

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

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

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

другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

Моделювання впливу параметрів точності 3D-принтеру H-BOT з модифікацією  
changing tool на якісні показники друку

(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи КТРСм-20-1

Боклаг Д.К.

Спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-  
інтегровані технології

Тип програми Освітньо-професійна

Керівник доц. Разумов-Фризюк Є. А.

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАМ

(підпис)

Невлюдов І.Ш.  
(прізвище, ініціали)

2021р.

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми	Освітньо-професійна
Освітня програма	Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки
	Комп'ютеризовані та робототехнічні системи

« \_\_\_\_\_ » 2021 г.

#### 4.9 Додатки:

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Демонстраційний матеріал представлений у виді презентації PowerPoint(\*ppt)

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	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз конструкцій 3D-принтерів, що дозволяють одночасно використовувати декілька матеріалів	05.11.21	виконав
2	Аналіз вимог технічного завдання	10.11.21	виконав
3	Розробка системи changing tool	24.11.21	виконав
4	Збірка механічної частини 3D-принтеру H-BOT	28.11.21	виконав
5	Розробка моделі та впливу параметрів	01.12.21	виконав
6	Оформлення пояснювальної записки	02.12.21	виконав
7	Перевірка керівником роботи	02.12.21	виконав
8	Нормоконтроль		
9	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichек		
10	Подання роботи на рецензію		
11	Подання роботи на підпис зав. кафедри		
12	Подання атестаційної роботи в ЕК		

Дата видачі завдання 05.11.2021 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Боклаг Д.К.

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доцент Разумов-Фризюк Є. А.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 80 с., 1 табл., 61 рис., 19 джерел

3D-ДРУК, ТЕХНОЛОГІЧНЕ РІШЕННЯ, ПЛАСТИК, 3D-ПРИНТЕР, МОДЕЛЬ, КІНЕМАТИКА.

Предмет дослідження – технологія 3D-друку.

Об'єкт дослідження – технологічне рішення changing tool в 3D-принтері з кінематикою H-BOT.

Метою магістерської роботи – розробка системи одночасного 3D-друку декількома матеріалами.

В ході виконання кваліфікаційної роботи було проаналізовано технологічні рішення які мають змогу друкувати декілька матеріалами, та існуючі кінематики 3D-принтерів сумісні для модифікації changing tool.

Розроблена 3D-модель технологічного рішення changing tool. Виконалося вдосконалення 3D-принтеру з кінематикою H-BOT під вимоги даного технологічного рішення. Проведено аналіз і моделювання необхідної точності захватного пристрою системи аналіз впливів точності changing tool.

## **ABSTRACT**

Explanatory note: 80 pages, 5 tables, 61 pictures, 19 sources.

3D-PRINTING, TECHNOLOGICAL SOLUTION, PLASTIC, 3D-PRINTER, MODEL, KINEMATICS.

The subject of research is 3D printing technology.

The object of research is a technological solution for changing tools in a 3D printer with H-BOT kinematics.

The purpose of the master's work is to develop a system of simultaneous 3D printing with several materials.

In the course of the qualification work, technological solutions that can print several materials were analyzed, and the existing kinematics of 3D printers are compatible for modifying the changing tool.

Developed 3D-model of technological solution changing tool. The 3D printer with H-BOT kinematics has been improved to meet the requirements of this technological solution. The analysis and modeling of the required accuracy of the gripping device of the system of analysis of the effects of the accuracy of the changing tool.

## ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки.....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз конструкцій 3D-принтерів, що дозволяють одночасно використовувати декілька матеріалів.....	12
1.1 Змішувачий екструдер DIMOND NORT.....	12
1.2 Два фіксованих екструдер CHIMERA.....	14
1.3 Hotend Switchel NOSEL .....	16
1.4 Система конструкції changing tool.....	18
1.5 Висновки до розділу.....	20
2 Вибір кінематики FDM/FFF 3D принтерів .....	21
2.1 FDM/FFF технологія .....	21
2.2 Кінематики Cartesian.....	25
2.3 Кінематика ULTIMAKER.....	26
2.4 Кінематика COREXY.....	28
2.5 Кінематика H-BOT.....	29
2.6 Висновки до розділу.....	31
3 Розробка та аналіз кінематики H-BOT.....	32
3.1 Аналіз особливостей кінематики H-BOT.....	32
3.2 Аналіз і вибір систем передач .....	38
3.3 Висновки до розділу.....	43
4 Розробка 3D-принтера H-BOT.....	44
4.1 Розробка корпусу .....	44
4.2 Розробка осі Z.....	45
4.3 Розробка осі Y.....	50
4.4 Розробка осі X.....	51
4.5 Висновки до розділу.....	52
5 Розробка конструкцій системи changing tool .....	53

5.1 Розробка 3-D моделі системи changing tool .....	53
5.2 Вибір компонентів .....	55
5.3 Виготовлення компонентів .....	58
5.4 Висновки до розділу.....	59
6 Складання механічної частини принтера .....	60
6.1 Поетапна збірка механічної частини 3D-принтеру .....	60
6.2 Висновки до розділу .....	63
7 Аналіз і моделювання необхідної точності захватного пристрою системи changing tool.....	64
7.1 Аналіз процесу самоцентрування.....	64
7.2 Розрахунок та геометричне моделювання відхилень.....	68
7.3 Висновки до розділу .....	72
8 Охорона праці.....	73
Висновки .....	76
Перелік посилань.....	77
Додатки.....	79

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

коПЕТ – поліетилентерефталат сополімер

КПО – коефіцієнт природного освітлення

ПВА – полівинилацетат

ПЛА – полілактид

ТПУ – термопластичний поліуретан

ШГП – шарико-гвинтова передача

FDM – Fused Deposition Modeling

FFF – Fused Filament Fabrication

3D – 3 Directions



## ВСТУП

Технологія тривимірного друку з кожним роком становиться популярнішою та доступнішою. Технологія 3D друкування вже сьогодні зікала свою актуальність в багатьох сферах таких як: медицина, будівництво, промислове прототипування та в багатьох інших галузях. Важко переоцінити універсальність технології, за допомогою які вже сьогодні ми отримали можливість створювати невеликі фрагменти печінки та інших органів, з кожним роком таких прикладів в сучасній медицині становиться ще більше. Треба зауважити що 3D принтери створили, революцію і в інших галузях, наприклад в будівництві, завдяки можливості масштабувати принтер, які здатні будувати цілі будинки.

На сьогоднішній день, розповсюдженою технологією є метод видавлювання розплавленого матеріалу тобто екструзії. Ця технологія отримала назву Fused Deposition Modeling. Головна особливість даною технології полягає в тому, що об'єкт формується шляхом нанесення розплавленого матеріалу, заздалегідь встановленим алгоритмом. Область використання 3D-друку постійно розширюється, так як вдосконалюються методи друку, використовуються нові матеріали, збільшується точність міцність отриманих об'єктів. В той же час самі 3D-принтери становляться доступніші і простіші.

Предмет дослідження – технологія 3D-друку.

Об'єкт дослідження – технологічне рішення changing tool в 3D-принтеру з кінематикою H-BOT.

Метою магістерської роботи – розробка технологічного рішення які надає можливість друкувати різними філаментами в процесі друку.

В зв'язку з активним розвитком 3D-друку в сучасному світі, з кожним днем з'являються нові види модернізації принтеру котрі покращують показники друку та збільшують можливості 3D-принтеру. Попит на друк декілька матеріалами з кожним днем росте, з'являються нові технології для вирішення цього питання.

Використання системи для друкування багатьма матеріалами дають змогу надрукувати модель, яка складається з різних пластиків чи додаткових допоміжних конструкцій, набагато швидше і якісніше. Можливість надрукувати модель з мінімальною кількістю відходів, та значно заощадивши ваш час та ваші гроші. Саме тому розробка технологічного рішення для друку декілька матеріалами *changing tool* є актуальною та сучасною задачею.

Технології що дозволяють друкувати одночасно декілька матеріалами відносно нова, та не отримала належної популярності. На сьогоднішній день технологічні рішення, що дозволяють використовувати декілька матеріалів в процесі друку мають низку переваги:

- велика кількість технологій;
- великий ціновий діапазон;
- зменшення часу друку;
- простий у використанні.

В свою чергу технологічні рішення мають деякі недоліки:

- потреба обробки моделей після друку;
- складність в налаштуванні.

Система *changing tool* є дуже універсальною, вона вирішує усі потреби в друку декілька матеріалами. *Changing tool* складається з захватного механізму та ефектора екструдера, системи подачі та системи переміщення. Для повноцінного функціонування системи *Changing tool* потрібно дотримуватися певних умов, таких як: велику жорсткість конструкції принтера, точність розташування складових та їх установки, надійність та якість комплектуючих.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз літератури;
- проаналізувати існуючі системи багатокольоровими друком;
- провести аналіз кінематик сумісних до системи *changing tool*;
- розробити модель 3D-принтеру;
- розробити систему *changing tool*;
- аналіз вибору матеріалів та компонентів;

- виготовлення компонентів;
- моделювання впливу параметрів точності модифікації changing tool;
- складання 3D-принтеру;
- складання системи changing tool;
- провести експериментальні дослідження.

Атестаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008:2015 [1], методичними вказівками та навчальним посібником [2].

## **1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ 3D-ПРИНТЕРІВ, ЩО ДОЗВОЛЯЮТЬ ОДНОЧАСНО ВИКОРИСТОВУВАТИ ДЕКІЛЬКА МАТЕРІАЛІВ**

### **1.1 Змішувачий екструдер DIMOND HOTEND**

Система для друку трьома різними кольорами під назвою Diamond Hotend. Ця технологія отримала таку назву саме через візуальну схожість з діамантом (рис. 1.1). Данну систему можна використати в будь-якому 3D принтері з подачею bowden. Diamond Hotend дає можливість друкувати трьома різними пластиками не міняючи пластик в друкувальній головці. Головною особливістю є можливість створювати новий колір, бо при використанні трьох кольорів: жовтого, голубого та пурпурного дозволяє отримати будь-який відтінок [4].



Рисунок 1.1 – Екструдер Diamond Hotend

Система Dimond Honted включає три незалежних керованих систем подачі філоментних ліній, що об'єднанні в одному сопло діаметром 0.4 мм. В самому соплі пластик нагрівається до температури здатної для дифузії декількох матеріалів, через те що подача пластика відбувається окремо один від одного, можна регулювати кількість конкретного пластика з тим чи іншим кольором та утворювати бажанні відтінки.

Для повноцінної роботи цією системою необхідно виготовити додатковий каркас, до якого буде кріпитися охолоджувач, тобто вентилятор. Зазвичай каркас друкується на самому 3-D принтері з надійного пластика, який витримує високу температуру. Повністю зібрана система Dimond Honted зображена на (рис. 1.2).

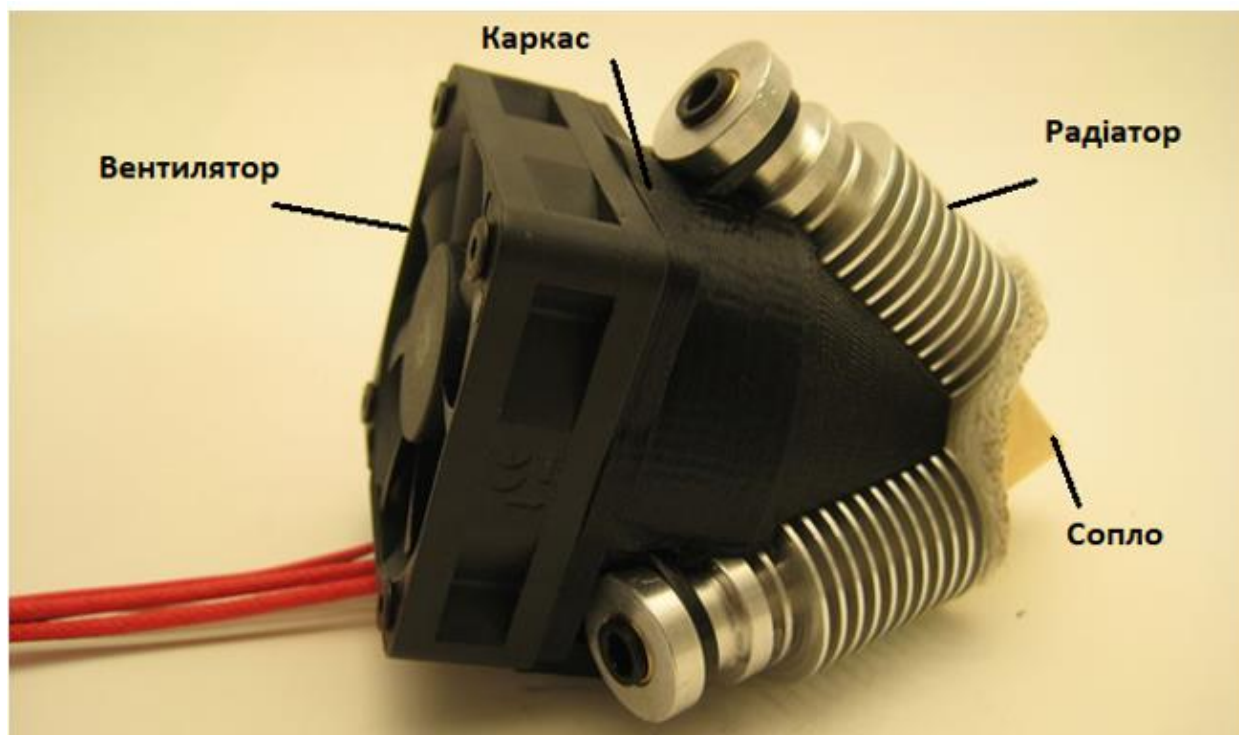


Рисунок 1.2 – Dimond Hotend

Головні переваги Dimond Hotend:

- задекларована можливість друку трьома різними пластиками або різними кольорами;
- можливість створювання нових відтінків;
- стандартне калібрування друкувальної головки [1].

Недоліки:

- для повноцінного функціонування системи необхідно виготовлення додаткового каркасу;
- програмне забезпечення яке підтримує друк моделі трьома кольорами представлено лише в PrusaSlicer;
- відсутність якісного перемішування пластику, отримання нових відтінків є номінальним, на виході ми отримуємо неоднорідний, неоднокольоровий пластик;
- наявність спільної подачі пластику, яка часто-густо забиває інші канали постачання пластику, утворюється пробка[5].

## 1.2 Два фіксованих екструдер CHIMER

Система Chimera Hotend для 3D принтера є простим і компактним способом модернізації двокольоровим друком. Сама конструкція складається з двох окремих сопел, у яких є своя індивідуальна температура нагріву для кожного пластику. Завдяки цьому, друк може вестися паралельно двома різними матеріалами або одним матеріалом але різних кольорів, забезпечуючи високий рівень друку. Це технологічне рішення дає можливість надрукувати модель різними кольорами не зупиняючи друк на заміну пластику. В свою чергу місце знаходження термобар'єрів можливо регулювати індивідуально один від одного, що робить встановлення систем Chimera Hotend простішим. Охолодження відбувається в даному пристрої завдяки алюмінієвого радіатору, який відрізняється високою ефективністю, а компактні розміри дозволяють легко знайти місце в конструкції принтера. В будові корпусу Chimera Hotend використовується алюміній, це дозволило значно знизити його вагу без зменшення міцності (рис 1.3).

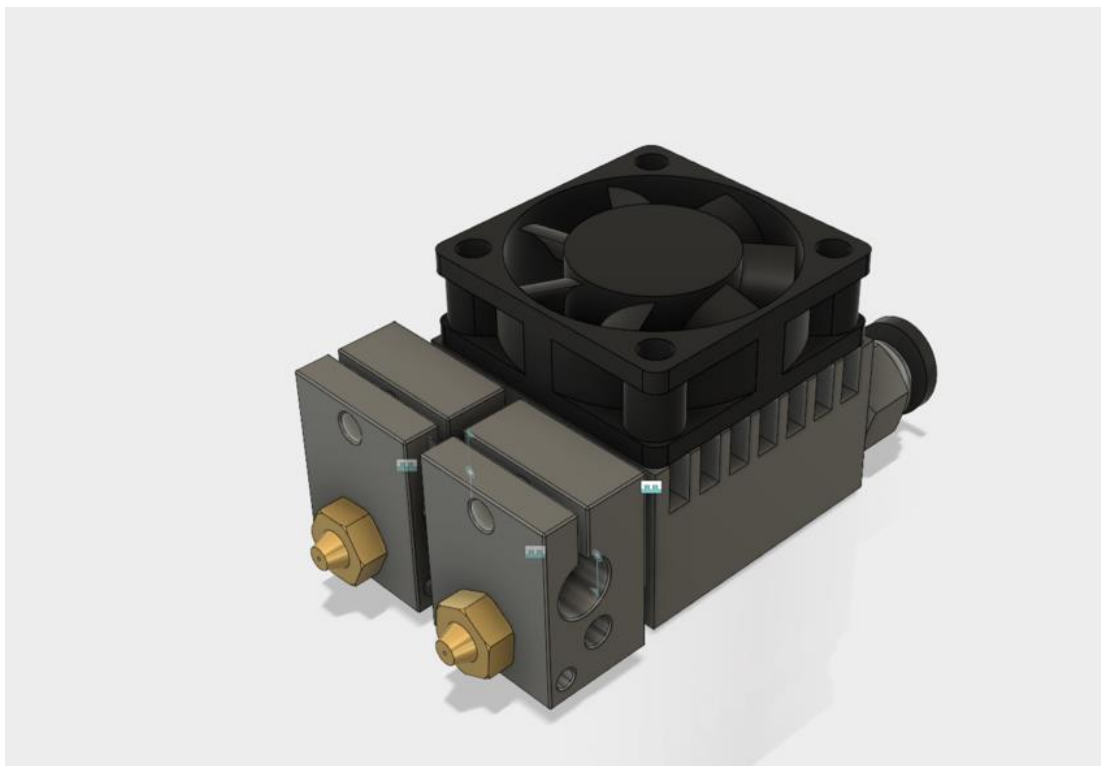


Рисунок 1.3 – 3D-модель Chimera Hotend

В даній моделі присутньо два окремих сопла які не дають таку різноманітність дій порівняно з DIMOND HOTEND, але в свою чергу він має менші габарити тому позитивно впливає на інерційну складову, що дозволяє друкувальній головці швидше переміщуватися та зменшує час друку, не впливаючи на якість надрукованої моделі [6].

Переваги Chimera Hotend:

- можливість друку двома соплами на одному екструдері;
- незалежні два сопла які функціонують окремо один від одного[2].

Недоліки:

- два сопла номінально фіксовані на одному рівні, використання неякісних компонентів приводить до зміщення сопіл, що потребую постійної калібровки;
- підтікання пластика з незадіяного сопла;
- деформація моделі другим непрацюючим соплом.

### 1.3 Hotend Switchel Nosel

Даний різновид подвійної друкувальної головки відрізняється своєю структурою. Два hotend головки встановлені під кутом один від одного, перемикання між головками відбувається завдяки серводвигуну з високим обертаючим моментом. Кожна друкувальна головка має свій окремий радіатор та систему охолодження у вигляді вентилятора. В даній конструкції подача пластика відбувається завдяки системі Bowden, тим самим не збільшуючи вагу каретки, даючи можливість швидше рухатись друкувальною головці, тим самим покращувати показники друку (рис 1.4).

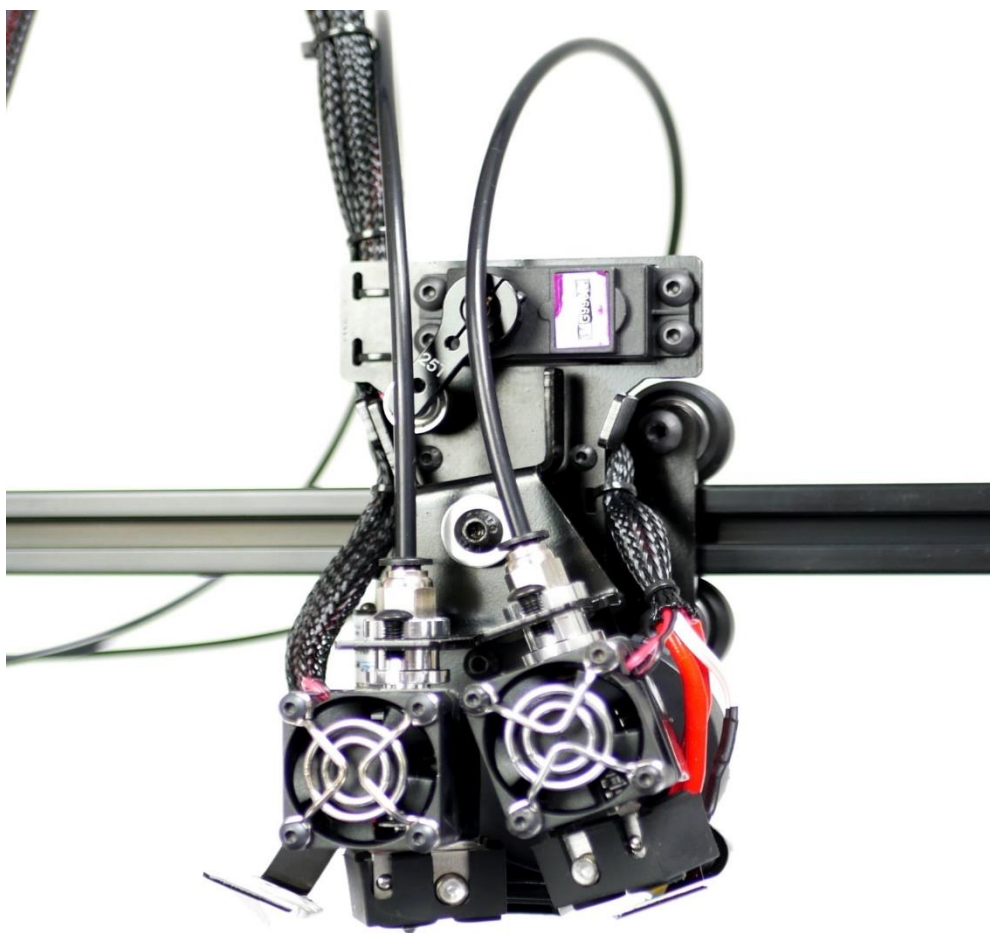


Рисунок 1.4 – Hotend Switchel NOSEL



Дане технологічне рішення обирається у випадках друку складних конструкцій де обов'язкове використання розчинних підтримок таких як ПВА. (рис 1.5).

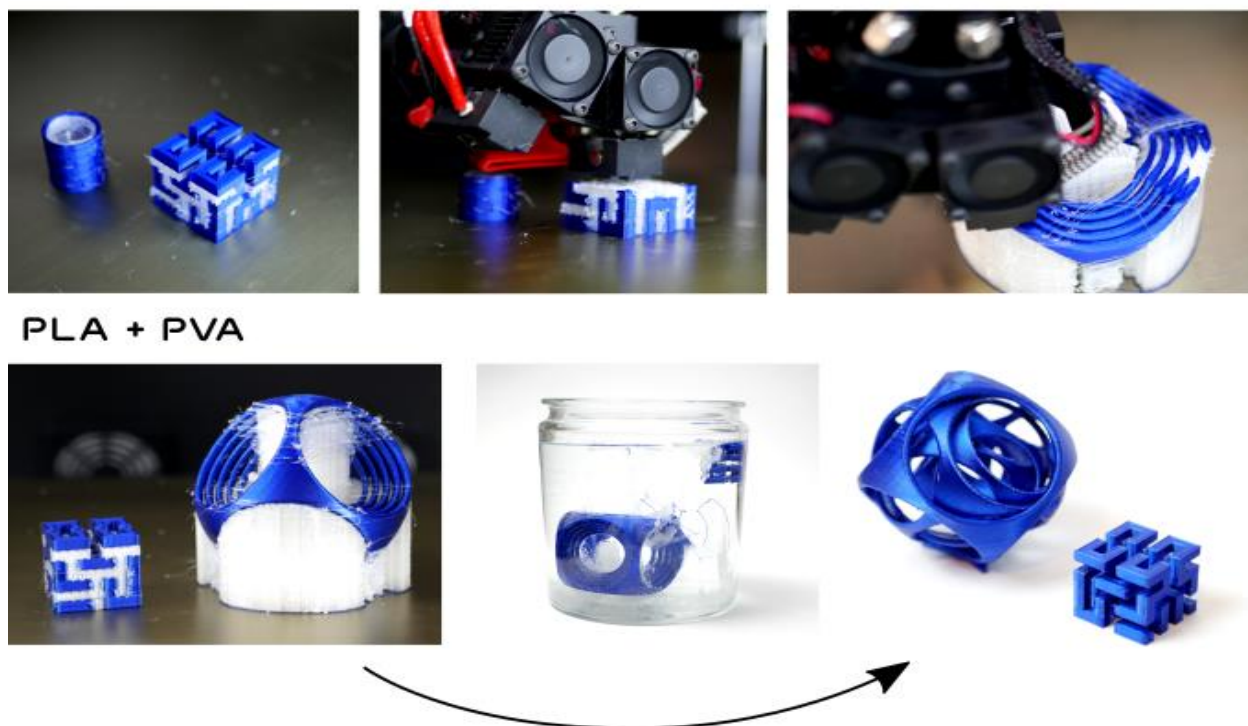


Рисунок 1.5 – Друк за допомогою розчинного підтримки

Також дуже зручно за допомогою Hotend Switchel NOSEL друкувати моделі з різними пластиками, наприклад ПЛА та ТПУ, де ПЛА є міцним та не гнучким, а TPU навпаки відіграє роль гнучкого елемента в даній моделі (рис 1.6).



Рисунок 1.6 – Надрукована модель пластиками PLA та TPU

Головні переваги Hotend Switchel NOSEL:

- відсутність підтікання з не працюючої головки;
- відсутня необхідність друкувати чернкової вежи;
- не працююче сопло не має змоги деформувати друкуючу модель

через своє положенні на екструдері

Недоліки:

- складність калібрування положення екструдерів;
- необхідність додатково налаштовувати процес перемикання екструдерів;
- за наявності поганої системи охолодження відбувається забивання подачі пластику.

#### 1.4 Система конструкції CHANGING TOOL

Changing tool представляє собою систему котра дозволяє використовувати декілька екструдерів, кількість екструдерів залежить на пряму від розмірів самого принтеру, зазвичай встановлюють від 4 змінних екструдерів і більше. Сама названа Changing tool з перекладу нам вказую про заміну інструмента, роль «інструмента» може відігравати друкувальні машинки, лазерний гравер, чи будь-які ЧПУ інструменти, тим самим дає можливість модернізувати звичайний 3D-принтер в багатофункціональний пристрій. Зазвичай, щоб використовувати цю систему лазерних граверів необхідні більш великі потужності двигунів та більш міцніші компоненти системи, тому ця технологія в більшості використовується для 3D-друку різними матеріалами та кольорами.

Принцип роботи даної технологічного рішення полягає в тому, що механізм захвату екструдерних головок знаходиться на каретці (рис. 1.7).

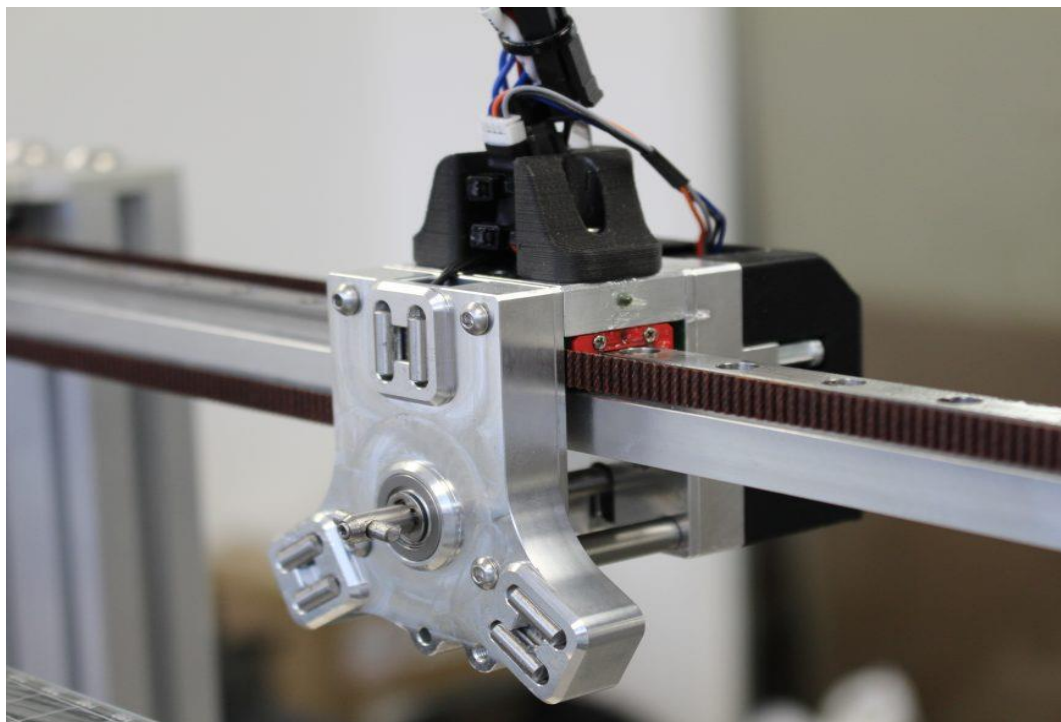


Рисунок 1.7 – Каретка з захватним механізмом

Самі екструдерні головки фіксуються на каркасі 3D-принтеру. На кожній головці знаходяться механізм замикання. В необхідний момент каретка під'їжджає до потрібної екструдерної головки, та захватує необхідний нам екструдер. В подальшому здійснюється друкування, при потребі друку іншим матеріалом або іншим кольором, каретка повертає екструдер на своє початкове місце, та захватує інший екструдер.

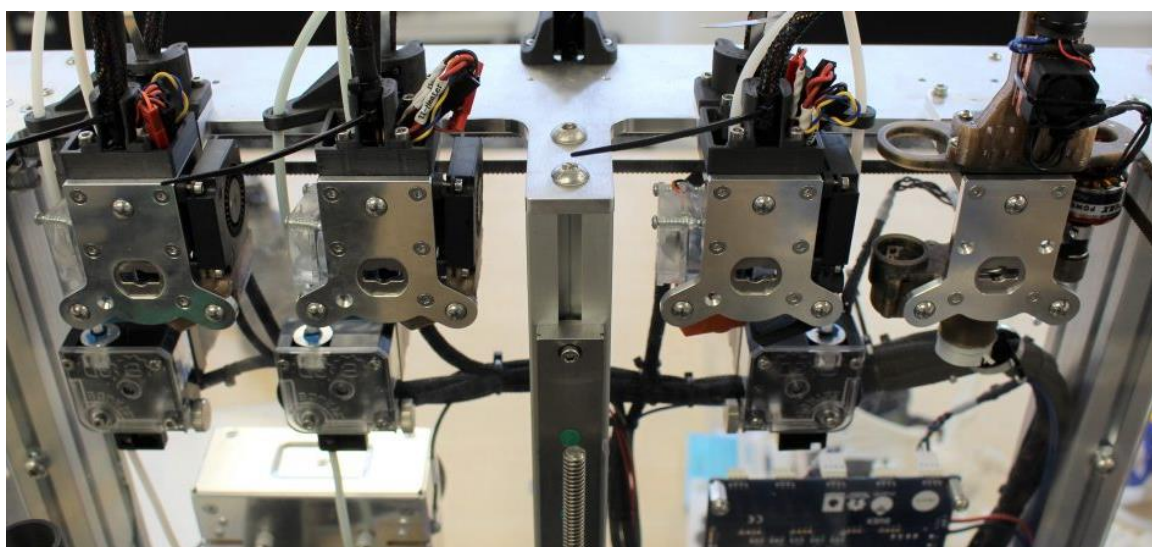


Рисунок 1.8 – Друкувальні головки з механізмом замиканням

Треба зауважити що дана технологічне рішення підходить не для всіх FDM 3D-принтерів. Така модернізація можлива тільки в 3D-принтерах з кінематикою де каретка переміщується по осям X, Y, а стіл по осі Z. Такими кінематиками є: H-BOT, COREXY, ULTIMAKER.

Переваги:

- можливість друкування одночасно різними діаметрами сопел;
- можливість друку різними матеріалами та кольорами;
- відсутність підтікання матеріалів з інших екструдерів [3].

Недоліки:

- складність самої конструкції;
- складність автоматизації системи;
- велика вартість системи.

### 1.5 Висновки до розділу

В даному розділі було розглянуто технологічні рішення для FDM 3D-принтерів. Розглянуті нами конструкції мають свої переваги та недоліки, їхній функціонал в більшості випадках залежить від ціни. Якщо розглядати бюджетний варіант модернізації 3D-принтеру, друком різними кольорами, то можна обрати систему Hotend Switchel Nosel, він дає змогу друкувати двома різними матеріалами, конструкція є більш досконалою, через відсутність підтікання пластику з неробочого сопла, але в той же час, ця система обмежена використанням двома видами пластику, тому в своєму ціновому сегменті він є раціональним вибором. Якщо розглянути більш надійну та багатофункціональну систему, котра дає можливість використовувати до 5 видів пластику в процесі друку, то під ці критерії краще за всього нам підходить система Changing tool. Це технологічне рішення надає нам більший спектр можливостей, вирізняється своєю надійністю та якістю друку, але в свою чергу її вартість набагато більша, порівняно з іншими системами.

## 2 ВИБІР КІНЕМАТИК FDM/FFF 3D-ПРИНТЕРІВ

### 2.1 Технологія друку FDM/FFF

FDM (Fused Deposition Modeling) – технологія методом поступового наплавлення. Дана технологія була розроблена Стівеном Скоттом Крапом в кінці 1980-х. Через декілька років, а саме у 1990 році, ця технологія 3D-друку була запатентована та вийшла на ринок 3D-принтерів. Саме цей рік вважається початком існування 3D-друкування.

FDM технологія представляє собою, процес адитивного виробництва, котрий реалізовується завдяки екструзії матеріалів. У FDM, побудова моделі відбувається методом нанесення шар за шаром розплавленого матеріалу заздалегідь встановленим алгоритмом. Найрозповсюдженими матеріалами для 3D-друку є термопластичні полімери котрі в свою чергу мають форму нитки там має діаметр 1.75 мм. [7].

Оскільки ця технологія є запровадженою та запатентованою, назва і як результат аббревіатура є власністю компанії Stratasys, яка заснована Стівеном Скоттом Крапом. Саме через ці фактори не має змоги безкоштовно використовувати цю технологію. Ці обставини змусили ентузіастів 3D - друкування, учасників проекту RepRap, вигадати законний спосіб, для обходу юридичних обмежень, утворили новий подібний термін Fused Filament Fabrication, тобто FFF.

Fused Filament Fabrication – виготовлення плавленої нитки, передусім цей термін є рівнозначним до терміну Fused Deposition Modeling, в середовищі 3D - друкування, ці два терміни є синонімічними. Раніше було згадано, що впровадили цю технологію, учасники проекту RepRap, який було започатковано в 2005 році. Головна мета цього проекту є в створення 3D-принтера, який зможе надрукувати необхідні компоненти для відтворення аналогічного 3D - принтеру.

Завдяки цим ентузіастам 3D-друку, ми маємо змогу вільно використовувати дану технологію, моделювання методом наплавлення [8].

Принцип роботи FDM/FFF 3D -принтеру починається з завантаження матеріала в принтер, тобто катушка з термопластичної нитки подається до друкувальної головки. Як тільки сопло досягне достатньої температури для екструзії термопластика, нитка подається до екструдера, а потім і до сопла, де і відбувається екструзія.

Розташування екструдера відбувається до кожної кінематики індивідуально, загалом можна сказати що екструдер прикріплений до трьох-осевої системи, яка дає змогу йому переміщуватися по осям X, Y і Z. Розплавлений термопластик поступово видавлюється у виді тонких ниток і наплавляється шар за шаром, наперед в визначених місцях, де в подальшому відбувається охолодження матеріалу і його затвердіння (рис. 2.1). Більшість власників 3D-принтерів прибігають до використання вентиляторів, котрі в свою чергу розміщені на екструдері. Використання вентилятору прискорює процес охолодження, та підвищують якість надрукованої моделі.

FDM/FFF принтери мають можливість регулювати параметри процесу друку, такі як: температура сопла та платформи, швидкість вентиляторів охолодження, висота шару.

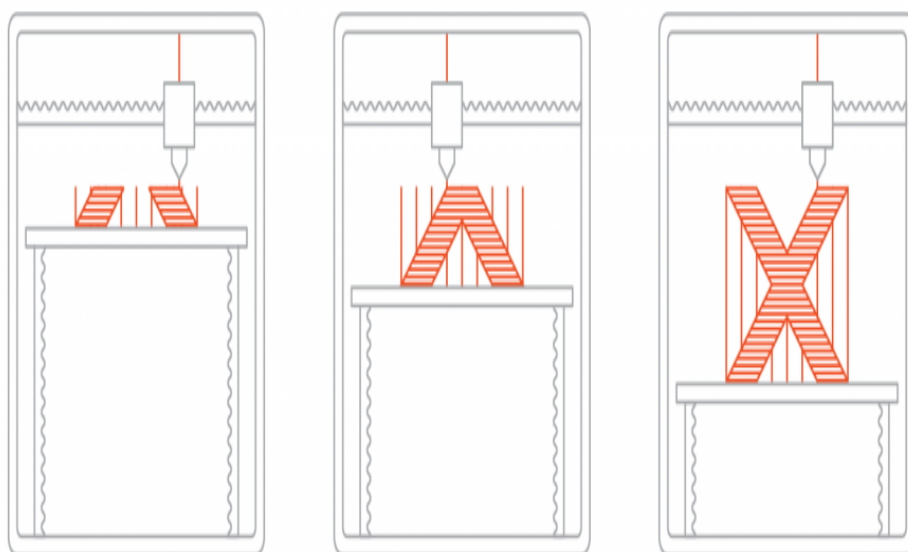


Рисунок 2.1 – Процес FDM/FFF друку



Деталі які надруковані за технологією FDM/FFF не друкуються повністю заповненими, щоб заощадити час друку, матеріал і самі кошти, прибігають до такого рішення. Зовнішній периметр утворюється завдяки декількох проходів п, так звана оболонка, а внутрішня частина заповнюється структурою малої щільності, так званим заповненням.

Щільність заповнення і товщина корпусу на пряму впливає на міцність деталі. В більшості випадках підходить щільність заповнення 25%, а товщина корпусу 0.1 мм (рис 2.2 а). Цей варіант можна назвати стандартним для швидкого друку, та в свою чергу він виступає компромісом між міцністю швидкістю [9].

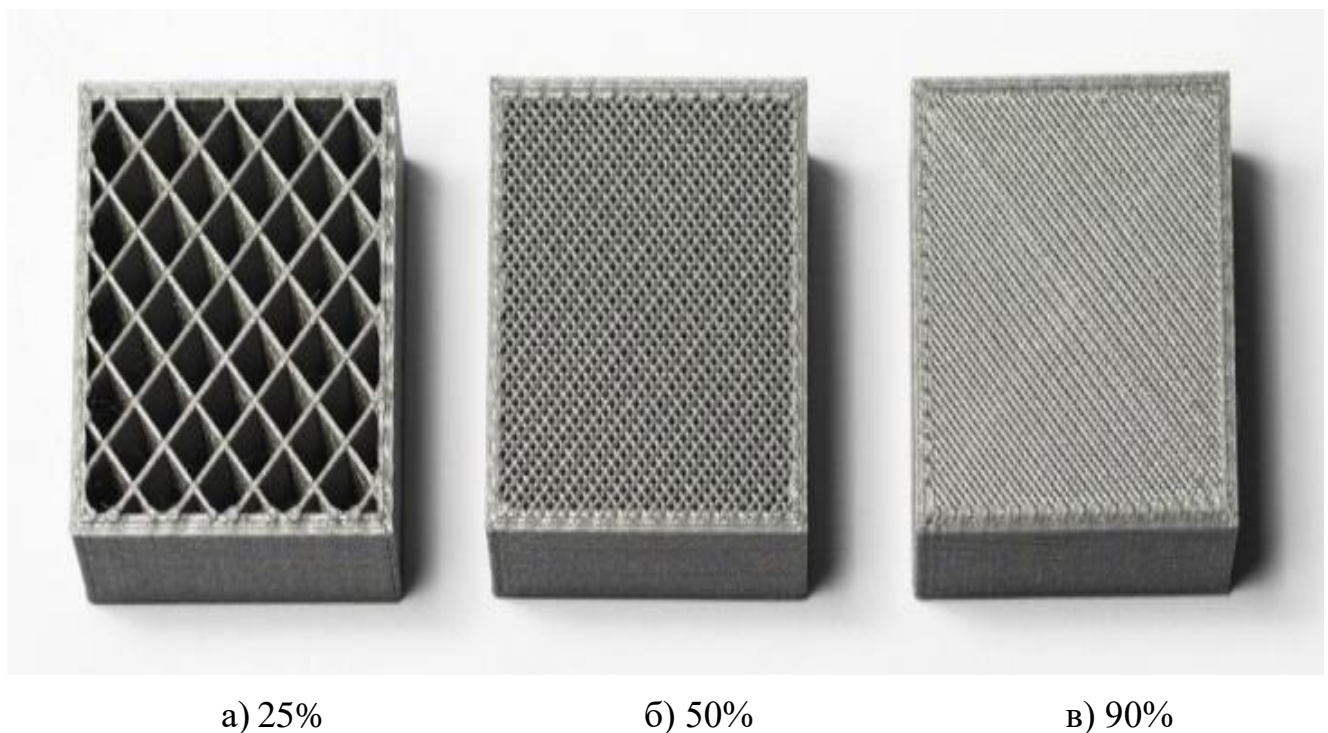


Рисунок 2.2 – Внутрішня геометрія деталей з різною ступінь заповнення

Переваги FDM/FFF технології:

– загальнодоступність. Цей вид 3D-друку в фінансовому плані є найбільш доступним, що в свою чергу пояснює високу популярність FDM/FFF 3D-принтерів, орієнтовано 90 відсотків усіх принтерів, які є в сучасному світі є FDM/FFF 3D-принтери;

- FDM-друк, є один із найзручніших видів виготовлення нестандартних деталей і прототипів із термопластика;

- співвідношення ціна якість. Зараз FDM-принтери мають відмінну якість і точність друку, тим самим спроможні похвалитися відмінною якістю відтворення об'єктів (з товщиною шару до 50 мкм) при відносно невисокій вартості;

- широкий вибір матеріалів. Асортимент термопластика складається більш ніж з 20 позицій, які відрізняються своїми властивостями. Найпоширенішими видами пластику є PLA та ABS, до інженерних матеріалів відносяться такі пластики такі як TPU и PET.

Недоліки:

- матеріали. Технологія 3D-друку FDM/FFF на даний момент може запропонувати виготовлення 3D-моделей лише термопластиками, використання інших матеріалів даною технологією на сьогоднішній день відсутня;

- точність друку. Раніше ми згадували що технологія FDM/FFF має гарні показники друку, від 20 мкм до 500 мкм. В той же час порівняно з іншими технологіями такими як SLA, SLM, DLP мають показники точності більшу, вона досягає до 10 мкм, в цьому показнику, технологія FDM/FFF програє іншим вище названим технологіям 3D-друку;

- постобробка. Тільки-но надрукована модель, може мати видимі лінії шарів, для візуального поліпшення кінцевого продукту необхідно виконати обробку моделі.

FDM/FFF, на сьогоднішній день це є найрозповсюдженішою технологією 3D-друку, вона займає найвищі місця в якості друку, та в той же час демонструє високі показники в швидкості друку. Фінансова складова є ключовою в поширенні даної технології. Саме через невелику вартість, технологія FDM/FFF дозволяє стати доступною для кожного. [6]. Це стає можливим як і для комерційних, промислових підприємств, так і для навчання в наукових закладах, чи просто для домашнього використання.



Сьогодні можна поділити 3D-принтери за багатьма відмінностями: швидкість друку, розміри робочого області, ціна тощо. Кожен має свої особливості, але найголовнішими відмінностями є кінематика. На сьогоднішній час можна виділити 4 принципово відмінних один від одних кінематик. Cartesian, Polar, Scara, Delta.

## 2.2 Кінематики Cartesian

Кінематика Cartesian. З англійської мови Cartesian перекладається як декартовий, тому можна зрозуміти, що мова йдеться саме про принтери на основі декартової системи координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . На сьогоднішній день це найпопулярнішим типом кінематики який зустрічається, саме тому що такі принтери мають величезну кількість варіацій, саме тому кожен бажаючий має можливість знайти той самий 3D-принтер під свої задачі [10]. Принтери на основі декартової систему координат, як ми згадували раніше, можна розрізняти за багатьма переліком параметрів. Ми будемо розглядати 3D-принтери котрі працюють в декартовій системі координат, але відрізняються способом переміщення друкувальної платформи та стола. Кількість видів обмежена, загально кількість складає 5 варіантів.

- друкувальна головка рухається по осі  $Z$  та одній із горизонтальних осей, тобто пара осей  $X$ - $Z$  або  $Y$ - $Z$ , в свою чергу платформа рухається по незайманій горизонтальній осі  $X$  або  $Y$ ;

- друкувальна головка рухається по осям  $X$  та  $Y$ , простими словами вправо-вліво, вперед-назад. Платформа в свою чергу рухається по осі  $Z$ , тобто вверх та вниз;

- друкувальна головка, тобто екструдер рухається по одній із горизонтальних осей  $X$  або  $Y$ . В свою чергу у платформи рух відбувається по осі  $Z$ , та ще по одній незайманій горизонтальній осі;

- екструдер переміщується одразу по всім трьом осям  $X$ ,  $Y$  та  $Z$ , в той же час платформа не рухається взагалі, вона завжди стала;

– друкувальна головка рухається по осі Z, в той же час у платформи рух відбувається по горизонтальним осям X та Y.

Друга схема вважається найрозповсюдженішою – коли екструдер рухається по двом горизонтальним осям X та Y, а платформа для друкування рухається по третій осі, ось Z [8].

Раніше ми згадували ще, для технологічного рішення CHANGING TOOL підходять не усі декартові кінематики, а лише вид де друкувальна платформа рухається по осі Z, а екструдер виконує рух по горизонтальним осям X та Y, тому розглянемо більше розгорнуто найпопулярніші кінематики цього виду[11].

### 2.3 Кінематика Ultimaker

Ultimaker – одна з найбільш популярніших варіацій Cartesian кінематики, екструдер рухається по осям X та Y (рис. 2.3), а рух друкувальної платформа відбувається по осі Z, тобто ця кінематика відноситься до другого типу.

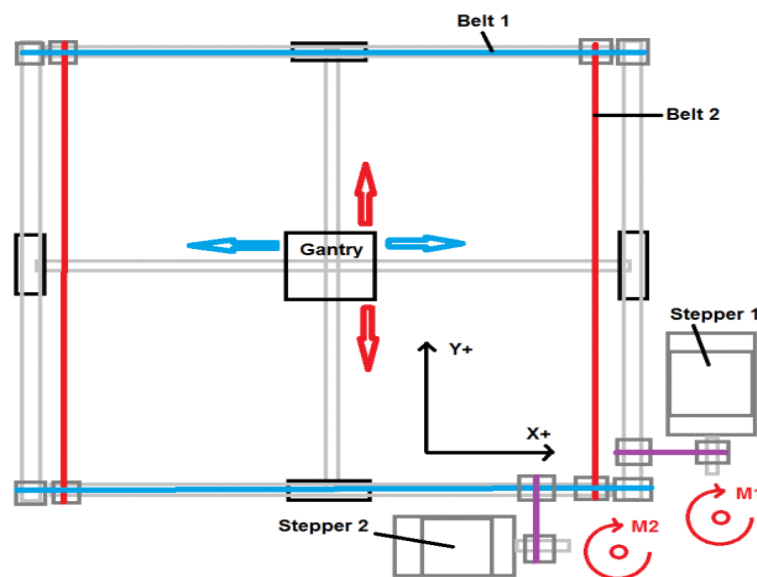


Рисунок 2.3 – Кінематика ULTIMAKER

Всі три осі X, Y та Z в даній кінематиці побудовані повністю на валах. В цьому випадку, вали виконують роль у той же час, як направляючі так і шківів. Так як, побудова даної кінематики повністю складається з валів, саме тому характеристика якості друку максимально чутлива до якості і точності збірки у разі недотримання точності збірки до міліметрів, можуть привести к поганим наслідкам [12]. В цьому випадку ціни на принтери з кінематикою ULTIMAKER напряду залежить від якості її комплектуючих, пріоритетними є саме вали. В даному типі кінематики, в більшості випадках використовують ремені замкнутого типу, тобто кільцеві ремені. Цей фактор є сприятливим, бо спрощую систему натяжки, так як безпосередньо, важливо, щоб усі в 4 ремені мали однакову силу натягу.

#### Переваги кінематики ULTIMAKER:

- рух стола. Стіл переміщується тільки по осі Z, ця особливість дає змогу друкувати моделі великих розмірів, бо коли стіл рухається по горизонтальним осям, центр маси тіла буде знаходитись набагато вище за стіл, тим самим буде виникати відліпання від стола, що може привести до небажаного результату;

- короткі зубчасті ремені які не викликають складнощів у їх регулювання;
- крокові двигуни розміщуються саме на корпусі 3D-принтера та не впливають своєю масою на осі X та Y.

#### Недоліки:

- якість компонентів. Дуже часто можна зустрітись з такою проблемою як, низькоякісні компоненти, що в даній кінематиці особливо помітно. Особливо зустрічаються погані підшипники чи нерівні вали;

- вибагливість в точності збірки. Якісні компоненти не дають вам гарантію отримати якісно надруковану модель, не маловажну роль відіграє точність розташування валів, особливо варто звернути увагу на перпендикулярність в перехрестя валів, бо не дотримання потрібного кута призведе до проблем при друку.

## 2.4 Кінематика COREXY

COREXY так само як і минулі кінематики належать до другого типу декартової кінематики, рух стола відбувається по осі Z, а сама друкувальна головка рухається по осям X та Y. Дану кінематику з легкістю можна переплутати з кінематикою H-BOT і це не випадково. Якщо розглянути дві ці кінематики то можна зробити що відмінності мінімальні. Головна відмінність полягає в системі передач площини XY, в COREXY використовується одразу два окремих ремені, має більшу кількість шківів, та має перехрещення ременів (рис 2.4).

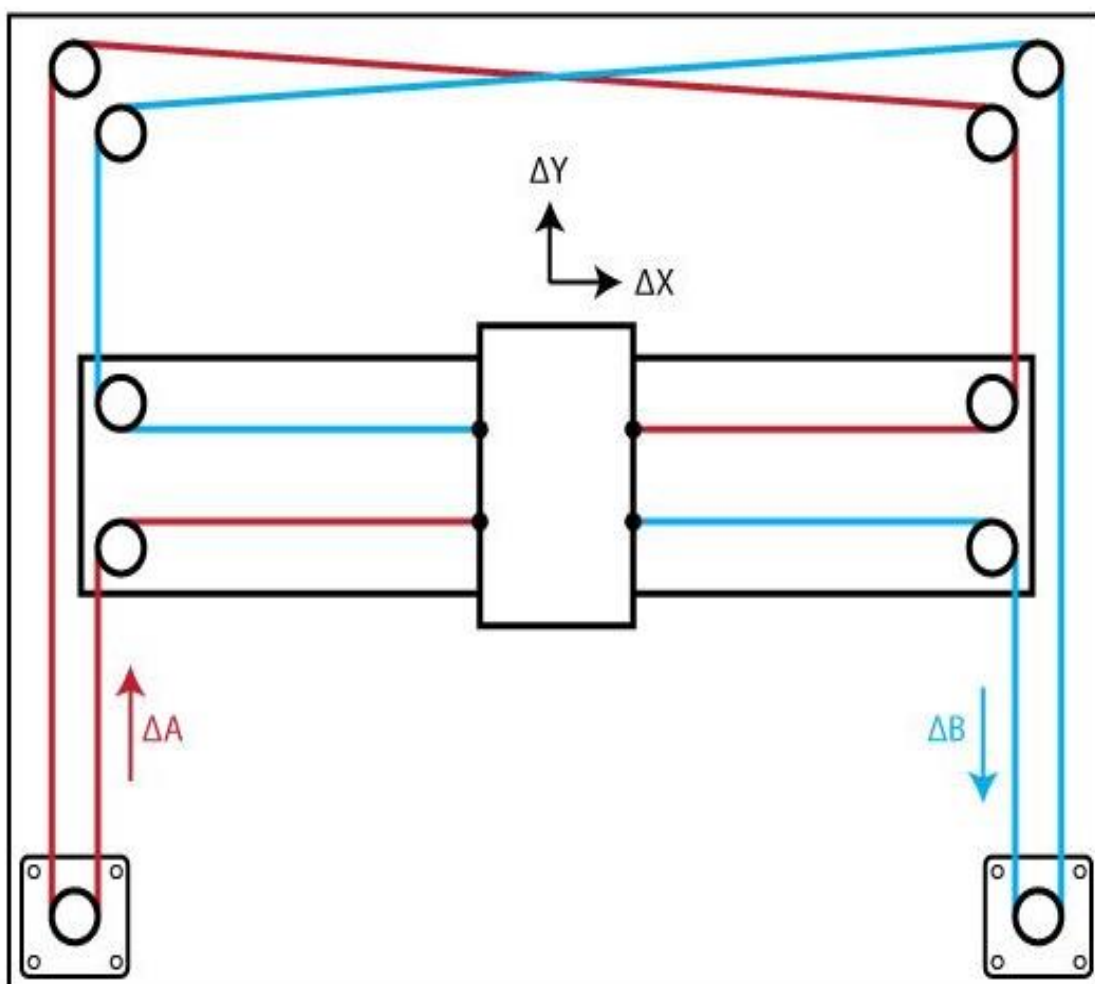


Рисунок 2.4 – Кінематика COREXY

Переваги кінематики COREXY:

– жорсткість конструкції. Данна конструкція вимагає великої жорсткості але порівняно з кінематикою H-BOT та ULTIMAKER, має можливість трохи нехтувати цим, як наслідок на має такої вибагливості в підборі компонентів.

Недолки:

– Важкість кінематики. В даному виді кінематиці використовується багато комплектуючих, які одночасно виконують певну задачу, з виходом зі строю одного маленького компонента, відображується на функціонування даної конструкції;

– калібровка. Так як, в цій кінематиці використовується одразу два ремені котрі перехрещуються між с собою, сильно ускладнює нам процес калібровки, вимагаючи максимальної точності та витрачаючи на це більше часу.

## 2.5 Кінематика H-BOT.

В даній кінематиці ось Z складається з 4 валів які відіграють роль направляючих та двох механізмів для перетворення обертаючого руху в поступальний. В даному випадку роль перетворювача відіграє шарико-гвинтова передача с редуктором та мотором який і приводить у рух робочу платформу. За рух осям X та Y, відповідають два мотори які розташовані на корпусі 3D- принтеру, самі мотори з'єднані між собою одним єдиним ременем.

При впровадженні ременя в дану систему, він набуває форму літери H (рис 2.5), тобто ремінь нібито описує по контуру літеру H, саме тому ця кінематика отримала назву H-BOT [13]. Сам рух по горизонтальній площині виповнюється за допомогою 3 рейок, 2 з яких розташовані на самому каркасі, та відповідають за надійний рух екструдера по осі Y[14]. Рух на другій горизонтальній осі, тобто ось X відбувається за допомогою використання однієї рейки котра розташована на профілі. Сам же профіль кріпиться на двох інших рейках за допомогою алюмінієвої каретки.

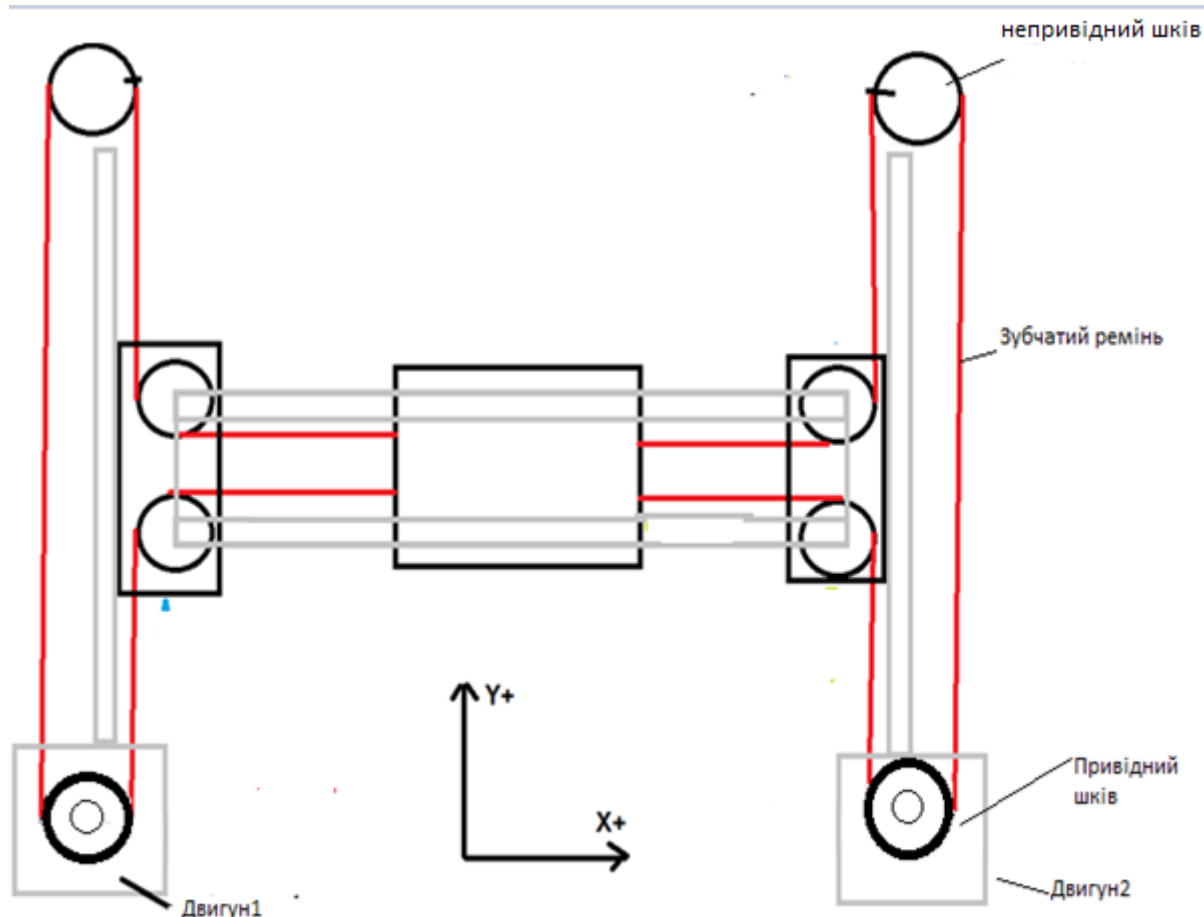


Рисунок 2.5 – Кінематика H-BOT

Переваги кінематики H-BOT:

- простота кінематики. Порівняно з кінематикою які ми згадували раніше наприклад COREXY та ULTIMAKER, в даній кінематиці використовується лише один ремінь, який не потребує синхронізації натягіння з іншими ременями, менша система шківів, що робить цю кінематику простішою;
- невелика кількість комплектуючих. Через цей показник осі мають меншу вагу, що позитивно впливають на інерційну складову, та потенційно збільшую швидкість друку;
- надійність кінематики. Сама через простоту даної кінематики, принтер демонструє високі показники надійності;
- ціна. Вартість значно зменшується через невелику кількість комплектуючих.

– модернізація. Ми згадували, що всі вище розглянуті кінематики підходять для модернізації 3D-принтеру технологією *changing tool*, але реалізувати на кінематиці H-BOT буде найпростіше через свою мінімалістичність системи передач, сама кінематика не займає багато місця, що дуже важливо у впровадженні даної технології.

Недоліки кінематики H-BOT:

– жорсткість конструкції. При відсутності достатньої жорсткості і перпендикулярності осей X та Y, зростає ймовірність перекосу, що приводить до не якісного друку, а в самих поганих випадках принтер може вийти зі строю.

## 2.6 Висновки до розділу

Дана кінематика має багато переваг відносно інших картезіанських видів кінематик, але в контексті впровадження технологічного рішення, що дозволяють одночасно використовувати декілька матеріалів, а саме *changing tool*, ці плюси є більш вагомими в даному випадку. Найголовнішими це мінімалістичність кінематики і її простота в побудові. Легкість горизонтальних осей X та Y, що поліпшує інерційну складову, та дає друкувальній головці переміщуватися з більшою швидкістю, та зменшити час на заміну друкувальної головки. Саме через ці фактори ми обрали кінематику H-BOT.

Більш детально про особливості кінематики H-BOT буде описано в розділі 3.

### 3 РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ КІНЕМАТИКИ H-BOT

#### 3.1 Аналіз особливостей кінематики H-BOT

Кінематика H-BOT, відносить до типу декартових 3D-принтерів, де друкувальна платформа та екструдер рухаються по трьох осьовій системі координат. В даному випадку, в кінематиці H-BOT, переміщення відбувається за таким принципом, робоча платформа переміщується по осі Z, тобто вверх-вниз, а друкуюча головка переміщується по горизонтальним осям, X та Y, тобто вправо вліво, вперед назад.

Таку назву кінематика отримала завдяки розташування ремені у 3D-принтері. Ремінь закріплений в системі шківів таким чином, що мовбито вимальовує по контуру латинську літеру H. Саме через візуальну схожість, кінематика H-BOT отримала таку назву.

В даній кінематиці було обрано використовувати зубчастий ремінь GT2 шириною 10 мм, так як ця серія ременів розроблена спеціально для ділянок з великим навантаженням та обертаючим моментом. В свою чергу ремінь розташований в системі, яка складається з 8 шківів, 6 яких є не приводними, а два інших шківів є приводними. Два шківів закріплені на каркасі, 4 неprivідних шківів кріпляться до алюмінієвої каретки. Привідні шківів зафіксовані безпосередньо до валу шагового двигуна. Саме завдяки приводному шківу здійснюється рух ременя, який той в свою чергу приводить до руху каретку з друкувальну головку. Рух екструдера залежить від того, яким чином обертаються шківів, розглянемо усі можливі варіанти:

- рух екструдера праворуч по осі X. Для цього необхідно щоб, два привідних шківів рухалися одночасно за годинниковою стрілкою;

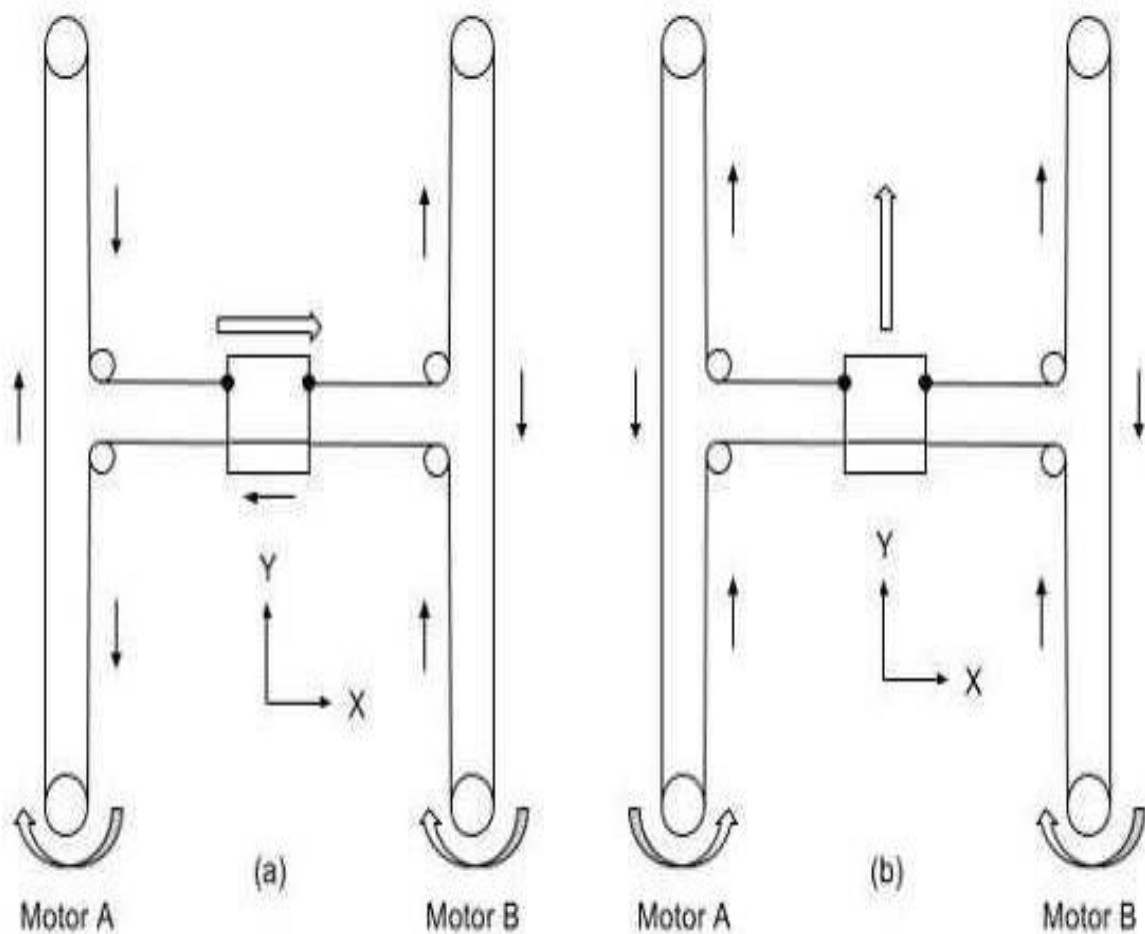
- рух екструдера ліворуч по осі X. Для даного рух повинно щоб, два привідних шківів рухалися одночасно проти годинниковою стрілкою (рис.3.1 а);



– рух екструдера вперед по осі  $Y$ . Для цього потрібно щоб один привідний шків рухався проти годинникової стрілки, а другий за годинниковою, тобто їх рух відбувається в протилежних напрямках один від одного (рис 3.1 б);

– рух екструдера по осі  $Y$  назад. В цьому разі навпаки привідні шків повинні рухатися один до одного, тобто один шків рухається за годинниковою стрілкою, а інший проти годинниковою стрілки;

– рух по діагоналі. В даному випадку екструдер рухається одночасно по осі  $X$  та  $Y$ , іншими словами по діагоналі, це відбувається в випадку коли тільки один привідний шків вертається [15].



а) Рух по осі  $X$  в ліво б) Рух по осі  $Y$  в перед

Рисунок 3.1 – Рух по осям  $X$  та  $Y$  в кінематиці H-BOT

Розрахунки кінематики Н-ВОТ (рис 3.2).

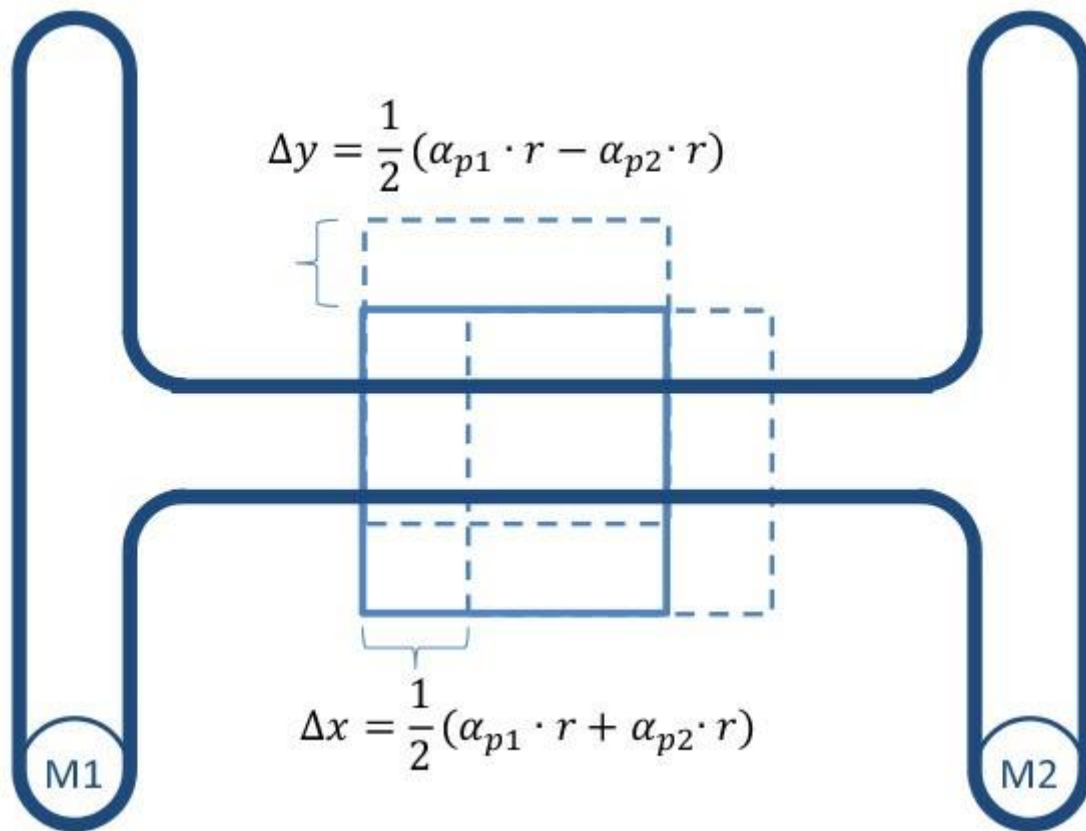


Рисунок 3.2 – Розрахунки приріста в кінематиці Н-ВОТ

Визначення приросту по осі X

$$\Delta X = \frac{1}{2} (\alpha_{p1} \cdot r + \alpha_{p1} \cdot r), \quad (3.1)$$

де  $\alpha_{p1}, \alpha_{p2}$  - кут обертання привідного шківа;  
 $r$  - радіус шківа.

Визначення приросту по осі Y

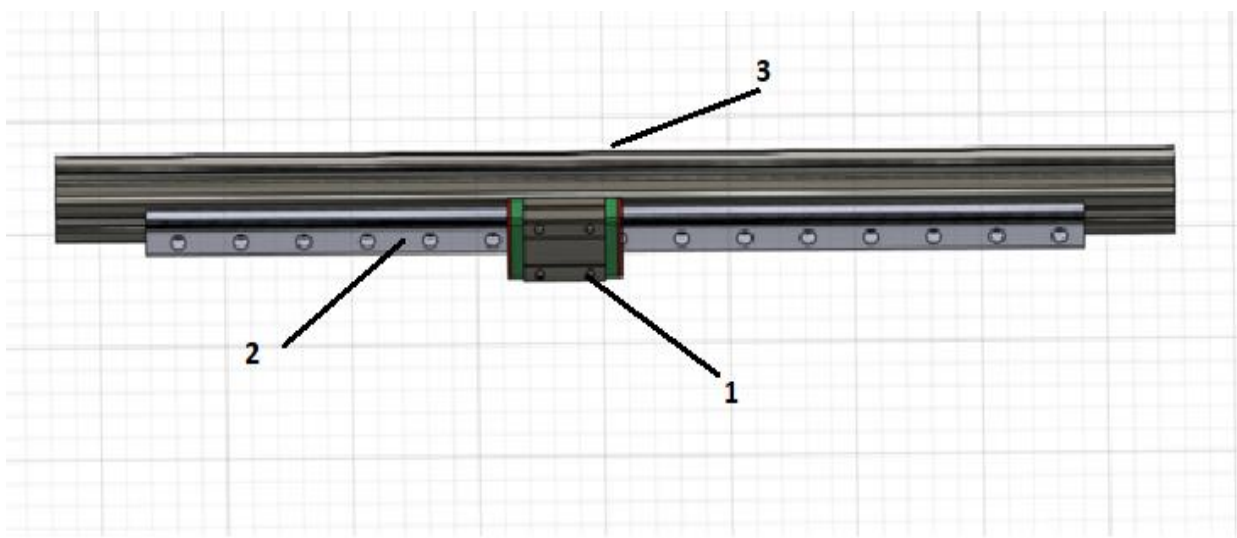
$$\Delta Y = \frac{1}{2} (\alpha_{p1} \cdot r - \alpha_{p1} \cdot r), \quad (3.2)$$

де  $\alpha_{p1}, \alpha_{p2}$  - кут обертання привідного шківа;

$r$  – радіус шківа [16].

Великою перевагою H-BOT кінематики полягає в тому що, двигуни розташовані на каркасі принтеру, тим самим вони ніяк не впливають своєю масою на осі X та Y. Саме через цю особливість, маса не впливає на інерційну складову каретки що позитивно впливає на якість друку та дає змогу поставити більш потужні двигуни, що значно збільшить швидкість пересування екструдера, і як висновок зросте швидкість друку.

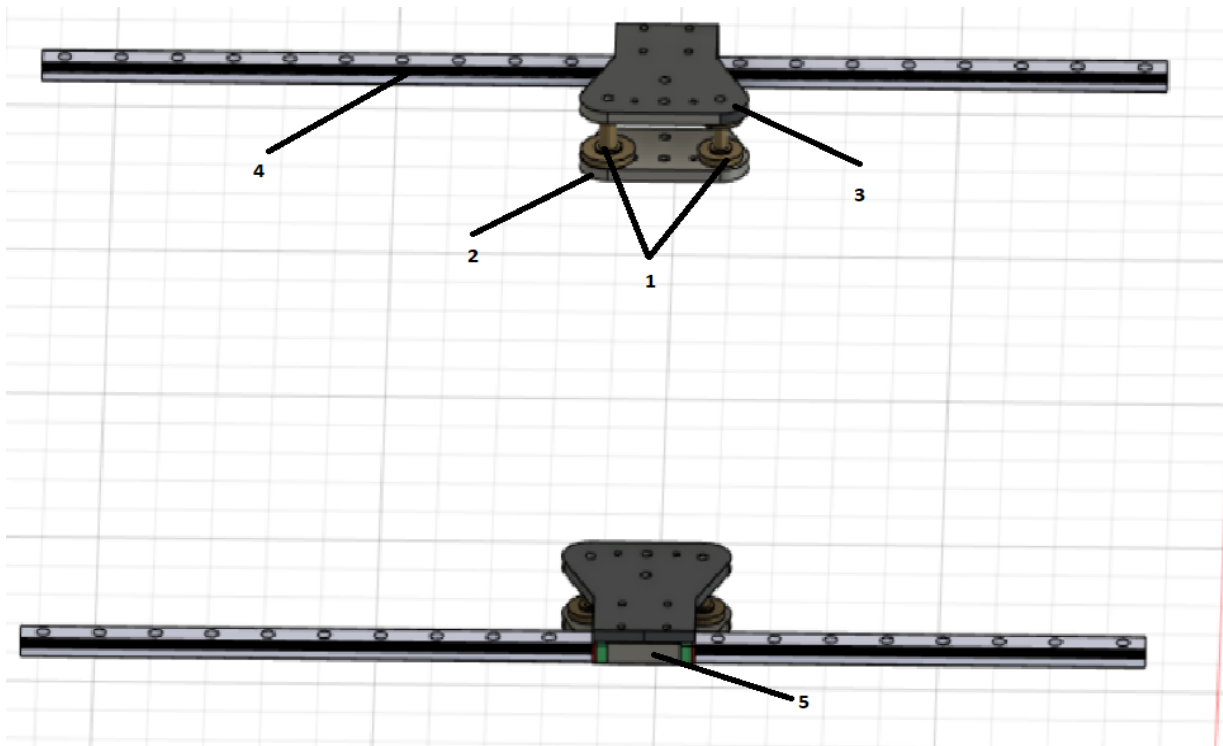
Принцип роботи кінематики. Друкувальна головка рухається по осям X та Y, за ось X відповідає профіль до якого кріпиться одна рейкова направляюча, по котрій відбувається рух екструдера (рис 3.3).



1 – каретка ; 2 – лінійна рейкова направляюча; 3 – профіль.

Рисунок 3.3 – Рейка осі X

За переміщення по другій горизонтальній осі Y відповідає одразу дві рейки закріплених на корпусі 3D-принтера. До цих рейок за допомогою двох алюмінієвих кареток, конструкцію якої розроблено самостійно, закріплено профіль осі X та два латунних шківа.



1 – два латунних непривідних шківів; 2 – менша алюмінієва каретка; 3 – більша алюмінієва каретка;

4 – лінійна рейкова направляюча; 5 – направляюча каретка.

Рисунок 3.4 – Рейка та з'єднувальні елементи зі шківів

На рис. 3.4 зображено рейкову напрямну осі Y зі з'єднувальними елементами, та шківів, саме через шківів розташований сам ремінь. Всього кількість латунних шківів у самій кінематиці 6 штук, та два привідних шківів, розміщення цих шківів надає реміню такий вид, що нагадує латинську літеру H. У рух ремінь приводить 2 крокових двигуна.

Рух стола відбувається лише по осі Z зверху вниз, завдяки двом шарико-гвинтовим передачам, для надійності та жорсткості конструкції використовується 4 вали. Шарико-гвинтова передача з'єднана до крокового мотору з редуктором за допомогою муфти, яка відіграє роль єдиного елемента для передачі обертаючого моменту. В той же час з'єднувальним елементом між каркасом та валом є опори SK 12, які закріплені за допомогою гвинтів M5 та T-подібних гайок M5. Спеціально до стола було виготовлено алюмінієва рама, яка відіграє роль опори стола. До рами кріпиться вали та Шарико-гвинтова передача

за допомогою пластикових кареток, які було змодельовані та надруковані за допомогою пластика каПЕТ.

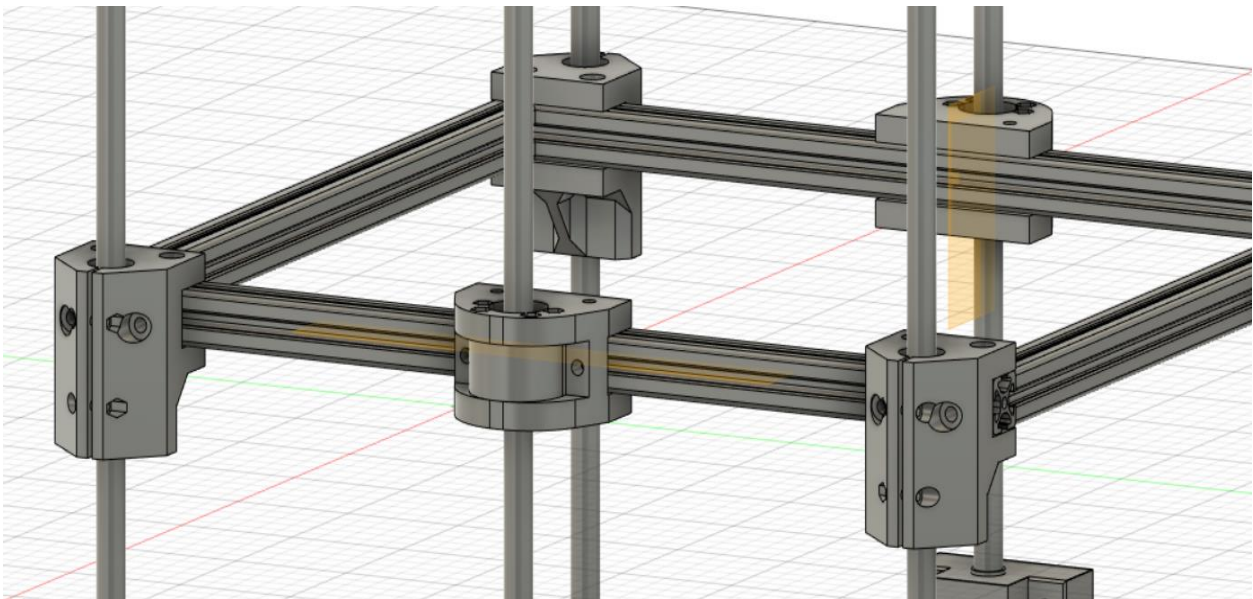


Рисунок 3.5 – Рома стола з опорами до ШГП та валів

Переваги особливостей кінематики H-BOT:

- ціна. Завдяки тому що використовується мала кількість шагових двигунів та мала кількість драйверів, що значно зменшують ціну 3D-принтера;
- ремінь. Так як в данній кінематиці відсутнє перекрещення ременів, як наприклад в CoreXY, це покращує точність роботи друку;
- модернізація. Велика можливість для модернізації 3D-принтеру, наприклад установка більш важких директ екструдерів, та встановлення технології changing tool.

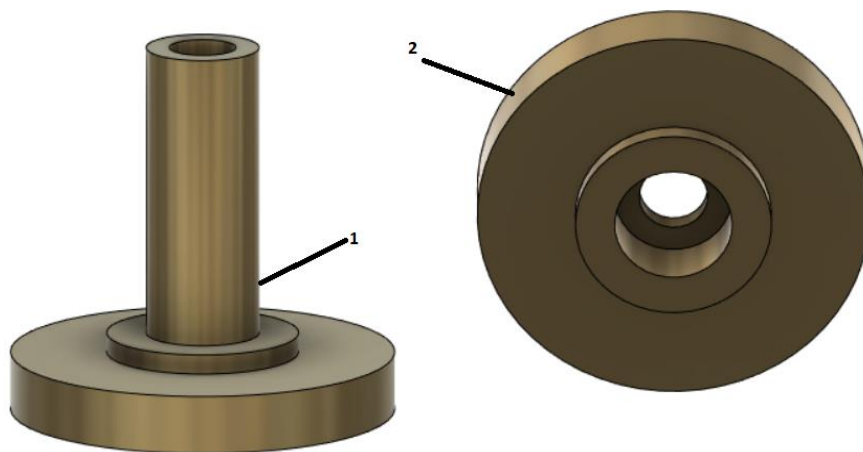
Недоліки:

- Жорсткість конструкції. При недостатній жорсткості перпендикулярності осей X,Y, можливо великий перекосяк, неточно прця, а в самих негативних наслідках зовсім вийти зі строю.

### 3.2 Аналіз і вибір систем передач

В кінематиці H-BOT, для площини XY системою передач було обрано ремінь типу GT2. Головною функцією ремня є передача обертаючого моменту зі шківів до шківів. Ремінь є не замкненим та приводним, довжина ремня складає 4,2 метри, шаг зуба 2 мм, ширина ремня 10 мм. Виготовлений з матеріалу неопрон, в ролі корда виступає скловолокно, тому цей ремінь задовольняє потребам для ділянок з великим навантаженням. Раніше ми пригадували, що ремінь проходить через системи шківів, що в свою чергу своїм положенням нагадує латинською літерою Н. Сумарно використовується 8 шківів, два шківів приводних.

Не привідні шківів було розроблено власноруч, за допомогою програми Fusion 360, та виготовлений на заказ. Матеріалом для виготовлення шківів було обрано латунь, так як цей метал демонструє гарні показники зносостійкості, та відмінні показники в експлуатації. Сама латунна частина складається з двох елементів, основної частини, та кришки. (рис. 3.6). Для не привідних шківів було обрано підшипники моделі 607 C&U RS (19x7x6) де 19мм це зовнішній діаметр, 7 мм внутрішній діаметр 6 мм товщина. Основна частина та кришка відрізняється лише відсутністю вала у кришці, а так їх розмір однакові. Діаметр кришки складає 24мм довжина валу 16мм.



1 – основна частина ; 2 – кришка.

Рисунок 3.6 – Не привідний шків

Привідний шків: діаметр фланця 25 мм; діаметр по зубцям 19,9 мм; кількість зубів 32; діаметр отвору для двигуна 5 мм; загальна висота шківів 19 мм, всього задіяно два фіксуючих гвинта (рис 3.7).

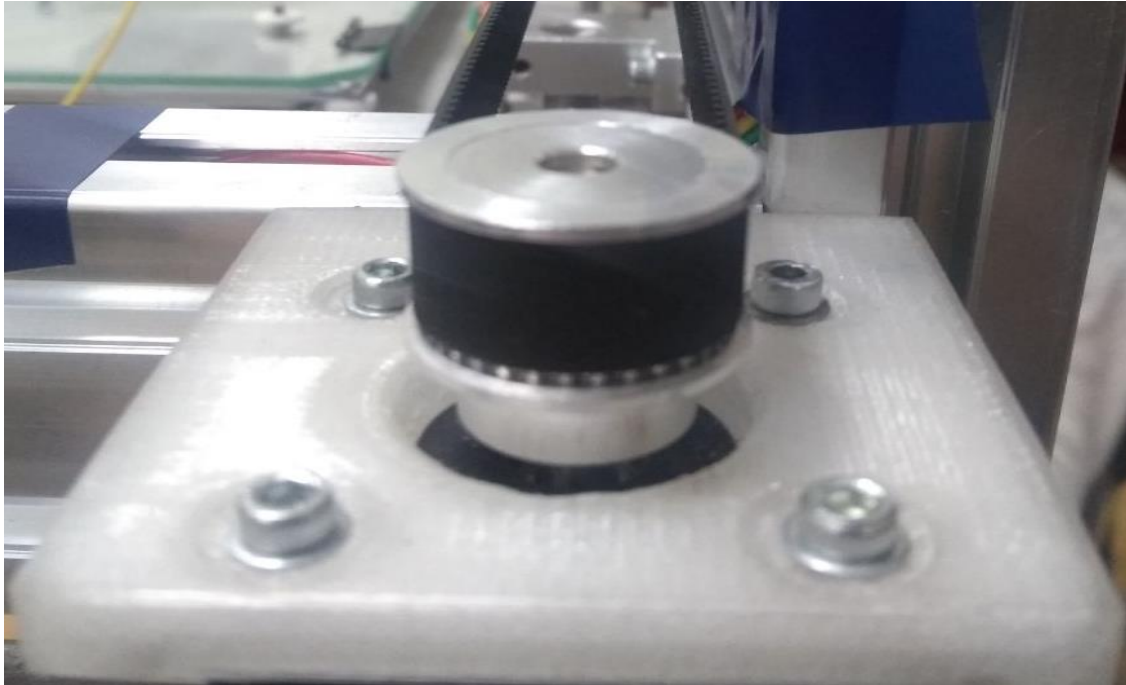


Рисунок 3.7 – Привідний шків

Для осі X в ролі систем передач використовується лінійна рейкова напвляюча MGN 12 з кареткою: ширина рейки 12 мм, довжина рейки 400 мм висота рейки 8 мм, висота каретки 10 мм, ширина каретки 27 мм, довжина каретки 46 мм (рис 3.8). Данна модель дуже часто зустрічається серед ЧПУ верстатів та 3D-принтерів. Обрана нами рейка зіскала популярність через свою надійність та надання конструкції бажаної жорсткості, ці параметри є одними з найважливішими чиниками для отримання якісного друку. В той же час рейка надає плавність руху та високу точність переміщення, відмінно витримує навантаження в горизонтальних напрямках. Друкувальна головка закріплена до каретки лінійної направляючої, завдяки котрій відбувається переміщення по осі X.



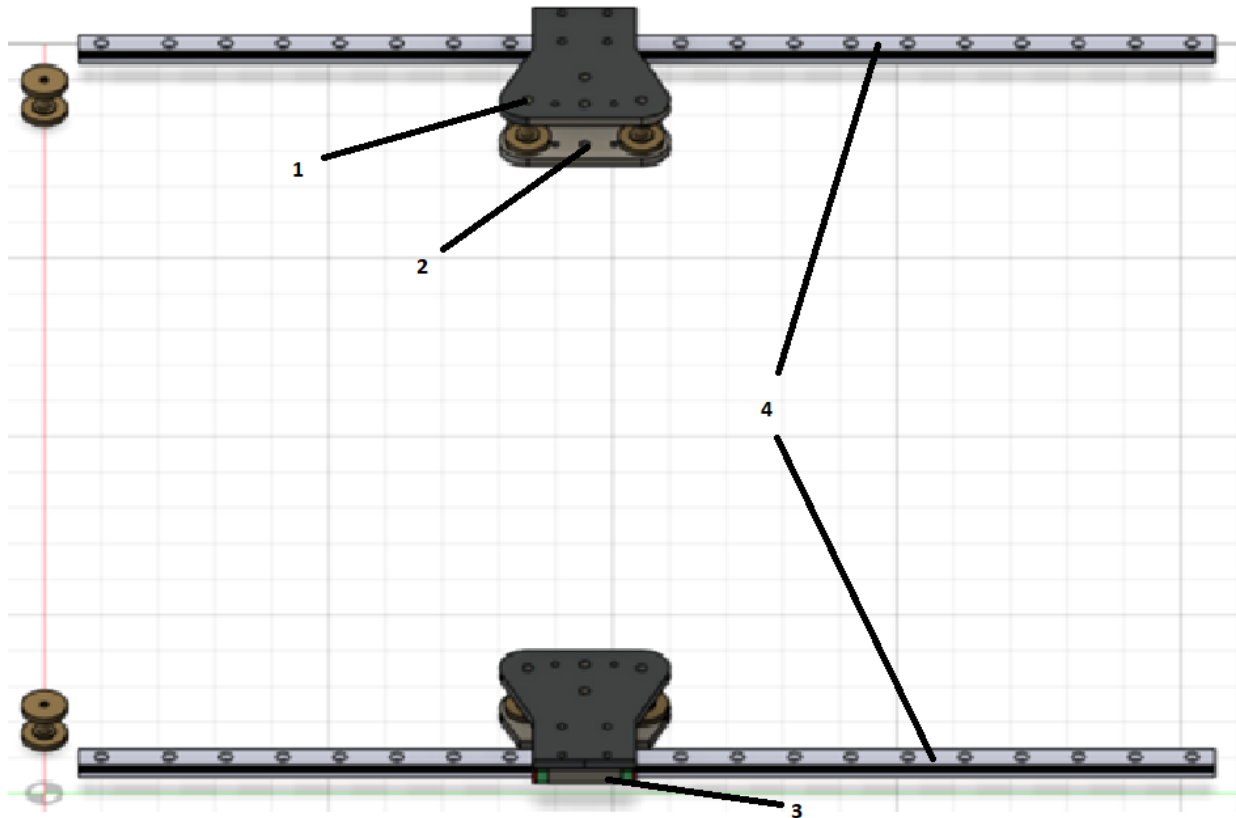


Рисунок 3.8 – Лінійна рейкова направляюча MGN 12

Системи передач для осі Y було обрано також сама лінійна рейкова направляюча моделі MGN 12 з тим самими показниками як і для осі X, тільки довжина цієї лінійної рейкової направляючої довша на 50 мм, тобто складає 450 мм. Для осі Y використовується відразу дві лінійних рейкових направляючих (рис 3.9), завдяки додадковим кареткам, які самостійно було розроблено, (більш детально про це буде описанно в розділі розробка механічної частини 3D-принтеру), саме ці алюмінієві каретки виконують роль єднального елемента між осями X та Y. Через те що ми використовуємо одразу дві лінійні рейкові направляючі, вага горизонтальних осей рівномірно розподіляється, зменшуючи навантаження тим самим збільшує жорсткість конструкції, та забезпечує надійний та плавний, а найголовніше точний рух нашого екструдера.



Так як осі  $X$  та  $Y$  в кінематиці Н-ВОТ повністю залежить одне від одного, при недостатньої точності установки лінійних рейкоових направляючих до каркасу, ми отримаємо систему, яка не здатна буде виконувати запланований нами рух екструдера по горизонтальній площині.



1 – більша алюмінієва каретка; 2 – менша алюмінієва каретка; 3 – каретка лінійної направляючої; 4 – рейкові направляючі

Рисунок 3.9 – Лінійна рейкові направляючі по осі  $Y$

Ось  $Z$ , складається з багатьох елементів. Системи передач для осі  $Z$  було обрано шарико-гвинтова передача. Вона виконує роль лінійного приводу перетворюючи обертаючий рух гвинта в поступальний рух гайки. Гвинт взаємодіє з гайкою не напряму, а через шарики, тим самим забезпечуючи у край малу силу тертя, і як наслідок високий ККД роботи. У рух гвинт приводить кроковий двигун з редуктором через муфту, в залежності від того, як саме обертається гвинт, робоча платформа підіймається або опускається.

Взагалом для осі Z використовується 4 лінійних направляючих вали, та два шарико-гвинтові передачі з муфтами які в свою чергу закріпленні до крокового двигуна з редуктором (рис 3.10).

Було обрано лінійний направляючий вал який виготовлений зі сталі C45, діаметр 12 мм, довжина 570 мм, твердість поверхні HRC 60-64.

Шарико-гвинтова передача: з діаметром 12 мм, шаг гвинта складає 4 мм. Гвинта оброблений повністю під опори EK10 та EF10, де 10 це діаметр опор.

Також використовується кроковий двигун з редуктором. Вибір пав саме на це технологічне рішення, бо кроковий двигун має можливість поділити своє повне обертання на 200 кроків, з редуктором, кількість кроків зростає в 27 раз, тобто становитиме 540 кроків на одне обертання двигуна, що дає більш точніше позиціонування робочої платформи. Єднальним елементом між редуктором та гвинтом виступає муфта з діаметром 8 мм.

Для надійного руху друкувальної платформи по осі Z, використовуємо одразу 4 вали, які забезпечують жорсткість та прямолінійність руху. Вали кріпляться до корпусу за допомогою алюмінієвої опори SK12, степінь стиску валу регулюється за допомогою двох гвинтів. В свою чергу кріплення валів до алюмінієвої рами відбувається за допомогою кріпленням, які були самостійно розроблені та надруковані коПЕТ пластиком. Більш детально кріплення ШГП та валів буде розглянуто та описано в розділі 4 розробка конструкції механічної частини принтеру.

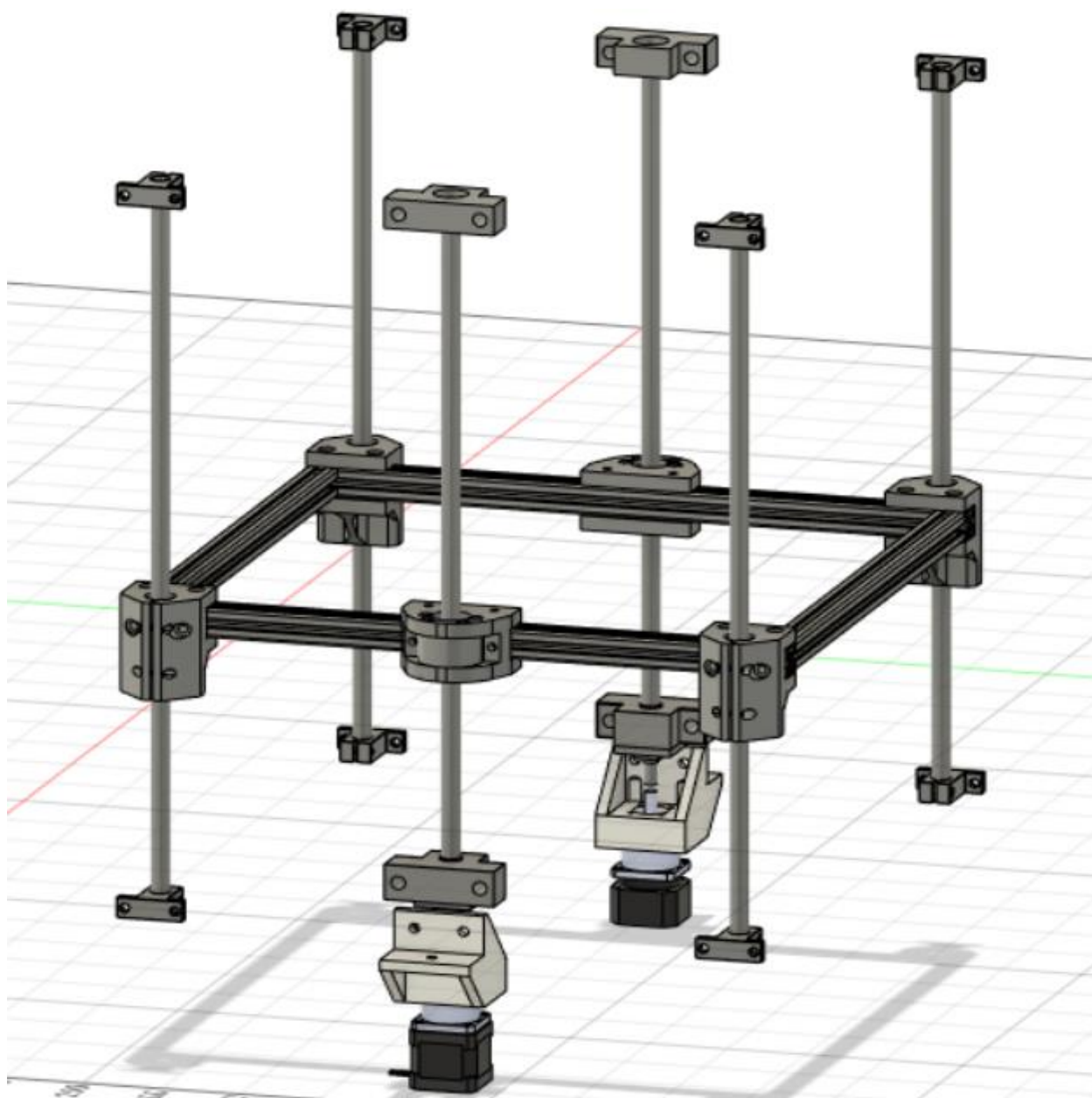


Рисунок 3.10 – 3D-модель осі Z

### 3.3 Висновки до розділу

В даному розділі було розглянуто особливості кінематики H-BOT, також було описано принцип пересування екструдерної головки та друкувальної платформи в триосьовій системі. Приведена формула для розрахунку переміщення каретки для осей X та Y. Було проведено аналіз і вибір компонентів системи передач для кожної осі.

## 4 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ПРИНТЕРА

### 4.1 Розробка корпусу

В ході розробки корпусу було розглянуто та проаналізовано декілька видів матеріалів такі як: полікарбонат, фанера, алюміній.

В ході аналізу вибраних нами матеріалів, котрі повинні відповідати таким вимогам як: міцність, надійність, жорсткість. Було знайдене рішення, що для вище згаданих критерій відповідає алюміній. Якщо порівнювати показники даних матеріалів такі як коефіцієнт жорсткості, мала питома вага, ціна, ці характеристики найкраще задовільняє саме алюміній.

Для збірки 3D-принтеру було обрано верстатний алюмінієвий профіль, аналог профілю Bosch, сам профіль має розміри розмірами 30 мм × 60 мм та 30 мм × 30 мм, з отвором під Т-подібну гайку. Габаритні розміри 3D-принтеру було розроблено під параметри робочої зони, розмір яких складає 300 мм × 300 мм 450 мм, та під систему changing tool а саме під додаткові екструдери, тому розміри корпуси становитимуть 850 мм × 630 мм × 530 мм. (рис 4.1).

Для кріплення верстатних алюмінієвих профілів використовується з'єднувальний куток для профілю розмірами 30 мм × 30 мм з пазом під Т-подібну гайку. Фіксування відбувалося за допомогою гвинтів М4 та М5 довжиною 12 мм, також використовувалися Т-подібні гайки М4 велика, та Т-подібна гайка М5. Для верстатного алюмінієвого профілю на якому розміщується лінійна рейкова направляюча, єднальним елементом в даному випадку використовується внутрішній кутовий з'єднувач серії 30L. Його було обрано саме для того, щоб не було жодних перешкод для роботи лінійних рейкоових направляючих по осі Y.

Два крокових двигуна по осі Z розташовані всередині корпусу 3D-принтера. Усі інші електронні пристрої було розташовані з зовнішньої сторони принтеру.

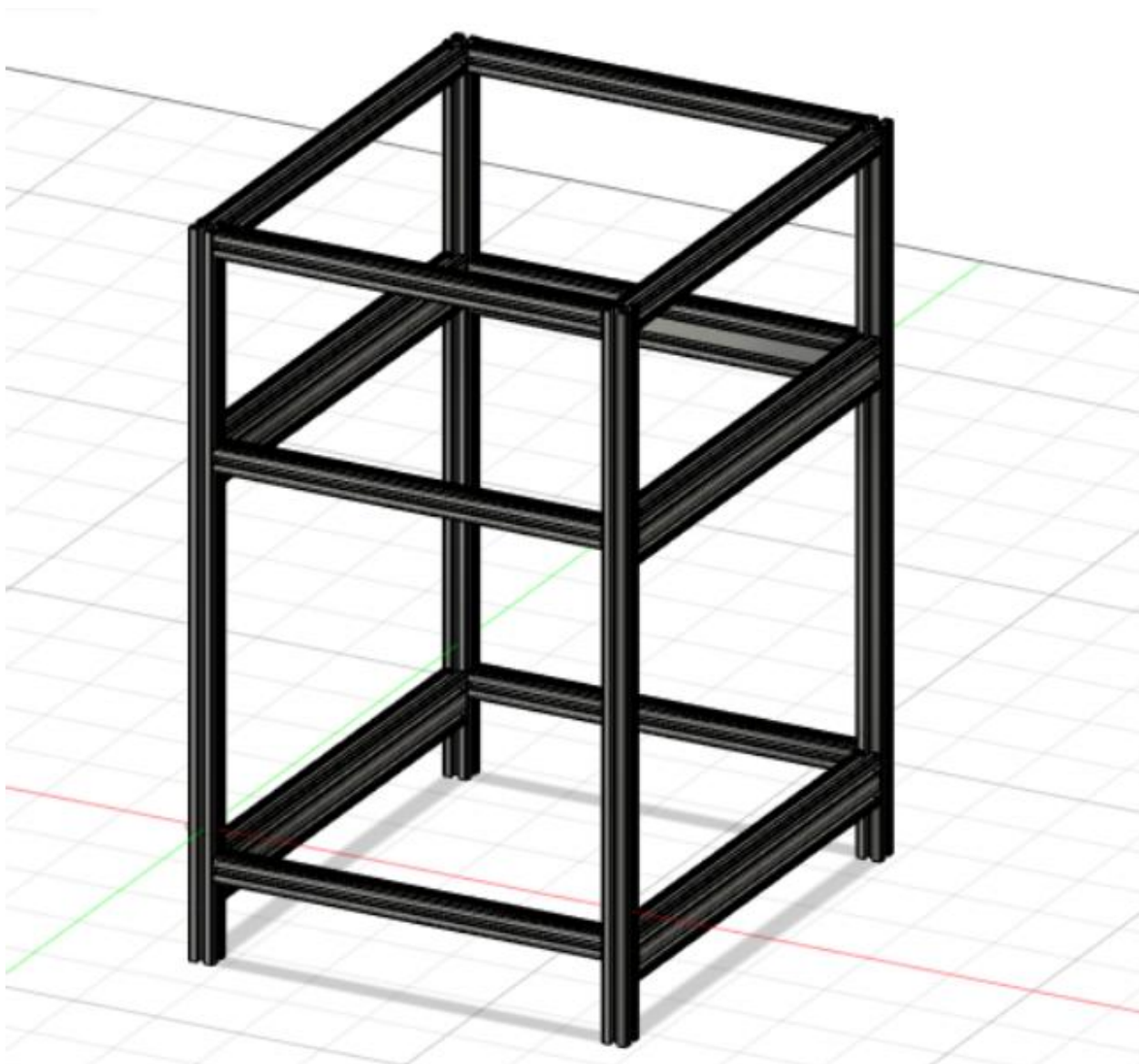


Рисунок 4.1 – 3D-модель корпусу принтер

#### 4.2 Розробка осі Z

При розробці осі Z, головною задачею було отримання жорсткої і надійної осі Z, саме тому використовується одразу чотири лінійних направляючих та два шари́ко-гвинто́вої передачі.

Для розробки осі Z було використано чотири лінійних направляючих валів з діаметром 12 мм та завдовжки 530 мм, та закріплені до корпусу за допомогою алюмінієвої опори SK12, степінь стиску валу регулюється за допомогою двох

гвинтів. Також використовується дві шарико-гвинтові передачі. Шарико-гвинтові передачі складаються з: ходового гвинта, гайки з вбудованими кульками та механізмом повернення кульок. Завдяки низьким показникам тертя між гайкою та гвинтом ШГП мають високу міцність та зносостійкість.

Муфта виконує роль єднального елемента між ШГП та редуктором, та в той же час виконує передачу обертового моменту з редуктора до ШГП.

Сам редуктор з мотором кріпиться до каркасу за допомогою самостійно змодельованої опори та в подальшому надрукованої пластиком кАПЕТ (рис 4.2).

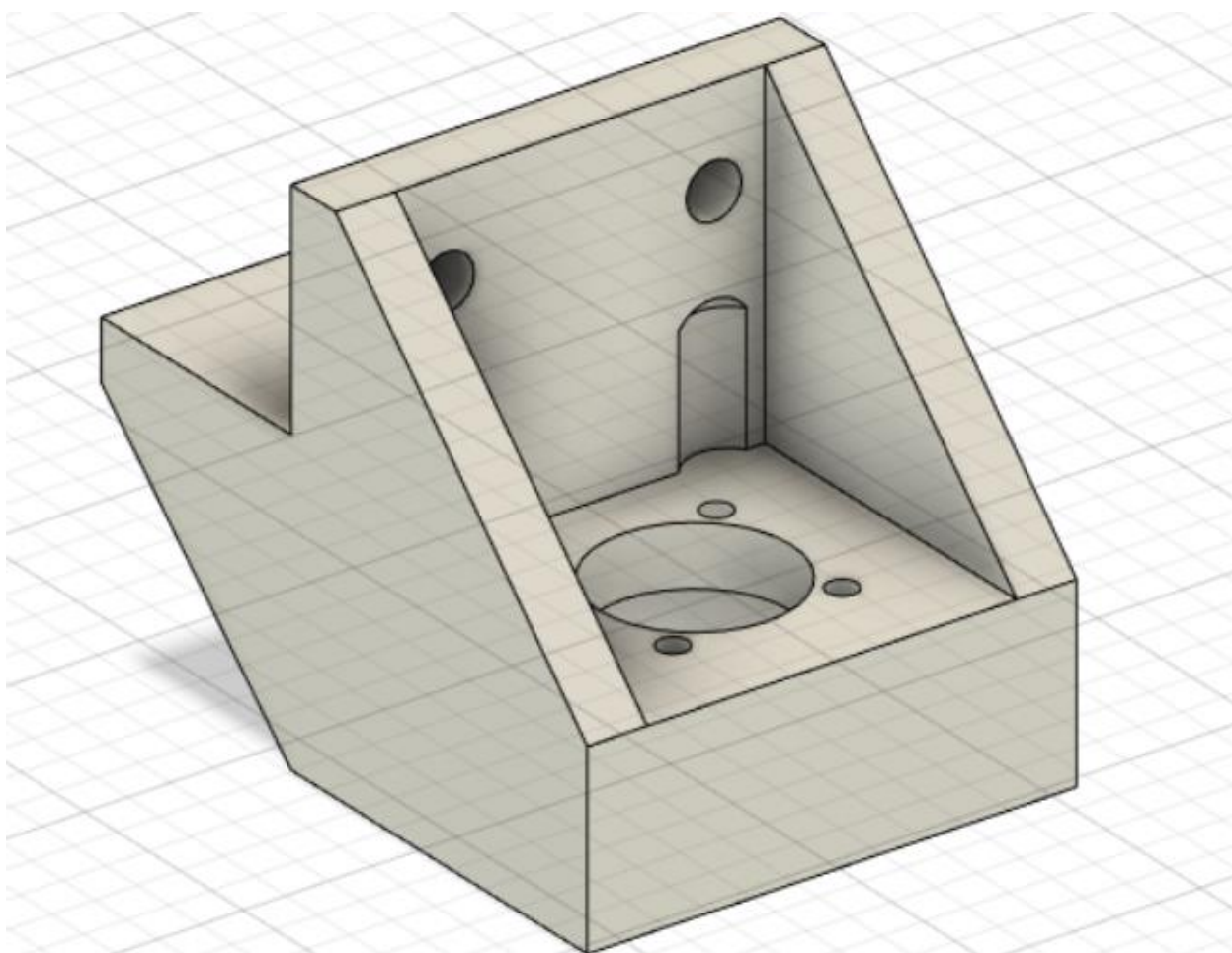


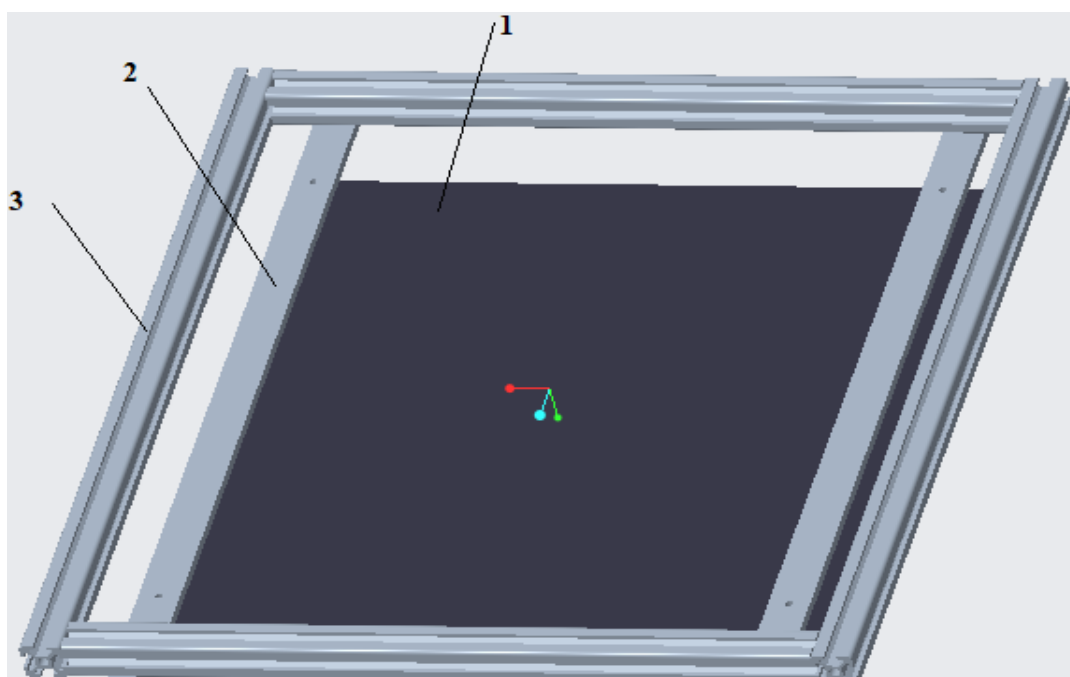
Рисунок 4.2 – Кріплення редуктора з кроковим двигуном до каркасу.

Також єднальним елементом між ШГП та корпусом є опора ЕК10. Верхня частина валу буде закріплена тільки до корпусу завдяки верхній опорі ЕК10.

Друкувальна платформа в принтері H-BOT складається з самого столу з нагрівальним килимом та рами. Стіл буде виготовлений зі сталі, товщина стола

складатиме 3 мм, а площа стола складатиме 310мм × 310мм. В ролі нагрівача виступає силіконовий килим. У килимі присутній NTC-термістор MF58, робочий діапазон якого складає від -30 до +300 градусів Цельсія. Килим як і стіл мають однакові розміри 310 мм × 310 мм. В той же час робоча зона складатиме 300 мм × 300 мм.

Друга частина стола складається з рами. Сама рама було зібрана з верстатного алюмінієвого профілю аналог профілю Bosch розміри якого становлять 20 мм × 20 мм та мають довжини 420 мм та 357 мм. Кріплення між верстатними профілями виконується за допомогою кутків та гвинтів М5 та Т-подібними гайками М5. До верстатних профілів закріплені Н-подібні профілі завдовжки 420 мм (рис. 4.3).



1 – робочий стіл; 2 – Н-подібний профіль; 3 – алюмінієвий профіль.

Рисунок 4.3 – Друкувальна платформа

Вали кріпляться до рами друкувальної платформи завдяки каретці, яка була самостійно розроблена та надрукована за допомогою 3D-принтеру. Матеріал для каретки було обрано пластик саРЕТ (рис 4.4).



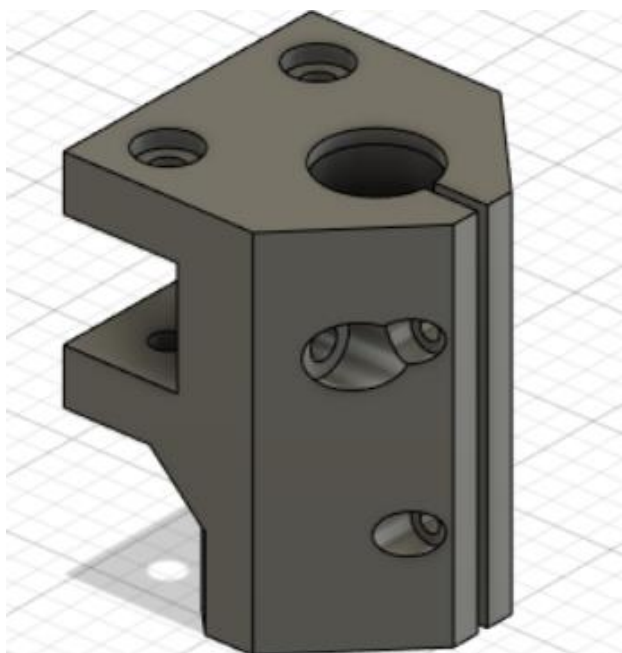


Рисунок 4.4 – Каретка до валу

Загалом використовується 4 таких каретки до кожного валу.

Кріплення ШГП до рами стола відбувається також за допомогою власноруч змодельованої каретки та надрукована тим самим пластиком саPET. В самій каретці буде розташована гайка з вбудованими кульками (рис 4.5).

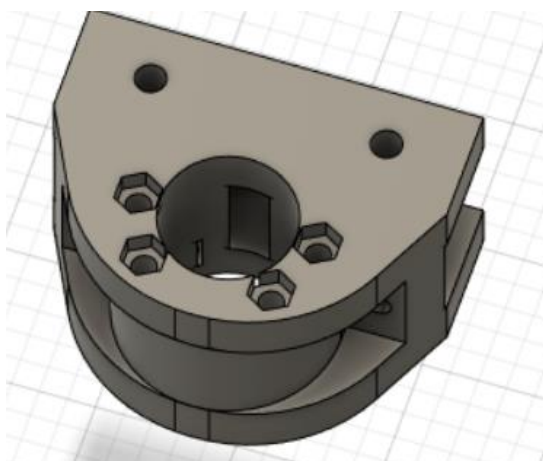
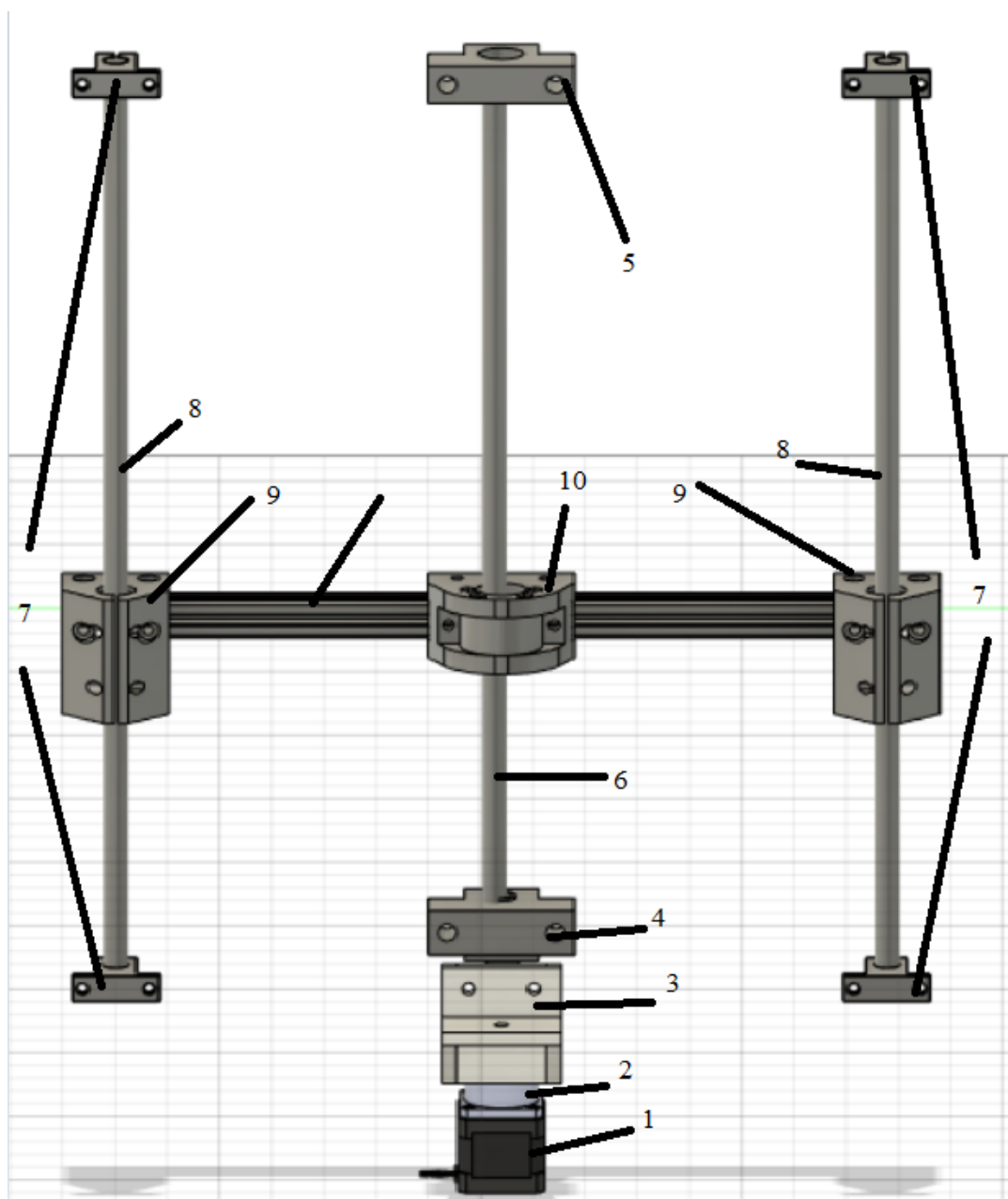


Рисунок 4.5 – Каретка до ШГП.

На рис. 4.6 зображена 3D-модель одно сторона осі Z з двома валами шарико-гвинтової передачі та опорами до рами стола та опорами до корпусу.





1 – кроковий двигун; 2 – редуктор; 3 – опора до корпусу; 4 – нижня опора ШГП; 5 – верхня опора ШГП; 6 – шарико-гвинтова передача; 7 – опори для валів; 8 – вали; 9 – каретки до валів; 10 – каретка для ШГП.

Рисунок 4.6 – 3D модель осі Z

### 4.3 Розробка осі Y

Вісь Y складається як ми раніше згадували з двох лінійних рейкових напрямних MGN12H, довжина котрих складається 450 мм. Вони в свою чергу закріплені на верстатному алюмінієвому профілі 30 мм × 60 мм, довжина якої

складає 490 мм. Кріплення до верстату відбувається за допомогою гвинтів М3 завдовжки 16 мм та Т-подібних гайок М3 (рис 4.7).

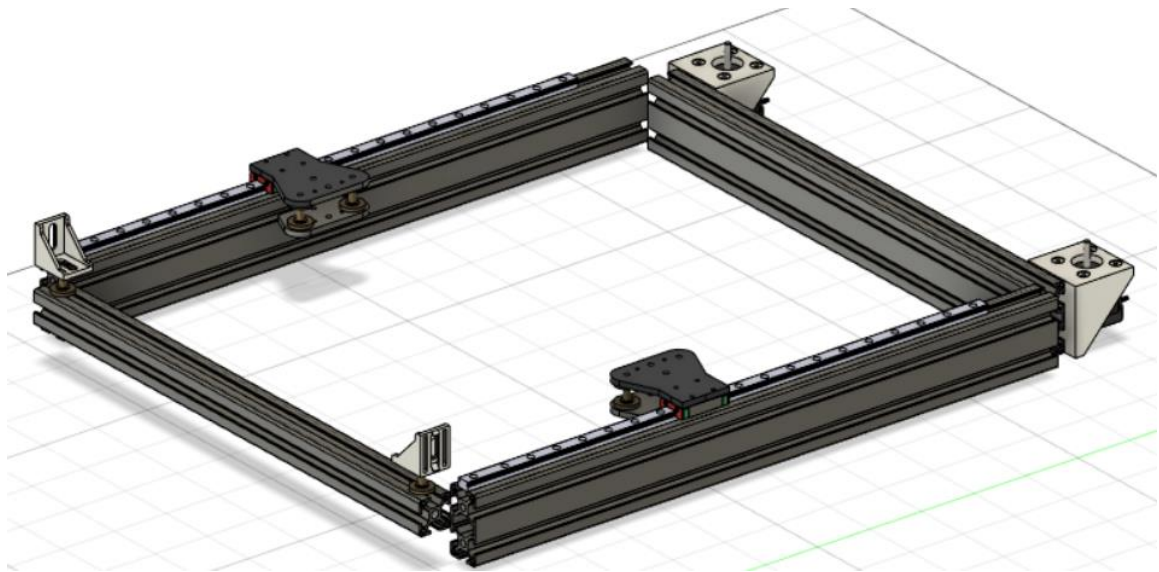
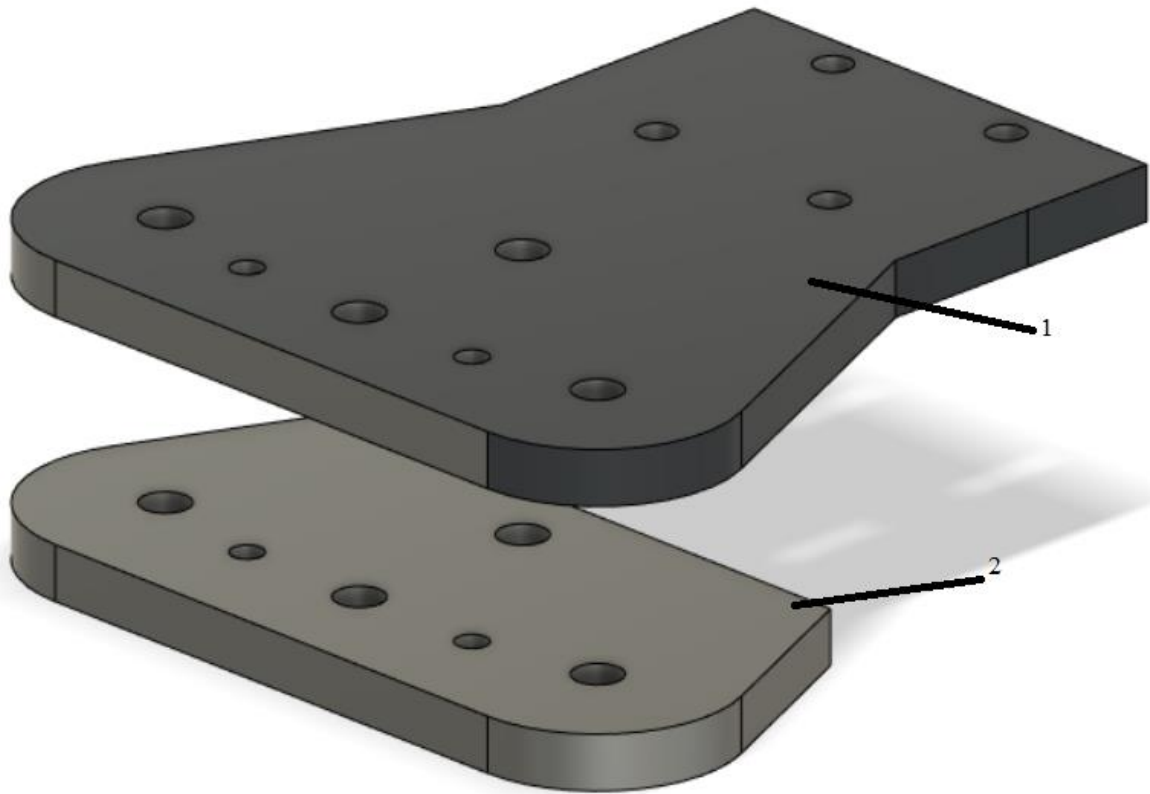


Рисунок 4.7 – 3D-модель осі Y

На лінійній рейковій напрямній, на котрій знаходиться сама каретка, було розроблено самостійно додатково дві алюмінієві каретки, котрі виконують роль єднального елемента між осями X та Y (рис 4.8). Товщина кареток становить 5 мм. На більшій алюмінієвій каретці було зроблено 6 отворів під гвинт М3 та 4 отвору під гвинт М5. Більша алюмінієва каретка кріпиться до рейкової каретки за допомогою 4 гвинтів М3. Менша каретка має туж саму кількість отворів, єдина відмінність полягає в відсутності частини з отворами для кріплення до рейкової каретки. Два отвору на каретці відведені для кріплення до лінійною рейковою напрямній під гвинт М5. Останні два отвори було розроблені для не приведених шківів.. Більш детальна характеристика не привідних шківів описано в підрозділі 3.2 Аналіз і вибір систем передач.



1 – Верхня алюмінієва каретка; 2 – Нижня алюмінієва каретка

Рисунок 4.8 – 3D-модель алюмінієвих кареток

#### 4.4 Розробка осі X

Друга горизонтальна ось яку ми розробляли є ось X. Так як робоча зона складає у нас 300 мм × 300мм, ми використовуємо рейкову напрямну довжиною 400 мм. Сама напрямна кріпиться до верстатного профілю довжина якого складає 450 мм, інші габаритні параметри складають 20 мм × 20 мм. Рейкова розміщена знизу верстатного профіля, тобто кареткою до друкувального стола.

Верстатний профіль кріпиться до алюмінієвих кареток. Також до осі X ми відносимо шків котрі закріплені між двома алюмінієвими каретками, по два шківів до кожної пари кареток.

Треба зауважити що вісь X складається і з захватного механізму системи changing tool, але розробка данної системи буде розглянуто окремо в розділі 5

### Розробка конструкцій системи changing tool

Вісь X складається з лінійної рейкової напрямній з кареткою довжиною 400 мм, котра кріпиться до верстатного алюмінієвого профілю розміром 20 мм × 20 мм, довжиною 450 мм. Сама же верстатний профіль єднається до алюмінієвої каретки, через два гвинта М5. Шків також відносяться до зборки осі X, самі ж шків кріпляться до алюмінієвої каретки за допомогою гвинтів М5 (рис 4.9).

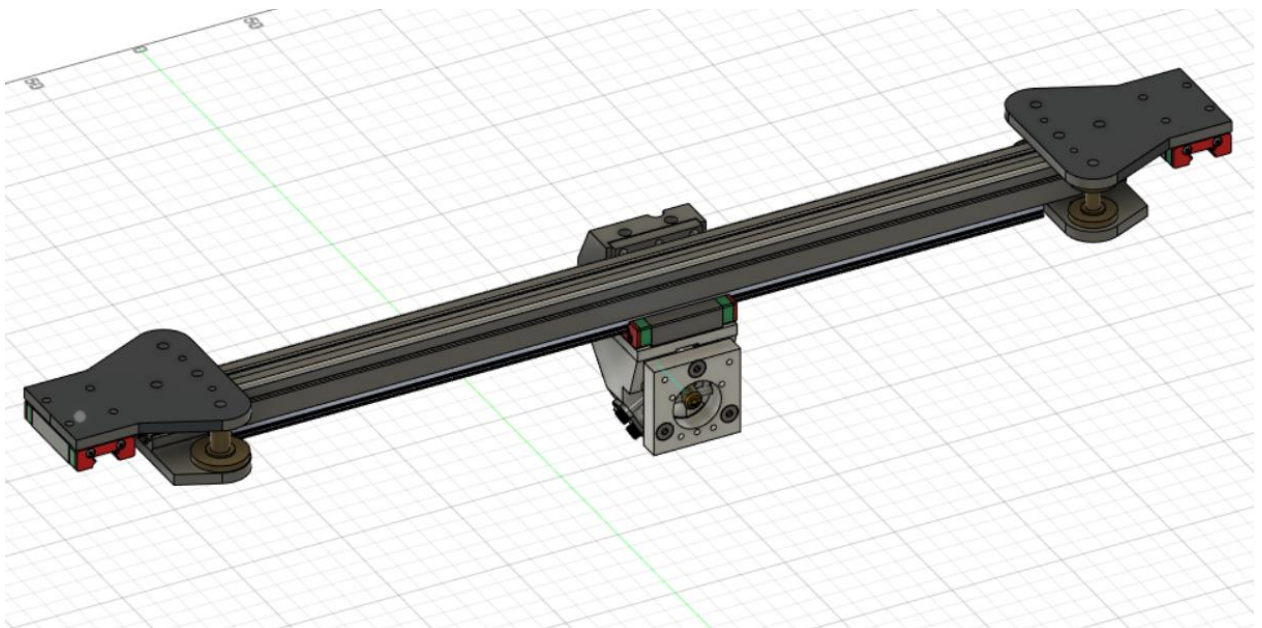


Рисунок 4.9 – 3D-модель осі X

#### 4.5 Висновки до розділу

В даному розділі було розроблено конструкцію механічної частини принтера, приведені 3D-модель каркасу принтеру. Розроблена 3D-модель кожної осі та описані компоненти цих направляючих.

## 5 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ СИСТЕМИ CHANGING TOOL

### 5.1 Розробка 3D-моделі системи changing tool

Як ми згадували раніше changing tool перекладається як заміна інструмента, в ролі інструмента виступають екструдери з різними пластиками, та різними соплами, екструдери знаходяться на каркасі 3D-принтеру. Процес зміни екструдерів відбувається завдяки захватному механізму (рис 5.1).

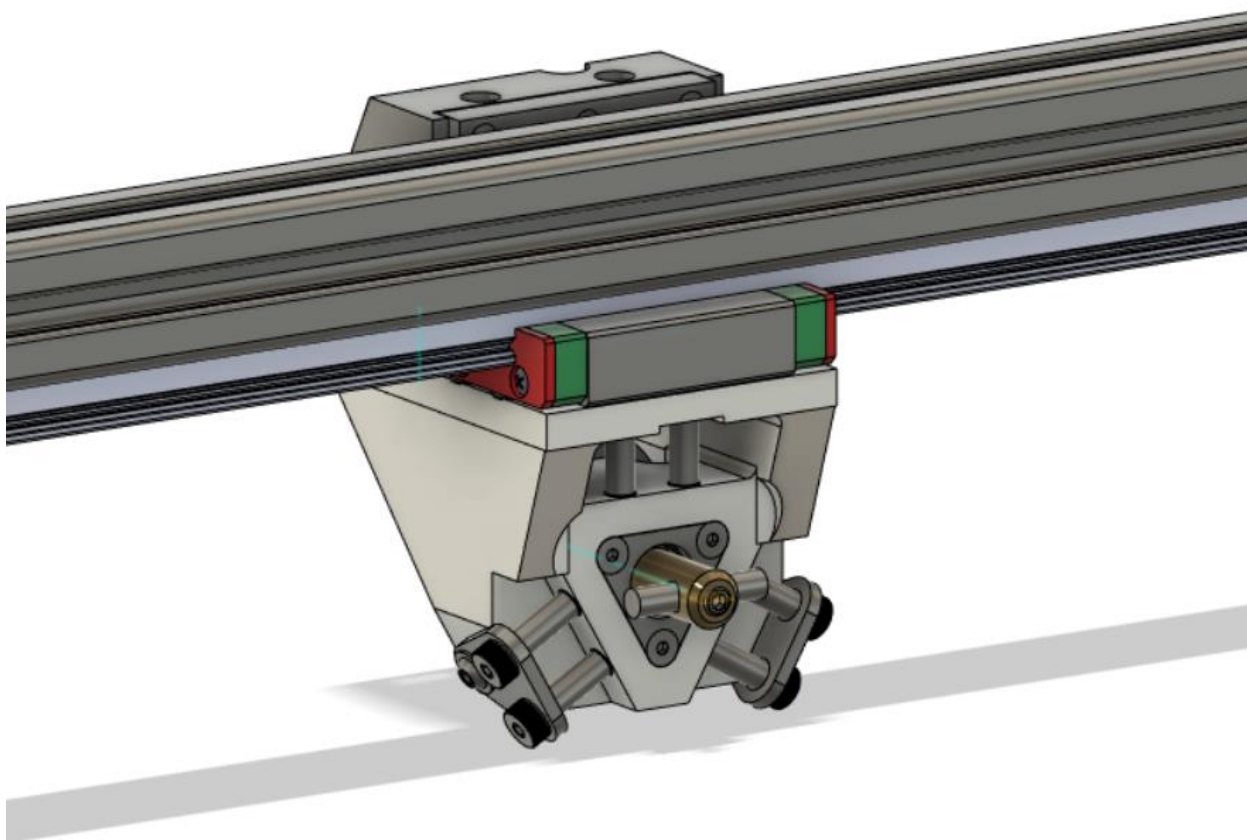


Рисунок 5.1 – Механізм захвату changing tool

Захватний механізм є основним компонентом в системі changing tool, сам механізм розташований на каретці рельсовій напрямній. Сам механізм складається з декількох складових:

- каркасу захватаного механізму;
- коромисла;
- вал з поперечиною;
- фіксатор для цетруючих гвинтів;
- центруючі гвинти
- каретка для ременів.

Ефектор екструдера складається з таких елементів як:

- центруючі кульки;
- каретка екструдера;
- елемент фіксації.

3D-модель зображена на рис. 5.2.

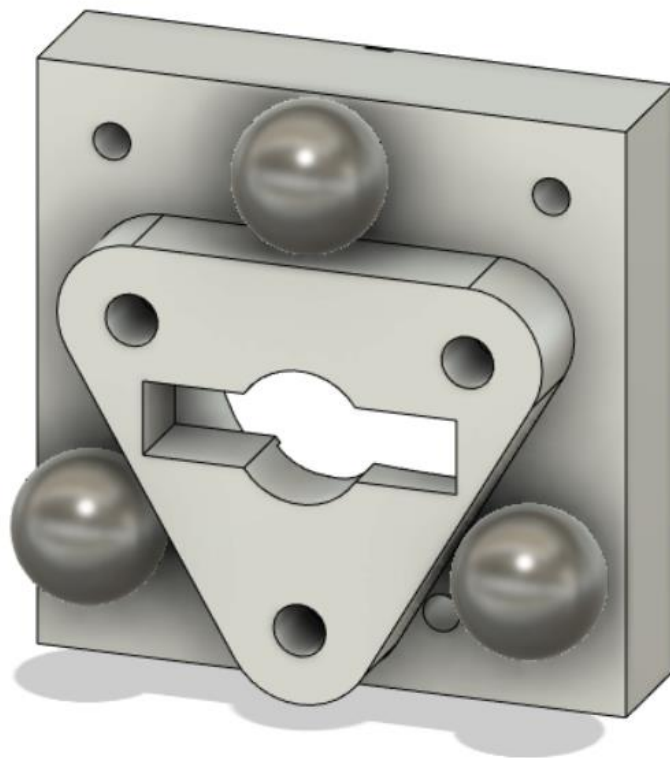


Рисунок 5.2 – Ефектор екструдера

- центруючі кульки;
- каретка екструдера;
- елемент фіксації.



Процес роботи захватного механізму відбувається таким чином. Коромисло приводить у рух кроковий двигун через два троси котрі закріплені до гвинта який знаходиться в самому коромислі. В свою чергу коромисло приводить у рух вал з поперечиною, який і виконує дію замикання. Для того щоб замикання відбувалось коректно, використовується ефектор, який складається з трьох центруючих кульок, котрі закріпленні до каретки екструдера. Положення ефектора відносно каретки відбувається за допомогою кульок та центруючим гвинтам, по два гвинта до кожної кульки. Треба зауважити що велику роль відіграє якість і точність збірки, при недотримання точності положення центруючих гвинтів, ми не отримаємо належне положення кульок, що не дасть нам відповідної площини для забезпечення надійного та точного захвату екструдеру захватним механізмом.

## 5.2 Вибір компонентів

Каркас захватного механізму було самостійно змодельовано та в подальшому надруковано на 3D-принтері (рис 5.3).

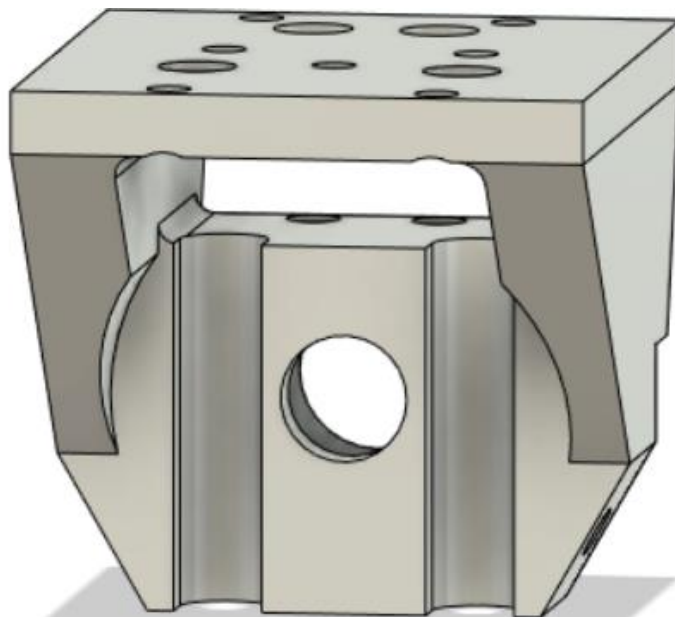


Рисунок 5.3 – 3D-модель каркасу захватного механізму

Каркас має отвір для валу, та отвори для кріплення каретки для ременів та отвори до каретки рельсової напрямної. Також бачимо що в каркасі є отвори для фіксатора центруючих гвинтів. Можемо зробити висновок що каркас відіграє роль єдального елементу між усіма компонентами захватного механізму.

Механізм який виконує замикання умовно можна поділити на дві частини. Перша частина складається з алюмінієвого коромисла, котрого приводить у рух кроковий двигун через троси. Саме коромисло рухаючись приводить у рух другу частину механізму, латунний вал з двома підшипниками та поперечиною, який і виконую замикання каретки з екструдером (рис 5.4).

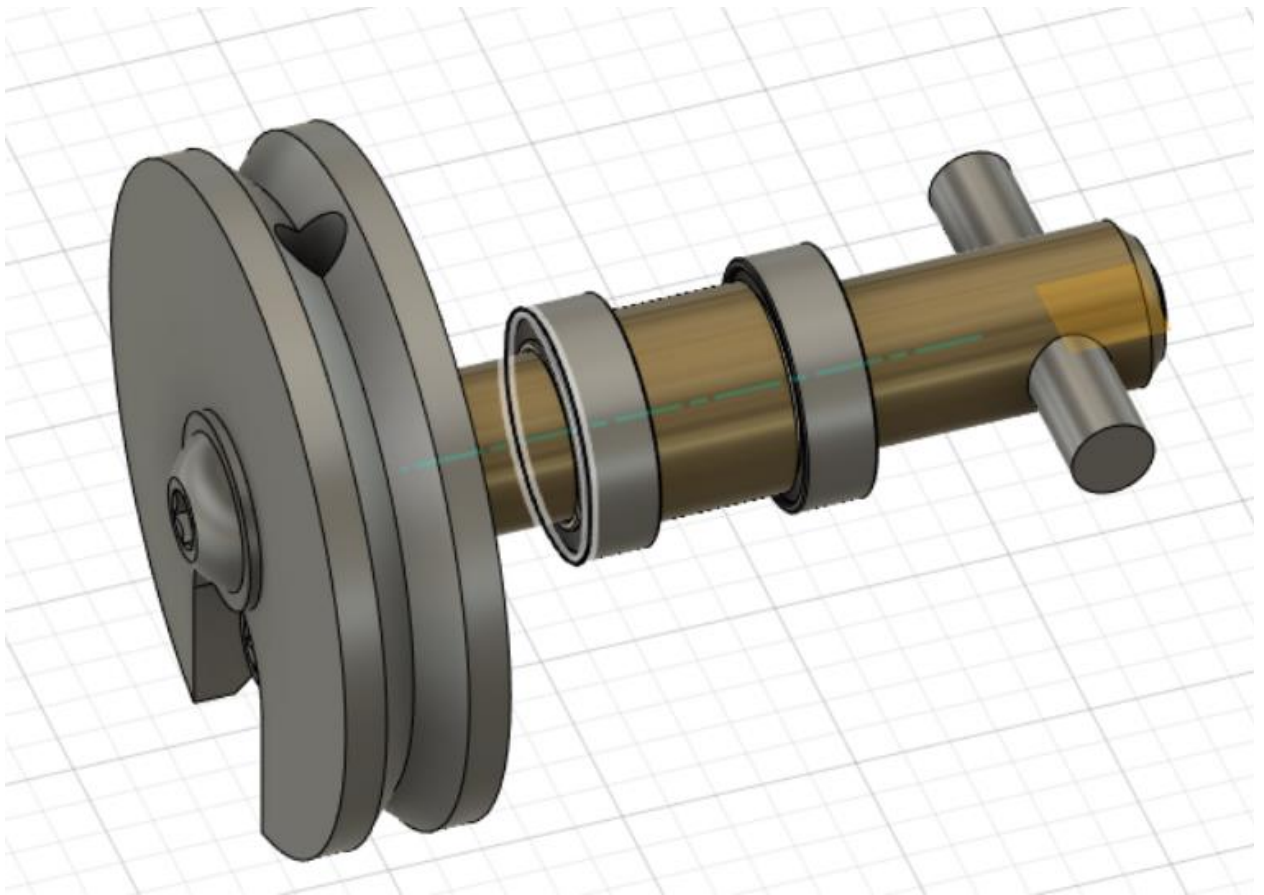


Рисунок 5.4 – Гвинт с коромислом

Ефектор складається з центрованих кульок та замка. Розташування кульок відбувається за допомогою центрованих гвинтів (рис.5.5). Для цієї задачі ми обрали ступінчасті гвинти моделі DIN 9841 M3. Сам ефектор та елемент фіксації



виготовлені зі сталі. Центруючі кульки зі сталі та кріпляться до алюмінієвої каретки за допомогою гвинтів М4 патай.

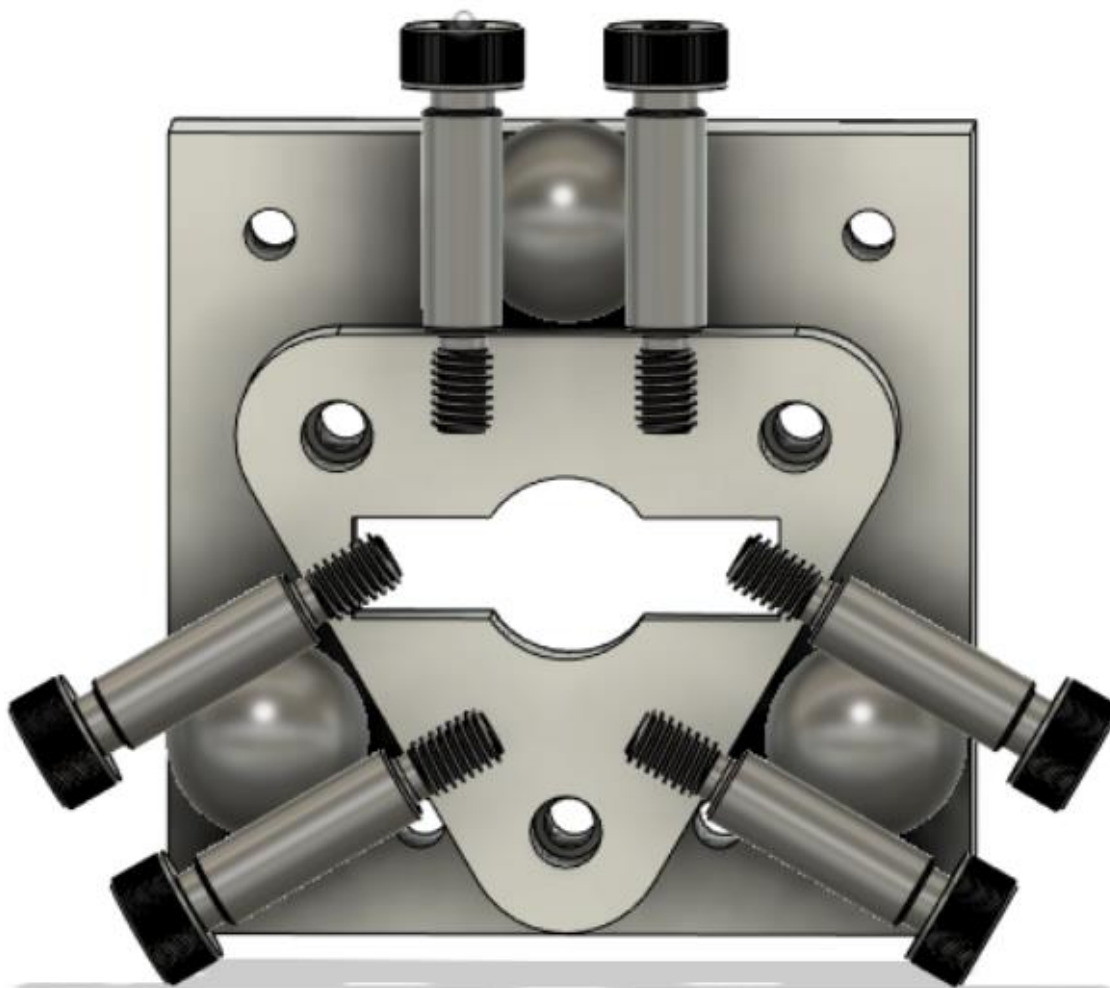


Рисунок 5.5 – Ефектор з центруючими гвинтами

Ще одним елементом є каретка для зубчастого ремня, кріплення каретки відбувається до пластикового каркасу механізму захвату. Каретка складається з двох частин (рис 5.6), які закріплені за допомогою 6 гвинтів М3. В даній каретці присутній отвір під ремінь, саме за допомогою ремня приводить у рух захватний механізм по площині ХУ.

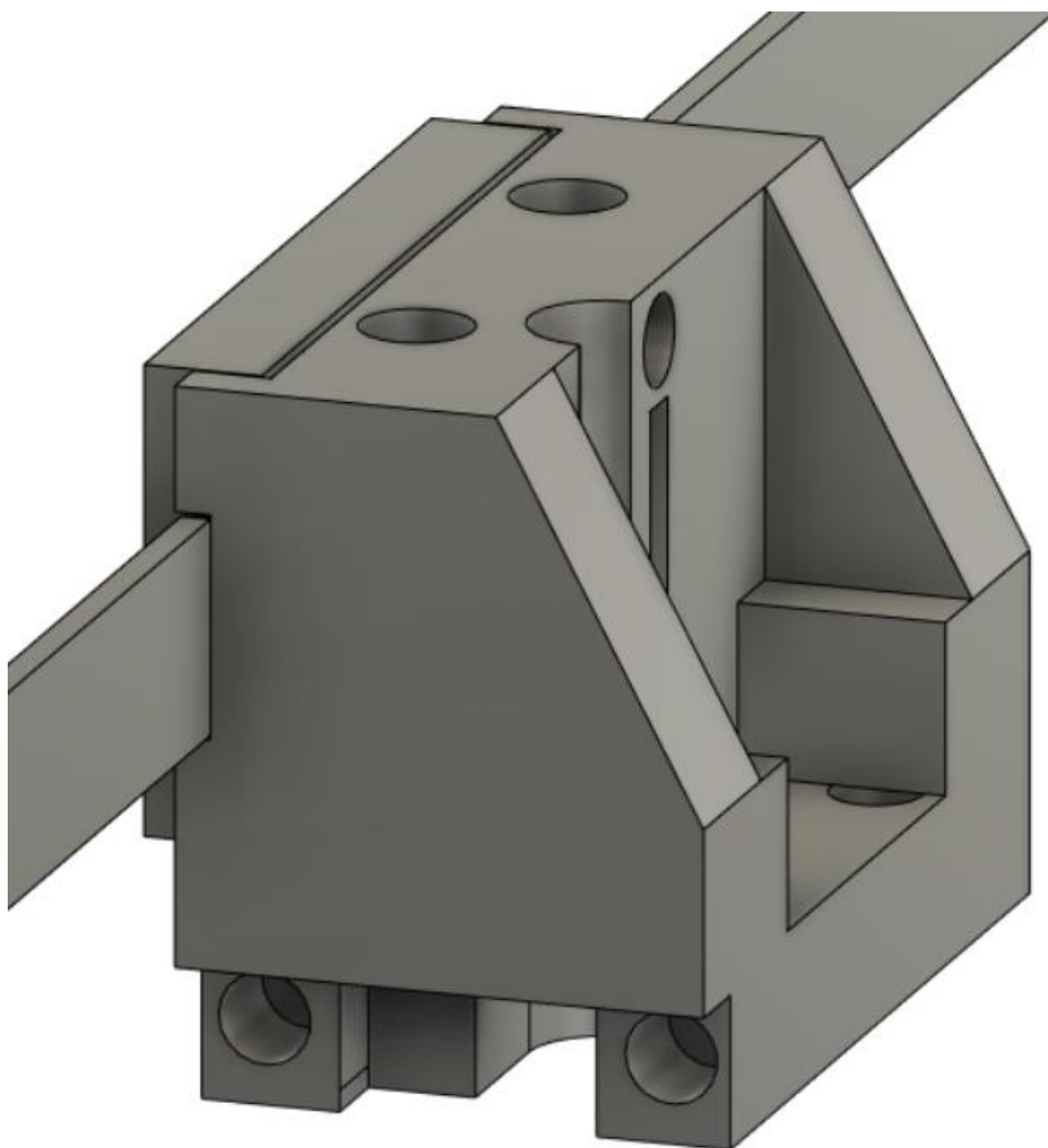


Рисунок 5.6 – Каретка під ремінь.

### 5.3 Виготовлення компонентів

Каркас для каретки було надруковано пластиком соРЕТ білого кольору. Щільність заповнення складає 99 відсотків. Треба зауважити що деталь піддалась додаткової обробки.(рис 5.7).



Рисунок 5.7 – Надрукований каркас

Кріплення каркасу до елементів системи changing tool відбувається за допомогою гвинтів з допоміжним елементом, для надійного фіксування використовується розчин дихлоретан (рис 5.8).



Рисунок 5.8 – Гвинт з додатковим елементом.

#### 5.4 Висновки до розділу

В даному розділі було проведена розробка системи changing tool. Описана сама конструкція та принцип її роботи. Приведена 3D-модель конструкції та її складових. Провели виготовлення компонентів системи changing tool.

## 6 СКЛАДАННЯ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ПРИНТЕРА

### 6.1 Поетапна збірка механічної частини 3D-принтеру.

Складання макета відбувалося не повністю з нуля, а на базі макета розробленого мною на бакалаврській дипломній роботі. Так як системи changing tool має вимогу що до конструкції, виготовлений раніше мною макет був змінений та вдосконалений. Матеріал з якого була здійснена збірка каркасу залишився той самий. Для цього ми використовували такі комплектуючі як: верстатний алюмінієвий верстат (аналог верстата Bosch), внутрішні кутові з'єднувачі серії 30L, зовнішніх єднальних кутків. Кріплення відбувалось за допомогою гвинтів М4 і М5 та Т-подібної гайки М4, та Т-подібна гайка М5. Зібраний каркас проілюстровано на (рис 6.1 а).



а) Попередній макет б) Вдосконалений макет

Рисунок 6.1 – Каркас 3D принтеру

На рис. 6.1 можемо побачити відмінність макетів, котра полягає в тому, що положення нижніх профілів була змінена, для того щоб розташувати кроковий двигун з редуктором до каркасу, та за для позитивного впливу інерційної складової.

Другим етапом здійснювалося встановлення на копусі осі Z. В осі Z також відбулися зміни, а саме використання шарико-гвинтової передачі, з верхньої опорою для ШГП ЕК10, та нижньою опорою EF10, замість шпильки з гайкою. Звичайні крокові двигуни були замінені на двигуни з редуктором. Опори для двигуна та каретки для муфти було також замінені. Незмінні залишилися вали з порами SK12.

Окремо було розроблено та надруковано кріплення для крокових двигунів з редуктором (рис 5.2). Матеріал для друку було обрано пластик саPET з щільністю заповнення 100 відсотків.

Опори для валів ЕК10 та EF10 кріпляться до каркасу за допомогою гвинтів М4 та закладної Т-подібної гайок.



Рисунок 6.2 – Двигун з редуктором та кріпленням



На рис. 6.3 зображено надруковані каретки для ШГП, матеріал для друку було обрано пластик саPET з щільністю заповнення 100 відсотків.

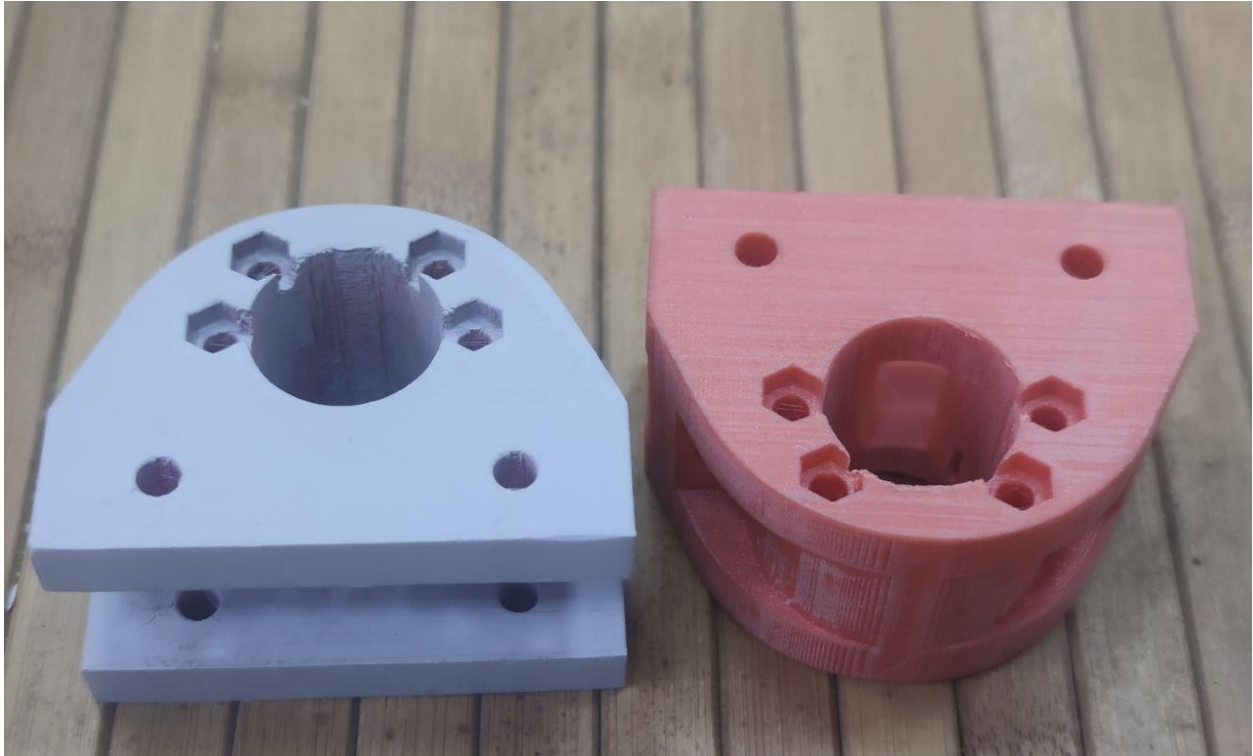


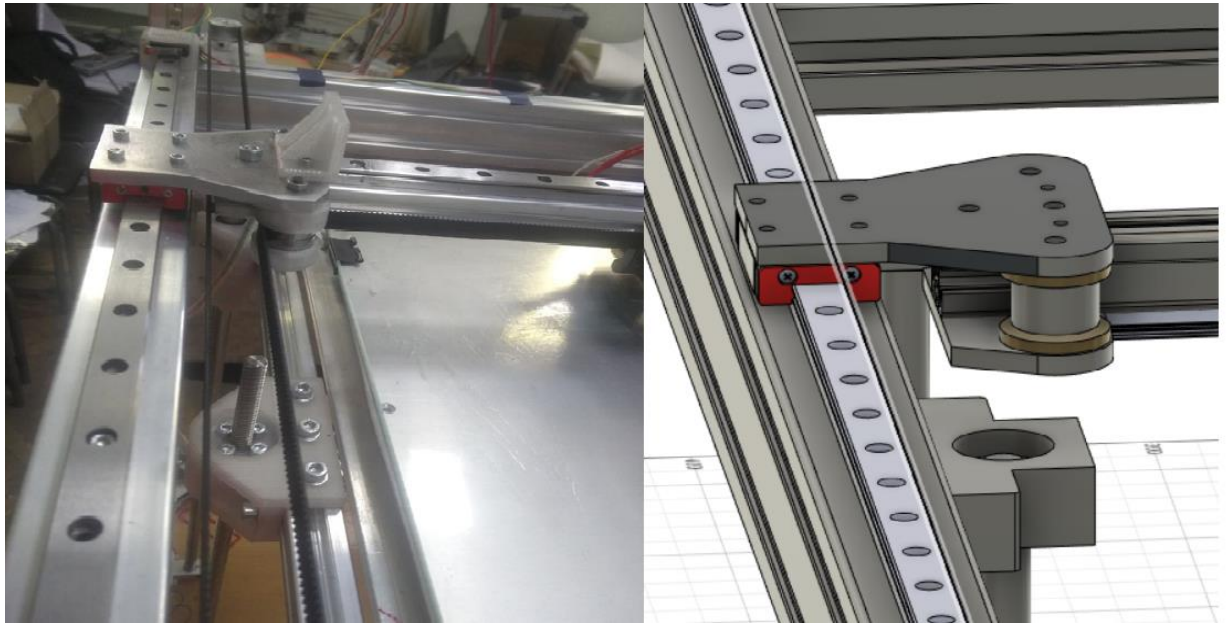
Рисунок 6.3 – Каретки для шарико-гвинтової передачі

На рис. 6.4 зображено виготовлені латунні шківни.



Рисунок – 6.4 Латунні шківни

Зміни в площині ХУ також відбулися, а саме виготовлення дотакової алюмінієвої каретки, та зміна розташування рельсової по осі Х (рис 6.5)



а) Попередня площина ХУ      б) Вдосконалена площина ХУ

Рисунок 6.5 – Площина ХУ

Виготовлення другої алюмінієвої каретки надає жорсткості системі передач, шківів фіксуються з двох сторін, тому не відбувається жодних люфтів. було замінені непривідні шківів з пластикових на латунні.

## 6.2 Висновки до розділу

В даному розділі було розглянуті зміни принтеру, описанні відмінності вдосконаленій системі передач та відмінності в комплектуючих. Також продемонстровано самостійно розроблені опори та кріплення, котрі було надруковані 3D-принтеру H-BOT.

## 7 АНАЛІЗ І МОДЕЛЮВАННЯ НЕОБХІДНОЇ ТОЧНОСТІ ЗАХВАТНОГО ПРИБОРУ СИСТЕМИ CHANGING TOOL

### 7.1 Моделювання центруючих частин системи changing tool.

Система changing tool складається з двох частин захватного механізму та ефектора екструдера. Найголовнішим процесом в даному технологічному рішенні є стикування цих двох елементів. Як ми згадували раніше в 5 розділі розробка конструкцій системи changing tool, ефектор складається з 3 сталевих кульок та алюмінієвої каретки. Контактуювання здійснюється завдяки трьом сферам і шести циліндричним напрямним. Циліндричні напрямні в даному випадку це гвинти, сферою служать сталеві кульки. (рис. 7.1) Стикування здійснюється завдяки 6 точкам і забезпечує якісне і жорстке з'єднання та самоцентрування.

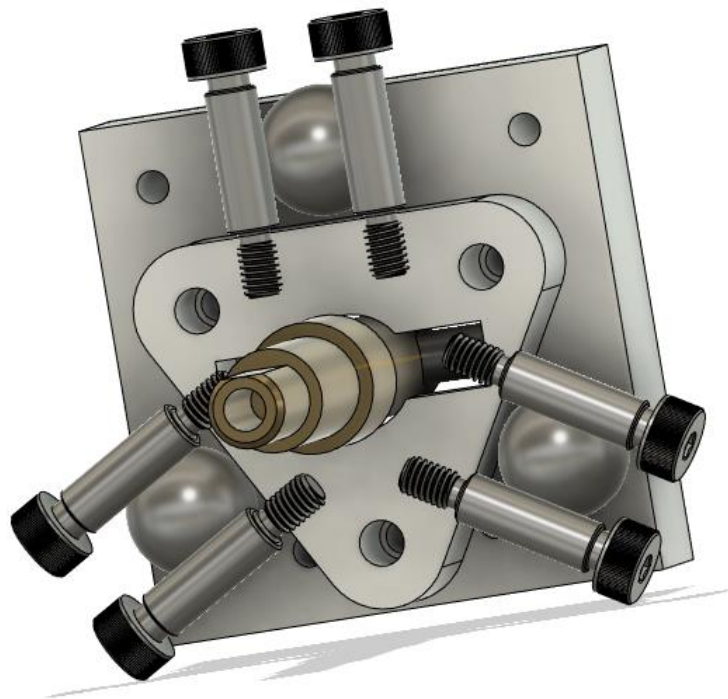


Рисунок 7.1– Ефектор і центруючі гвинти



На рисунку 7.2 представлено зображення в розрізі, де відображено вал з циліндричним фіксатором проходить крізь отвір, для подальшого повороту і фіксації зажиму, для уникнення його зміщення.

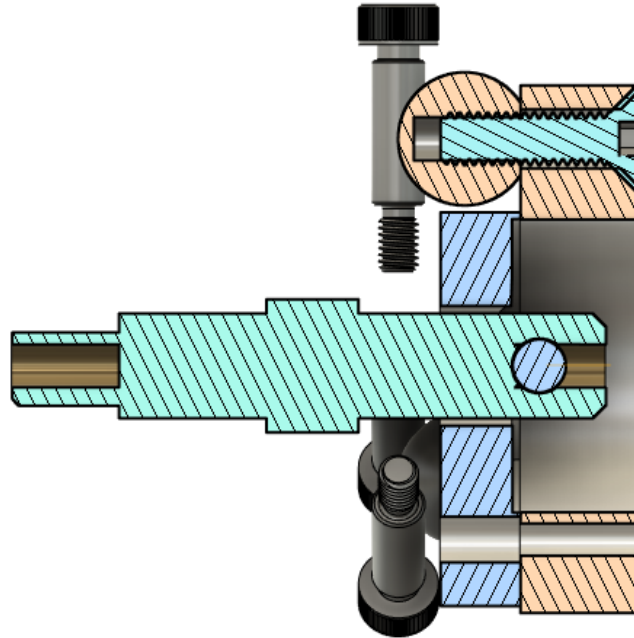


Рисунок 7.2 – Зображення в розрізі

На рисунку 7.3 представлено вид з заду, де зображено сам механізм фіксації валу з циліндричною поперечною

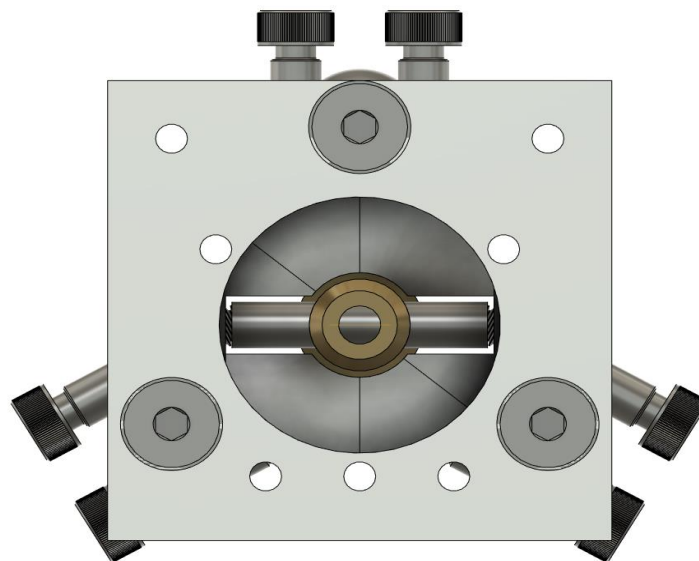


Рисунок 7.3 – Вид з заду

На рис. 7.4 продемонстровано вид стикування двох частин механізму changing tool зверху.

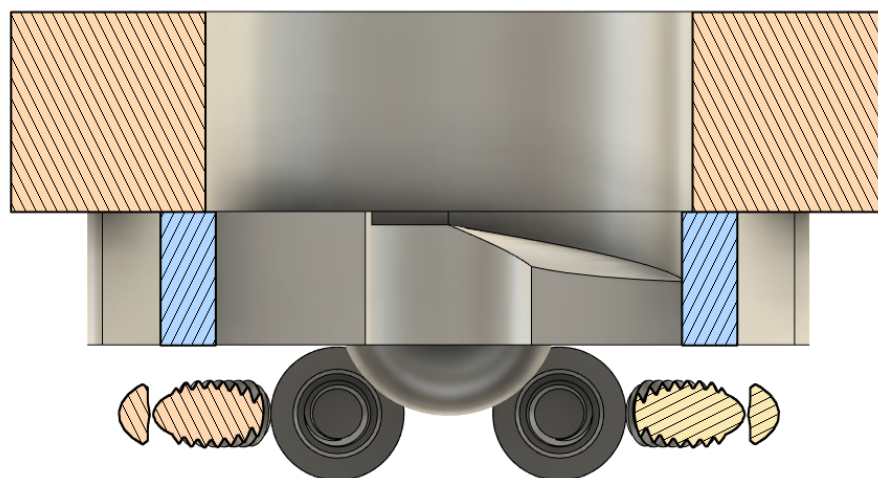


Рисунок 7.4 – Вид зверху

Для оцінки необхідної точності контактування виконано наступне моделювання, оцінювалося з яким відхиленням може підійти захоплюючий механізм до ефектора для якісного захоплення, тобто з'ясувати максимальне відхилення для кожної осі окремо їх сукупне можливе відхилення. Відхилення по осі X не оцінювалося, бо це безпосередньо ось зближення з об'єктом, так як відстань між перекладеною та так званим замком складає 5 мм, цієї відстані достатньо для чіткого контактування двох частин системи.

На рис. 7.5 зображено стикування кульок з гвинтами при відсутності відхилень.

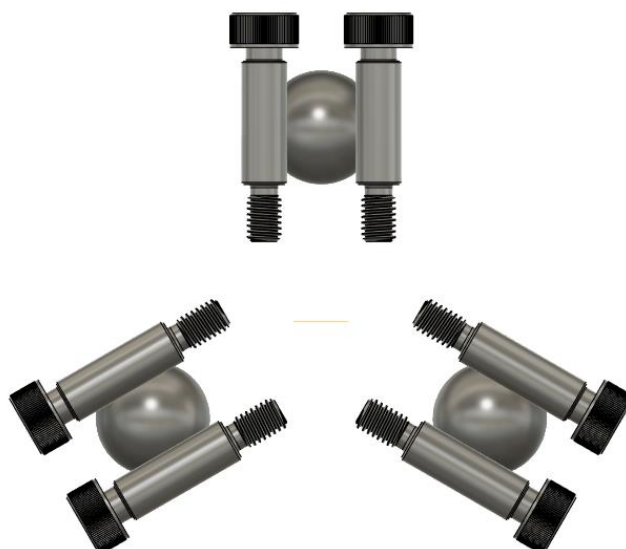


Рисунок 7.5 – Контактуювання без відхилень

Було змодельовано зміщення по осі Y (рис. 7.6)

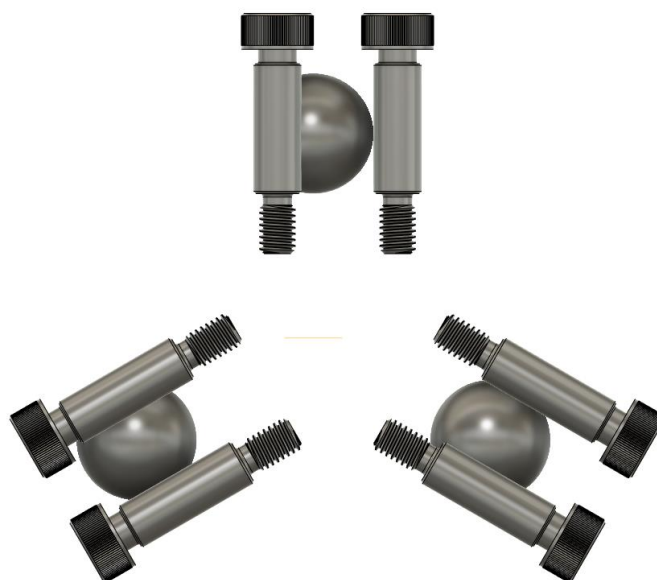


Рисунок 7.6 – Контактуювання з відхиленням по осі Y

Наступним кроком ми розглянули зміщення каретки по осі Z результат зпродемонстровано на (рис 7.7).

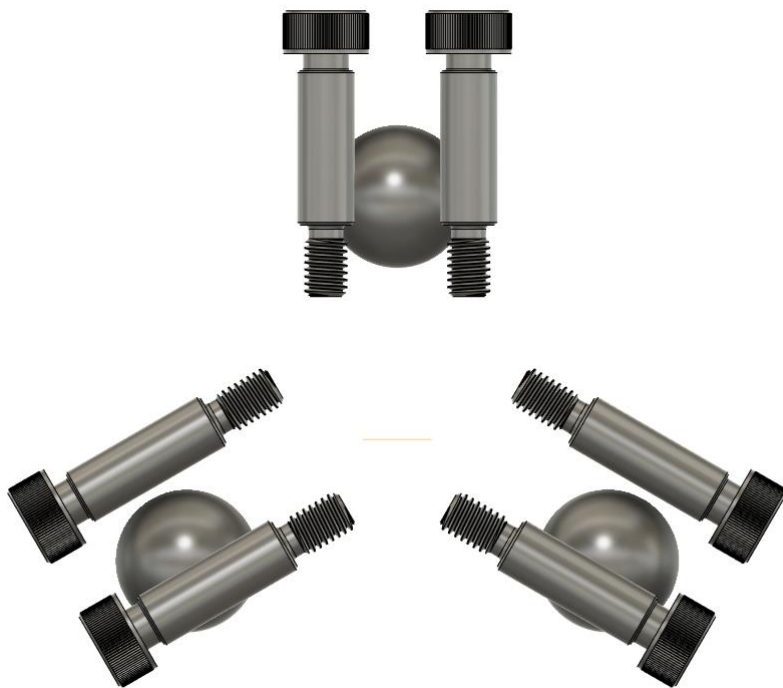


Рисунок 7.7 – Контактуювання з відхиленням по осі Z

## 7.2 Розрахунок та геометричне моделювання відхилень

Для більш детального аналізу було розроблено наступне геометричне інтрєпритація де у вигляді лінійних ділянок було обрано осі циліндричних поверхонь і сфери представлені у вигляді кола. На рис. 7.8 зображено що осі гвинтів є дотичними до кола, центрування буде виконуватися коректно при умові, коли центр кола буде розташований між цими осями, так як осі відіграють роль дотичних то відстань між центра кола до осі гвинтів складає 5 мм, тобто допустиме значення відхилення становитиме не більше 5 мм. При значенні відхилену 5мм або більше цетрування не відбудеться як наслідок захват каретки буде не можливе.

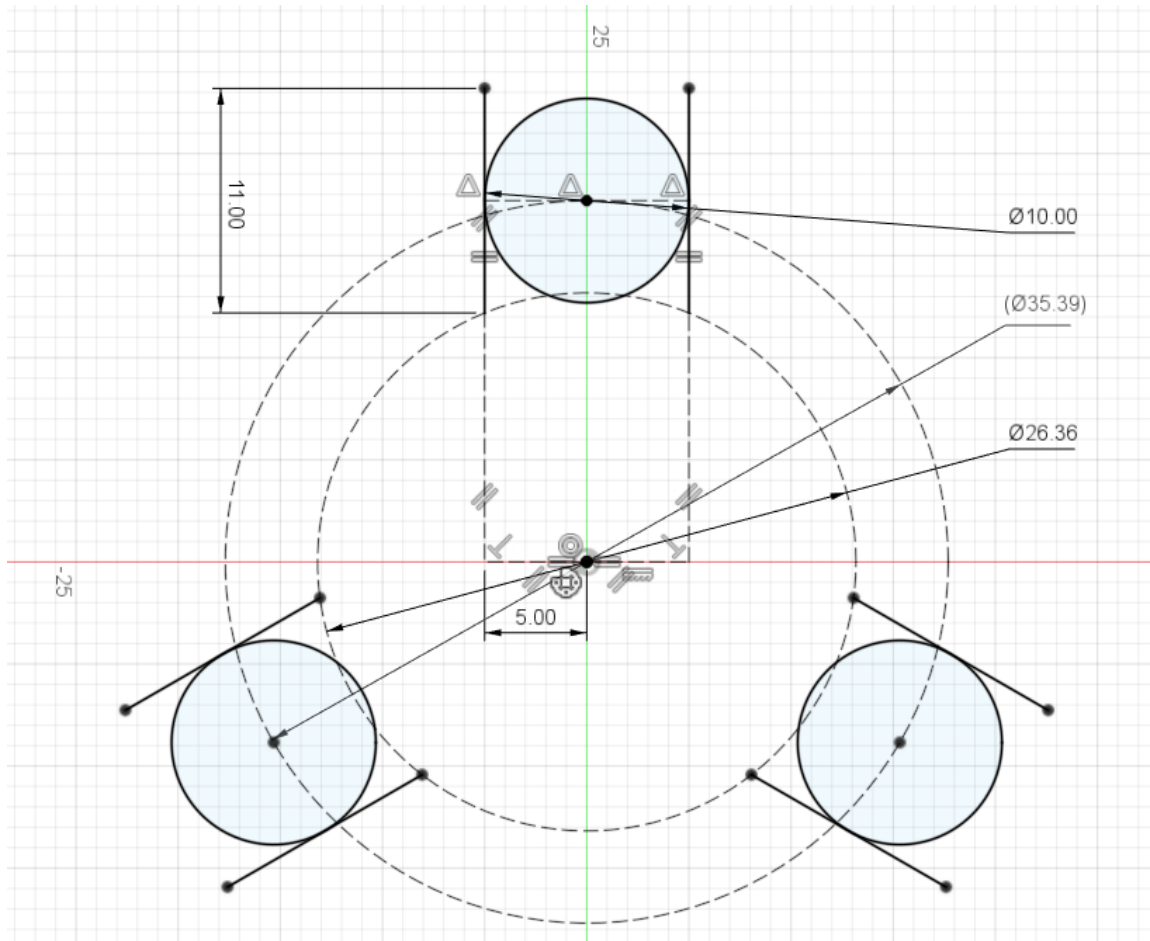


Рисунок 7.8 – Геометричне контактування без відхилень

Так як у нас осі Z та Y перпендикулярні, то при відхилення по двом осям одночасно, зміщення центру кола розраховуватиметься за формулою 7.1

$$c = \sqrt{y^2 + z^2}, \quad (7.1)$$

де  $y$  – зміщення по осі Y;

$z$  – зміщення по осі Z;

$c$  – сумарне відхилення центра кола.

Якщо  $c \geq 5$ , центрування захватного механізму та ефектора екструдеру не відбудеться.

При значенні  $c < 5$ , центрування відбудеться коректно.

У таблиці 7.1 зображені результати експериментальних досліджень.

Таблиця 7.1 – Експериментальні значення

Номер експеримент	Відхилення по осі Y	Відхилення по осі Z	Сумарне відхилення C
1	4	0	4
2	6	0	6
3	0	3	3
4	0	7	7
5	2	4	4.47
6	4	4	5.65
7	3	3	4.24
8	1	5	5.1
9	3	5	5.83
10	1	1	1.41

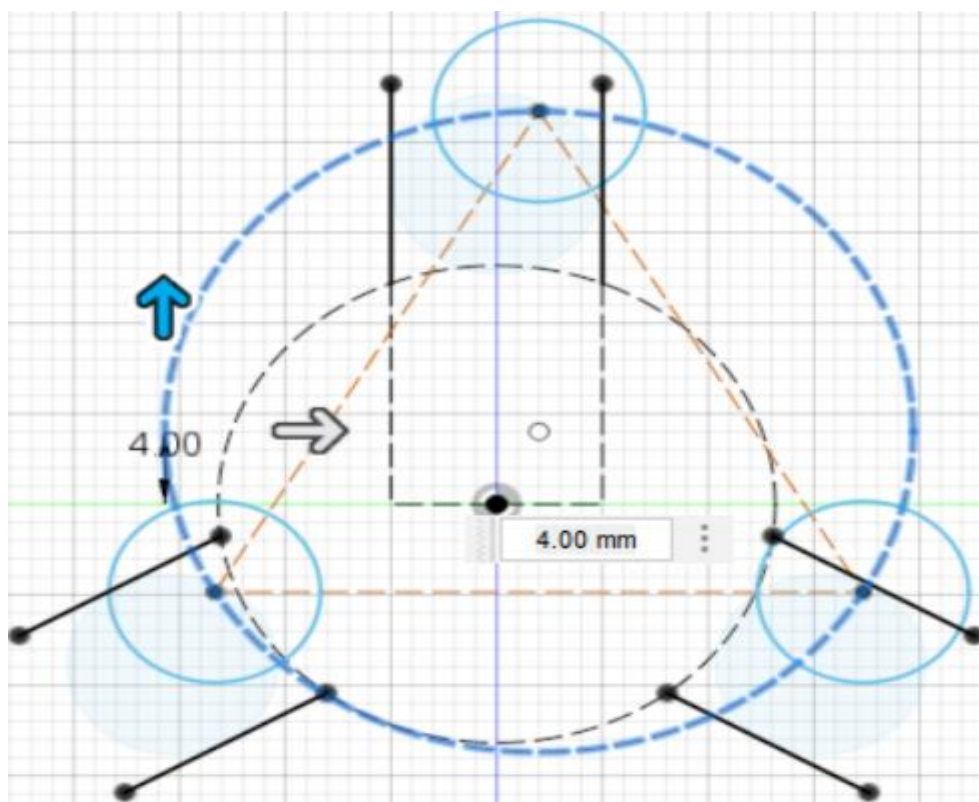


Рисунок 7.9 – Результати експерименту 5

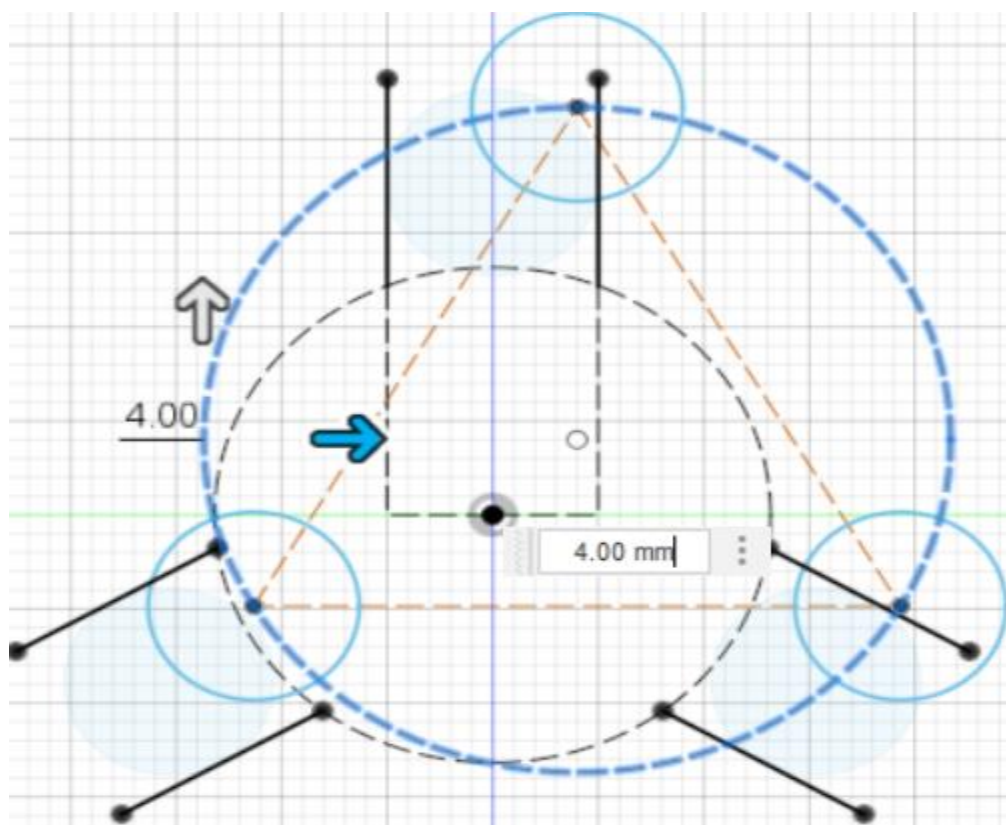


Рисунок 7.10 – Результати експерименту 6

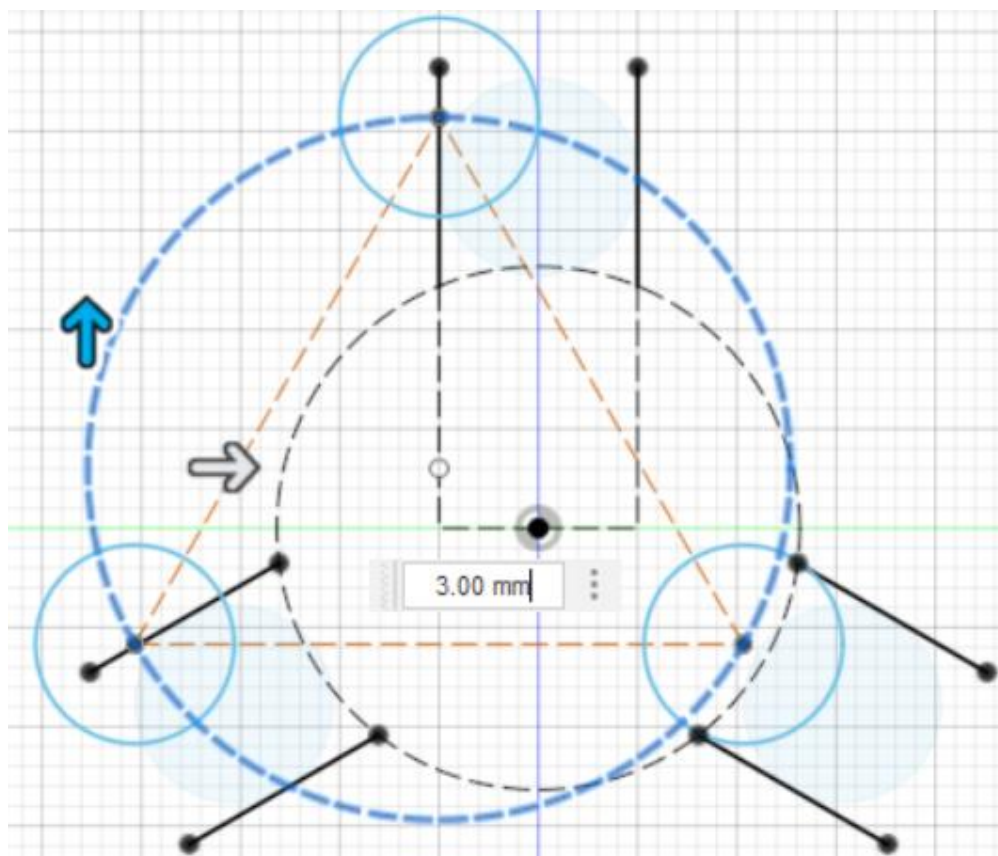


Рисунок 7.11 – Результати експерименту



## 7.2 Висновки до розділу.

В даному розділу було розроблена 3D-модель центруючих гвинтів з кульками ефектора, в якому було описано принцип самоцентрування цих елементів. Для більш детальної оцінки можливих відхилень, була розроблена геометрична інтерпретація цих елементів в котрій проводились експеримент з можливими відхиленнями. Було проведено 10 експериментів, в котрих було розраховано сумарне відхилення, отримані результати внесені до таблиці. Також було приведені візуальні підтвердження у вигляді геометричній інтерпретації.



## 8 ОХОРОНА ПРАЦІ

Здійснення кваліфікаційної роботи, яка складається з розробки моделі та її складання, здійснювалося на робочому місці. Робоче місце складається з столу стільця, та персонального ком'ютера. Саме робоче місце знаходиться в лабораторному приміщенні. Приміщення має площу приблизно  $47.74\text{м}^2$ , а висота в свою чергу складає 4 метра (рис 8.1). За не складними підрахунками, отримаємо що об'єм складатиме  $190.96\text{ м}^3$ . Згідно с ДСанПін 3.3.2.007-98, площа одного робочого місця повинно складати не менше  $6\text{ м}^2$  а об'єм робочого місця повинен складати не менше  $20\text{ м}^3$  [17]. В лабораторії одночасно працює 5 чоловік. Для даного приміщення робоча площа на одну людину складатиме  $9.54\text{ м}^2$  а об'єм в свою чергу становитиме  $38.19\text{ м}^3$ .

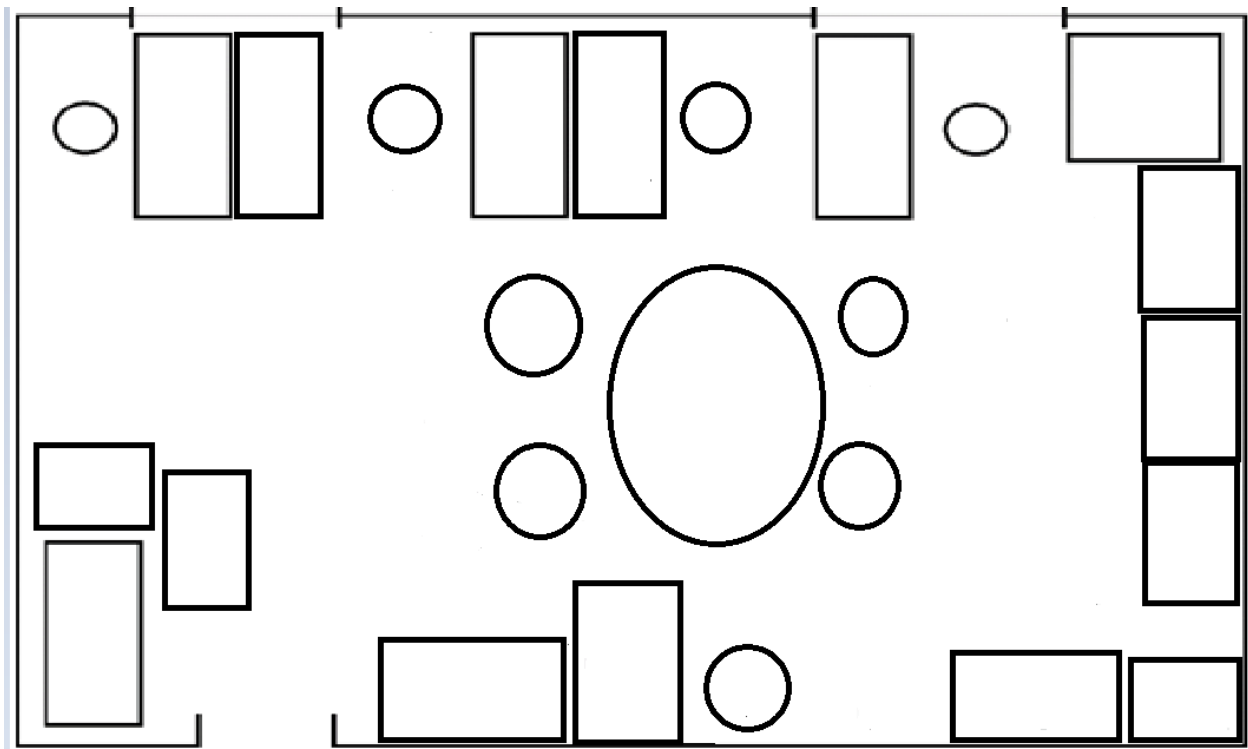


Рисунок 8.1 – Схема лабораторного приміщення

Для розрахунку природного освітлення потрібно встановити площу вікон, що буде надаватиме нормоване значення коефіцієнт природного освітлення. В подальшому необхідно порівняти розраховану площу з фактичною. В лабораторії присутньо два вікна які мають розміри  $2,5 \text{ м} \times 2 \text{ м}$ . Умови праці в приміщенні вважаються допустимими якщо:

$$S_{\text{вік}} \leq S_{\text{реал}}, \quad (8.1)$$

де  $S_{\text{вік}}$  – площа вікон, яка обчислюється за формулою (4.2);

$S_{\text{реал}}$  – реальне значення площини вікон в приміщенні що становить  $5 \text{ м}^2$ .

$$S_0 = \frac{e_n \eta_0 K_{зд} K_z S_n}{100 \tau_0 r_1}, \quad (8.2)$$

де  $S_0$  – площа світлових отворів, яка надає нормовані значення КПО (коефіцієнт природного освітлення) в приміщенні;

$S_n$  – площа підлоги приміщення;

$e_{\text{норм}}$  – нормоване значення КПО, для 3-го поясу світового клімату, яка складає  $e = 0.9$ ;

$\eta_0$  – світлова характеристика вікна;

$K_{\text{буд}}$  – коефіцієнт який враховує затінення вікон, будівлям які розположені протилежно,  $K = 1$ ;

$K_z$  – коефіцієнт запасу ( це значення на пряму залежить від періодичності очищення скла, та показнику концентрації пилу в приміщенні),  $K_z = 1,4$ ;

$\tau_0$  – загальний коефіцієнт світлопропускання який визначається в залежності від коефіцієнта пропускання скла, втрат світла в оправах вікна, шару забруднення, наявність сонцезахисних конструкцій,  $\tau_0 = 0,94$ ;

$r_1$  – коефіцієнт, що враховує підвищення КПО за рахунок відображення.

$$S_o = \frac{0.9 \times 15 \times 1 \times 1.4 \times 42.7}{100 \times 0.94 \times 1.1} = 7,8 \text{ м}^2. \quad (8.3)$$

Так як,  $S_{\text{в\ddot{и}к}} > S_{\text{реал}}$ , для поліпшення даної характеристики необхідно використовувати додаткове штучне освітлення.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи, було розроблено технологічне рішення для забезпечення можливості в процесі друкування використовувати декілька матеріалів.

Головною метою роботи є розробка системи changing tool, котра дозволяє використовувати до 5 екструдерів з різними матеріалами. Була проаналізована література за темою роботи. Був проведений аналіз систем котрі мають змогу використовувати декілька матеріалів. Було розглянуто сумісні кінематики котрі задовольняють вимогам конструкції changing tool. Проведено аналіз параметрів котрі впливають на якісні показники друку.

Проведена розробка 3D-моделі системи changing tool, розробка системи постачання та принцип пересування каретки з захватним механізмом.

Проаналізовано особливості системи передач в кінематиці H-BOT.

Було розроблено та надруковані компоненти для нашої системи.

Було проаналізовано та вдосконалено існуючий макет 3D-принтеру з кінематикою H-BOT.

Виконали розробку моделі та проаналізували вплив параметрів за допомогою геометричною інтерпретації захватного механізму з ефектором екструдера, а сама розглянули можливі відхилення в положенні центруючих гвинтів відносно сфер каретки екструдерів. Знайшли експериментальним шляхом усі можливі варіанти відхилень та обчислили допустимі значення зміщення каретки екструдера, та мінімізували можливі відхилення, за допомогою використання більш точних систем передач.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015. Документація. звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення [Текст] – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.
2. Невлюдов І.Ш., Косенко В.В., Євсєєв В.В. Методичні вказівки з «Розробки й оформлення магістерської атестаційної роботи» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітні програми: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» Харків: ХНУРЕ, 2019. 55 с.
3. Diamond Hotend – [Електронний ресурс] / Режим доступу: [https://reprap.org/wiki/Diamond\\_Hotend](https://reprap.org/wiki/Diamond_Hotend).
4. Chimera Hotend – [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.filastruder.com/products/chimera-cyclops>.
5. Changing tool – [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://hackaday.com/tag/tool-changer>.
6. Технологии 3D-печати [Електронний ресурс]; Режим доступу: [https://www.ixbt.com/printer/3d/3d\\_tech.shtml](https://www.ixbt.com/printer/3d/3d_tech.shtml).
7. Всё о 3D-печати. Аддитивное производство. Основные понятия [Електронний ресурс]/ Режим доступу [https://3dtoday.ru/wiki/3D\\_print\\_technolog](https://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technolog).
8. Технологія FDM/FFF [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://3d-laboratory.ru/fff-tec>
9. Кінематики в технологіях FDM/FFF [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://3dtoday.ru/blogs/dagov/3d-printing-for-beginners>

10. Кінематики в технологіях FDM/FFF [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://top3dshop.ru/blog/types-of-fdm-3d-printer.html>
11. Декартові кінематики [Електронний ресурс] / Режим доступу <https://3dplast.biz/a398991-kinematika-printera-preimuschestva.html>
12. Кінематика H-BOT [Електронний ресурс] / Режим доступу <https://3dprinter.ua/kinematics-3d-printer/>
13. Розрахунки кінематики H-BOT [Електронний ресурс] / Режим доступу <https://3dtoday.ru/questions/pochemu-kinematika-h-bot-luchshaya>
14. Розрахунки кінематики H-BOT [Електронний ресурс] / Режим доступу <https://3dtoday.ru/blogs/sergeydsi/mathematical-calculation-maximum-acceleration-kinematics-of-the-printer/>
15. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Основи охорони праці та цивільний захист" підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, В. А. Айвазов, О. В. Мамонтов, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 517 с.
16. Боклаг Д.К. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ОДНОЧАСНОГО 3D ДРУКУ ДЕКІЛЬКОМА МАТЕРІАЛАМИ. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2021) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – Вип. 2. – 185 с. С. -75-79
17. Невлюдов І. Ш., Разумов-Фризюк Є. А. / Regression analysis of the influence of 3D printing on product quality / І. Ш. Невлюдов, Разумов-Фризюк Є. А. // Theoretical and scientific bases of development of scientific thought : матеріали V-ої Міжнародної наукової конференції за новими тенденціями у науці та освіті. – Рим, Італія 16-19 лютого 2021 р. – 606 с.