

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та
робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Розробка конвеєрного 3D-принтера за технологію FFF/FDM. Механічна частина
(тема)

Виконав:
студент 4 курсу, групи АКТАКІТ-20-3
Лисун Максим Дмитрович
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва освітньої програми)

Керівник ас. каф. КІТАР Нікітін Д.О.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Невлюдов І.Ш.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

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

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)

« _____ » червня 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Лисуну Максиму Дмитровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка конвеєрного 3D-принтера за технологію FFF/FDM.

Механічна частина

затверджена наказом університету від 03 червня 2024 р. № 544Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 19 червня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Напрямок живлення пристрою – 220В;

3.2 Максимальні габаритні розміри – не більше 550мм×450мм×400мм;

3.3 Вага – не більше 15 кг;

3.4 Тип кінематики – Prusa;

3.5 Розміри робочого поля, мм – 600×190×не менше 180;

3.6 Кількість екструдерів – 1;

3.7 Максимальна температура екструдера, °С – 260-280;

3.8 Максимальна температура робочого столу, °С – до 100;

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ; _____

4.2 Аналіз 3D-друку; _____

4.3 Розробка кінематичної схеми; _____

4.4 Розробка 3D-моделі та розрахунки; _____

4.5 Актуальність моделі; _____

4.6 Висновки; _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	20.03.2024	Виконано
2	Аналіз 3D друку	01.04.2024	Виконано
3	Розробка кінематики майбутньої моделі	13.04.2024	Виконано
4	Підбір компонентів пристрою	16.04.2024	Виконано
5	Розробка 3D моделі	20.05.2024	Виконано
6	Підбір електричних компонентів	03.06.2024	Виконано
7	Прошивка принтера через Arduino IDE	05.06.2024	Виконано
8	Перевірка роботи керівником		
9	Нормоконтроль		
10	Перевірка роботи сервісом StrikePlagiarist		
11	Подання роботи на рецензію		
12	Подання роботи на підпис зав. кафедри		
13	Подання атестаційної роботи в ЕК		

Дата видачі завдання 22 квітня 2024 р.

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи _____

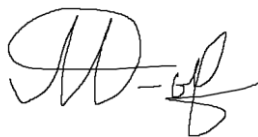
(підпис)

ас. кафедри КІТАР Нікітін Д.О.

(посада, прізвище, ініціали)

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

10 червня 2024

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'M.D.' with a stylized flourish at the end.

Лисун М.Д.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до атестаційної роботи: 79 с., 5 табл., 74 рис., 1 дод., 15 джерел.

КОНВЕЄРНИЙ 3D ПРИНТЕР, ДВИГУН ДЛЯ ПРИНТЕРУ, ЕКСТРУДЕР, FDM/FFF ТЕХНОЛОГІЯ, АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО, КІНЕМАТИКА, ОСІ, ARDUINO, RAMPS 1.4, MARLIN.

Мета роботи – розробка автоматизованого верстату адитивного 3D друку, для виготовлення крупно габаритних деталей.

Об'єкт дослідження – процес екструзійного друку.

Предмет дослідження – адитивна технологія FFF/FDM 3D друку.

В ході виконання атестаційної роботи було виконано аналіз 3D-друку за технологією FDM/FFF, аналіз конвеєрних принтерів на ринку 3D друку. Розроблено кінематичну схему та модель за вимогами наданого ТЗ.

ABSTRACT

Explanatory note to the certification work: 79 pages, 5 tables, 74 figures, 1 appendix, 15 sources.

CONVEYOR 3D PRINTER, PRINTER ENGINE, EXTRUDER, FDM/FFF TECHNOLOGY, ADDITIVE MANUFACTURING, KINEMATICS, AXES, ARDUINO, RAMPS 1.4, MARLIN.

The purpose of the work: the development of an automated additive 3D printing machine for the production of large-sized parts.

The object of research is the process of extrusion printing.

The subject of research is additive FFF/FDM 3D printing technology.

In the course of the certification work, an analysis of 3D printing using FDM/FFF technology, an analysis of conveyor printers on the 3D printing market was performed. A kinematic scheme and a model were developed according to the requirements of the provided TOR.

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз 3D-друку за технологією FDM/FFF.....	12
1.1 Технології 3D-друку та їх актуальність.....	12
1.2 Области використання принтерів за технології FDM/FFF, переваги та недоліки.....	16
1.3 Принцип роботи FFF/FDM 3D-принтерів.....	18
1.4 Вимоги до принтера та процесу виготовлення виробів.....	20
1.4.1 Створення цифрової моделі та генерування G-коду.....	20
1.4.2 Область друку та висота шару, різновиди сопла.....	21
1.4.3 Адгезія шарів та деформація.....	23
1.4.4 Матеріали для друку.....	25
1.4.5 Використання підтримки конструкцій.....	27
1.5 Кінематики 3D-принтерів за технології FDM/FFF.....	28
1.5.1 Кінематика “Prusa”.....	28
1.5.2 Кінематика “H-bot”.....	30
1.5.3 Кінематика “CoreXY”.....	30
1.5.4 Кінематика “Makerbot”.....	32
1.5.5 Кінематика “Ultimaker”.....	33
1.5.6 Кінематика “Core-XYZ”.....	34
1.6 Переваги конвеєрного принтера на прикладі концепції фірми Blackbelt 3D.....	36
1.7 Аналіз ТЗ.....	37
2 Розробка схеми кінематики конвеєрного 3D-принтеру.....	39
2.1 Розробка кінематики та загальної схеми.....	39
2.2 Опис покупних елементів.....	43
2.3 Вибір двигунів для моделі та розрахунок передавальної функції.....	53

3 Розробка 3D-моделі та її програмування.....	55
3.1 Розробка рами 3D-принтеру.....	55
3.2 Розробка системи руху по осі Y та конвеєрної стрічки.....	56
3.3 Розробка систем руху за осями X та Z.....	61
3.4 Налаштування електроніки принтеру та підключення плат.....	65
3.5 Налаштування прошивки Marlin для плати Aduino Mega 2560 R3.....	73
4 Охорона праці.....	77
Висновки.....	82
Перелік джерел посилань.....	83
Додаток А Презентаційний матеріал.....	85

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧКИ

АБС або ABS – акрилонітрілбутадієнстірол;

БЖ – блок живлення;

ЕМП – електромагнітні поля;

НДР – науково-дослідна робота;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПВХ або ПВХ – полівінілхлорид;

ПЛА або PLA – поліактид, polyactide;

ТДР – тимчасово допустимі рівні;

ТЗ – технічне завдання.

ВСТУП

3D-принтери, які раніше асоціювалися лише з виробництвом, швидко стають важливим інструментом для різних сфер життя, включаючи роботу та творчість. Ці універсальні пристрої відкривають нові перспективи і можливості, забезпечуючи не тільки виробництво, але і реалізацію ідей та творчих проєктів.

Вже зараз перспективи 3D друку вкрай багатообіцяючі. Вчені активно розвивають існуючі методики 3D друку, розробляють нові технології і типи матеріалів, знаходять нові сфери застосування. Багато хто називає 3D друк технологією майбутнього, і цьому є причини. Методика здатна повністю перевернути звичний уклад життя, змінивши спосіб виробництва більшості речей. По суті, 3D принтер – це справжня багатофункціональна фабрика, невелика і компактна. За рахунок цього майбутнє 3D друку з упевненістю можна назвати успішним.

Застосування 3D-принтера для перетворення цифрового файлу в фізичний об'єкт вже набуло широкого поширення. Наприклад, в таких областях як інженерія, будівництво, економіка, хірургія та мистецтво. Вже ведуться суперечки про наслідки обміну цифровими об'єктами через інтернет, щоб тут же роздрукувати їх на принтері.

3D принтер є доволі багато функціональним верстатом, але він все одно має певні обмеження. Одним з них є максимальний розмір деталі, який напряму залежить від розміру робочого стола принтеру. Для вирішення цього питання доводиться робити великі за габаритами принтери, що немало впливає як і на час розробки моделі такого принтера, так і на його кінцеву ціну при збірці. Також, максимальна швидкість друку та її прискорення багато в чому залежить від кінематики на якій побудовано принтер. Саме для вирішення цих проблем існує конвеєрний 3D принтер, який нині є доволі актуальним варіантом для виготовлення великогабаритних деталей.

Мета роботи: розробка автоматизованого верстату адитивного 3D друку, для виготовлення крупно габаритних деталей та покращення процесу друку, можливість друку еластомерами.

Об'єкт дослідження – процес екструзійного друку.

Предмет дослідження – адитивна технологія FFF/FDM 3D друку.

Для досягнення такої мети необхідно вирішити такі задачі:

- виконати аналіз 3D-друку за технологією FDM/FFF;
- зрозуміти вимоги до процесу виготовлення виробів на 3D-принтерах;
- розробити схему кінематики для конвеєрного 3D-принтеру;
- розрахувати приблизну вартість проекту;
- розробити 3D модель конвеєрного принтеру згідно вимог ТЗ;
- оформити пояснювальну записку згідно з вимогами ДСТУ 3008:2015

[1] та методичними вказівками з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра [2].

1 АНАЛІЗ 3D-ДРУКУ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ FDM/FFF

1.1 Технології 3D-друку та їх актуальність

3D-друк – це методика виготовлення об'ємних виробів на основі цифрових моделей. Незалежно від конкретної технології, явище процесу полягає в поступовому пошаровому відтворенні об'єктів. У цьому процесі застосовується спеціальний електронний пристрій – 3D принтер, який друкує певними видами матеріалів.

Найбільш поширеними видами друку на теперішній час є:

- екструзійний: FDM (Fused Deposition Modeling) та FFF (Fused Filament Fabrication);
- порошковий: DMLS (Direct Metal Laser Sintering), EBM (Electron Beam Melting), SLM (Selective Laser Melting), SHS (Selective Heat Sintering) та SLS (Selective Laser Sintering);
- струменевий: 3DP (Three-Dimensional Printing);
- ламінування: LOM (Laminated Object Manufacturing).

Наприклад, методика прямого лазерного спікання металів або DMLS, широко використовується у промисловості та представлена величезним рядом професійного обладнання для 3D друку. Її суть полягає у відтворенні виробів за заданими 3D моделями із спеціального металевого порошку за допомогою лазера. Цей метод дуже схожий на SLS або SLM. Селективне лазерне спікання (SLS) доступне на дорогих професійних 3D принтерах та відрізняється високою якістю виробів. З її допомогою можна досягти результату, наближеного до відтворення виробів шляхом лиття під тиском. Сама технологія досить проста. Спеціальне відділення 3D принтера заповнюється витратним матеріалом, після чого запускається друк. Перед відтворенням порошок розігрівається практично до температури плавлення (приклад на рис. 1.1). За допомогою лазерної установки та сканувального дзеркала промінь лазера спрямовується на

необхідні ділянки порошку, як би спікаючи їх разом шар за шаром. Після спікання першого шару механізм, що дорівнює, додає тонкий шар порошку поверх нього, і процес відбувається заново до повної побудови об'єкта. Тобто відтворення об'єкта відбувається знизу-вгору, а за рахунок заповнення камери порошком не потрібна побудова підтримувальних структур.

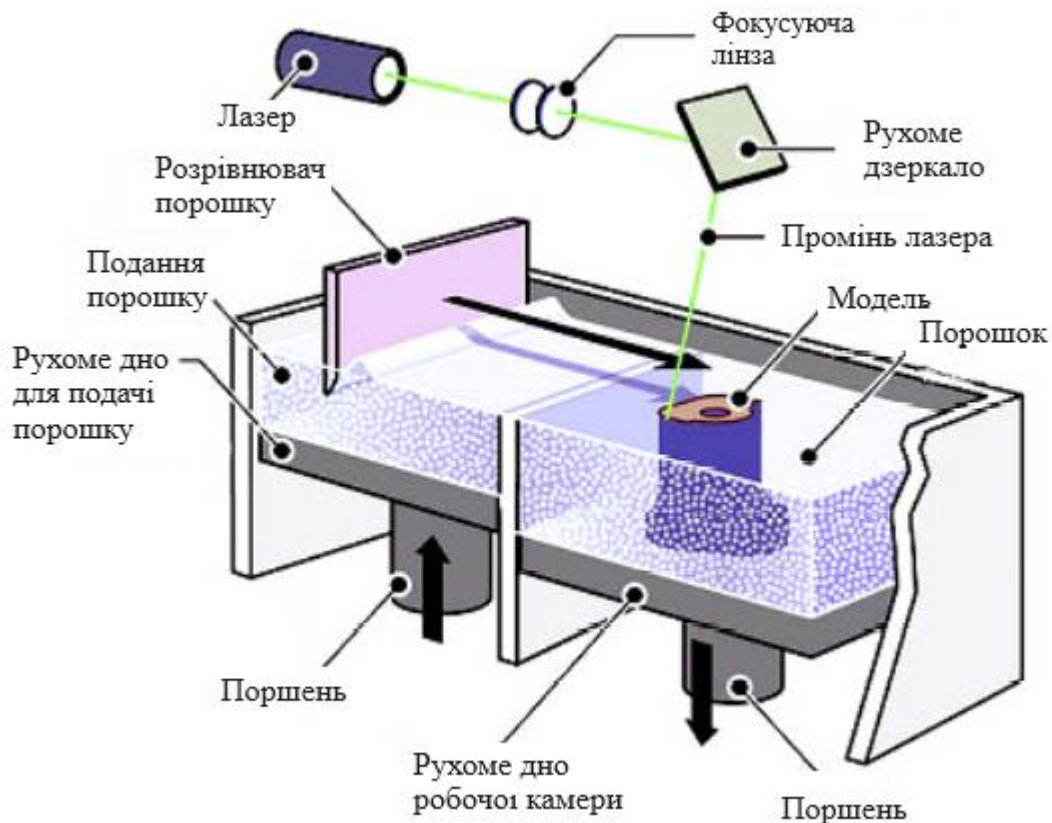


Рисунок 1.1 – Пристрій SLS 3D принтера

Ще однією цікавою технологією є LOM – явище полягає у послідовному склеюванні листів витратного матеріалу (паперу, фольги тощо) між собою. Для того, щоб кожен шар матеріалу відповідав шару заданої 3D моделі, він обрізається по необхідному контуру лазером або ножом. Готова модель завантажується в програму (наприклад, Cura), де відбувається її поділ на шари та виставляються необхідні настройки 3D-друку.

Після запуску моделі до друку на робочу платформу 3D принтера подається витратний матеріал (окремий лист, або з рулону), розігрівається до

потрібної температури і розподіляється під певним тиском. Після цього за допомогою спеціального ножа або лазера на аркуші вирізається контур першого шару, причому ділянки, що вимагають видалення після завершення 3D друку надрізаються за певним візерунком. Далі платформа опускається на висоту одного шару. У разі застосування матеріалу в рулоні рулон повертається, подаючи новий матеріал і прибираючи залишки. Якщо використовуються листи, з кожним новим шаром подається новий лист (приклад на рис 1.2).

При цьому перед нанесенням кожного наступного шару витратний матеріал покривається спеціальним клеєм знизу. За рахунок нагрівання та укладання під тиском формується цілісний виріб. Процес вирізання шарів і нанесення нових аркушів матеріалу повторюється аж до повної побудови об'єкта, після чого 3D друк із паперу можна вважати завершеним.

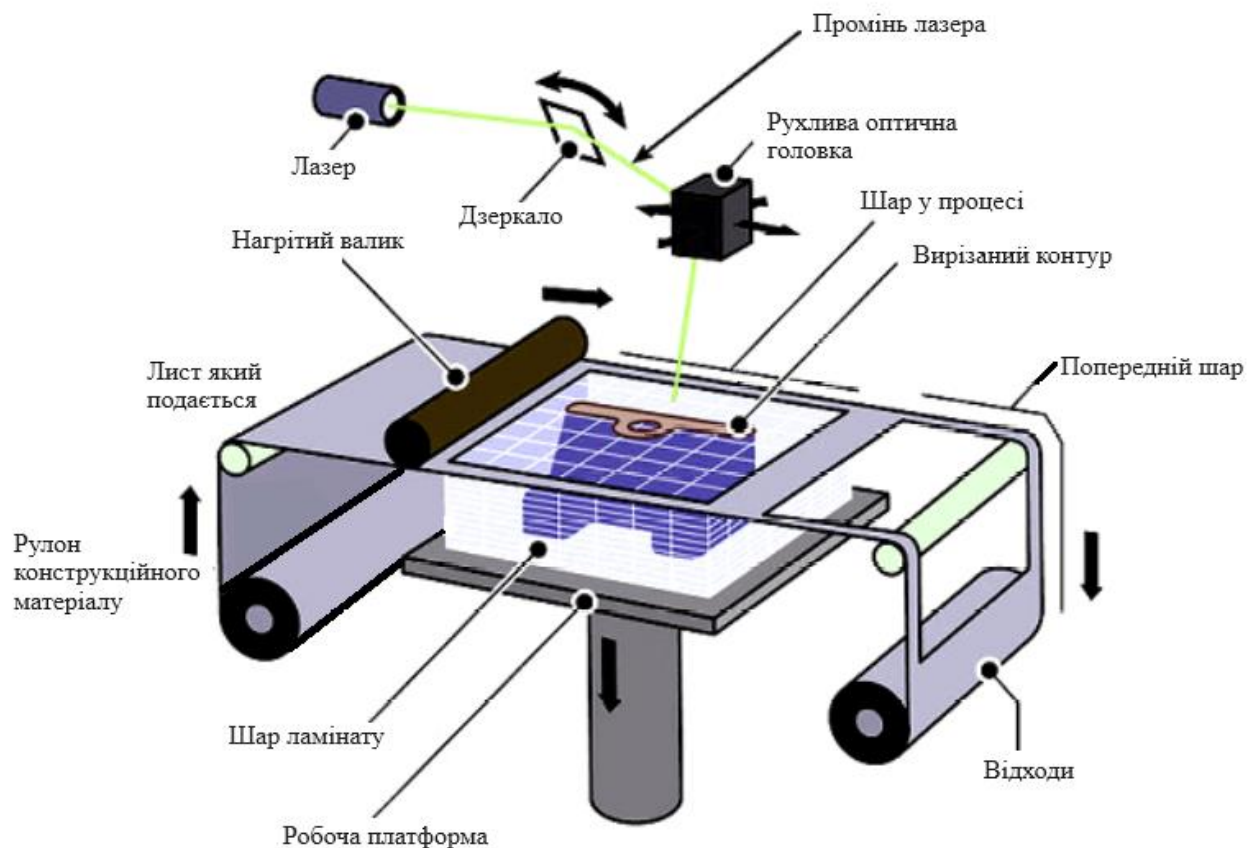


Рисунок 1.2 – Пристрій LOM 3D принтера

Щодо актуальності, наприклад застосування 3D-принтерів у медицині дозволяє здійснювати швидкі оперативні втручання. Також вони докладно відтворюють точну копію вихідного матеріалу, що дає гарантію проведення успішної операції. У наш час 3D-принтери успішно використовуються в ортопедичній стоматології (рисунок 1.3), де за рахунок тривимірного друку отримують протези, моделі та брекети без необхідності використання традиційних матеріалів, у найкоротші терміни, порівняно з класичною технологією виробництва ортодонтичних апаратів, необхідні для корекції прикусу. Спочатку зуби сканують, а потім відбувається 3D-моделювання з наступним друком елайнерів. Це дозволяє набагато якісніше та швидше зробити потрібний зразок та приступити до лікування пацієнта.

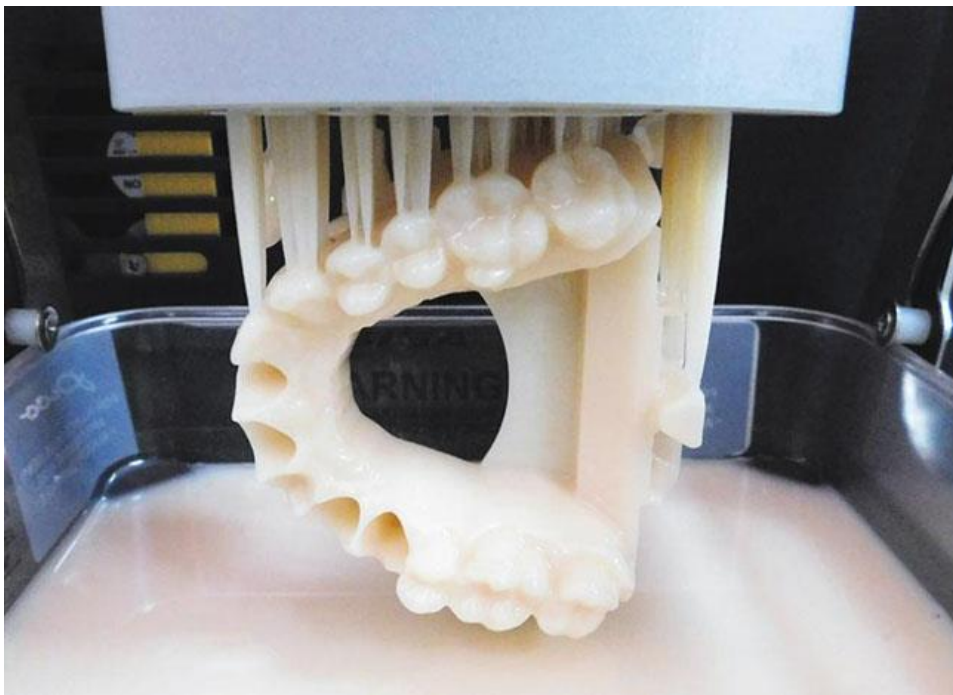


Рисунок 1.3 – Використання 3D-принтеру у стоматології

Також 3D-друк використовується у будівництві, і як приклад – “Офіс Майбутнього” на рис. 1.4.



Рисунок 1.4 – Офіс майбутнього, ОАЕ

Для цієї будівлі елементи створювалися не на будмайданчику, і їх надрукували за 17 днів, а саму будівлю було зібрано за 48 годин. Сама концепція полягає у процесі видавлювання пошарово певної рідкої суміші, рівень за рівнем, створюючи конструкцію, ґрунтуючись на тривимірній моделі.

1.2 Области використання принтерів за технології FDM/FFF, переваги та недоліки

Найпопулярнішим методом 3D-друку, в силу доступності та розповсюдженості є технологія пошарового наплавлення ниток. 3D-принтер, що працює за технологією FDM/FFF, плавить нитку матеріалу – філамент, і укладає його шарами, утворюючи задану програмою модель. Найчастіші області використання:

– прототипування: виробництво прототипів нових продуктів. Це дозволяє швидко та вартісно-ефективно створювати фізичні моделі для перевірки дизайну та функціональності;

- виробництво малокомплектованих деталей: компанії використовують FDM/FFF технологію для виготовлення маленьких серій деталей, зокрема, в промисловості та медичній сфері;
- освітні цілі: FDM/FFF друк використовується в освітніх закладах для навчання студентів процесам 3D-друку та дизайну;
- створення моделей та прототипів в архітектурній галузі: архітектори використовують FDM/FFF друк для створення макетів будівель та архітектурних проектів;
- домашнє виробництво: за допомогою доступних індивідуальних 3D-принтерів люди можуть виготовляти різноманітні предмети вдома або в гаражі для особистого використання або задоволення своїх творчих потреб;
- медичні додатки: FDM/FFF друк використовується для виготовлення протезів, моделей органів для попереднього планування операцій, медичних інструментів та інших медичних пристроїв.

Переваги та недоліки 3D-друку за технології FDM/FFF.

На відміну від інших методів 3D-друку, технологія FDM/FFF дозволяє виготовити деталь із величезним діапазоном розмірів. За допомогою 3D-друку FDM можна виготовити деталі розміром від кількох міліметрів до кількох метрів.

3D-друк FDM/FFF також може бути виконаний з використанням величезної кількості матеріалів. Термопластичні матеріали можуть піддаватися кільком модифікаціям. Незважаючи на ці модифікації, матеріал дає фантастичні кінцеві результати.

У порівнянні з деякими традиційними технологіями 3D-друк FDM/FFF виконується швидше, а отже з її допомогою можна робити більше виробів за той самий проміжок часу.

Також такий процес друку є найбільш економічним. Тому що термопластичні матеріали доступні в широкому асортименті.

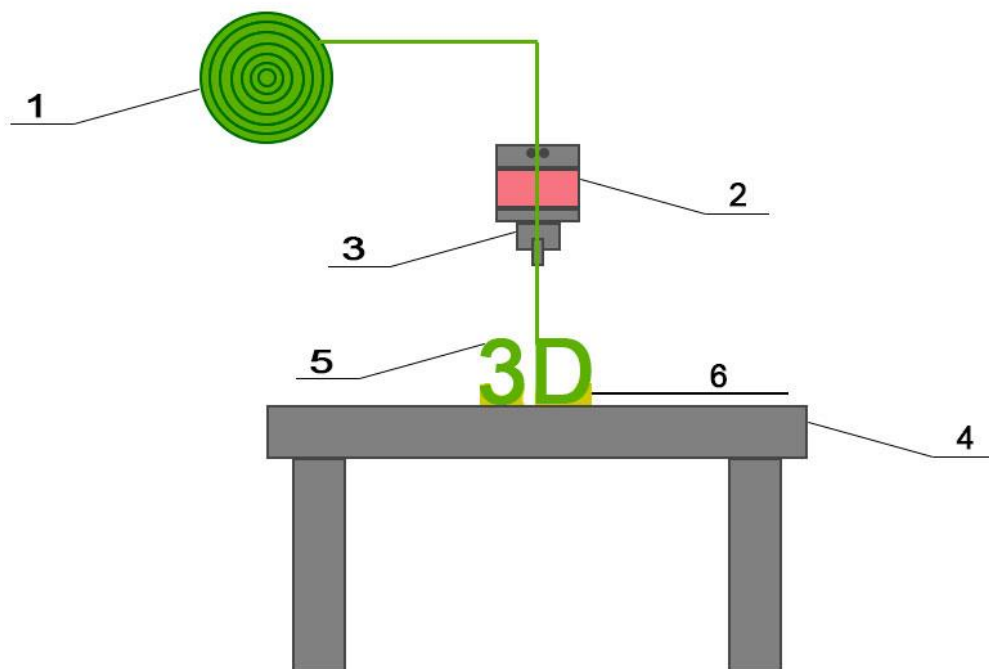
З мінусів можна назвати точність та ступінь деталізації, вона відрізняється від інших технологій. Також поступове охолодження матеріалу

може призвести до деформації та скручування деталей. В результаті усадки матеріалу виріб може втратити форму.

Також механізм адгезії шарів суттєво збільшує час, необхідний для обробки, щоб отримати більш гладку поверхню, ніж інші методи.

1.3 Принцип роботи FFF/FDM 3D-принтерів

Звичайний FDM-3D-принтер складається з об'єднаних екструдера та насадки сопла, складального столу та механізму подачі філаменту. Матеріал потрапляє в екструдер, де нагрівається та розплавляється. Екструдер розміщує матеріал на столі через насадку сопла, приклад на рис. 1.5.



1 – матеріал (філамент); 2 – екструдер (або нагрівальний елемент); 3 – сопло; 4 – складальний стіл; 5 – надрукований об'єкт; 6 – опори (підтримки)

Рисунок 1.5 – Принцип роботи FDM-3D-принтера

Спочатку необхідно підготувати 3D модель об'єкта, яку ми будемо друкувати. Це можна зробити за допомогою спеціалізованих CAD програм або

вибором готових моделей з онлайн-ресурсів. Далі, принтер розплавляє філамент (зазвичай пластик), який подається з котушки, щоб утворити рідку масу. Рідкий матеріал потім виштовхується через друкарську головку, або екструдер (рисунок 1.6), де він твердне при контакті з повітрям або при допомозі додаткового охолодження.

Принтер рухає головку згори донизу (або в інших напрямках), додаючи матеріал на підготовлений друкований стіл або попередній шар. Кожен доданий шар твердне, створюючи структуру об'єкта. Принтер продовжує цей процес, наносячи шари один за одним, доки не буде завершено друковану модель. Після завершення друку об'єкт охолоджується. Деякі принтери можуть мати також додаткові етапи обробки або після-друкарські операції, такі як полірування або фарбування.

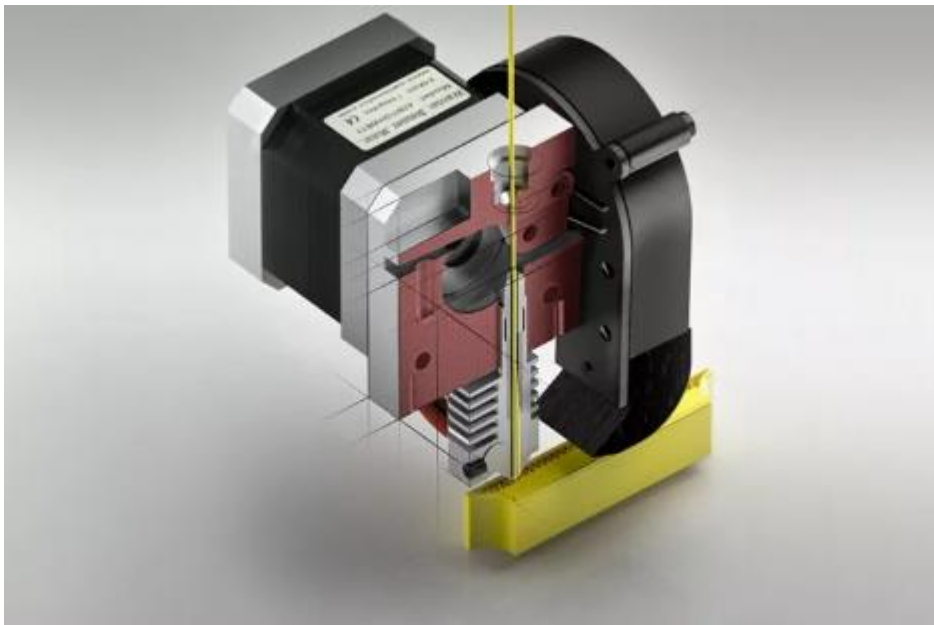


Рисунок 1.6 – вигляд екструдера для 3D-принтера

Екструдер 3D-принтера поділений на 2 частини які функціонують між собою:

– блок cool-end відповідає за подання філаменту. За рахунок обертання шестерні з котушки виходить нитка із пластику, яка проходить у нагрівач. Там

нитка стає в'язкою під впливом високих температур. Це допомагає видавити її через сопло та перетворити на необхідну форму;

– блок hot-end являє собою сопло з нагрівальним елементом. Зазвичай воно зроблено з алюмінію або латуні, оскільки ці матеріали мають відмінну теплопровідність. У процесі роботи цей блок розігрівається, що сприяє плавленню пластику.

Для 3D-принтерів з технологією FDM/FFF існує кілька різновидів екструдерів, які можуть бути використані для нанесення матеріалу на друковану платформу. Ось декілька основних типів:

– одно-дюймовий екструдер (Single Extruder): це базовий тип екструдера, який має одне звичайне сопло для нанесення матеріалу. Зазвичай використовується для друку з одним матеріалом;

– двох-дюймовий екструдер (Dual Extruder): цей тип екструдера має два звичайних сопла, що дозволяє використовувати два різні матеріали або кольори під час друку. Це дозволяє створювати деталі з більшою варіативністю;

– екструдер з підтримкою розчинника (Soluble Support Extruder): цей тип екструдера використовується для друку з розчинним матеріалом, який використовується для створення підтримки для деталей, які мають високу кутову або навіть підвісну структуру. Після завершення друку розчинний матеріал може бути видалений у відповідному розчиннику;

– екструдер з можливістю зміни діаметра сопла (Variable Nozzle Extruder): цей тип екструдера дозволяє змінювати діаметр сопла, що використовується для нанесення матеріалу. Це може бути корисно для друку з різними швидкостями або роздільними здатностями.

1.4 Вимоги до принтера та процесу виготовлення виробів

1.4.1 Створення цифрової моделі та генерування G-коду

Процес 3D-друку починається з розробки віртуального образу майбутнього об'єкта в 3D-редакторі або CAD-програмі («3D Max», «AutoCAD»,

«SolidWorks» тощо). На створення віртуального образу майбутнього об'єкта потрібно від кількох хвилин до кількох годин або днів, залежно від ступеня складності моделі.

В окремих випадках для створення віртуальних образів майбутніх об'єктів використовуються 3D-сканери. При цьому скановані об'єкти отримують всі дефекти, які потрібно редагувати. Щоб отримати високоточний об'єкт, найкраще поєднувати два цих способи.

Також готові віртуальні моделі можна знайти в Інтернеті, на спеціалізованих сайтах, присвячених 3D-друку.

STL-файл з майбутнім об'єктом обробляється спеціальною програмою, тобто слайсером, яка переводить його в керувальний G-код для 3D-принтера (рисунок 1.7).

При підготовці файлу 3D моделі на друк, потрібно обрати якість друку, тобто товщина стінки, швидкість подачі філаменту та переміщення, підтримки на навислі поверхні, та інші параметри.

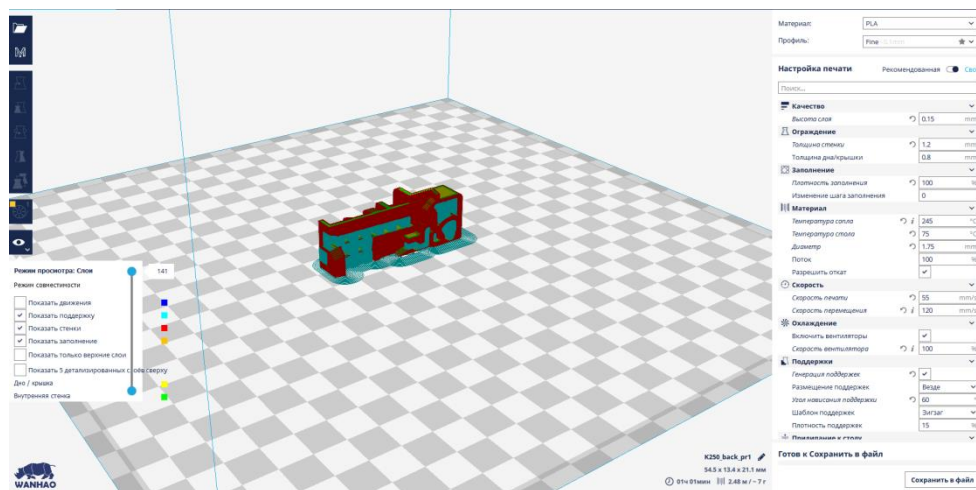


Рисунок 1.7 – Об'єкт у програмі-слайсері

1.4.2 Область друку та висота шару, різновиди сопла

Звичайний настільний 3D-принтер, який використовується в побуті, приблизно має розміри 200 мм × 200 мм × 200 мм. А 3D-принтер, який

використовується в промислових цілях, має розміри 1000 мм × 1000 мм × 1000 мм.

Висота шару печаті напряму впливає на якість поверхні виробу, а також на точність геометричних параметрів деталі, приклад на рис. 1.8.

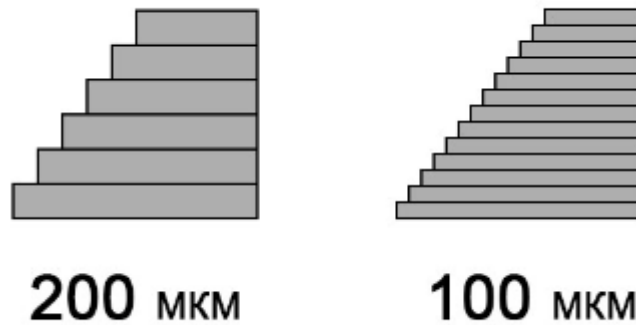


Рисунок 1.8 – Різниця між висотою шару

Якщо при виробленні деталі обрати невелику висоту шару (20-100 мкм), то деталі вийдуть більш гладкими і матимуть вигнуту геометрію, але через точність витрачається більше часу на виготовлення деталі.

У той же час, велика висота шару (200 мкм або більше) дозволяє працювати з більшою швидкістю, але на виході отримуємо більш ступінчасту деталь та деякі розбіжності геометричних параметрів. Тому використовуючи технологію FDM/FFF, ми не можемо отримати ідеальну якість поверхні, при цьому друкуючи на високій швидкості з висотою шару >200 мкм.

Висота шару залежить від різних розмірів та видів обраного сопла:

- стандартне сопло (Standard Nozzle): Це найпоширеніший тип сопла, яке поставляється з більшістю 3D-принтерів. Зазвичай воно має діаметр 0,4 мм, але також можуть бути доступні і інші розміри;

- сопла з різним діаметром (Variable Diameter Nozzle): Деякі сопла мають можливість змінювати діаметр для налаштування швидкості друку, роздільної здатності та інших параметрів. Це дозволяє користувачам вибирати оптимальний діаметр сопла для конкретних вимог;

– сопла зі змінною формою (Variable Shape Nozzle): Деякі сопла можуть мати спеціальні форми, такі як конічна, дзвоникоподібна або кільцева, для досягнення специфічних ефектів або для оптимізації друку певних типів деталей;

– сопла з низькою абразивністю (Low Abrasion Nozzle): Деякі сопла виготовлені з матеріалів, які мають високу стійкість до абразії. Це корисно для друку з високо-абразивних матеріалів, таких як відбілювачі або скловолокно;

– сопла з великим діаметром (Large Diameter Nozzle): Такі сопла мають більший діаметр, що дозволяє швидше друкувати деталі з більшими шарами матеріалу. Вони корисні для швидкого прототипування або виробництва деталей, де не потрібна висока роздільна здатність, приклади на рисунку 1.9.

Тому під час друку на домашньому принтері великі деталі слід розбивати на дрібні, а потім збирати, а якщо використовувати промисловий 3D-принтер, то можна надрукувати на ньому цілу деталь.



Рисунок 1.9 – Сопла різних діаметрів

1.4.3 Адгезія шарів та деформація

Чим вища адгезія шарів, тим вища його міцність. Це правило є справедливим і для деталей, надрукованих за допомогою 3D-друку тому що моделювання відбувається шар за шаром.

Висока температура термопластичного матеріалу у процесі виробу розплавляє деяку поверхню попереднього шару та дозволяє з'єднати новий шар із попереднім, приклад на рис. 1.10.

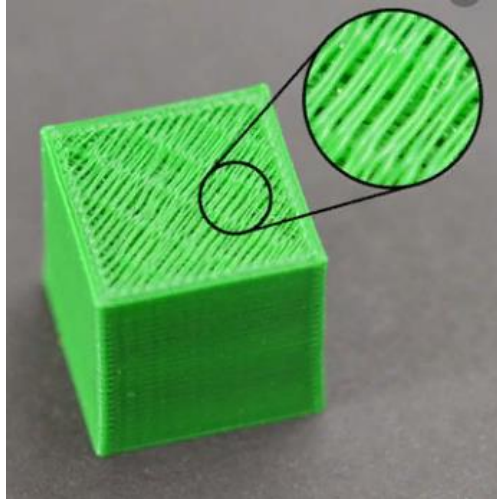


Рисунок 1.10 – Погана адгезія шарів

Це також спричиняє деформацію матеріалу. Тому деталі, вироблені за допомогою 3D-друку завжди будуть мати трохи хвилясту або ступінчасту поверхню, яка частіше за все може потребувати постобробки після друку на FDM/FFF принтері.

Ефект деформації викликаний затвердінням, якому піддається термопластичний матеріал після пошарового осадження.

Незалежно від геометрії матеріалу швидкість охолодження на різних ділянках поверхні буде різною. Обраний матеріал для виробу грає велику роль при деформуванні частин деталі. Таким чином ABS, поширений термопластичний матеріал, який використовується в FDM/FFF-друці, більш чутливий до деформації порівняно з PLA або PETG. Причиною цього ефекту є більш висока температура склування та відносно високий коефіцієнт теплового розширення матеріалу.

Тонкі виступаючі частини деталі піддаються коробленню. Через це, перед 3D-друком таких моделей завжди треба додавати додатковий матеріал по краям виробу. Але з іншого боку, слід уникати великих плоских ділянок для

застосування технології FDM/FFF, оскільки вони теж дуже схильні до деформації. Отже, коли це можливо, необхідно зберігати заокруглення в дизайні моделі, щоб уникнути короблення. Деякі такі ефекти деформації представлені нижче на рисунку 1.11.

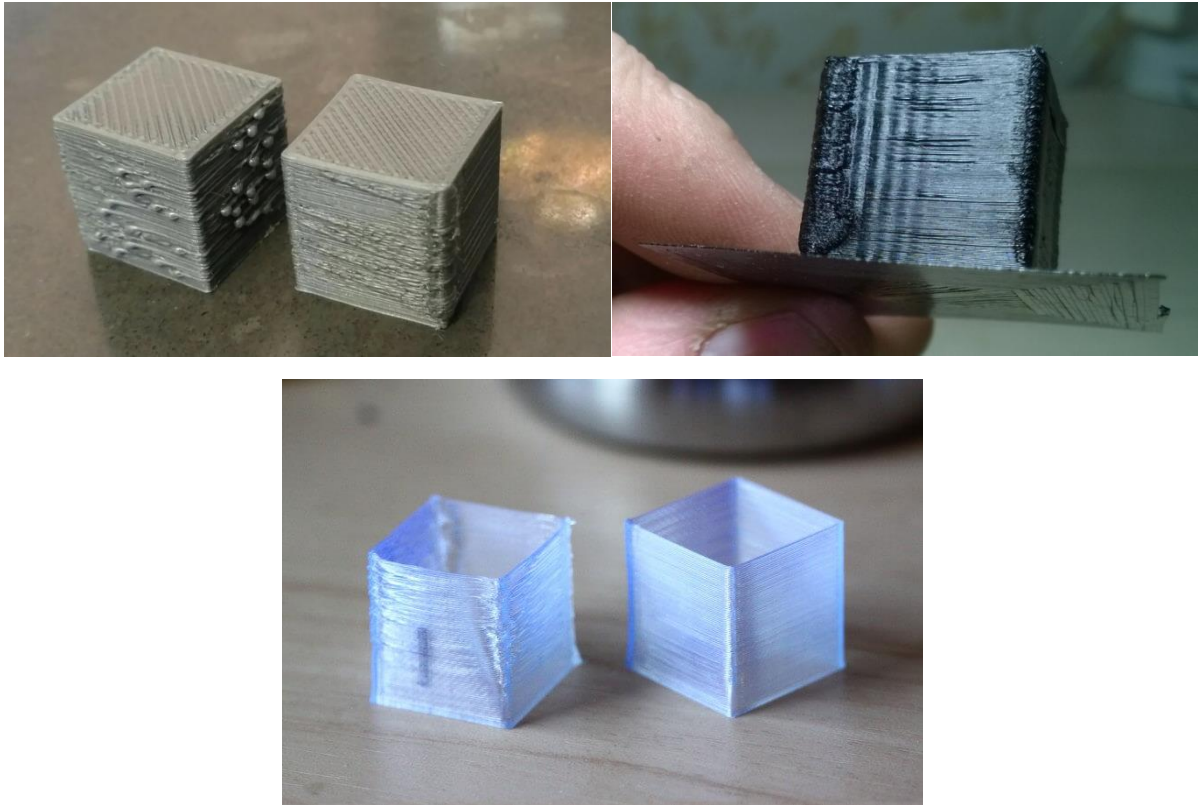


Рисунок 1.11 – Різні дефекти при виготовленні

1.4.4 Матеріали для друку

З найпопулярніших матеріалів для друку можна виділити:

– полілактид (PLA, ПЛА): один із найбільш широко використовуваних термопластиків. Він відомий своєю екологічністю. Цей матеріал є полімером молочної кислоти, що робить PLA повністю матеріалом, що біорозкладається. Сировиною для виробництва полілактиду служать кукурудза та цукрова тростина. У той же час екологічність полілактиду зумовлює його недовговічність. Пластик легко вбирає воду і відносно м'який. Як правило, моделі з PLA не призначаються для функціонального використання, а служать як дизайнерські моделі, сувеніри та іграшки. Одним із найбільш важливих

факторів для застосування в 3D-друку служить низька температура плавлення – всього 170-180 °С, що сприяє відносно низькій витраті електроенергії та використанню недорогих сопел з латуні та алюмінію. Як правило, екструзія проводиться за 160-170 °С. В той же час, PLA досить повільно застигає (температура склування становить близько 50 °С), що слід враховувати при виборі 3D-принтера. Оптимальним варіантом є пристрій з корпусом відкритого типу, що підігрівається робочою платформою (щоб уникнути деформацій моделей великого розміру) і, бажано, додатковими вентиляторами для охолодження свіжих шарів моделі;

– акрилонітрилбутадієнстирол (ABS, АБС): цей тип пластику є найпопулярнішим термопластиком, але не найпоширенішим. Така суперечність пояснюється певними труднощами технічного характеру, що виникають під час друку ABS. ABS-пластик стійкий до вологи, кислот та олії, має досить високі показники термостійкості – від 90 °С до 110 °С. На жаль, деякі види матеріалу руйнуються під впливом прямого сонячного світла, що обмежує застосування. В той же час, ABS-пластик легко піддається фарбуванню, що дозволяє наносити захисні покриття на немеханічні елементи. Основним мінусом ABS-пластика можна вважати високий рівень усадки при охолодженні – матеріал може втратити до 0,8% обсягу. Цей ефект може призвести до значних деформацій моделі, закручування перших шарів та розтріскування;

– полівініловий спирт (PVA, ПВА): матеріал з унікальними властивостями та особливим застосуванням. Головною особливістю PVA є водорозчинність. 3D-принтери, оснащені подвійними екструдерами, мають можливість друку моделей із опорними структурами з PVA. Після завершення друку опори можуть бути розчинені у воді, залишаючи готову модель, яка не потребує механічної або хімічної обробки нерівностей. При низькій вологості пластик має високу міцність на розрив. При збільшенні вологості зменшується міцність, але зростає еластичність. Температура екструзії складає 160-175 °С, що дозволяє використовувати PVA в принтерах, призначених для друку ABS та PLA-пластиками;

– нейлон (Nylon): цей матеріал привабливий своєю високою зносостійкістю та низьким коефіцієнтом тертя. Нейлон часто використовується для покриття деталей, що труться, що підвищує їх експлуатаційні якості і часто дозволяє функціонувати без мастила. Існує кілька видів нейлону, вироблених різними методами і мають дещо різні характеристики. Найбільш відомим є нейлон-66, створений американською компанією DuPont у 1935 році. Другим найпопулярнішим варіантом є нейлон-6, розроблений компанією BASF в обхід патенту DuPont. Ці два варіанти дуже схожі. З погляду 3D-друку основною відмінністю є температура плавлення: нейлон-6 плавиться при температурі 220 °С, а нейлон-66 при 265 °С.

1.4.5 Використання підтримки конструкцій.

Причиною використання опорних структур у процесі є те, що термопластичний матеріал не може бути нанесений у повітря. Опори забезпечують підтримку конструкцій з виступами чи іншими обмеженнями, приклад на рис. 1.12.

Треба мати на увазі, що деталі повинні бути надруковані з найменшою кількістю опорних конструкцій. Це пришвидшить процес виготовлення та зменшить кількість використаного матеріалу, що в свою чергу зменшить вартість виробу та самого процесу.



Рисунок 1.12 – Приклади опорних конструкцій після 3D-друку

1.5 Кінематики 3D-принтерів за технології FDM/FFF

Найпоширеніші 3D-принтери з так званою картезіанською кінематикою. Вони засновані на декартовій системі координат, осі X , Y і Z . За ними задаються координати, якими друкуюча головка і платформа столу змінюють положення. Основні варіації переміщення у цій кінематиці:

- платформа пересувається однією з горизонтальних осей – X чи Y , екструдер рухається за другою горизонтальною осею, і вертикальної осі Z ;
- платформа переміщається по висоті, осі Z , а екструдер пересувається по двох осях, вперед-назад і вліво-вправо;
- платформа рухається по двох осях, одна з яких горизонтальна, а друга вертикальна вісь Z , екструдер – по іншій горизонтальній осі;
- платформа рухається двома горизонтальними осях X і Y , а екструдер переміщається лише з осі Z ;
- платформа нерухома, екструдер пересувається по всіх трьох осях.

1.5.1 Кінематика "Prusa"

«Prusa» – найпростіша, компактна недорога схема. Названа на честь свого винахідника, мабуть, різновид принтерів, який найбільше продається в побутовому секторі. Стіл рухомий в одній горизонтальній осі, як правило, Y , а екструдер рухається по інших двох. За кожен напрямок відповідає свій двигун, на деяких моделях за вісь Z абсолютно одночасно працюють два двигуна, приклад на рис. 1.13.

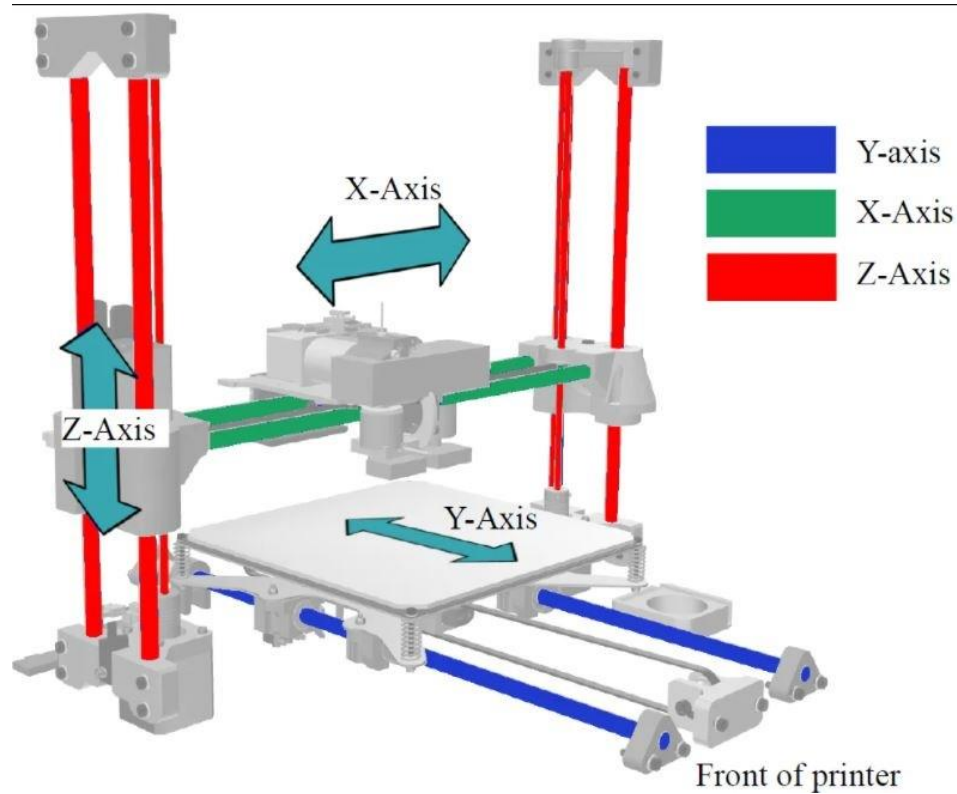


Рисунок 1.13 – Приклад руху екструдера по осям X та Z, а столу по осі Y

Варіант простий у складанні, нормально вирішує побутові завдання, дозволяє бачити процес друку. Останній фактор одночасно є і недоліком, тому що призводить до ефекту делямінації через підвищене нерівномірне охолодження столу.

Переваги:

- за процесом друку зручно спостерігати;
- невисока ціна комплектуючих та самого принтера, а також проста конструкція;
- легкий доступ до деталей, для яких може знадобитися обслуговування.

Недоліки:

- відкрита робоча камера погіршує якість друку матеріалами, які чутливі до перепадів температур. Перевагою буде зроблена закрыта камера, якщо зібрати кубічний ковпак, наприклад з акрилу, але це збільшить загальні габарити корпусу принтера;

– інертність, пов'язана із нагрівальним столом 3D принтера, так як стіл переміщається по осі Y з немалою швидкістю, а разом з ним під час друку переміщується і сама модель. У результаті, при друкуванні високих і тонких моделей на великих швидкостях сильно погіршується якість результату друку.

1.5.2 Кінематика «H-bot»

«H-bot» – це тип конфігурації кінематики для 3D-принтерів, який використовує два незалежних рухомих елементи (мотори), розташованих по обидва боки робочої області. Конструкція передбачає всього один довгий ремінь і не вимагає наявності рухомих моторів. За кінематики «H-bot» краще використовувати армований ремінь – жодних проблем із натягувачами. Стіл рухається виключно вгору-вниз, по осі Z, (рис. 1.14). Каретка з екструдером переміщається над столом по осях X і Y за допомогою одного ремня і двох двигунів, що працюють узгоджено.

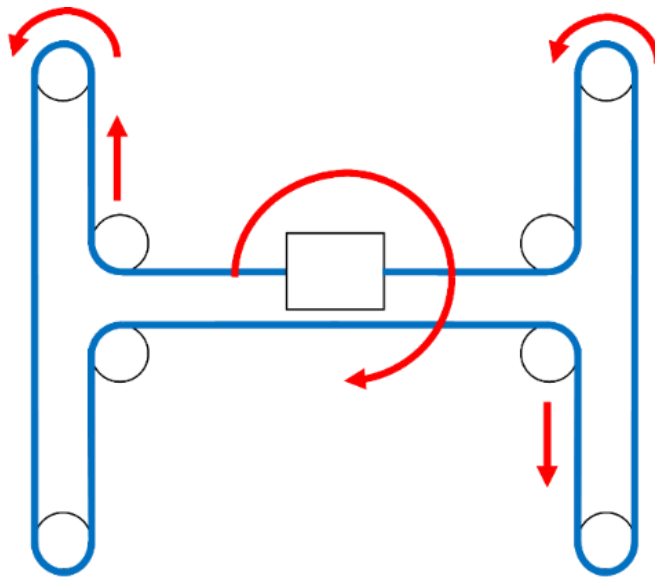


Рисунок 1.14 – Приклад руху схеми «H-bot»

1.5.3 Кінематика «CoreXY»

«CoreXY» багато в чому повторює «H-bot», але відрізняється наявністю двох зубчастих ременів. Найчастіше професійні 3D принтери компонуються за

цими кінематичними схемами, (рис. 1.15). З різної схеми встановлення ременів впливають основні відмінності між «H-bot» та «CoreXY». У «H-bot» зусилля, що переміщують балку осі X по осі Y можуть перекосити її, після чого конструкція потребуватиме відновлення. У зв'язку з цим, кріплення балки осі X і сам її профіль повинні бути якісними, і добре продуманими, що в кінцевому підсумку позначається на витратах при виробництві принтера. У «CoreXY» ця проблема відсутня.

Ще одне вразливе місце цих кінематик – зубчасті ремені. Через свою велику довжину, класичні ремені GT2-6 можуть помітно розтягнутися за невеликий проміжок робочого часу, що, безсумнівно, позначиться на якості друку і працездатності принтера. Цей момент більше стосується кінематики «H-bot», бо там використовується один дуже довгий зубчастий ремінь, протягнутий через усю конструкцію. Однак під час масштабування габаритів усього механізму для збільшення обсягу робочої камери, в якийсь момент ця проблема може з'явитися і на «CoreXY». Там теж використовуються досить довгі зубчасті ремені, хоч і значно коротші, як порівняти з «H-bot».

У підсумку, під час масштабування таких кінематик варто приділити особливу увагу підбору відповідного зубчастого ременя, для того, щоб під час роботи він не провисав і зміг прослужити досить довгий час.

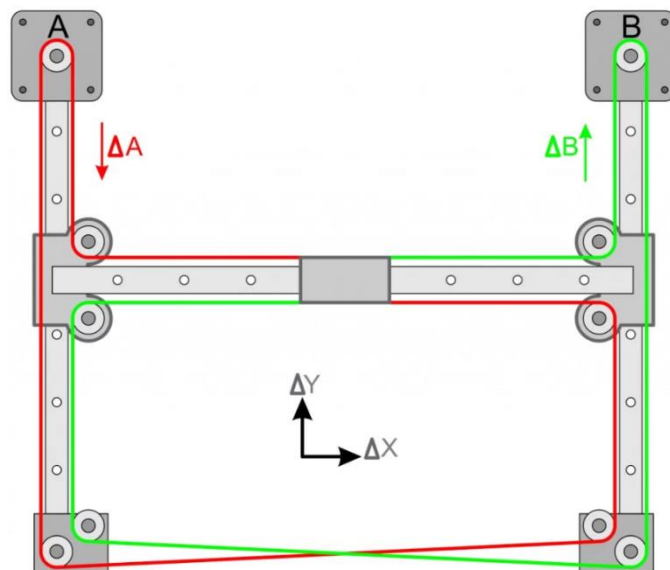


Рисунок 1.15 – Приклад руху схеми «CoreXY»

Переваги:

- висока жорсткість конструкції;
- відсутність інертності, що викликається рухом столу;
- рівномірна якість друку в будь-якому місці робочого простору;
- можливість забезпечити високоточний якісний друк при прийнятній швидкості.

Недоліки:

- висока вартість, складний ремонт;
- розмір принтера в два-три рази більший за друкований обсяг;
- схильність до перекосів каретки.

1.5.4 Кінематика “Makerbot”

«Makerbot». На перший погляд ця кінематика схожа на «CoreXY» та «H-bot», друкуюча голова переміщається по осях X та Y , а стіл 3D принтера переміщається по вертикальній осі Z . Її відмінність у тому, що для осей X та Y використовуються різні ремені і крокові двигуни. Один кроковий двигун переміщається по осі Y разом з кареткою екструдера, він відповідає за переміщення друкуючої голови по осі X , контролюючи їх через окремий зубчастий ремінь. А за переміщення по осі Y відповідає інший кроковий двигун і своя система ременів, приклад на рис. 1.16.

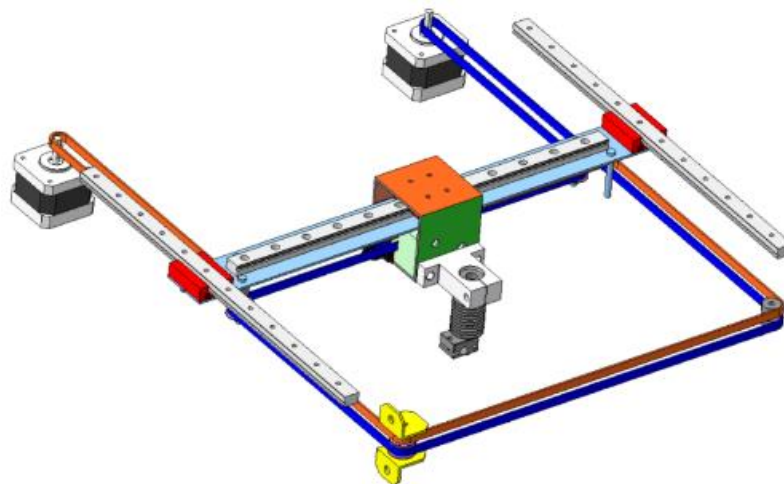


Рисунок 1.16 – Схема “Makerbot”

Переваги:

- зубчасті ремені, що використовуються в конструкції, не мають великої довжини і не схильні до розтягування;
- таку кінематику легко зібрати в закритий корпус, щоб друкувати філаментами, чутливими до перепадів температур;
- добра масштабованість завдяки порівняно коротким зубчастим ременям;
- якісний результат 3D-друку при досить високій швидкості.

Недоліки:

- кроковий двигун осі X подорожує разом з друкуючою головою по осі У, через що каретка набуває додаткової ваги;
- кроковий двигун розташовується з краю від напрямних осі X, через що конструкція цієї осі отримує зміщення центру мас в одну зі сторін, що може позначитися на якості друку.

1.5.5 Кінематика “Ultimaker”

«Ultimaker» зазвичай асоціюється з 3D-принтерами, а не з кінематикою в класичному механічному сенсі. Якщо ви маєте на увазі кінематику 3D-принтерів «Ultimaker», то важливо зазначити, що конкретні моделі можуть мати певні відмінності в дизайні та кінематиці. Однак спільним для більшості 3D-принтерів «Ultimaker» є використання кінематики "каретки по прямій лінії" (cartesian motion system). Її основна відмінність – напрямні вали, розташовані перпендикулярно один до одного і проходять крізь каретку хотенда або екструдера. Ці вали мають бути по можливості максимально рівними. Від цього безпосередньо залежить як працездатність принтера, так і якість його друку.

Також, особливу увагу в цій кінематиці потрібно приділити і підшипникам ковзання. Зазвичай як підшипники використовують втулки. Управління переміщеннями по осях X і У розділене. Двигуни встановлені на корпус принтера і не ускладнюють переміщення своєю вагою. Для кожної осі окремо використовується свій кроковий двигун і окремі зубчасті ремені, часто

замкнуті. Безпосередньо до друкуючої голови ремені тут приєднувати не доведеться (рис. 1.17).

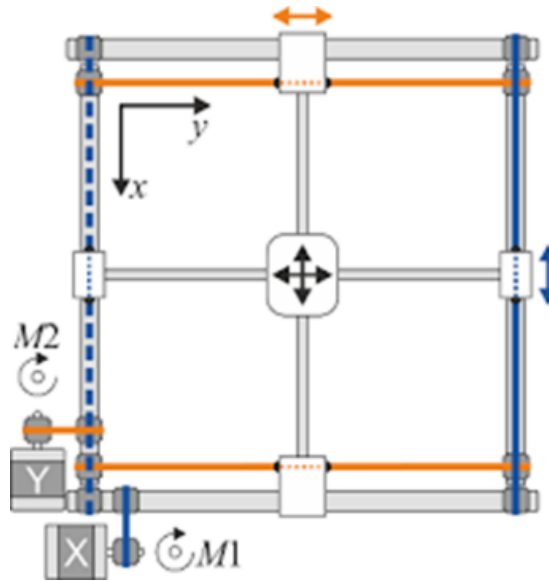


Рисунок 1.17 – Схема кінематики “Ultimaker”

Переваги:

- короткі зубчасті ремені;
- легко встановити закритий корпус;
- крокові двигуни розташовані на корпусі;
- мала вага друкованої голови, висока швидкість переміщення;
- гарна якість друку.

Недоліки:

- дуже високі вимоги до якості напрямних валів та підшипників;
- погана масштабованість, пов'язана з першим мінусом.

1.5.6 Кінематика “Core-XYZ”

Кінематика, що нагадує Core-XY, але ще складніша, порівняно з нею. Тут екструдер може переміщатися у всіх трьох осях, а стіл нерухомо закріплений у нижній частині конструкції. У домашніх варіантах таких принтерів переміщення по всіх осях контролюються зубчастими ременями, кожен зубчастий ремінь простягається через всі три осі.

Принтер з такою кінематикою непросто зібрати, проте за процесом друку в ньому дуже цікаво спостерігати. Друкована модель залишається абсолютно нерухомою протягом усього процесу друку, Core-XYZ дозволяє уникнути мінусів дельта-кінематики (рис 1.18).

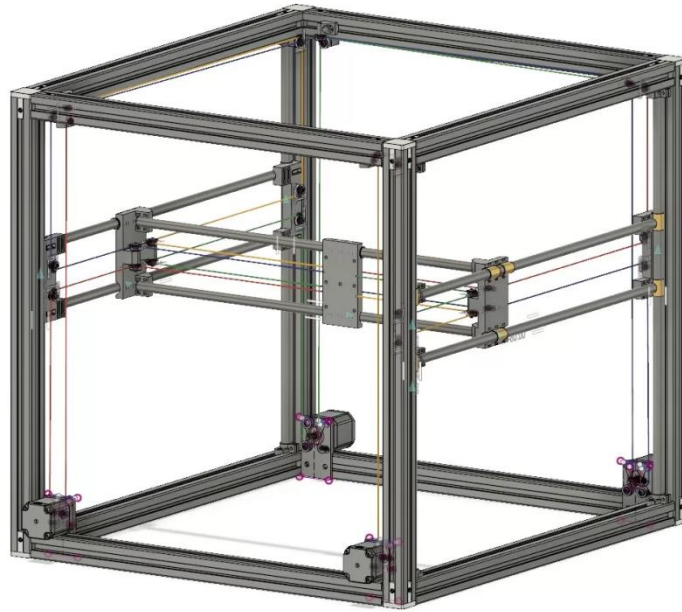


Рисунок 1.18 – Кінематика “Core-XYZ”

Переваги:

- жорстка конструкція;
- висока точність;
- модель під час друку залишається абсолютно нерухомою;
- легке встановлення закритої камери.

Недоліки:

- дуже складний процес складання, велика кількість складників;
- підвищені вимоги до електроніки та якості деталей механічної складової принтера;
- складна масштабованість через довгі зубчасті ремені.

1.6 Переваги конвеєрного принтера на прикладі концепції фірми Blackbelt 3D

Такий тип промислового обладнання як конвеєрний принтер, здатний виробляти надзвичайно довгі деталі (в теорії до безкінечності), а також здійснювати конвеєрне виробництво. Особливою перевагою є можливість виробляти деталі без побудови структур, які виконують функцію підтримки. Такий ефект досягається завдяки унікальній конструкції приладу. Робота принтера базується на принципі FDM 3D-друку з деякими відмінностями, приклад на рис. 1.19.

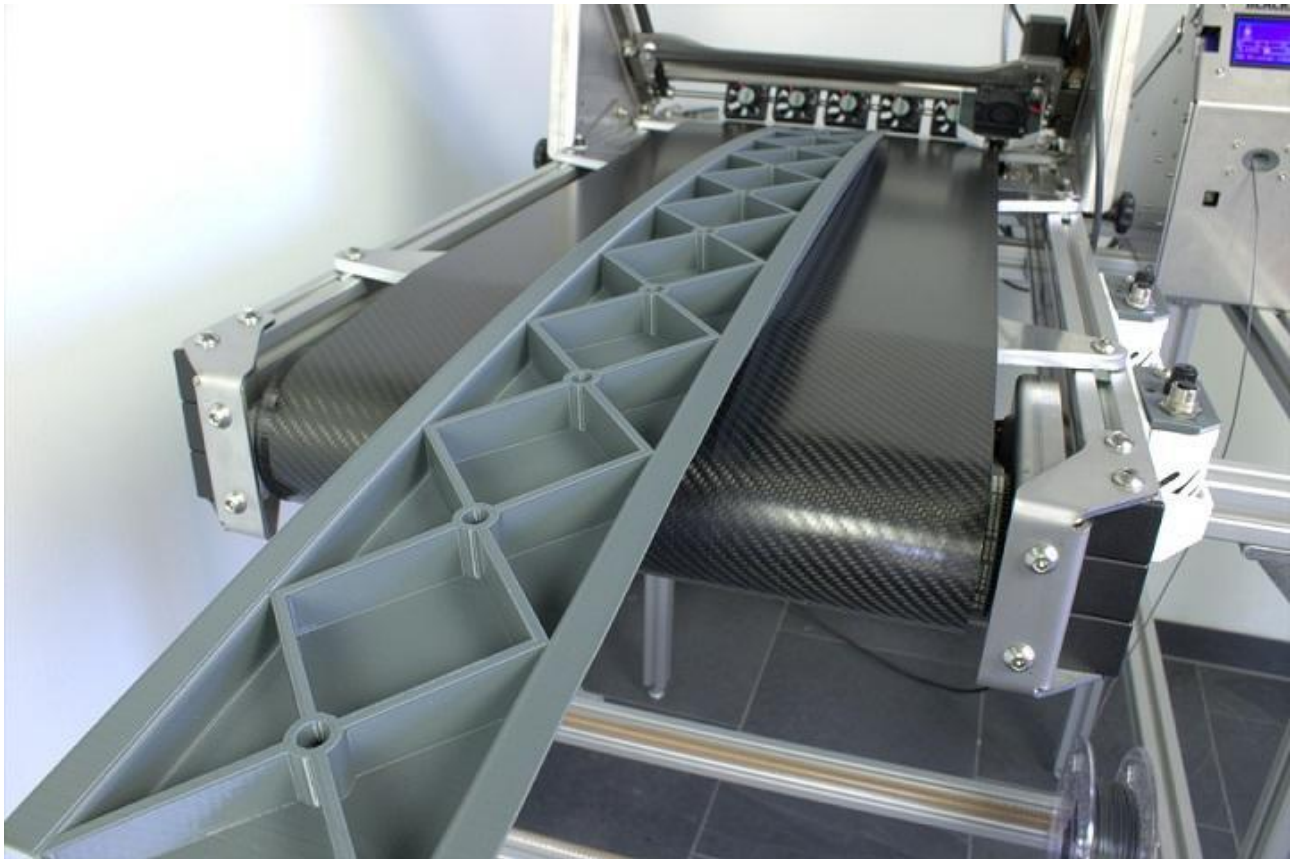


Рисунок 1.19 – Виготовлення довгого елемента на конвеєрному принтері

Процес створення здійснюється на конвеєрній стрічці, що рухається, яка функціонує як вісь Z. З кожним новим шаром вона переміщається по горизонталі. У той самий час накладання шарів відбувається під певним кутом,

який можна регулювати в налаштуваннях приладу. За умовчанням встановлений кут 45° , є можливість вибрати кута в 15° , 25° та 34° . Як матеріал використовується пластикова нитка діаметром приблизно 1,75 мм.

До основних переваг такого конвеєрного принтеру від звичайних варіантів варто віднести модульну конструкцію приладу, за рахунок чого можна адаптувати принтер під власні потреби. Тобто, при необхідності, робота 3D-принтера може здійснюватися як у промислових, так і в домашніх умовах. Пристрій доступний у двох варіантах: настільному та автономному. Конвеєрна стрічка може бути виконана з якісного вуглецевого композиту та забезпечувати надійну адгезію та точність 3D-друку.

До того ж прилад оснащений трьома головками зі змінними соплами діаметром 0,4 мм, 0,6 мм і 0,8 мм. Є надзвичайно цікава можливість виробляти компоненти необмеженої довжини, в теорії до безконечності. Щоправда, для деталей довжиною понад 1300 мм рекомендується забезпечувати додаткову підтримку з допомогою рольганга.

Такий прилад здатний безперервно виробляти вироби один за одним. А за рахунок конвеєрної стрічки оператору не потрібно буде вручну їх відокремлювати. Контейнер міститься перед принтером і по закінченні друку деталі будуть падати до нього.

Само собою, конструкція конвеєрного 3D-принтера передбачає створення елементів складної геометрії, недоступної при традиційному 3D-друку. А завдяки можливості друкувати без підтримки, можна значно заощадити на витратних матеріалах.

1.7 Аналіз ТЗ

Згідно з завданням треба буде розробити конвеєрний 3D-принтер, який буде простий в обслуговуванні та заміні деталей, матиме можливість як конвеєрного друку, так і друку великогабаритних деталей по осі Y.

Необхідно побудувати 3D модель, яка буде містити в собі 1 екструдер, конвеєрну стрічку, нагрівальний стіл, систему зупинки та калібрування екструдера, електронні складові, такі як Arduino Mega, блок живлення та Ramps1.4.

Основні вимоги до конструкції принтера наведені в таблиці 1.1.

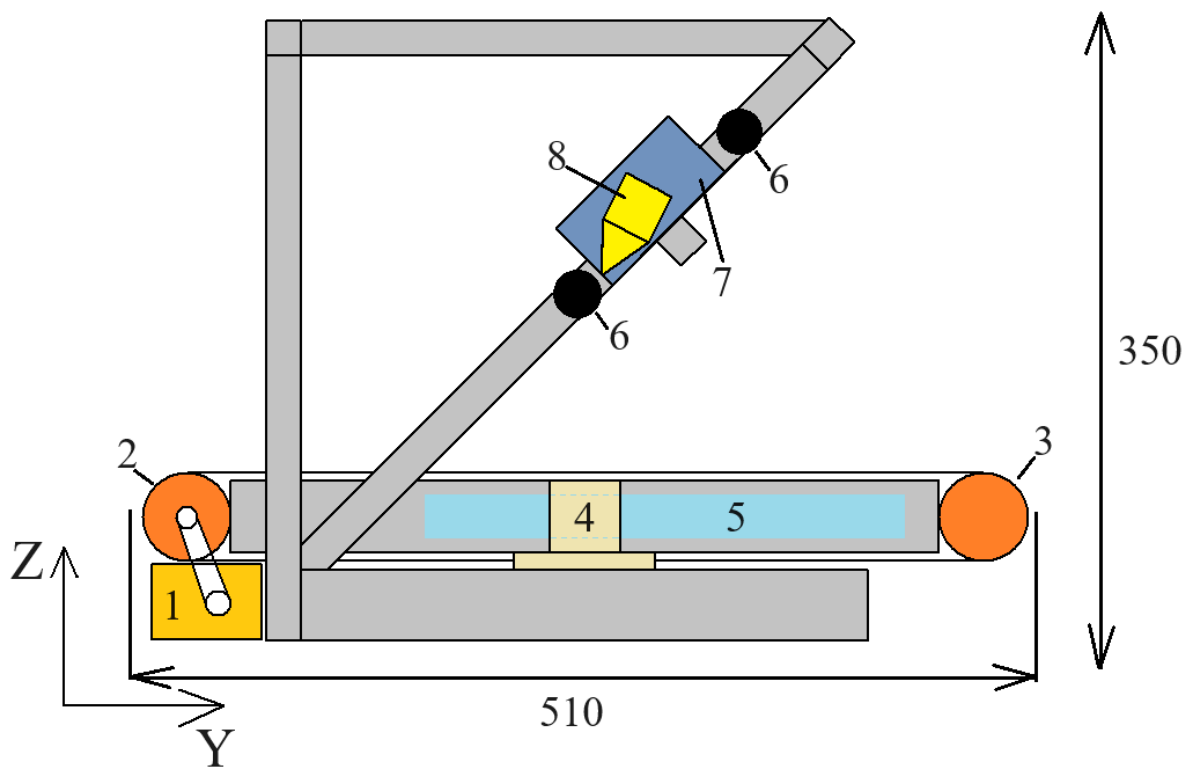
Таблиця 1.1 – Вимоги до конструкції конвеєрного 3D-принтеру

№	Параметри	Значення
1	Розміри конструкції (довжина, ширина, висота), мм	не більше 550×450×400
2	Вага, кг	не більше 15
3	Тип кінематики	Prusa
4	Енергоживлення, В	220
5	Кількість екструдерів	1
6	Розміри робочого поля (довжина, ширина, висота), мм	0-600≤×190×180≤
7	Максимальна температура екструдера, °C	260-280
8	Максимальна температура робочого столу, °C	до 100
9	Матеріали для друку	ABS, PLA, CoPET, TPU, NILON, NIPS
10	Тип подачі матеріалу	Direct

2 РОЗРОБКА СХЕМИ КІНЕМАТИКИ КОНВЕЄРНОГО 3D-ПРИНТЕРУ

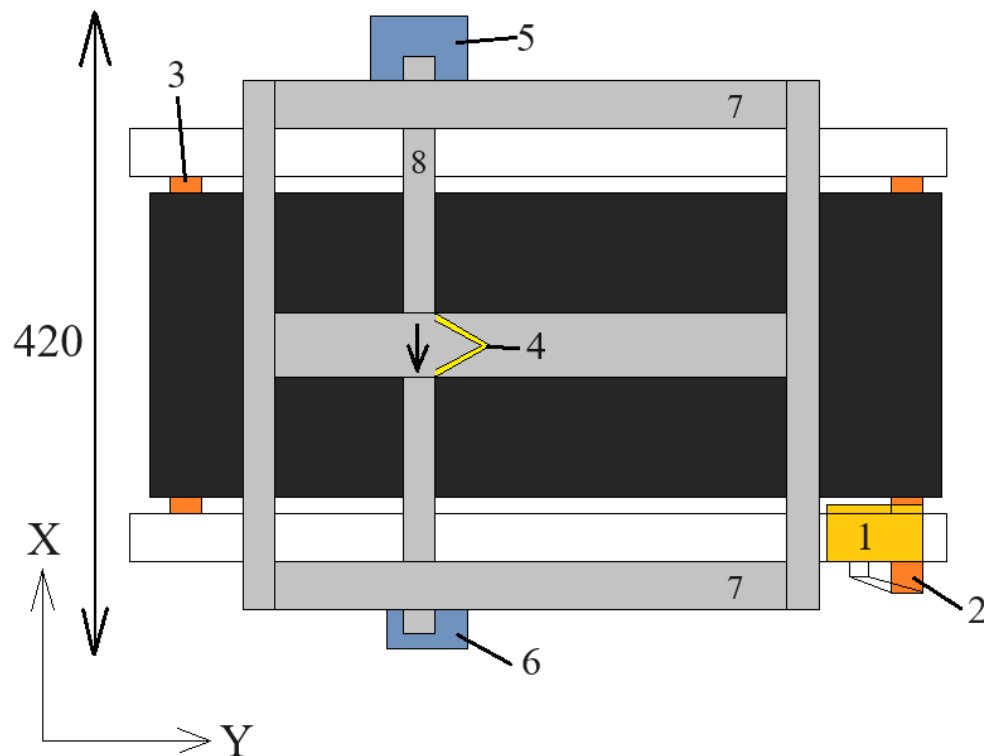
2.1 Розробка кінематики та загальної схеми

Виходячи з технічного завдання задумано створити 3D-принтер з використанням конвеєрної стрічки для переміщення деталей по осі Y та можливістю конвеєрного виробництва. Дві кінематичні схеми з подальшим описом всіх елементів зображені нижче на рисунку 2.1 (осі Z та Y) та рисунку 2.2 (осі X та Y).



1 – двигун конвеєрної стрічки; 2 – приводний вал; 3 – другий вал, регульований; 4 – кріплення порталу та робочого столу; 5 – нагрівальний стіл; 6 – умовні позначення роликів що рухають екструдер по осі Z; 7 – каретка; 8 – екструдер

Рисунок 2.1 – Кінематична схема за осями Z та Y



1 – двигун конвеєрної стрічки; 2 – приводний вал; 3 – регульований вал; 4 – екструдер, стрілкою позначено що він знаходиться на профілі під номером 8; 5 – каретка з двигуном який рухає ось Z; 6 – каретка відповідальна за рух осі X; 7 – бічні профілі які знаходяться під нахилом 45° справа наліво догори; 8 – профіль на якому знаходиться екструдер

Рисунок 2.2 – Кінематична схема за осями X та Y

Загальні розміри принтеру виходячи з розмірів всіх деталей та каркасу:

- а) довжина – 510 мм;
- б) ширина – 420 мм;
- в) висота – 350 мм.

Розміри профілів використовуваних для макету варіюються від їх призначення, так задля вертикального порталу, та порталу під нахилом 45 градусів (рисунок 2.3) були взяті по два профілі 40 мм х 20 мм та по одному 20 мм х 20 мм. Верхній сполучний профіль має розміри 40 мм х 20 мм. Два

профілі на яких стоїть уся конструкція мають розміри 40мм x 40 мм. Загальна схема розташування профілів вказана на рисунку 2.4.

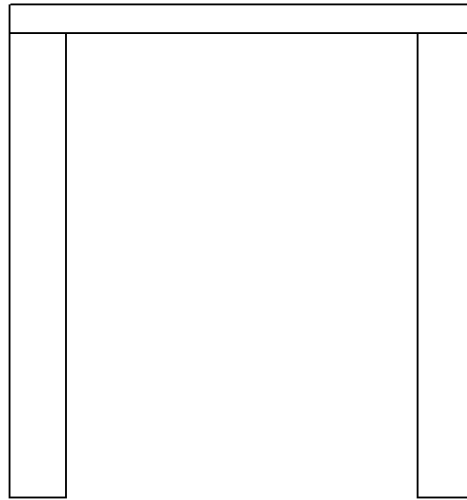
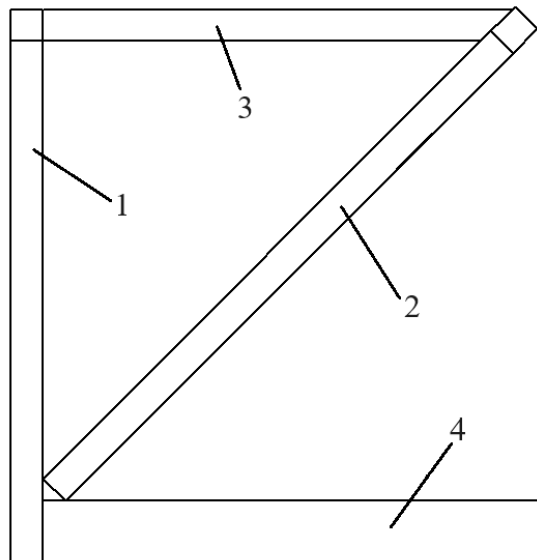


Рисунок 2.3 – Загальний вигляд порталу (розмір 350 мм x 330 мм)



1 – вертикальний портал; 2 – портал під нахилом 45°; 3 – сполучний профіль; 4 – основи конструкції

Рисунок 2.4 – Розташування профілів при створенні макету

Друк деталей на принтері відбуватиметься за поступальним принципом, шар за шаром, але щоб не зачіпати попередній надрукований шар при конвеєрному друці, кут сопла виставлений в районі 120-135 градусів. Для

порівняння на рисунку 2.5 зображений друк деталі на звичній кінематиці "Prusa" та на конвеєрному принтері.

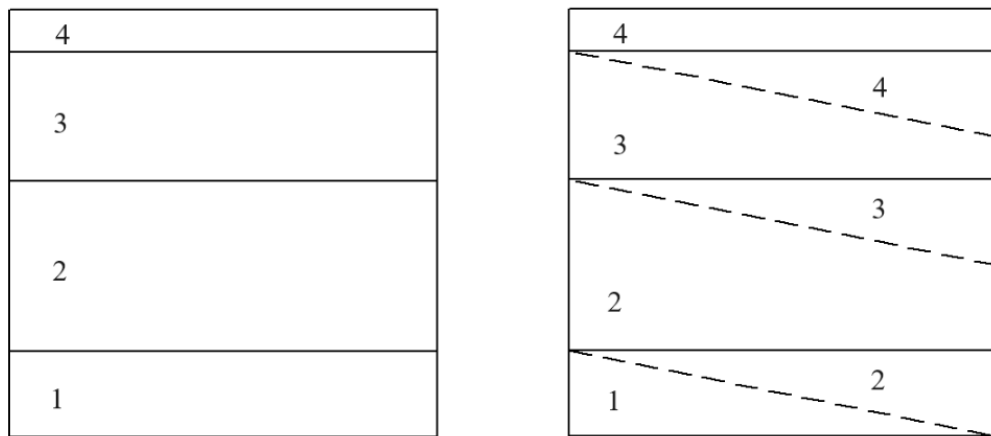


Рисунок 2.5 – Зліва кінематика "Prusa", справа конвеєрний друк

Все переміщення за осями Z та X буде роликове, задля здешевлення та спрощення конструкції, а от за ось Y відповідатиме конвеєрна стрічка.

Під стрічкою планується встановити двигун, який буде передавати рух на ось Y через два шківів, один на двигуні, інший на валику, вони з'єднані зубчатим ременем. Вал має діаметр 10 мм. Приклад наведений нижче на рисунку 2.6.

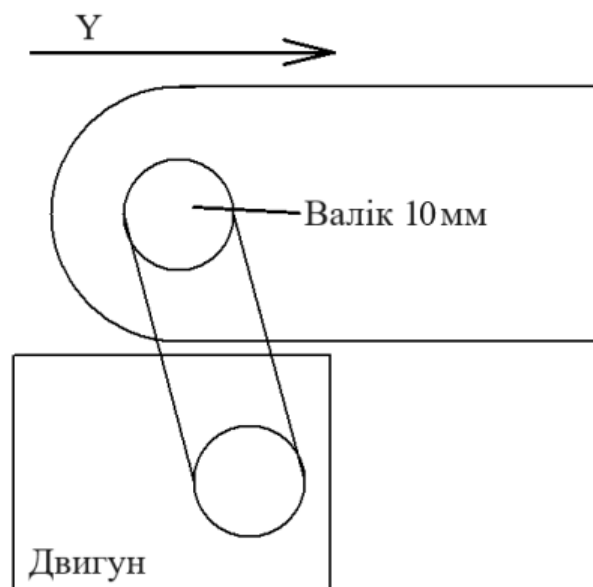


Рисунок 2.6 – З'єднання двигуна та 10мм валу зубчатим ременем

Натяг конвеєрної стрічки можна регулювати за допомогою валу, на рисунку 2.1 він позначений номером 3. У самому валі є отвір з різьбленням, приблизно розміром 5 мм. Якщо крутити гвинт через цей отвір, вал буде натягувати стрічку.

2.2 Опис покупних елементів

Каркас макету складається з алюмінієвих верстатних, конструкційних профілів (рисунок 2.7). Вартість 100 мм профілю розміром 20 мм х 40 мм складає 36 грн. Загальна кількість потрібних профілів для макету:

- 40 мм х 40 мм, довжина 320 мм (2шт.) => 460,8 грн;
- 40 мм х 40 мм, довжина 250 мм (1шт.) => 180 грн;
- 20 мм х 40 мм, довжина 330 мм (2шт.) => 237,6 грн;
- 20 мм х 40 мм, довжина 400 мм (4шт.) => 576 грн;
- 20 мм х 40 мм, довжина 300 мм (1шт.) => 108 грн;
- 20 мм х 20 мм, довжина 330 мм (2шт.) => 118,8 грн;
- 20 мм х 20 мм, довжина 210 мм (2шт.) => 75,6 грн;
- 20 мм х 20 мм, довжина 345 мм (1шт.) => 62 грн.

Кінцева вартість каркасу дорівнює 1818,8 грн.

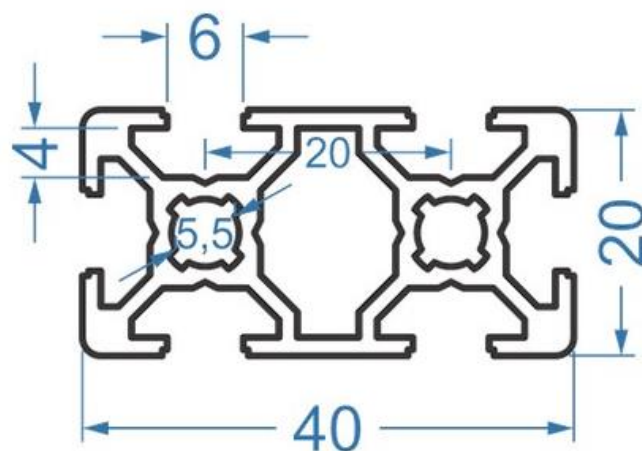


Рисунок 2.7 – Вид профілю 20 мм х 40 мм у розрізі

Для руху по Y буде використовуватися конвеєрна стрічка (рис. 2.8), між якою буде знаходитись нагрівальний стіл від фірми Anycubic Kobra (рис. 2.9). Стіл встановлений на двох профілях 20 мм x 20 мм та слюсарних куточках. На кожному профілі є місця для регулювальних штифтів. Для закріплення конструкції з обох сторін є профілі 20 мм x 40 мм, обидва довжиною 400 мм. Сама стрічка обертається на двох валах зі сталі, приблизною довжиною по 270 мм кожний, їх діаметр становить 10 мм (рис. 2.10). Обов'язково з кожної сторони валу є підшипники, в сумі їх виходить 4 (рис. 2.11). Саму стрічку рухає двигун, на якому є 20-ти зубчатий шків, 5 мм діаметром валу двигуна, на одному з валів які обертають стрічку буде опозитний шків (рис. 2.12), він з'єднується з валом двигуна зубчатим замкненим ременем GT2-6 мм довжиною 110 мм (рис. 2.13).



Рисунок 2.8 – Нейлонова конвеєрна стрічка з високим опором нагріву



Рисунок 2.9 – Стіл з підгрівом Hot Bed від Anycubic



Рисунок 2.10 – Лінійний напрямний вал 10 мм

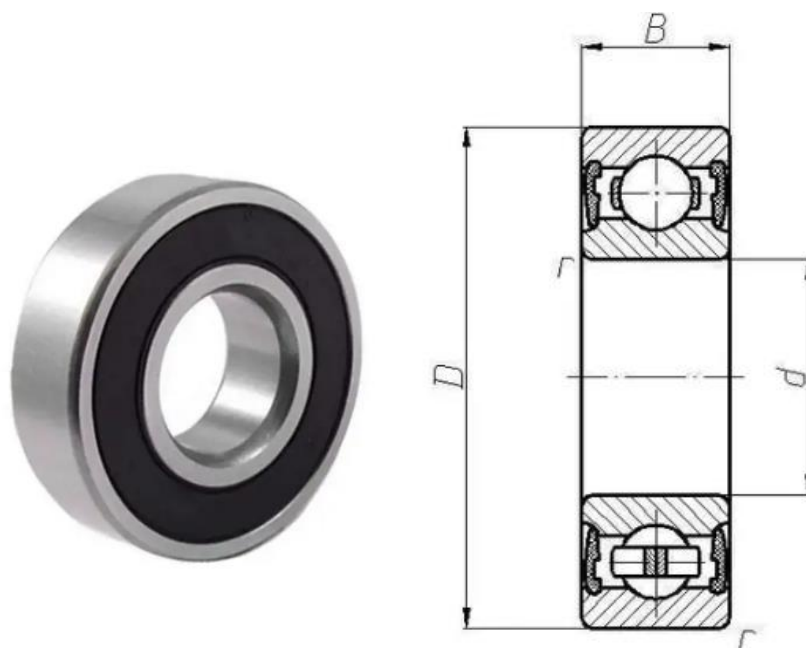


Рисунок 2.11 – Підшипник, розміри: 3 мм × 10 мм × 4 мм



Рисунок 2.12 – Шків для ременя GT2, алюміній



Рисунок 2.13 – Замкнений зубчатий ремень GT2-6 мм, довжина 110 мм

Для переміщення екструдера від CREALITY (рис. 2.14) по осям X та Z будуть використовуватися ролики діаметром 24 мм, 3 на осі X та 6 на осі Z (рис. 2.15). Вони рухають каретки вздовж профілю, а для їх регулювання використовуються втулки (рис. 2.16). По осі X ролики які знаходяться під екструдером з'єднані з двигуном (рис. 2.17) зубчастим ременем. Сам ремень (рис. 2.19) закріплений з одної сторони на шківі який знаходиться на двигуні, з іншої на зубчатому ролику (рис. 2.21). По осі Z також встановлений двигун, який обертає різьбовий вал (рис. 2.18), він в свою чергу з'єднаний з віссю X гайкою з фланцем яка знаходиться на крафтовому кронштейні (рис 2.22). На різьбі також є муфта (рис. 2.20), а сам двигун встановлений на кронштейні. Для електроніки використовуються механічний кінцевик (рис. 2.23), оптичний вимикач (рис. 2.24), драйвери двигунів (рис. 2.25), БЖ (рис. 2.26), плата Arduino Mega (рис. 2.27), плата Ramps 1.4 (рис. 2.28), та панель управління (рис. 2.29).



Рисунок 2.14 – Екструдер CREALITY Sprite 260 °С

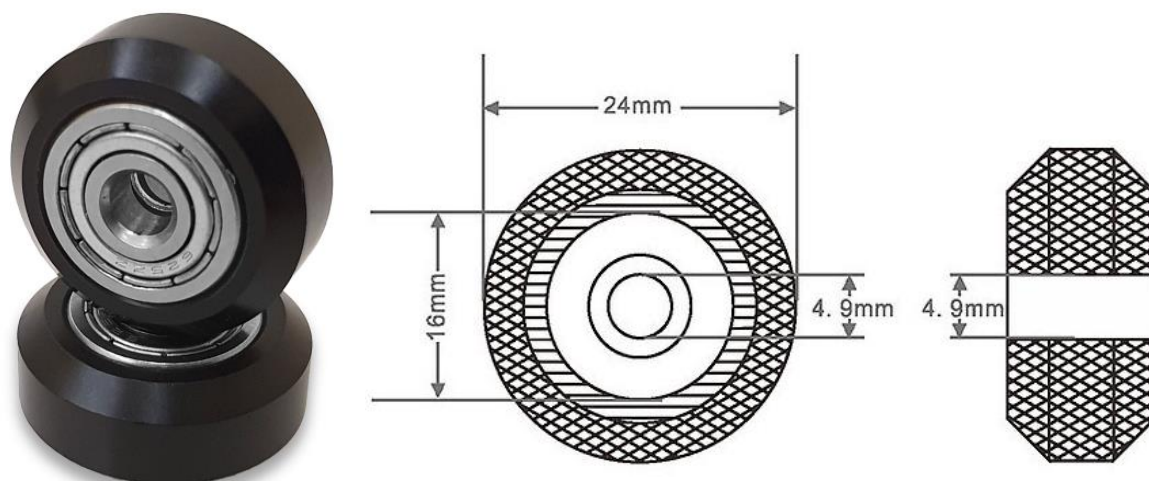


Рисунок 2.15 – Ролики для 3D-принтерів, зовнішній діаметр 24 мм, покриті твердим зносостійким POM (полиоксиметилен) матеріалом



Рисунок 2.16 – Втулки для регулювання роликів



Рисунок 2.17 – Кроковий двигун NEMA17



Рисунок 2.18 – Різбовий вал з латунною гайкою фланцем, діаметр 8 мм, крок різьби 2 мм



Рисунок 2.19 – Ремінь зубчастий GT2 6 мм



Рисунок 2.20 – Муфта сполучна жорстка, діаметр під вал 8 мм, зовнішній діаметр 14 мм



Рисунок 2.21 – Зубчастий ролик GT2-6 мм



Рисунок 2.22 – Кронштейн кутовий для крокового двигуна NEMA17

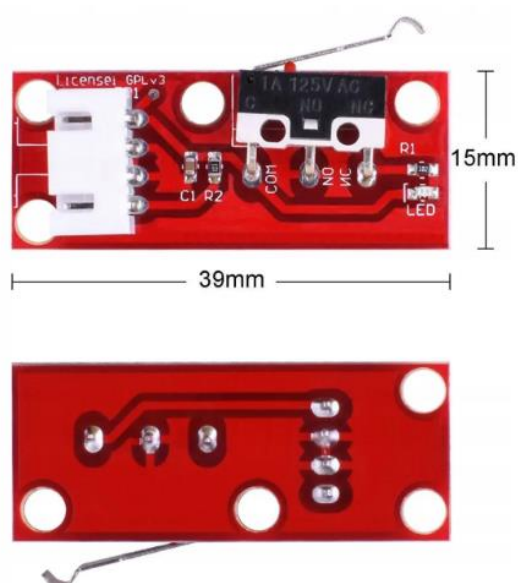


Рисунок 2.23 – Кінцевий вимикач Endstop для 3D-принтера



Рисунок 2.24 – Кінцевий вимикач оптичний, EndStop

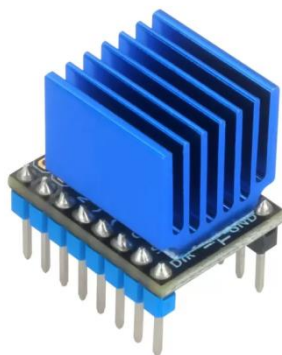


Рисунок 2.25 – Драйвер крокового двигуна TMC2226



Рисунок 2.26 – Блок живлення



Рисунок 2.27 – Arduino Mega 2560 R3



Рисунок 2.28 – RAMPS 1.4, плата розширення



Рисунок 2.29 – Панель управління 2004 LCD для RAMPS

Було розраховано суму всіх деталей проекту у таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Загальна сума елементів

Назва деталі	Кількість	Ціна за одиницю (грн)	Загальна ціна (грн)
Різьбовий вал з гайкою	1	240	240
Кроковий двигун NEMA 17	3	380	1140
Муфта сполучна	1	55	55
Ремінь зубчатий незамкнений GT2	1	70	70
Ролики «CREALITY»	9	55	495
Кронштейн кутовий	1	80	80
Шків для ременя GT2	3	60	180
Зубчастий ролик GT2	1	31	31
Замкнений ремінь GT2	1	18	18
Підшипник	4	17	68
Екструдер «CREALITY»	1	2949	2949
Нагрівальний стіл	1	603	603
Кінцевий вимикач Endstop	2	39	78
Кінцевий вимикач оптичний	1	55	55
Драйвер крокового двигуна	4	220	880

Продовження таблиці 2.1

Назва деталі	Кількість	Ціна за одиницю (грн)	Загальна ціна (грн)
Лінійний напрямний вал	2 шт. по 270 мм кожний	510 (ціна за 1 м)	276
Конвеєрна стрічка	1	3213	3213
Втулки для регулювання	1 комплект	85	85
Блок живлення	1	1055	1055
Arduino Mega 2560 R3	1	670	670
RAMPS 1.4	1	160	160
Панель управління	1	245	245

Загальна ціна принтеру з урахуванням ціни каркасу з алюмінієвих профілів – 14.465 грн.

2.3 Вибір двигунів для моделі та розрахунок передавальної функції

Виходячи з розробленої кінематичної схеми для руху осей потрібно три двигуна. Як найкращі варіанти, були обрані крокові біполярні двофазні двигуни NEMA 17 17HS4401.

Характеристики двигунів описані в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Характеристики крокового двигуна NEMA 17 17HS4401.

Характеристика	Значення
Крок	1,8°, 200 кроків за один оберт
Номінальний струм	1,7 А
Опір обмотки	1,5 Ом

Продовження таблиці 2.2

Характеристика	Значення
Індуктивність обмотки	2,8 мГн
Інерція ротора	54 см ²
Діаметр валу	5 мм
Вага	280 г
Максимальне значення температури	80 °С

Цей двигун також має компактні розміри (42 мм х 42 мм), і це робить його придатним для 3D принтеру, він не буде займати занадто багато місця.

Для розрахунку передавальної функції нам знадобиться формула:

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{k_t}{s(Js + b)(R + k_b s)}$$

де $\Omega(s)$ – кутова швидкість ротора;

$V(s)$ – вхідна напруга;

k_t – константа крутного моменту = 0,025 Н·м/А;

J – момент інерції ротора = 0,0000054 кг·м² або $5,4 \cdot 10^{-6}$;

b – коефіцієнт в'язкого тертя = 0,1 Н·м·с/рад;

R – опір обмотки = 1,5 Ом;

k_b – константа проти-ЕРС = 0,025 В·с/рад.

Підставивши значення отримаємо вираз:

$$G(s) = \frac{0,025}{s(5,4 \cdot 10^{-6}s + 0,1)(1,5 + 0,025s)}$$

Ця передавальна функція показує, як кутова швидкість двигуна змінюється відносно прикладеної напруги. Це може бути корисно для аналізу стабільності та проектування контролера для двигуна.

3 РОЗРОБКА 3D-МОДЕЛІ ТА ЇЇ ПРОГРАМУВАННЯ

3.1 Розробка рами 3D-принтеру

На початку розробки 3D-моделі у програмі SketchUp 2020, за схемою яка представлена на рисунку 2.4 була створена 3D конструкція каркасу (рис. 3.1). Головними умовами були стійкість, міцність конструкції, та можливість легкого пересування роликів. Для виконання цих умов були обрані алюмінієво-верстатні, конструкційні профілі розмірами 20 мм x 40 мм, 20 мм x 20 мм та 40 мм x 40 мм.

Профілі розмірів 40 мм x 40 мм використовуються знизу як опора форми “Н”, на них буде встановлюватися сама конвеєрна стрічка, вертикальний портал та 45-и градусний портал. Знизу портали обов’язково з’єднуються з опорою алюмінієвими кріпленнями, товщиною 3 мм (рис. 3.2). Зверху ж вони з’єднані профілем 20 мм x 40 мм який для більшої стійкості має два кутові кріплення з вертикальним порталом (рис. 3.3).

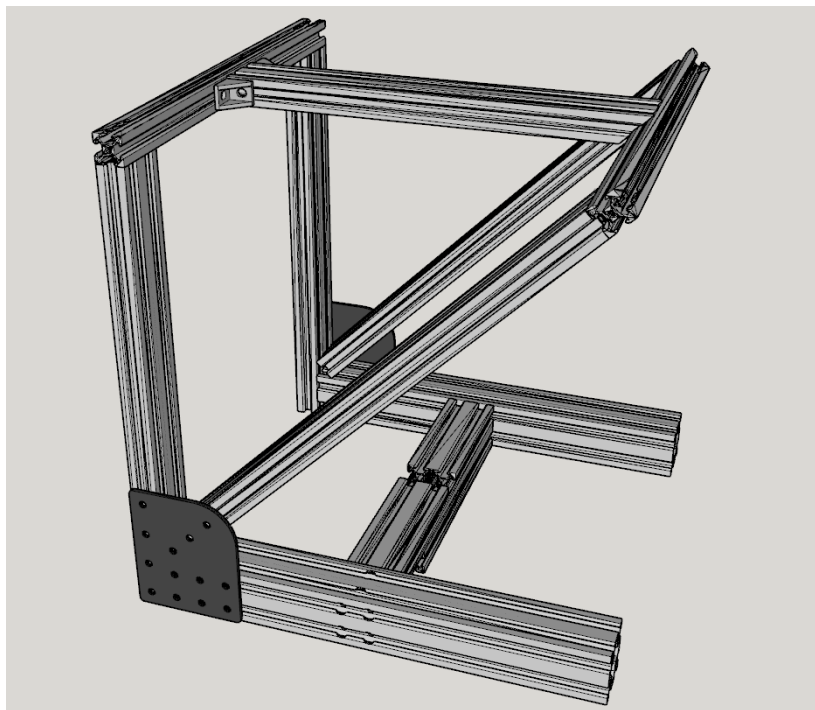


Рисунок 3.1 – Каркас 3D-принтера

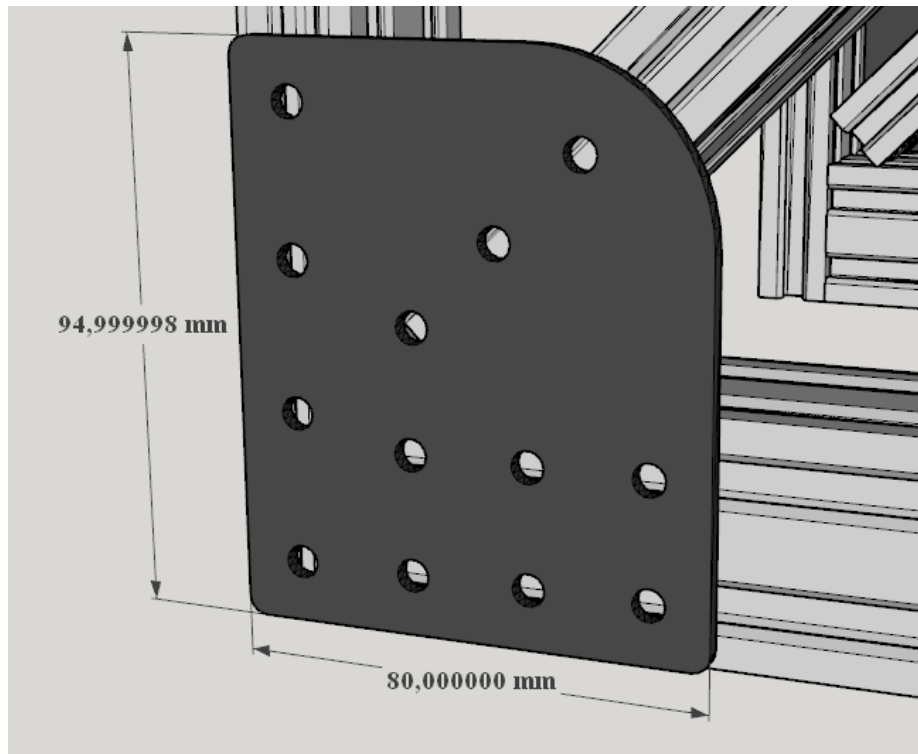


Рисунок 3.2 – Алюмінієве кріплення

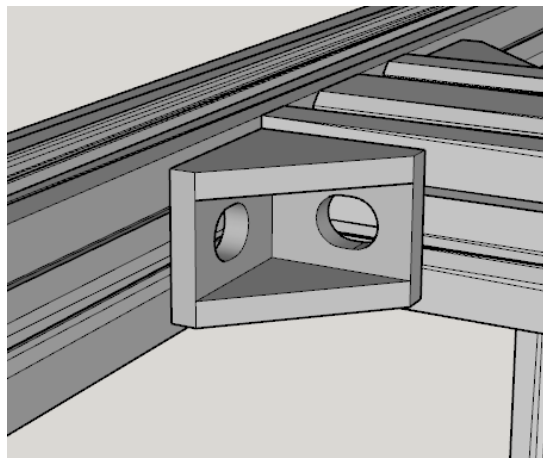


Рисунок 3.3 – Кутове кріплення

3.2 Розробка системи руху по осі Y та конвеєрної стрічки

Для осі Y була обрана нейлонова конвеєрна стрічка шириною 190 мм (рис. 3.4). Така стрічка з легкістю витримує температуру нагріву до 220 °С. Для неї було розроблено платформу з двох профілів 20 мм x 40 мм та двох 20 мм x 20 мм. Більші профілі є основою конструкції з обох сторін, а менші використовуються для підтримки нагрівального столу який знаходиться

всередині стрічки. Для з'єднання цієї платформи з основним каркасом принтера були створені 2 кастомні кріплення, які показані на рисунку 3.5.

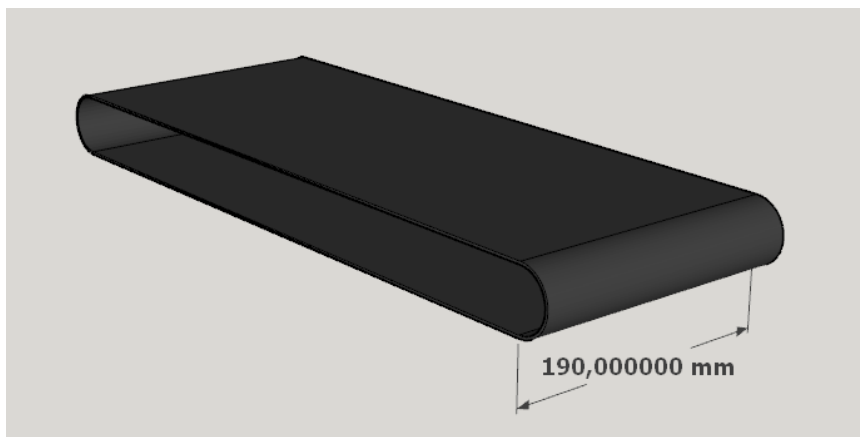


Рисунок 3.4 – Конвеєрна стрічка

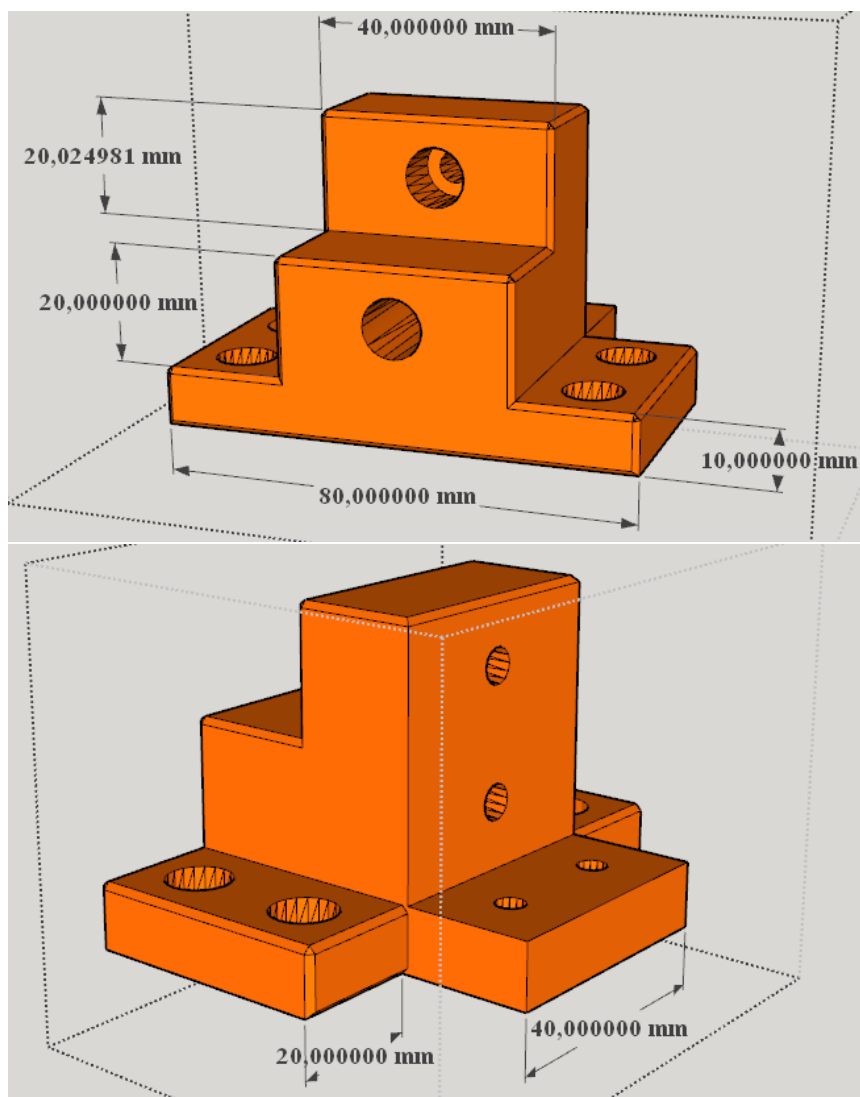


Рисунок 3.5 – Кріплення міжплатформове

Для обертю стрічки до платформи було додано два лінійних напрямних вала зі сталі, діаметром 10 мм, зверху яких встановлені дві труби з ПВХ (рис. 3.6). Для з'єднання цих валів з самою платформою були створені кріплення з пластику які зображені на рисунку 3.7.

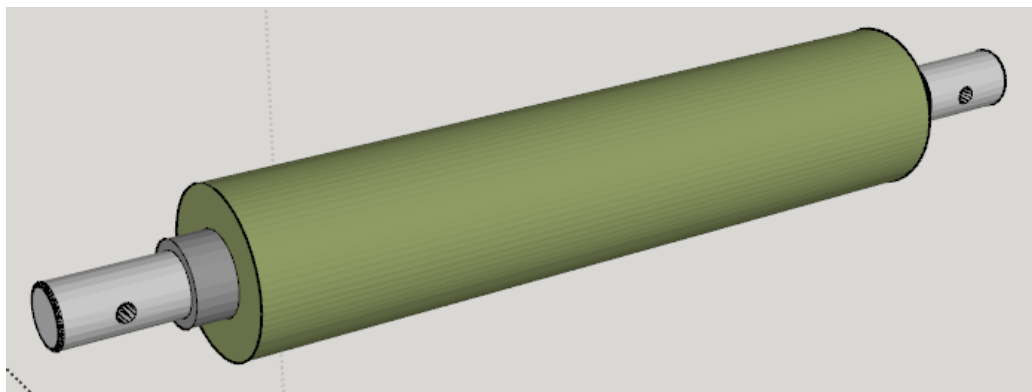


Рисунок 3.6 – Вал для обертю конвеєрної стрічки

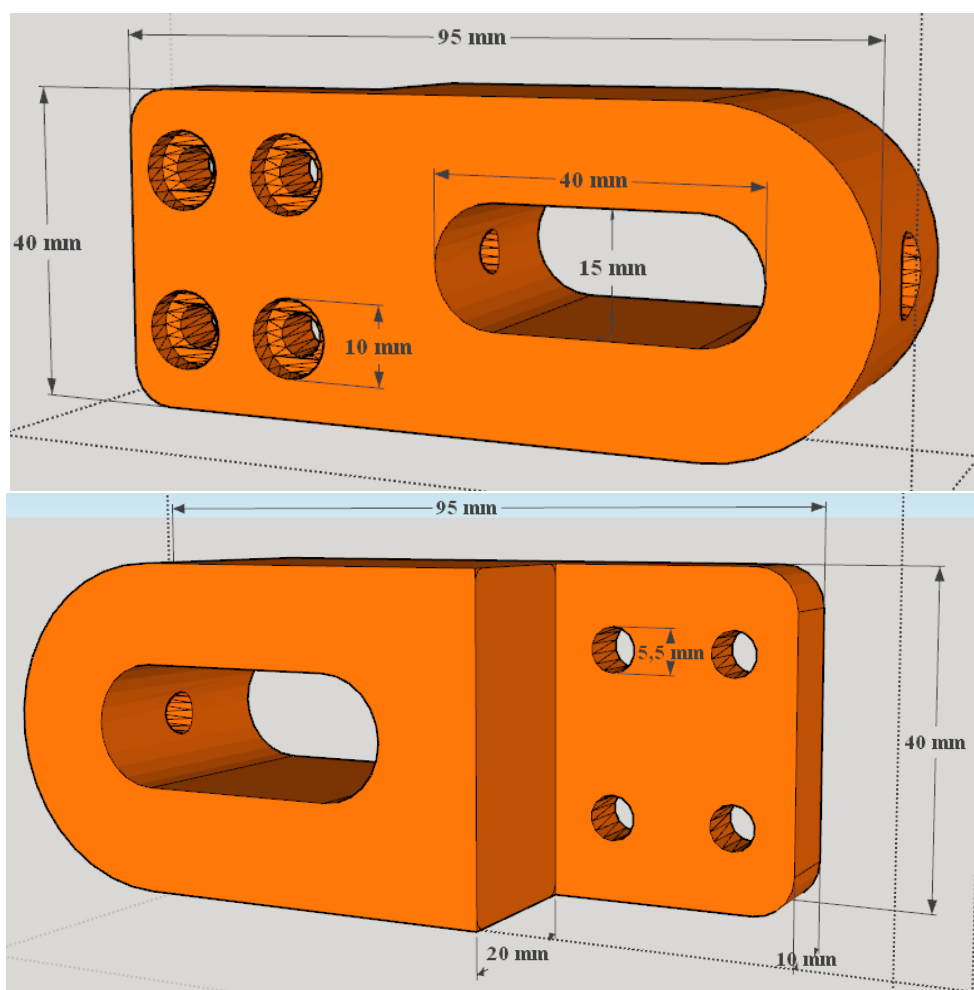


Рисунок 3.7 – Кріплення для валу

Повна конструкція платформи видом зсередини зображена на рис. 3.8. На ньому також можна побачити кроковий двигун NEMA17, який знаходиться позаду, в окремій кишени платформи.

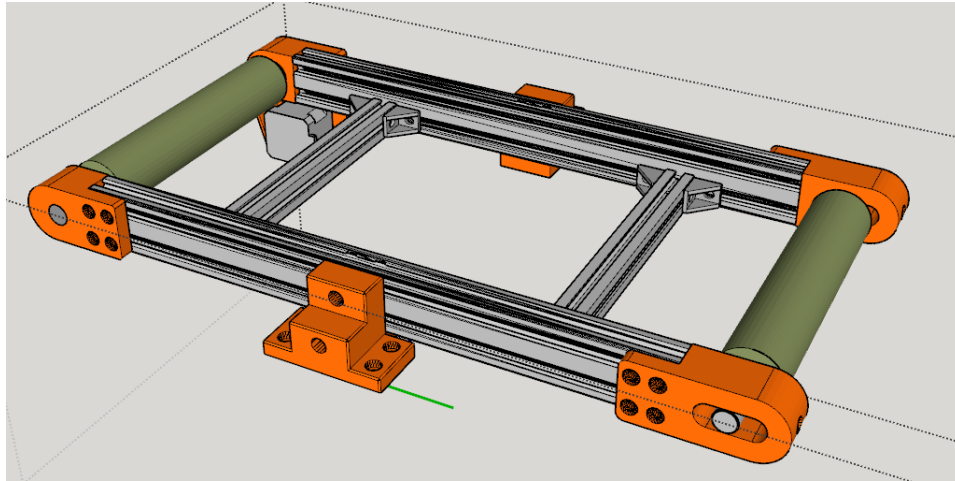


Рисунок 3.8 – Платформа для руху по осі Y, вид зсередини

На двигуні та одному з валів є по одному шківу (рис. 3.9), вони з'єднані зубчатим ременем. Двигун, працюючи передає рух на вал, тим самим обертаючи стрічку. Окрім цього, на іншому валі є наскрізне різьблення завдяки якому можна регулювати натяжіння стрічки. Всередину платформи встановлюється нагрівальний стіл від Anycubic Cobra на два профілі 20 мм x 20 мм (рис. 3.10). Ніжки столу регулюються по висоті так, щоб він майже впритул доторкався до стрічки.

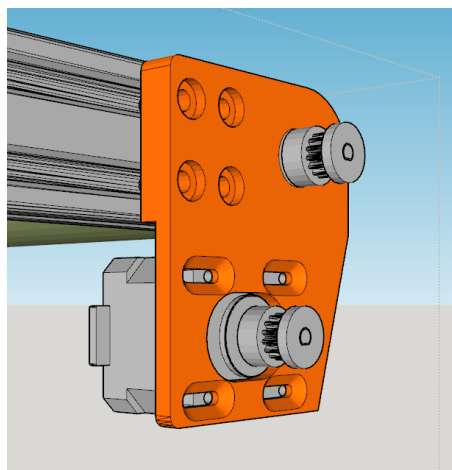


Рисунок 3.9 – Шківви двигуна та валу які обертають стрічку

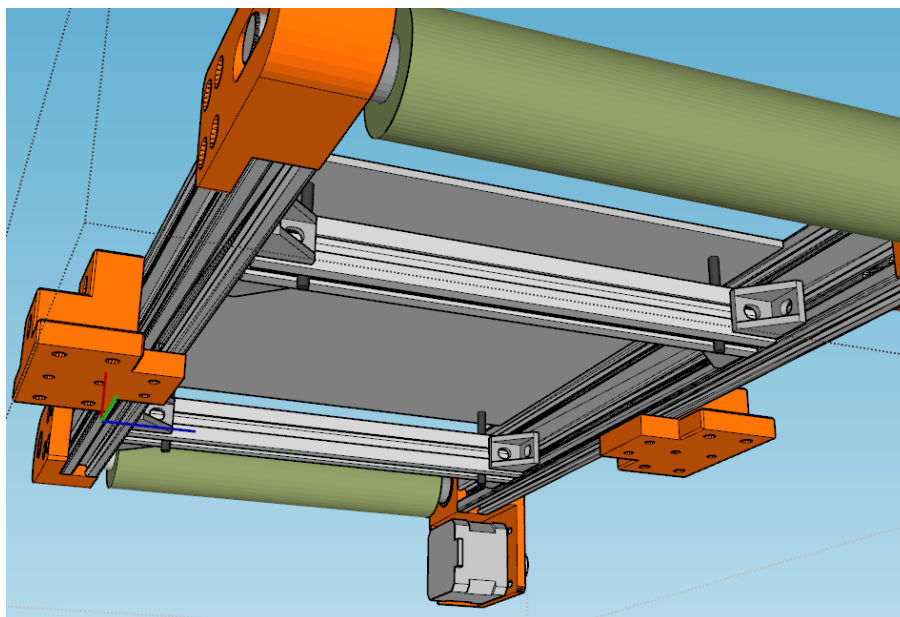


Рисунок 3.10 – Встановлений нагрівальний стіл

Загальний вид платформи встановленої на каркас принтеру зображений на рисунку 3.11.

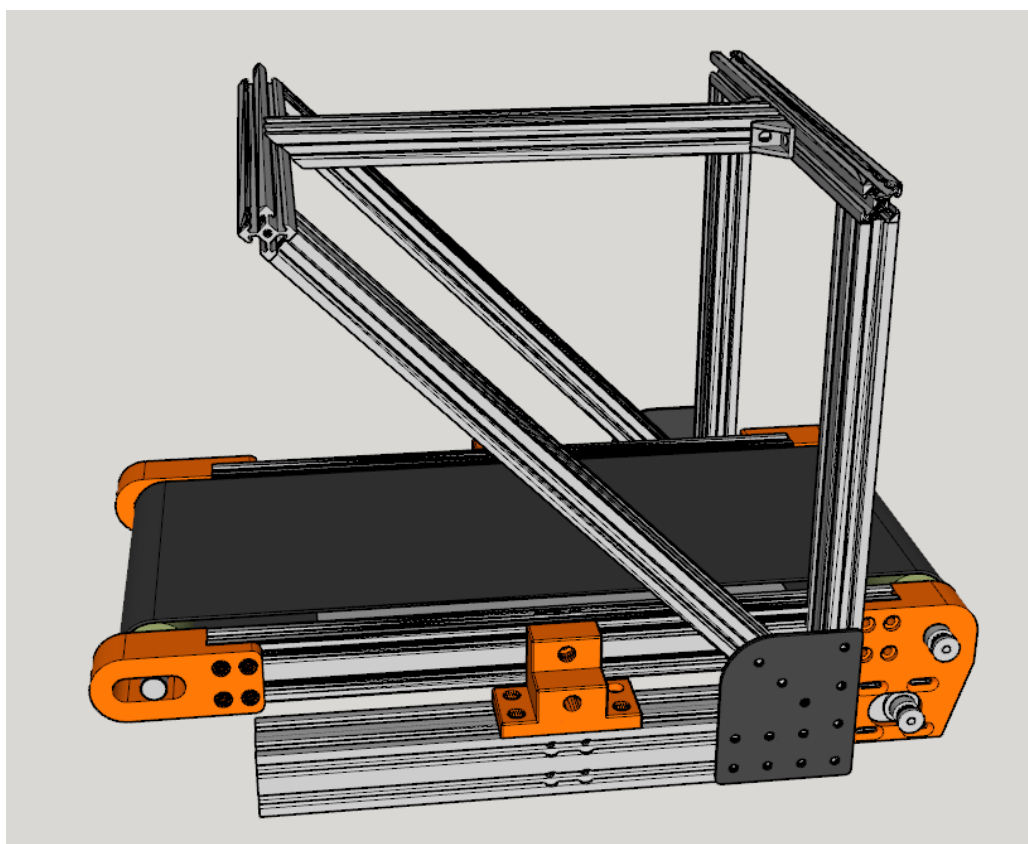


Рисунок 3.11 – Загальний вигляд принтеру з встановленою системою руху по по осі Y

3.3 Розробка систем руху за осями X та Z

При проектуванні було вирішено зробити рух по осі X використовуючи зубчатий ремінь. Двигун буде обертати з'єднані ременем шківів, опозитний шків, та рухати каретку для екструдера (рис. 3.12). Каретки зроблені з металу 3мм та незалежно від їхнього призначення вони будуть рухатися за профілями завдяки роликам. На кожен каретку зазначено по 3 ролика, один з них представлений на рисунку 3.13. Загальна схема системи руху по осі X зображена на рисунку 3.14, На ньому є умовне положення ременю, також коричневою стрілкою позначений двигун та червоними шківів для оберту.

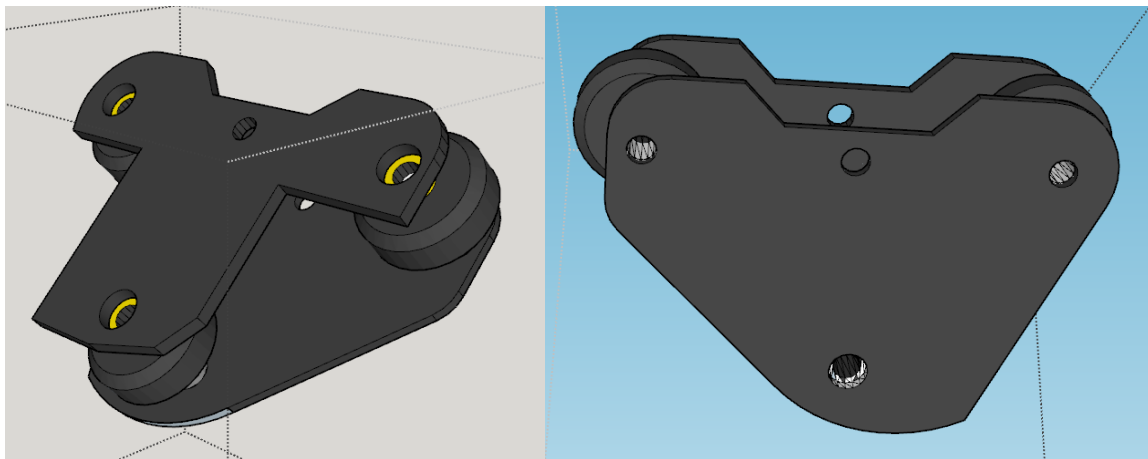


Рисунок 3.12 – Каретка для руху екструдера по осі X

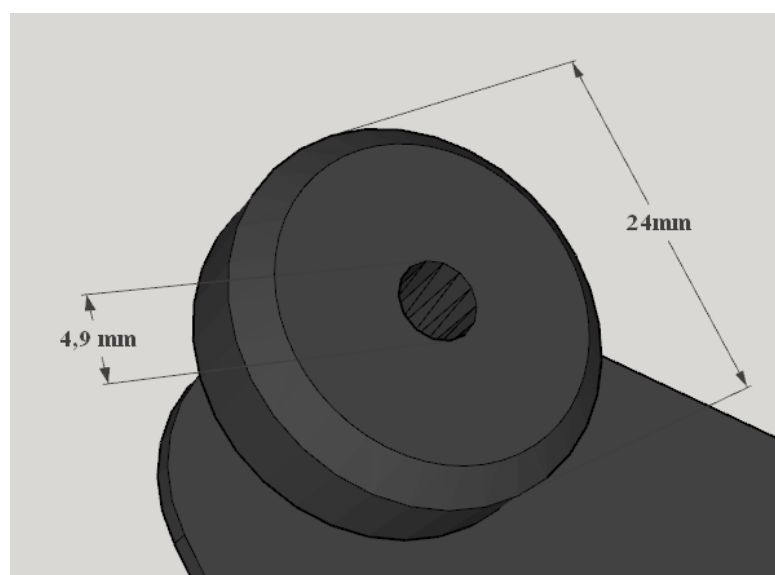


Рисунок 3.13 – Розмір роликів

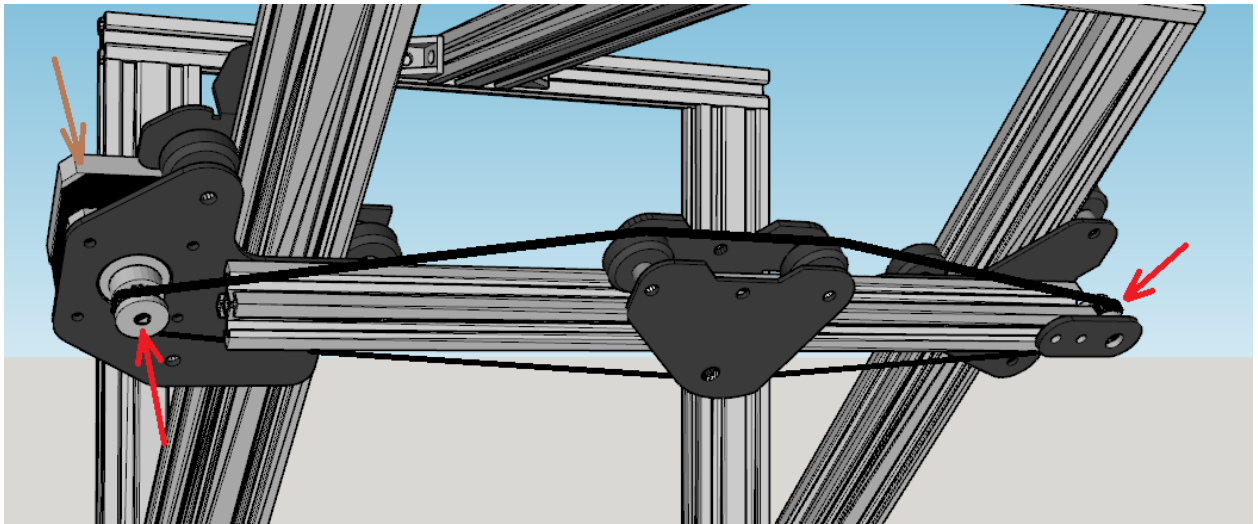
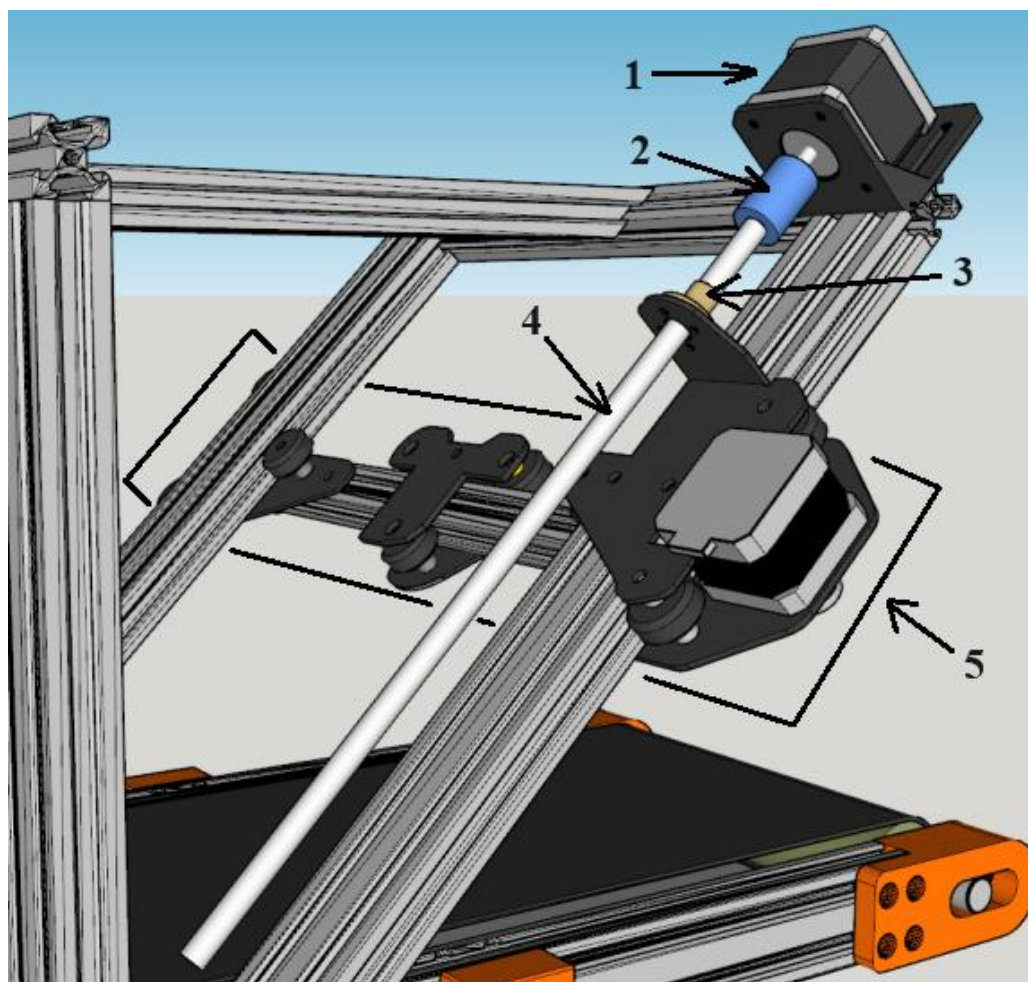


Рисунок 3.14 – Система руху по осі X

Так як система руху по осі Z зроблена на основі різьбового валу та в ній не використовуються зубчасті ремені, вона напряму пов'язана з профілем вказаним на рисунку 3.14.

Двигун знаходиться зверху конструкції, на спеціальному кронштейні. Різьбовий вал діаметром 8мм та вал двигуна діаметром 5 мм з'єднані сполучною муфтою. Каретка, на якому встановлений двигун що обертає ремінь по осі X, зроблена таким чином, щоб була можливість з'єднати весь горизонтальний профіль з різьбовим валом. Ця вся конструкція поєднана гайкою з фланцем, яка прикручена до каретки. Отож, коли двигун працює, він обертає різьбовий вал, при цьому гайка починає рухатися по ньому та в свою чергу опускає або піднімає увесь горизонтальний профіль. Вся ця система представлена на рисунку 3.15



1 – двигун осі Z; 2 – муфта сполучна; 3 – гайка з фланцем; 4 – умовне позначення різьбового валу; 5 – горизонтальний профіль який рухає каретку з екструдером по осі X

Рисунок 3.15 – Система руху по осі Z

Екструдер встановлюється на каретку яка зображена на рисунку 3.12. Екструдер CREALITY Sprite (рис. 3.16) має Direct подачу що забезпечує кращу екструзію та дозволяє друкувати еластомірами. З високим крутним моментом і силою екструзії до 80 Н, він гарантує високу точність та забезпечує надійний 3D друк.

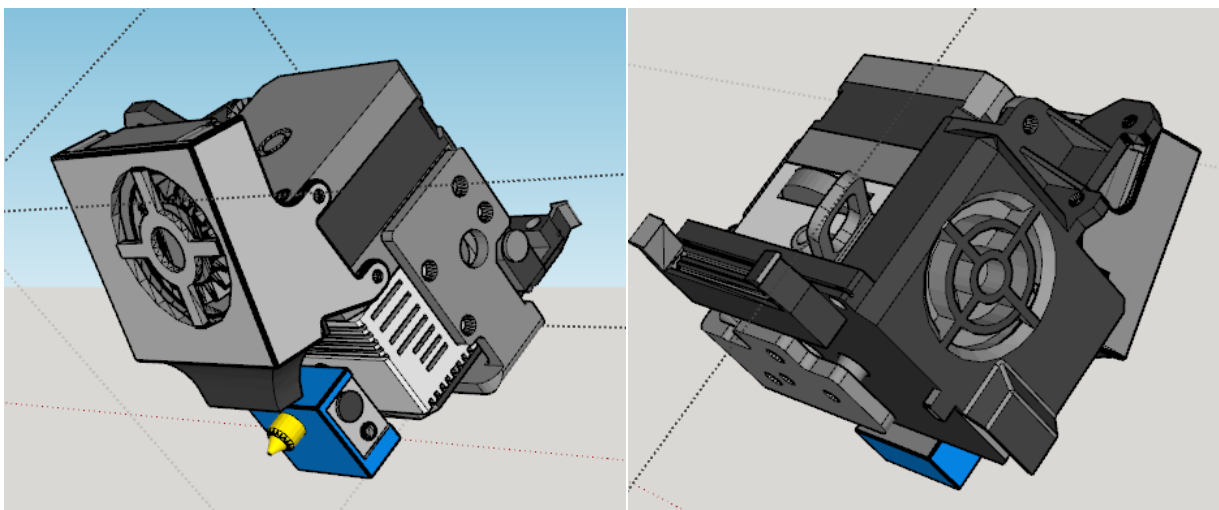


Рисунок 3.16 – Модель екструдера

Для спрощення подачі пластику до екструдера на верхню частину рами можна встановлювати котушку з філаментом, приклад на рисунку 3.17.

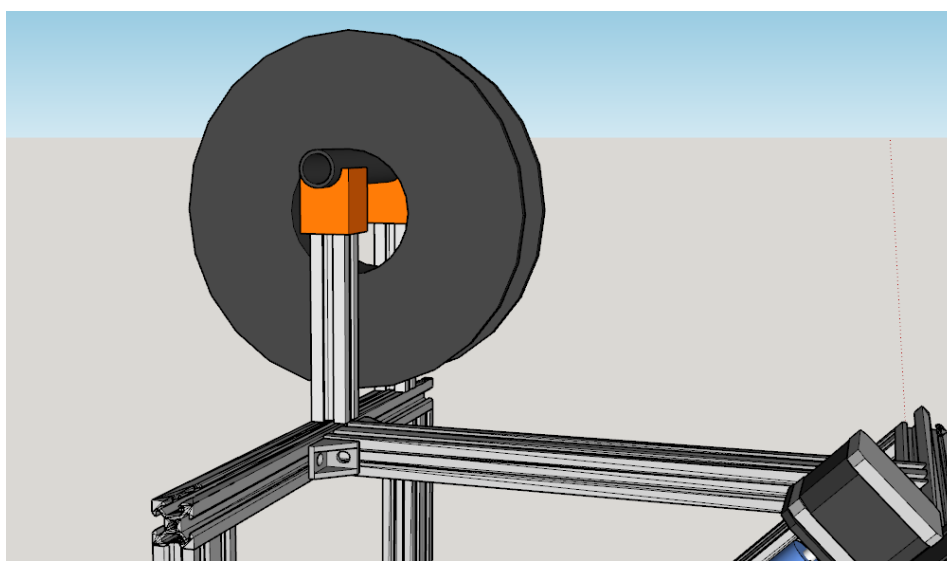


Рисунок 3.17 – Котушка з філаментом

Також для зміцнення механізму руху по осі Z, а саме різьбового валу, та зменшення вірогідності люфту при його обертах, була додана додаткова опорна конструкція з пластику та одного підшипника 22 мм зовнішнім та 8мм внутрішнім діаметром, яка зображена на рисунку 3.18.

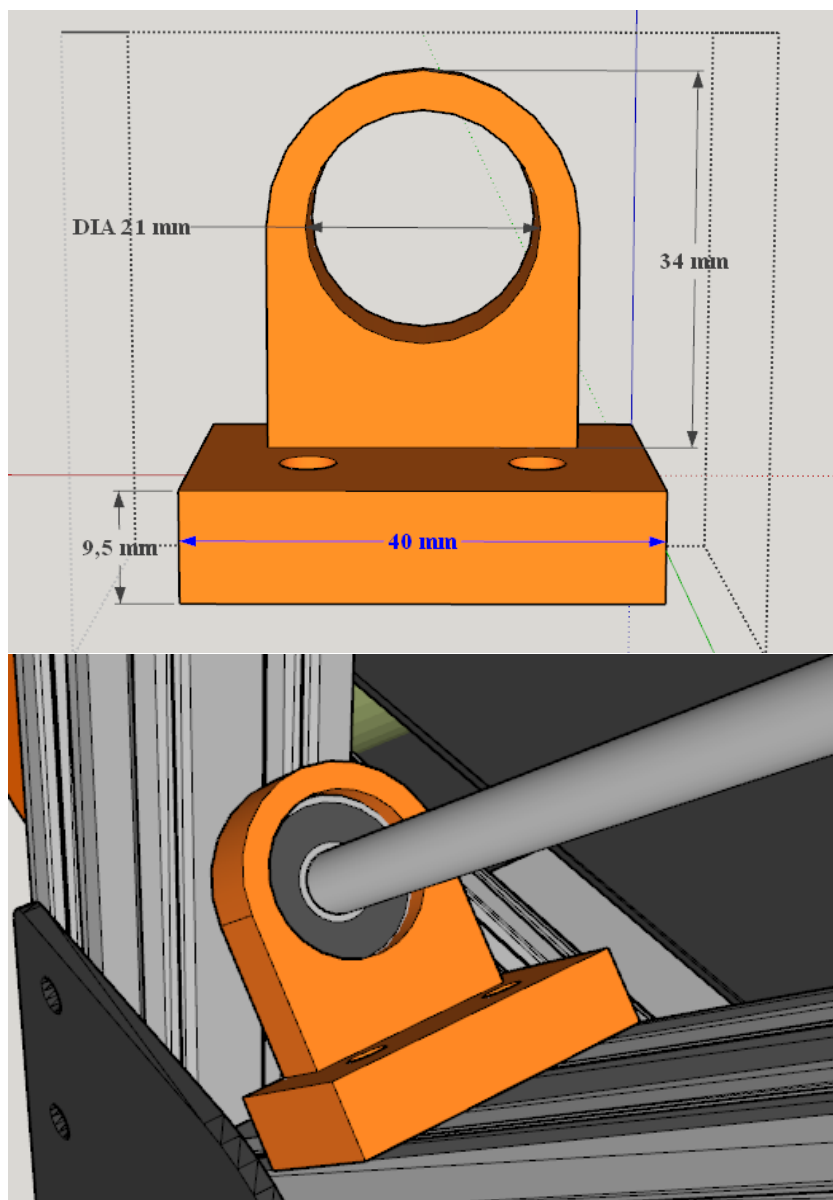


Рисунок 3.18 – Опорна конструкція для різбового валу

3.4 Налаштування електроніки принтеру та підключення плат

Задля прошивки принтера було вирішено взяти комбінацію плати Arduino Mega 2560 R3 та плати розширення RAMPS 1.4. Arduino Mega 2560 R3 є версією плати Arduino. Вона побудована на базі мікроконтролера ATmega2560. В якості USB-UART перетворювача використовується мікросхема ATmega16U2. Характеристика цієї плати наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристики плати Arduino Mega 2560 R3

Характеристика	Значення
Робоча напруга	5 В
Вхідна напруга (рекомендована)	7-12 В
Вхідна напруга (гранична)	6-20 В
Цифрові входи/виходи	54 (15 з яких можуть працювати також як виходи ШІМ)
Аналогові входи	16
Постійний струм через вхід/вихід	40 мА
Флеш пам'ять	256 кБ
ОЗУ	8 кБ
Тактова частота	16 МГц

Шилд RAMPS 1.4 – це плата розширення для плати Arduino Mega 2560, що дозволяє спростити будівництво електронної частини 3D принтера.

На платі RAMPS 1.4 вже розведені контакти для підключення крокових двигунів, драйверів для них, кінцевиків, нагрівальної платформи, нагрівача екструдера, термодатчиків, дисплея, карти пам'яті SD, місце для джамперів, що встановлюють різні режими мікрокроку і т.д. Для розуміння, схема підключення всіх цих елементів до Ramps 1.4 представлена на рисунку 3.19.

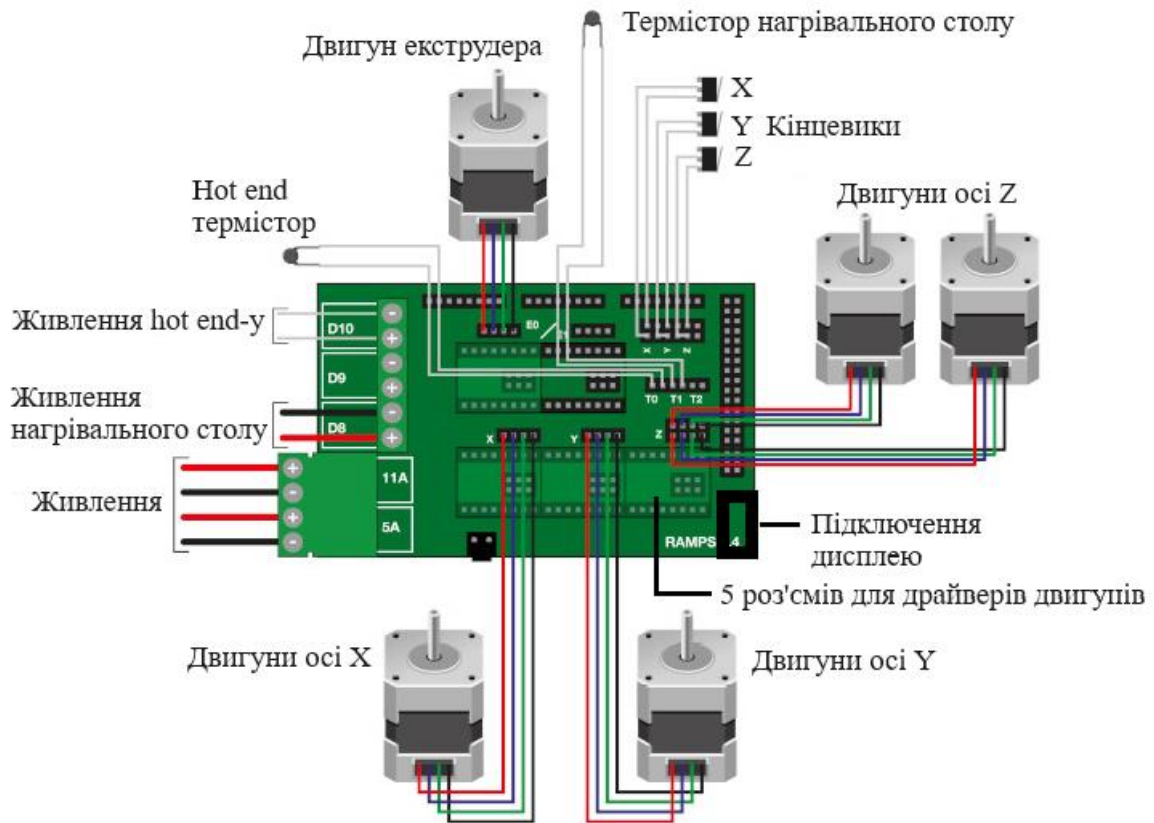


Рисунок 3.19 – Підключення елементів до Ramps 1.4

Усі двигуни підключаються по вище наведеній схемі, окрім двигуна осі Z, в нашій моделі він один. Важливим моментом є підключення драйверів двигунів. До Ramps 1.4 майже завжди підключають один із трьох варіантів: A4988, DRV8825 або TMC2226. Треба провести розрахунки щоб обрати один із цих варіантів. Розрахуємо потужність, яку має забезпечувати драйвер:

$$P_{driver} = V_{supply} \cdot I_{motor}, \quad (3.1)$$

де V_{supply} – напруга живлення;

I_{motor} – струм крокового двигуна = 1,7 А.

Для того щоб розрахувати напругу живлення нам треба обрати блок живлення який буде збігатися з усіма показниками. Перший показник це вихідна напруга. Так як для проекту була обрана комбінація Arduino Mega та Ramps 1.4, рекомендована вхідна напруга яких 7-12 В, нагрівальний стіл має

напругу 12 В, а екструдер хоч і має напругу 24 В, але hot-end може бути замінений на 12 В-ий, було вирішено обрати БЖ з вихідною напругою 12 В. Другий показник це вихідна сила струму. Для її розрахунку візьмемо формулу (3.2).

$$I_{total} = I_{motors} + I_{extr} + I_{bed} + I_{electr}, \quad (3.2)$$

де I_{motors} – споживання крокових двигунів (максимально);

I_{extr} – струм екструдеру;

I_{bed} – струм нагрівального столу;

I_{electr} – електроніка, в нашому випадку це дисплей та плати = 1,4 А.

Підставивши значення у формулу отримаємо вихідну силу струму:

$$I_{total} = 6,8 + 3,33 + 8 + 1,4 = 19,5 \text{ А.}$$

Обов'язково додаємо 30% запасу струму – $19,5 \cdot 1,3 = 25,35 \text{ А}$. Виходячи з цих розрахунків було обрано БЖ з металевим корпусом який зображений на рисунку 3.20, а його характеристики наведені нижче у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Характеристики блоку живлення

Характеристика	Значення
Вхідна напруга	220 В
Вихідна напруга	12 В
Вихідна сила струму	30 А
Потужність	360 Вт
ККД	більш ніж 80%
Робоча температура	від -10 °С до +70 °С
Клас захисту	IP20

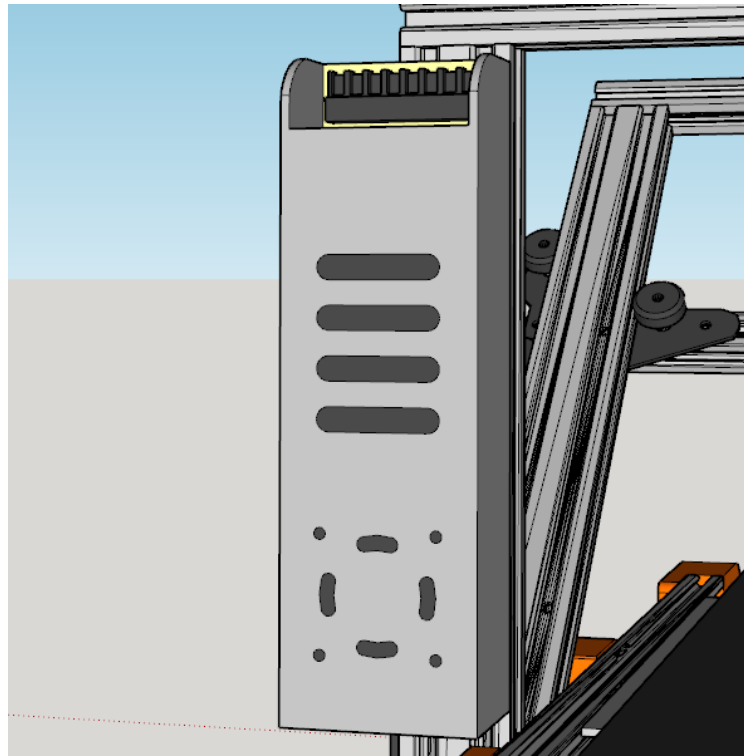


Рисунок 3.20 – БЖ встановлений на корпусі принтера

Повертаючись до формули (3.1) та підставивши знайдені значення, отримаємо потужність яку має забезпечувати драйвер, $P_{\text{driver}} = 20,4$ Вт. Виходячи з цього значення обираємо драйвер TMC2226. Він має дроблення кроку аж до $1/256$ та вважається тихим драйвером завдяки технології StealthChop, також автоматично знижує струм в режимі очікування. Обов'язково при встановленні драйверів на плату треба встановити мікрокроки за допомогою перемичок під драйверами. На рисунку 3.21 вказана нумерація роз'ємів, для підключення мікрокроку $1/2$ треба обрати номер 3, для $1/4$ номер 2, для $1/8$ номер 1 та 2, а для $1/16$ кроку треба обрати всі перемички. Двигун NEMA 17 має крок $1,8^\circ$, задля точнішої роботи оберемо варіант з $1/16$ розподілу кроку.

Драйвер TMC2226 використовує значення напруги на референсному піні (V_{ref}) для визначення максимального струму двигуна. Встановлюючи драйвер такого зразка на Ramps 1.4 треба відрегулювати це значення. За формулою (3.3) проведемо розрахунок:

$$V_{ref} = I_{max} \cdot R_{sense} \cdot \frac{1.41}{\sqrt{2}}, \quad (3.3)$$

де I_{max} – максимальне значення струму двигуна = 1,7 А;

R_{sense} – значення шунтового резистора на платі драйвера = 0,11 Ом.

Підставивши значення отримаємо $V_{ref} = 0,187$ В.

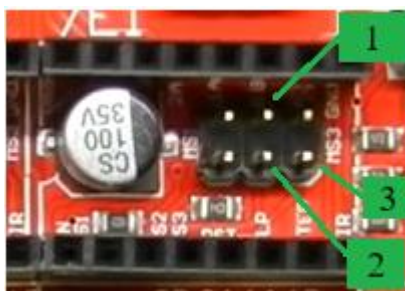


Рисунок 3.21 – Роз'єми для встановлення дроблення кроку

На рисунку 3.22 окремо показані Arduino Mega (2), Ramps 1.4 (1) з встановленими 4-ма драйверами та кріплення для цих плат (3).

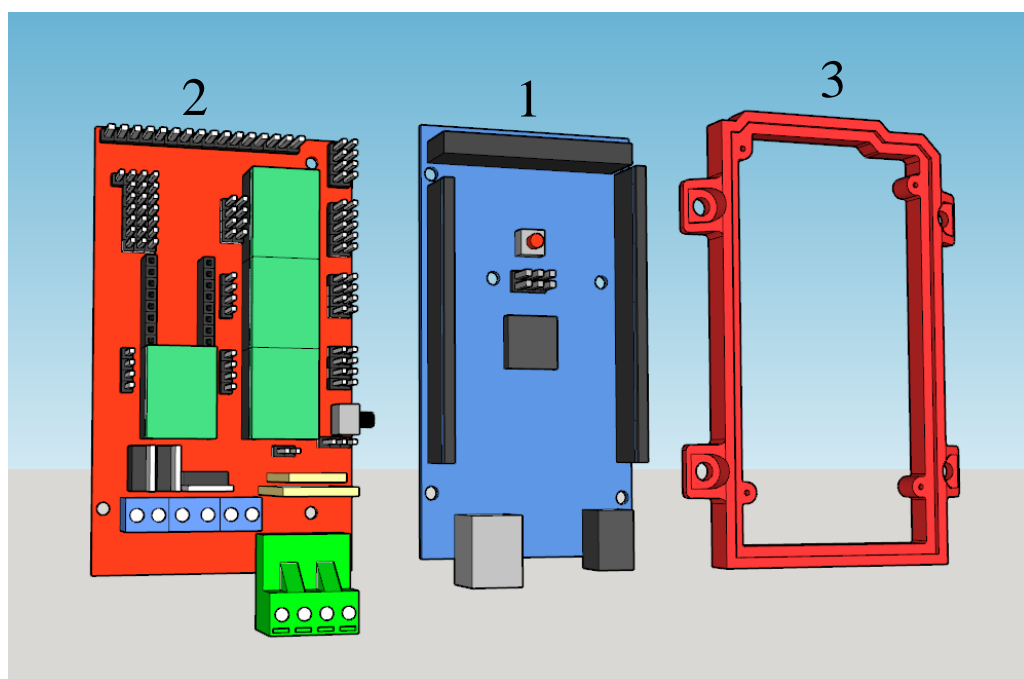


Рисунок 3.22 – Моделі плат у робочому середовищі SketchUp 2020

Також до моделі була додана панель керування з дисплеєм (рисунок 3.23), вбудованим роз'ємом для SD карти пам'яті, енкодер для навігації по меню, звуковий сигналізатор та кнопку екстреної зупинки друку. Така панель підключається до Ramps 1.4 через спеціальну плату перехідник, та 2 10-ти пінові шлейфи.

По осі X та Z були встановлені механічні кінцеві перемикачі (рисунок 3.24). А по осі Y встановлений один оптичний кінцевик зображений на рисунку 3.25. Він буде спрацьовувати, реагуючи на лінію, намальовану на конвеєрній стрічці. Такі кінцевики потрібні зокрема для визначення початку координат (0,0,0) по всіх трьох осях 3D принтера.

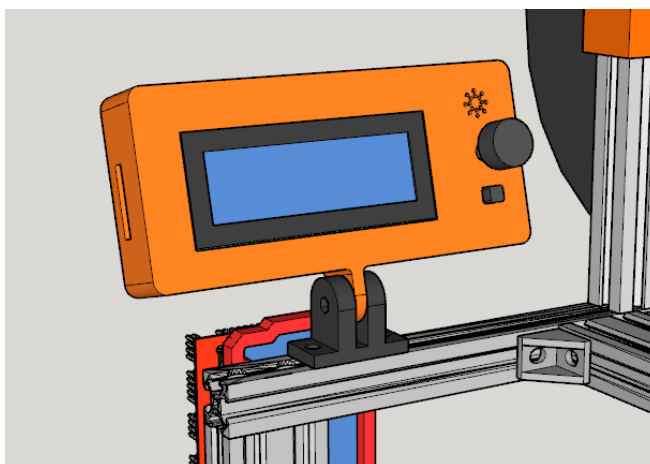


Рисунок 3.23 – Панель керування 2004 LCD для RAMPS 1.4

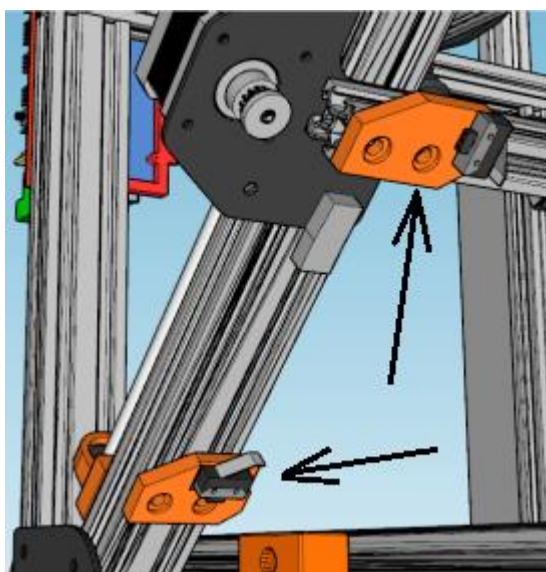


Рисунок 3.24 – Механічні кінцевики

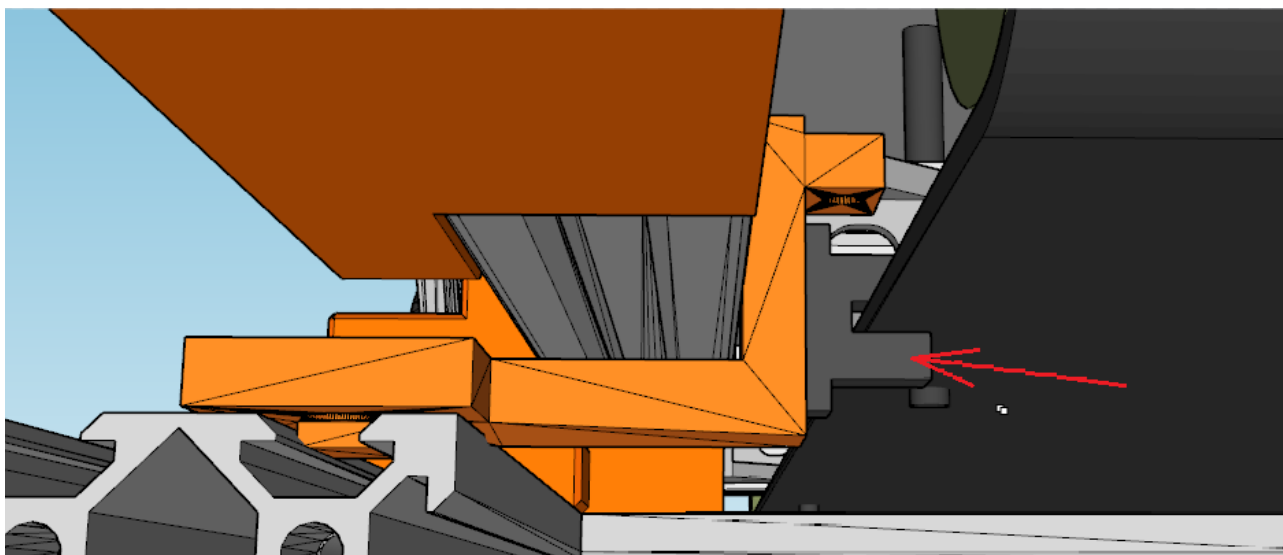


Рисунок 3.25 – Оптичний кінцевик осі Y (червона стрілка вказує на сканер)

Повна модель 3D конвеєрного принтеру зображена на рисунку 3.26.

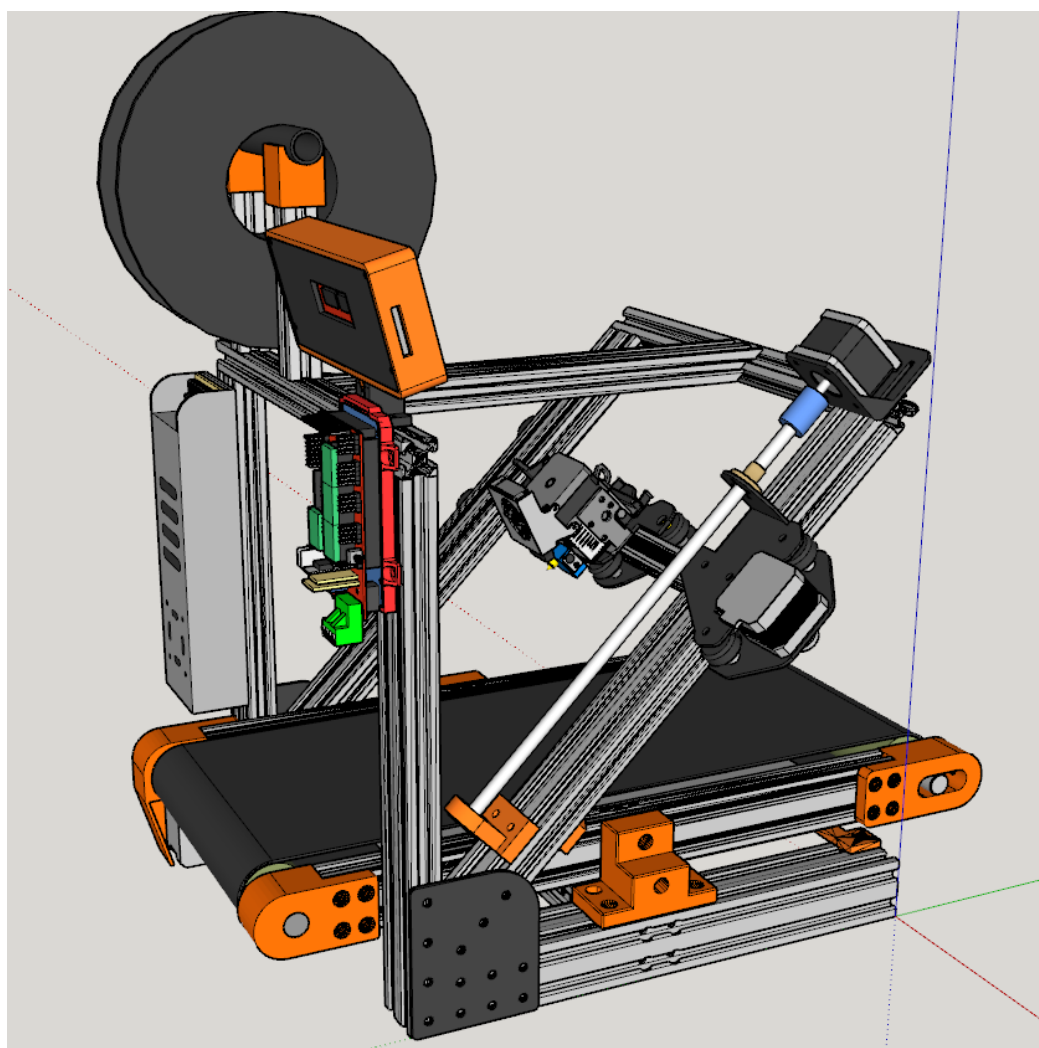


Рисунок 3.26 – Кінцева модель принтеру

3.5 Налаштування прошивки Marlin для плати Aduino Mega 2560 R3

Для встановлення Marlin треба завантажити архів з самою прошивкою та Arduino IDE. Після відкриття файлу прошивки в Arduino IDE треба змінити основні налаштування принтеру у вкладці "Configuration.h". Надалі будуть представлені рядки коду в які треба вносити зміни (за можливістю ці значення будуть підкреслені у тексті).

Перші три основні налаштування потрібні для правильного запуску прошивки:

– встановлюємо необхідну швидкість у бодах. Для кожної плати виробник рекомендує свої швидкості, тому для зв'язування Arduino mega 2560 та Ramps 1.4 необхідно поставити значення 115200 замість 250000:

(47 рядок коду) // This determines the communication speed of the printer #define BAUDRATE 115200;

– після встановлення швидкості в бодах, необхідно вказати плату управління, що використовується, в нашому випадку це екструдер, обдув та нагрівальний стіл що дорівнює значенню BOARD_RAMPS_13_EFB:

(55 рядок коду) #define MOTHERBOARD BOARD_RAMPS_13_EFB;

– призначаємо назву для принтера:

(59 рядок коду) // #define CUSTOM_MENDEL_NAME "CONVPR_MAKS3D".

Далі треба вказати значення пов'язані з температурами різних приладів:

– перший і один із найголовніших показників температури, це вибір датчиків (термісторів) екструдера та нагрівального столу. Обраний був термістор на 100 кОм, у списку термісторів він позначений номером 1 (// 1 is 100k thermistor - best choice for EPCOS 100k (4.7k pullup)), отож міняємо значення у кодї з нуля на одиницю, де це потрібно (115-118 рядки коду):

```
#define TEMP_SENSOR_0 1
```

```
#define TEMP_SENSOR_1 0
```

```
#define TEMP_SENSOR_2 0
```

```
#define TEMP_SENSOR_BED 1
```

Одиниці підставлені напроти `#define TEMP_SENSOR_0`, бо цей рядок відповідає за термістор першого екструдера, та напроти `#define TEMP_SENSOR_BED`, відповідає за термістор нагрівального столу. Так як екструдер в нас один, залишаємо в інших рядках нулі;

– надалі треба зазначити максимальні температури, при досягненні яких, нагрівальні елементи будуть вимикатися. Максимальною температурою екструдера є 260 °С, нагрівального столу - 120 °С, це було вказано у коді (140-143 рядки коду):

```
#define HEATER_0_MAXTEMP 260
#define HEATER_1_MAXTEMP 275
#define HEATER_2_MAXTEMP 275
#define BED_MAXTEMP 120
```

Значення `HEATER_1` та `HEATER_2` залишаємо незмінними (275), або змінюємо на нуль;

– третім етапом треба зазначити мінімальну температуру екструдера, або захист від проштовхування не прогрітого пластику. Якщо температура екструдера буде нижче 180 °С, то двигун екструдера не буде обертатися і пластик не подаватиметься (рядок 230):

```
#define EXTRUDE_MINTEMP 180.
```

Дуже важливою зміною у коді є налаштування кінцевих вимикачів. У коді треба обрати які кінцевики використовуються, значення `true` якщо механічні, значення `false` якщо оптичні (301-306 рядки коду):

```
const bool X_MIN_ENDSTOP_INVERTING = true;
const bool Y_MIN_ENDSTOP_INVERTING = true;
const bool Z_MIN_ENDSTOP_INVERTING = false;
const bool X_MAX_ENDSTOP_INVERTING = true;
const bool Y_MAX_ENDSTOP_INVERTING = true;
const bool Z_MAX_ENDSTOP_INVERTING = false;
```

Після цього треба встановити значення "HOME", або ж нульові координати, для цього встановлюються мінімальні значення кінцевиків (рядки 337-339):

```
#define X_HOME_DIR -1
```

```
#define Y_HOME_DIR -1
```

```
#define Z_HOME_DIR -1
```

де "-1" це значення "MIN", а "1" це "MAX".

Наступним кроком йде встановлення габаритів переміщення, або робочої області (рядки 345-350):

```
#define X_MAX_POS 200
```

```
#define X_MIN_POS 0
```

```
#define Y_MAX_POS 1040
```

```
#define Y_MIN_POS 0
```

```
#define Z_MAX_POS 120
```

```
#define Z_MIN_POS 0
```

Найголовнішою зміною у прошивці є налаштування кроків переміщення за осями (рядок 490):

```
#define
```

```
DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {78.7402,78.7402,200.0*8/3,760*1.1}
```

У дужках через кому встановлюються значення, у прикладі вище перші два значення "78.7402" відповідають за осі X та Y, тобто двигун повинен зробити 78,7 кроків для переміщення каретки на 1 мм. Третє значення це переміщення по осі Z, четверте – кількість кроків двигуна щоб продавити 1мм філаменту.

Для розрахунку осей X та Y відомо що обрані двигуни моделі мають кут повороту на 1 крок – 1,8°, тобто на 360° це 200 обертів. Також при встановленні драйверів був обраний мікрокрок 1/16. По обом осям стоять зубчасті ремені GT-2 6 мм з кроком зуба 2 мм та шківів 6мм на 20 зубів. Так як двигуни, ремені та шківів по всій конструкції використовуються однакові, розрахуємо кроки переміщення для обох осей за формулою:

$$\text{Steps per mm} = \frac{S_{pr} \cdot S_m}{L \cdot P} = \frac{200 \cdot 16}{2 \cdot 20} = 80 \text{ кр/мм.}$$

Ось Z обертається за допомогою трапецієдного гвинта діаметром 8 мм із кроком 2 мм та західністю 1, виходячи з цього, значення = 1600 кр/мм. Значення кроків двигуна екструдера підбирається експериментально після першої прошивки принтеру. Внесемо зміни в код:

```
DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {80,80,200*16/2,760*1.1}.
```

Обмеження максимальної швидкості переміщення осями, рекомендується змінити значення з 500 на 200:

```
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {200, 200, 5, 25} // (mm/sec).
```

Налаштування прискорення переміщень по осях. Одним з важливих налаштувань є завдання прискорень для різних осей, оскільки через некоректне налаштування цього моменту часто бувають проблеми при друку, а саме зміщення шарів через пропуск кроків двигуна. Якщо поставити надто великі прискорення, то будуть пропуски. За замовчуванням у прошивці стоять значення:

```
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {9000,9000,100,10000}
```

```
#define DEFAULT_ACCELERATION 3000
```

```
#define DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION 3000
```

Для осей X та Y встановленні прискорення 9000 мм/с² і це є дуже багато. Для перших запусків рекомендується встановити значення в межах 1000-1500, та DEFAULT_ACCELERATION змінити на 1500:

```
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {1000,1000,100,10000}
```

```
#define DEFAULT_ACCELERATION 1500
```

```
#define DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION 1500.
```

Після всіх цих змін залишається лише залити прошивку та перевірити принтер на дієздатність.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Основні види робіт під час виконання атестаційної роботи виконувались на персональному комп'ютері. Тому у даному розділі розглянуті питання, що пов'язані із охороною праці при роботі за комп'ютером.

Шкідливими факторами при роботі на комп'ютері можуть бути такі:

- електромагнітні поля (ЕМП);
- акустичний шум;
- вібрації;
- аероіонний склад повітря;
- мікроклімат;
- освітленість;
- шкідливі речовини у повітрі;
- візуальні показники відеомоніторів;
- електробезпека;
- пожежна безпека.

Для обмеження негативного впливу на організм людини, рекомендується, щоб усі перелічені параметри лежали в межах допустимих значень.

Тимчасові допустимі рівні (ТДР) ЕМП, створюваних ПЕОМ на робочих місцях, не повинні перевищувати значень, представлених у таблиці 4.1. У таблиці 4.2. наведено засоби захисту від випромінювань оптичного діапазону та ЕМП ПЕОМ.

Допустимі рівні звукового тиску, створюваного ПЕОМ, не повинен перевищувати 50 дБа.

Конструкція використовуваного ПЕОМ забезпечує можливість повороту корпусу горизонтальній площині з фіксацією в заданому положенні для забезпечення фронтального спостереження екрана відеомонітора. Корпус ПЕОМ має матову поверхню і немає деталей, здатних створювати відблиски. Конструкція відеомонітора передбачає регулювання яскравості та контрастності.

Таблиця 4.1 – ТДР, що створювані ПЕОМ

Параметр		ТДР ЭМП
Напруженість електричного поля	у діапазоні частот 5 Гц ... 2 кГц	25 В/м
	у діапазоні частот 2 кГц ... 400 кГц	2,5 В/м
Щільність магнітного потоку	у діапазоні частот 5 Гц ... 2 кГц	250 нТл
	у діапазоні частот 2 кГц ... 400 кГц	25 нТл
Електростатичний потенціал екрану відеомонітора		500 В
Напруженість електростатичного поля		15 кВ/м

Таблиця 4.2 – Засоби захисту від випромінювань оптичного діапазону та ЕМП ПЕОМ

Засіб профілактики несприятливого впливу ПЕОМ	Профілактична дія, що виявляється
Приєкранні захисні фільтри для відеомоніторів	Знижують рівень напруженості електричного та електростатичного поля, підвищують контрастність зображення, зменшують відблиски.
Нейтралізатори електричних полів промислової частоти	Знижують рівень електричного поля промислової частоти (50 Гц)
Окуляри захисні зі спектральними фільтрами ЛЗ та НСФ	Профілактика комп'ютерного зорового синдрому, покращення візуальних показників відеомоніторів, підвищення працездатності, зниження зорової втоми

Концентрації шкідливих речовин, що виділяються ПЕОМ у повітря приміщень у процесі роботи, не перевищують гранично допустимих концентрацій (ГДК), встановлених для повітря робочої зони.

Вікна у приміщенні, де передбачається експлуатувати систему, спрямовані північ і захід. Усі віконні отвори обладнані жалюзі.

Площа на робоче місце користувачів ЕОМ повинна становити не менше 4,5 м². У цьому приміщенні площею 50 м² будуть розміщені робочі місця для п'яти осіб, що відповідає нормі.

Таблиця 4.3 – Допустимі візуальні параметри відеомонітора

Параметри	Допустимі значення
Яскравість білого поля	Не менше 35 кд/м ²
Нерівномірність яскравості робочого поля	Не більше $\pm 20 \%$
Контрастність (для монохромного режиму)	Не менше 3:1
Частота оновлення зображення	Не менше 60 Гц
Просторова нестабільність зображення (ненавмисні зміни положення фрагментів зображення на екрані)	Не більше $2 \times 1E(-4L)$, де L – проектна відстань спостереження, мм

За вимогами приміщення, де розміщуються робочі місця з ПЕОМ, повинні бути обладнані захисним заземленням (зануленням). Крім того, в приміщенні буде присутній перетворювач напруги (блок живлення), підключений до промислової мережі 380, що дає на виході 0..40 В.

У приміщенні повинні забезпечуватись оптимальні параметри мікроклімату для категорії робіт відповідно до чинних санітарно-епідеміологічних нормативів мікроклімату виробничих приміщень.

Робочі столи в приміщенні слід розміщувати таким чином, щоб відеодисплейні термінали (ВДТ) були орієнтовані бічною стороною до світлових прорізів, щоб природне світло падало переважно зліва.

Штучне освітлення у приміщеннях здійснюватиметься системою загального рівномірного освітлення. Освітленість, яскравість, блискітність, розподіл яскравості регулюються.

Як штучні джерела світла будуть застосовуватися люмінесцентні лампи з розсіювачами або решітками, що екранують, укомплектовані електронними пуско-регулюючими апаратами. Загальне освітлення має бути виконане у

вигляді суцільних або уривчастих ліній світильників, розташованих локалізовано над робочим столом ближче до його переднього краю, зверненого до оператора.

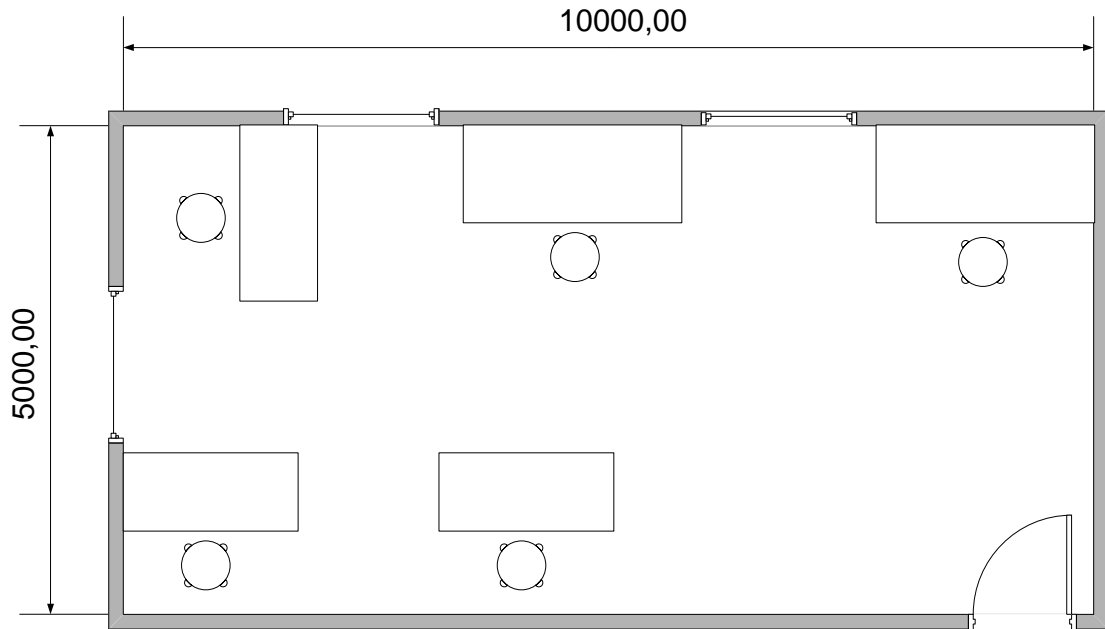


Рисунок 4.1 – План приміщення

Коефіцієнт запасу для освітлювальних установок загального освітлення прийнято дорівнює 1,4. Коефіцієнт пульсації не повинен перевищувати 5 %.

Для забезпечення нормованих значень освітленості в приміщеннях для використання ПЕОМ слід проводити чистку шибок віконних рам і світильників не рідше двох разів на рік і проводити своєчасну заміну ламп, що перегоріли.

Відстань між робочими столами з відеомоніторами (у напрямку тилу поверхні одного відеомонітора та екрана іншого відеомонітора) має бути не менше 2,0 м, а відстань між бічними поверхнями відеомоніторів – не менше 1,2 м. Екран відеомонітора повинен знаходитись від очей користувача на відстані 600 мм – 700 мм, але не ближче 500 мм з урахуванням розмірів алфавітно-цифрових знаків та символів. Конструкція робочого стільця (крісла) повинна забезпечувати підтримку раціональної робочої пози під час роботи на ПЕОМ, дозволяти змінювати позу з метою зниження статичного напруги м'язів шийно-

плечової області та спини попередження розвитку втоми. Для плану, зображеного на рисунку 4.1, ці вимоги можна здійснити.

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи був проведений аналіз актуальності 3D друку за технологією FFF/FDM, що дозволило зрозуміти актуальність конвеєрного 3D принтеру, який втілює ідею конвеєрного виробництва 3D моделей із пластику, а також крупно габаритних деталей.

Були розглянуті види кінематик для 3D друку, та різні елементи 3D принтерів, такі як: екструдери, двигуни, драйвери двигунів, плати. Розглянута різниця між ними.

Проаналізувавши ТЗ отримали план робіт та конструкцій. Після аналізу була розроблена кінематика для проекту, з урахування всіх вимог ТЗ. Обрані всі потрібні елементи для реального макету принтера, та розрахована його приблизна вартість.

Були обрані двигуни, для моделі та розраховані його передавальні функції. У середовищі SketchUp2020 були розроблені всі частини 3D моделі принтера, а саме рама та системи руху по осям X, Y, Z. Була обрана та налаштована електроніка та прошивка Marlin.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, С.П. Новоселов, О.В Сичова. – Харків: ХНУРЕ, 2022. – 55 с.
3. Різновиди кінематик FFF/FDM 3D-принтерів [Електроний ресурс] /- Режим доступу: www / URL: <https://3d-diy.com/wiki/3d-printery/raznovidnosti-kinematik-fdm-3d-printerov/>
4. Матеріали для 3D-друку: типи, способи застосування та властивості [Електроний ресурс] /- Режим доступу: www / URL: <https://artline.ua/uk/blogs/obzor-vsekh-vidov-filamenta-dlya-3d-pechati/>
5. Необмежений, або конвеєрний 3D-друк [Електроний ресурс] /- Режим доступу: www / URL: <https://3ddevice.com.ua/ru/blog/3d-printer-obzory/rabota-3d-printera-blackbelt-3d/>
6. 3D друк. Практичний посібник / Редвуд Бен, Гаррат Браян, шофер Філімон. – М.: ДМК-Прес, 2020. – 220 с.
7. Адитивне виробництво (3D-друк): огляд матеріалів, методів, застосувань та проблем / Т. НГО, А. Кашані, Г. Імбальцано, К. Нгуєн, Д Хуї, 2018. – стор. 172-196.
8. Manapat J, Chen Q, Ye P, Advincula R (2017) 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography. *Macromol Mater Eng* 302:1600553
9. Замкнені ремені GT-2 [Електроний ресурс] /- Режим доступу: www / URL: <https://uareprap.store/belt-mechanics/belt-2gt>

10. Кроковий двигун NEMA 17, опис, характеристики 34мм [Електроний ресурс] /- Режим доступу: www / URL: https://uareprap.store/cnc-parts?product_id=264

11. ABS пластик [Електроний ресурс] / Режим доступу: <https://3dua.com.ua/abs-plastik>– 10.05.2021. – Загол. з екрану.

12. 3D-друк з нуля [Електроний ресурс] / Режим доступу: <https://books.google.com.ua/books?id=ZPjqDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=3%D0%B4+%> – Загол. з екрану.

13. Основи виробництва електронних апаратів [Текст] / Невлюдов І. Ш. – Харків: ХНУРЕ, 2005. – С. 7 – 16.

14. 3D-друк з нуля [Електроний ресурс] / Режим доступу: <https://books.google.com.ua/books?id=ZPjqDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=3%D0%B4+%> – Загол. з екрану.

15. Оновлення та налаштування ПЗ 3D принтера [Електроний ресурс] / Режим доступу: <https://hobbytech.com.ua/marlin/>