

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

Другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

Моделювання системи розпилення зв'язувальної речовини в 3D принтері системи 3DP

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи АУТПМ-22-1

Пархоменко Д.В.

(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Автоматизоване управління технологічними процесами

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Овчаренко В.Є.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.

(прізвище, ініціали)

2024р.

## ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ  
 Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР  
 Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський)  
 Спеціальність \_\_\_\_\_ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
 Тип програми \_\_\_\_\_ Освітньо-професійна  
 Освітня програма \_\_\_\_\_ Автоматизоване управління технологічними процесами

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР

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

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Пархоменко Денису Віталійовичу  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання системи розпилення зв'язувальної речовини в 3D принтері системи 3DP

Затверджена наказом по університету від 03.11.2023 № 1286 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 19.01.2024

3. Вихідні дані до роботи 3D модель системи подачі з'єднувальної речовини, результати серії симуляцій протікання рідини через проміжки, рішення по оптимізації насосних систем

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Вступ

4.2 Аналіз технологій тривимірного друку

4.3 Розрахунки розміру шестерні

4.4 Моделювання макету шестеренчастого насосу у Fusion 360

4.5 Симуляція протікання

---



---



---



---



---

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій демонстраційний матеріал у форматі Power Point (\*.pptx) – 11с.

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Симуляція протікання	Разумов-Фризюк Є.А.		

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз завдання	02.09.2023	<i>Виконано</i>
2	Аналіз аналогічних пристроїв	03.09.2023	<i>Виконано</i>
3	Аналіз конструкції	06.09.2023	<i>Виконано</i>
4	Аналіз технологій друку	08.09.2023	<i>Виконано</i>
5	Розрахунки розміру шестерень насосу	12.10.2023	<i>Виконано</i>
6	Вибір додаткових елементів	16.11.2023	<i>Виконано</i>
7	Побудова 3D моделі	10.12.2023	<i>Виконано</i>
8	Симуляція протікання	16.12.2023	<i>Виконано</i>
9	Оформлення пояснювальної записки	28.12.2023	<i>Виконано</i>
10	Перевірка керівником роботи	03.01.2024	<i>Виконано</i>
11	Нормоконтроль	03.01.2024	<i>Виконано</i>
12	Подання роботи на перевірку Інтернет сервісом Unichesk	09.01.2024	<i>Виконано</i>
13	Подання роботи на рецензію	15.09.2023	<i>Виконано</i>
14	Подання роботи на підпис зав. кафедри	18.09.2023	
15	Подання атестаційної роботи в ЕК	19.09.2023	

Дата видачі завдання 01.09.2023

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Пархоменко Д.В.  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

проф. Овчаренко В.Є.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи містить: 77 с., 3 табл., 69 рис., 3 дод., 15 джерел.

ІНЖЕКЦІЙНИЙ ТРИВИМІРНИЙ ДРУК, МОДЕЛЬ, ІНЖЕКЦІЯ, ШЕСТЕРЕННИЙ НАСОС, ДРУК, ТЕХНОЛОГІЯ, 3D ПРИНТЕР.

Об'єкт дослідження – технологія інжекційного 3D друку 3DP.

Предмет дослідження – конструкція інжекційного 3D принтеру, що працює за технологією 3DP

Мета роботи – оптимізація конструкції систем подачі з'єднувальної речовини у робочу зону принтера.

Методи дослідження – використовуючи 3D макет побудований у програмі Fusion 360 проаналізувати характеристики інжекційних систем, виявити недоліки і навести методи оптимізації.

В ході виконання кваліфікаційної роботи було виконано аналіз багатьох видів технологій тривимірного друку, а також розглянуто різні види інжекційних систем і насосів, що забезпечують подачу речовини у робочу зону. Розроблено насосну систему для 3DP принтера, а також побудовано макет. Було проаналізовано недоліки шестеренних насосних систем і наведено варіанти оптимізації конструкції.

## **ABSTRACT**

Explanatory note to research report: 77 p., 3 tables, 69 pictures, 3 additions, 15 sources.

**INJECTION THREE-DIMENSIONAL PRINTING, MODEL, INJECTION, GEAR PUMP, PRINTING, TECHNOLOGY, 3D PRINTER.**

The object of study is the design of injection systems for three-dimensional printers.

Purpose – to optimize the design of systems for supplying a binder to the working area of the printer.

Research methods – using a 3D model built in the Fusion 360 program to analyze the characteristics of injection systems, identify shortcomings and provide optimization methods.

In the course of the qualification work, many types of 3D printing technologies were analyzed, and various types of injection systems and pumps that supply the substance to the working area were considered. A pumping system for a 3DP printer was developed and a model was built. The disadvantages of gear pumping systems were analyzed and design optimization options were presented.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	7
Вступ.....	8
1 Аналіз технологій 3D-друку та принтерів.....	9
1.1 Актуальність порошкових 3D принтерів.....	9
1.2 Принцип роботи 3DP-принтерів .....	11
1.3 Аналоги .....	13
1.4 Аналіз існуючих кінематичних .....	14
1.5 Висновки до першого розділу .....	17
2 Аналіз кінематичної системи і технологій друку .....	18
2.1 Кінематична схема.....	18
2.2 Аналіз розробленої 3D моделі системи подачі порошку .....	19
2.3 Опис конструкції принтера.....	20
2.4 Аналіз технологій друку .....	23
2.5 Аналіз типів точних насосних систем.....	27
2.5 Висновки другого розділу .....	30
3 Вибір типу насосної роторної системи і розрахунки розміру .....	31
3.1 Типи конструкції шестеренного насосу .....	31
3.2 Вибір конструкції насосу і розрахунки розміру шестерні у насосі.....	35
3.3 Висновки третього розділу .....	40
4 Моделювання системи подачі з'єднувальної речовини.....	41
4.1 Базові відомості про точні насосні системи .....	41
4.2 Моделювання системи .....	41
4.3 Висновки четвертого розділу .....	46
5 Дослідження пропускної здібності шестеренчастого екструдеру .....	47
5.1 Симуляція роботи екструдеру .....	47
5.2 Висновки п'ятого розділу .....	61
6 Охорона праці.....	62
Висновки .....	63
Перелік джерел посилань .....	64
Додаток А Апробація наукових результатів .....	66
Додаток Б Демонстраційний матеріал .....	69
Додаток В Відомість кваліфікаційної роботи .....	77

## **ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ**

ОПП – освітньо-професійна програма;

ПЗ – програмне забезпечення;

ЗДР – технологія тривимірного друку.

## ВСТУП

Порошкові 3D принтери не є традиційним способом виготовлення деталей. 3D принтери є досить новим рішенням на виробництвах, незважаючи на те, що технологію було створено ще у вісімдесяті роки ХХ століття, широкої популярності 3D принтери набули зовсім недавно. Їх важливою відмінною рисою є те, що вони здатні створювати складні, з геометричної точки зору, структури. 3D принтери також мають певні обмеження – для масового виробництва простої деталі вони неефективні, і в питанні масового виробництва варто звернутися до більш традиційних методів виготовлення деталей, таких як штампування. 3D принтери надають високу точність виготовленої деталі, що робить принтери ідеальними для виготовлення одиничних деталей або малих партій. Особливо варто відзначити, що 3D друк як явище вкрай різноманітне та має на увазі безліч різних технологій 3D друку. Ми розглянемо принтери базовані на такій технології як 3DP тобто технології до інжекційного тривимірного друку.

Інжекційний друк був би неможливим без точних систем подачі зв'язувальної речовини, для цього використовують точні насосні системи, таким чином метою роботи є оптимізація конструкції систем подачі з'єднувальної речовини у робочу зону принтера.

Об'єкт дослідження – конструкція інжекційних систем тривимірних принтерів.

Предмет дослідження – геометричні параметри насосних систем.

Методи дослідження – використовуючи 3D макет побудований у програмі Fusion 360 проаналізувати характеристики інжекційних систем, виявити недоліки і навести методи оптимізації.

Для досягнення цілей кваліфікаційної роботи необхідно вирішити завдання, сформувані під час проходження практики:

- провести аналіз існуючих порошкових 3D-принтерів;
- проаналізувати технології тривимірного друку;
- провести аналіз технологій порошкового друку, а також насосів;
- на основі аналізу насосних систем розробити насосну конструкцію.
- провести імітацію роботи насосу при різних значеннях проміжку.

Звіт виконано згідно з [1-2].

## 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ ТА ПРИНТЕРІВ

### 1.1 Актуальність порошкових 3D принтерів

Порошковий 3D-друк став одним з найпоширеніших видів 3D-друку в промисловості завдяки простоті друку та економічній ефективності. До цього типу друку відносяться такі технології, як інжекційний тривимірний друк (англ. 3D Printing, 3DP) електронно-променева плавка (англ. Electronbeam melting, EBM), пряме лазерне спікання металу (англ. Direct metal laser sintering, DMLS), селективне лазерне спікання (англ. Selective laser sintering, SLS) та селективне теплове спікання (англ. Selective heat sintering, SHS).

Тривимірний струменевий друк (3DP) був найпершим методом ламінованого моделювання, розробленим у 1993 році. Метод друку був запропонований двома студентами Массачусетського технологічного інституту (MIT) Тімом Андерсоном і Джимом Бредом, і саме завдяки їм термін 3D-друк поширився по всьому світу.

Сьогодні експерти налічують понад 30 технологій 3D-друку, кожна з яких має свої унікальні характеристики, але в деяких аспектах вони дублюють одна одну. Американське товариство з випробувань і тестування матеріалів (ASTM International) класифікує технології струменевого 3D-друку на дві категорії:

- Material jetting, розбризкування матеріалу;
- Binder jetting, це розпилення сполучної речовини.

У першому випадку сам будівельний матеріал подається безпосередньо через сопло і застигає після нанесення; у другому – з'єднувальна речовина розпорошується на тонкі шари гіпсу, полімерів або металевих порошоків; прототипом технології 3DP є другий метод [3].

Якщо детальніше розглянути процес 3D-друку за технологією 3DP, то він виглядає так: формувальна камера 3D-принтера складається з двох частин: перша – це матеріал, з якого вирощується модель, а друга – сам процес:

- CAD-модель завантажується в комп'ютер, підключений до принтера за допомогою кабелю Ethernet, і нарізається на шари товщиною приблизно 0,1 мм;
- тонкий шар порошкоподібного матеріалу (гіпс, полімер, пісок, метал) наноситься на платформу за допомогою валика;
- зв'язувальна речовина (клей, вода, спеціальна суміш) розпилюється за допомогою головки відповідно до координат меж першого шару, отриманих з

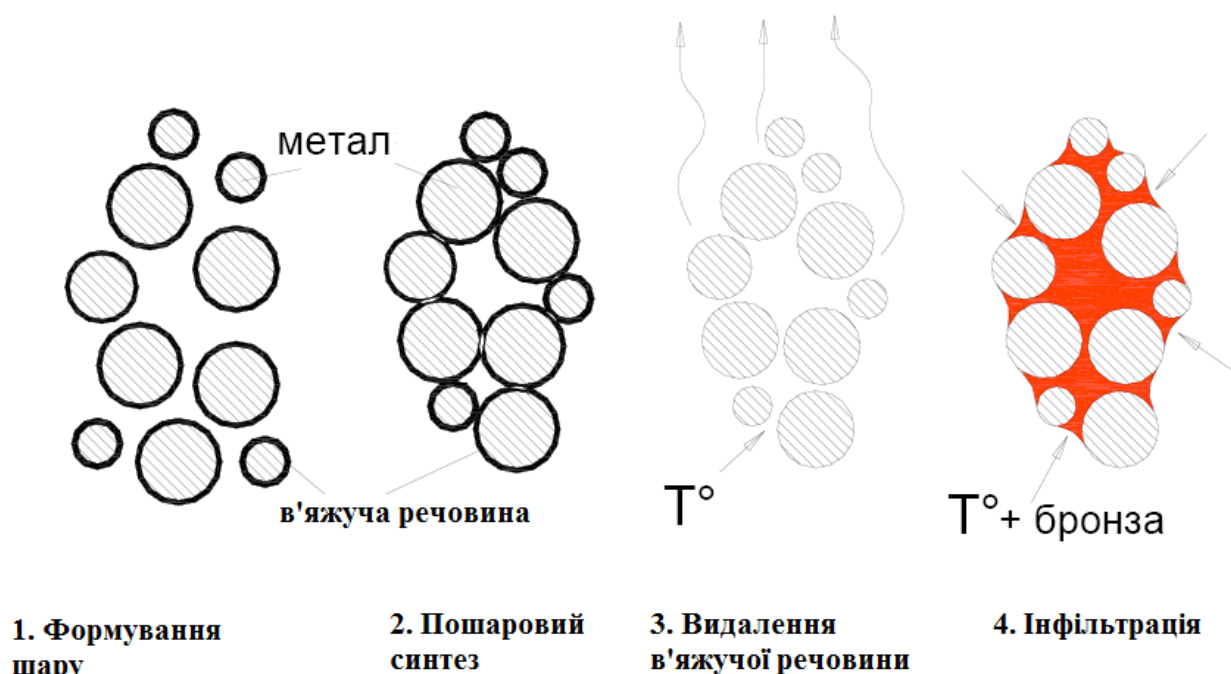
комп'ютера;

– платформа з моделлю опускається на товщину шару, а камера з розчином піднімається на таку ж відстань;

– ролики розкочують наступний шар і процес повторюється;

– після завершення 3D-друку виріб виймається з порошкового шару, а залишки ретельно очищаються.

Якщо модель виготовляється з металевого порошку, додається додатковий процес випалу в спеціальній печі. Цей процес проілюстровано на рисунку 1.1.



1,2 – Формується, зелена модель з матричного порошку і сполучного речовини;  
3 – Виріб поміщають в піч, наповненою захисним газом; 4 – При підвищенні температури до 1000-1100 градусів сполучна речовина видаляється, а вільне місце навколо частинок порошку просочує метал (наприклад бронза) попередньо поміщений поруч з зеленою моделлю.

Рисунок 1.1 – Процес випалу

SLM (селективне лазерне плавлення) – це інноваційна технологія виготовлення складних виробів шляхом лазерного плавлення металевих порошків з математичних CAD-моделей (3D-друк металом). SLM використовується для створення як прецизійних металевих деталей, що використовуються в складі вузлів і агрегатів, так і інтегрованих металевих деталей. Використовується для створення як формованих конструкцій.

Технологія використовує потужні лазери для створення тривимірних фізичних

об'єктів; фізико-механічні властивості виробів, виготовлених за технологією SLM, часто перевищують властивості виробів, виготовлених за допомогою звичайних методів, що робить цей процес успішною альтернативою традиційним методам виробництва.

Об'єкти SLM допомагають промисловим компаніям, що працюють в аерокосмічній, енергетичній, машинобудівній та приладобудівній галузях, вирішувати складні виробничі завдання.

Однак у нашому випадку практичніше використовувати 3DP, оскільки технологія SLM використовується для більш складних і промислових застосувань, тоді як 3DP може застосовуватися в багатьох галузях і не вимагає таких високих витрат.

Технологія 3DP ідеально відповідає нашим потребам. Струменеві 3D-принтери – це економічний, недорогий і простий у використанні інструмент для виготовлення складних деталей як для виробництва, так і для особистого користування [4].

## 1.2 Принцип роботи 3DP-принтерів

Порошкові 3D принтери є популярним промисловим варіантом 3D-друку, але сам процес друку за технологією binder jetting накладає певні обмеження, як у конструкції механічної частини, так і у швидкості.

3DP-принтери для роботи використовують порошкову речовину, яку, за допомогою екструдера або лазера, зв'язують, важливою частиною та головним обмеженням є саме процес подачі порошку на робочу ділянку. Загальну схему порошкових принтерів наведено на рисунку 1.2.

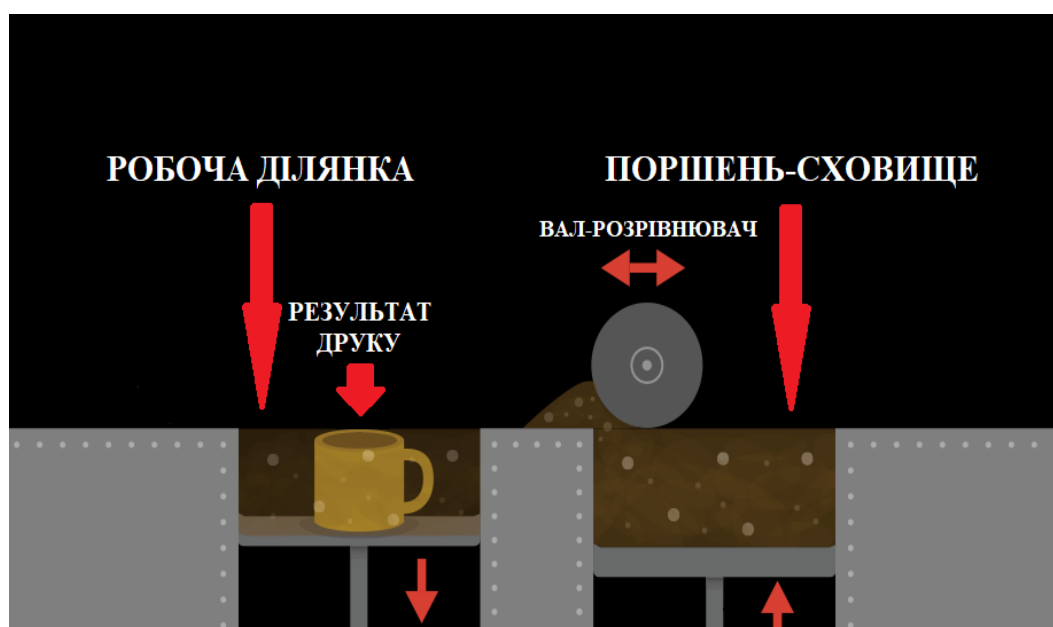


Рисунок 1.2 – Загальна схема подачі порошку у порошкових принтерах

Система подачі складається з двох поршнів, на початок роботи один з поршнів знаходиться у найвищій точці, він є робочою ділянкою, у той час як інший знаходиться у найнижчій точці і він є сховищем порошкової речовини [5].

Екструдер або лазер з'єднують порошок, таким чином серед порошку з'являється надрукована частина, після чого один з поршнів опускається, а інший підіймається, робоча зона частково уходить вниз, а сховище порошкової речовини йде вгору, таким чином забезпечується переміщення за віссю Z. Після шагу поршнів у роботу вступає розрівнювач, який має форму валу, він переміщує порошок від поршня-сховища до поршня який є робочою ділянкою, таким чином вже надрукована частина знаходиться під тонким шаром незв'язаної порошкової речовини, екструдер або лазер знову зв'язують порошок з порошком та порошок з вже зв'язаною (надрукованою) частиною, цей цикл повторюється до тих пір поки процес друку не буде закінчено.

Підсумком роботи є надрукований об'єкт який витягується з незв'язаного порошку, а весь не використаний на друк порошок можна повторно загрузити у поршень-сховище, для подальшого друку.

Важливою перевагою порошкового друку також є відсутність необхідності опорних конструкцій бо порошок, що оточує надруковану частину є опорою.

Видалення частин опори є важливою частиною вироблення об'єктів, виготовлених за допомогою інших технологій, приклад не очищеного виробу наведено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Неочищений виріб

### 1.3 Аналоги принтерів

Як приклад промислового 3D-принтера на основі технології струменевого 3D-друку розглянемо проект ExOne M-Flex, наведено на рисунку 1.4. ExOne M-Flex може виготовляти металеві та керамічні деталі, а також деталі з композитних порошків, надруковані на 3D-принтері. Зазвичай деталі піддаються термічній обробці або просочуються, щоб надати їм потрібної міцності та фізичних властивостей, а M-Flex оснащений піччю для термообробки, що дозволяє виготовляти високоточні деталі. Крім того, як і інші порошкові принтери, він не потребує опорної конструкції, оскільки незв'язаний матеріал підтримує вже надруковані деталі [6].



Рисунок 1.4 – ExOne M-Flex

Принтер, здатний друкувати металеві прототипи, багатокомпонентні дрібносерійні вироби та деталі на замовлення, включає в себе принтер, технологічне обладнання, друкарські матеріали та піч для затвердіння. Інтерфейс сенсорний і простий у використанні, а висока продуктивність залишається на промисловому рівні. Цей продукт вартістю 500000 доларів США потребує занадто багато ресурсів для реалізації, але він використовується в промисловості і є високоефективним обладнанням для роботи в промислових масштабах, що обслуговує потреби промислового виробництва.

Як не промисловий принтер-аналог, заснований на технології інжекційного тривимірного друку, обрано проект Oasis 3DP наведено на рисунку 1.5. Цей проект розроблено інженером у Нідерландах у 2018 році та є відкритим, тобто його відтворення можливе кожним бажаючим [7]. Основною особливістю є використання розповсюджених готових компонентів, що максимально спрощує відтворення цього проекту.

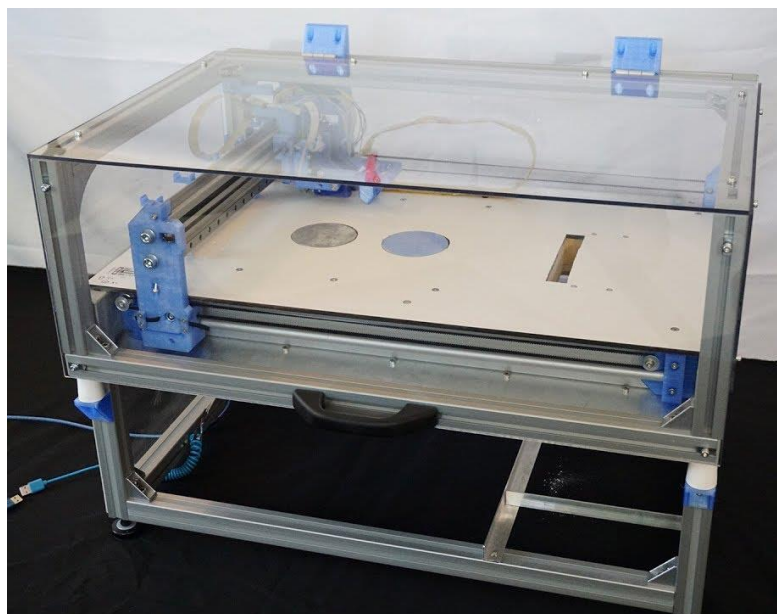


Рисунок 1.5 – Oasis 3DP

Відтворення такого принтеру є більш дешевим рішенням, однак точної ціни немає, проект Oasis 3DP це лише підібрані компоненти, та розроблене ПЗ, зборка установки і її ціна залежить від тих, хто його відтворює, ціна на елементи конструкції залежить від країни, де її будують. Oasis виконує лише базові функції принтера, він не має вбудованої системи для термообробки, однак функції принтера реалізовані у повній мірі.

#### 1.4 Аналіз існуючих кінематичних систем

Існує багато типів кінематичних систем для 3D-принтерів, але ми розглянемо найпопулярніші та найефективніші з них: H-бот, Delta-бот, полярний принтер і принтер-маніпулятор.

H-боти прості у використанні, оскільки використовують звичну для багатьох людей систему координат, мають багато програм і використовуються багатьма компаніями по всьому світу. Вони також дуже популярні серед аматорів через свою низьку вартість і просту електроніку [8]. Кінематичну схему H-бота можна побачити

на рисунку 1.6.

Недоліками цієї кінематики вважається відносно повільна робота і великий розмір. Перевагою є те, що доступна електроніка та програмне забезпечення є дешевими.

Однак оцінка швидкості не є об'єктивною, H-bot має низьку швидкість відносно дельта кінематики (Delta-bot), яка в свою чергу має складнощі з налаштуванням, H-bot не повільна кінематика і навіть швидша за деякі інші.

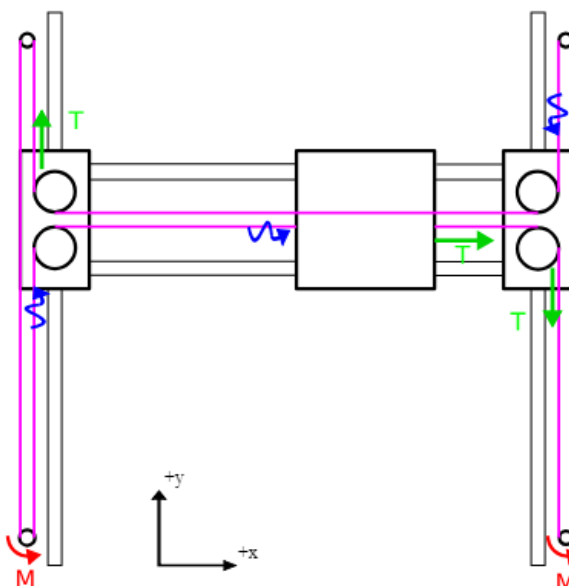


Рисунок 1.6 – Кінематика H-bot

Також існують принтери, що використовують рухому платформу, а друкуюча голівка переміщується лише за двома осями, вони зветься полярними. Ознайомитись з полярною кінематикою можна на рисунку 1.7.

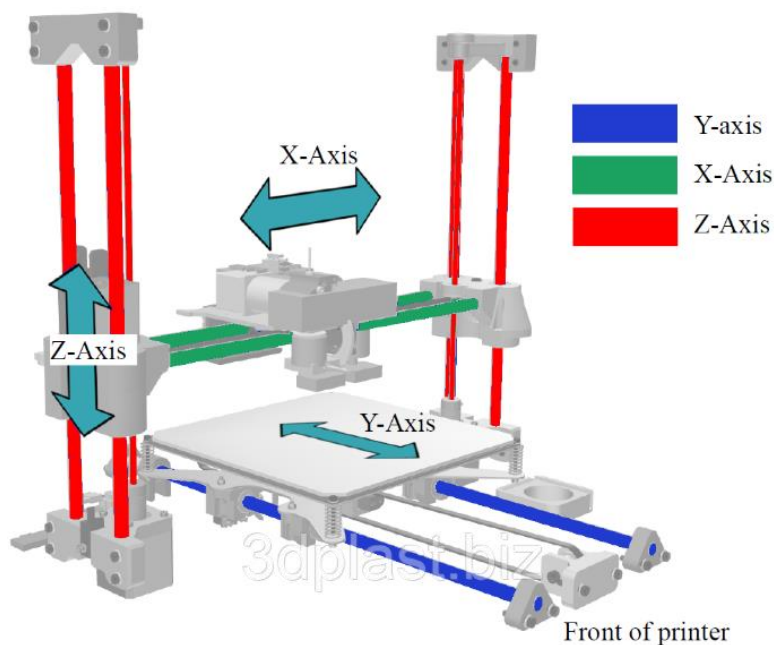


Рисунок 1.7 – Полярна кінематика

Дельта-бот є дуже складним принтером, але у нього багато переваг: він швидкий, займає мало простору, не має деталей, що виходять за межі самої конструкції та він надає можливість будувати високі вертикальні моделі. Мінусами даної кінематики є висока ціна, пов'язано це з складною електронною частиною та програмним забезпеченням. З дельта кінематикою можна ознайомитись на рисунку 1.8.

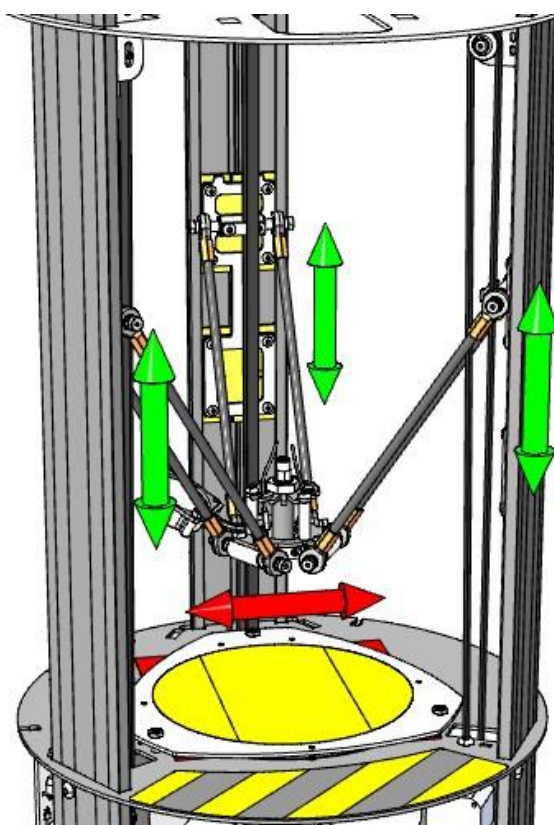


Рисунок 1.8 – Дельта кінематика

Дельта використовує полярну систему координат, що не є дуже популярною, тому і електроніки та ПЗ для цього принтеру не багато, що і призводить до високої ціни. Ремні, що регулюють переміщення мають бути рівномірно натягнуті, бо незбалансованість однієї частини може порушити роботу усього принтера, ця особливість робить складним не тільки побудову, але і використання принтера, його постійно потрібно перевіряти.

Останнім видом кінематики є маніпулятори, ці принтери використовують роботів-маніпуляторів для друку, цей вид кінематики надає великий простір для використання. Принтери-маніпулятори можуть виконувати лазерне гравірування, писати, малювати та переміщувати.

Головним недоліком є падіння точності, робот може точно працювати близько до себе, але чим більша відстань від робота тим нижче точність. Розглянути принтер на основі робота-маніпулятора можна на рисунку 1.9.



Рисунок 1.9 – Принтер-маніпулятор

Маніпулятори можуть бути використані для друку складних структур, але їх використання не є необхідним у масовому виробництві, є багато рішень які будуть як більш економнішими, так і більш ефективними.

Маніпулятори важко програмувати, а ПЗ може бути платним, такі принтери не підходять для масового виробництва, а будувати їх в навчальних цілях не є практичним, бо застосування такого принтеру буде обмежено, але їх можна використати в вузькоспеціалізованих галузях, вони підходять для гравірування великих об'єктів.

Кожна кінематика має переваги і недоліки, вони зазначені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Переваги і недоліки розглянутих варіантів кінематики

Кінематика	Переваги	Недоліки
H-bot	Низька ціна, просте ПЗ, доступність компонентів	Низька швидкість
Delta	Висока швидкість, малий розмір	Необхідність налаштування, висока ціна, складне ПЗ
Полярні	Енергоефективність, низька ціна	Низька точність
Маніпулятори	Багатий функціонал	Висока ціна, складне ПЗ, мала робоча зона, при зростанні відстані від установки – падає точність

## 1.5 Висновки до першого розділу

У першому розділі було розглянуто основні технології тривимірного друку, а також наведено базові відомості про кінематику принтерів і переміщення друкуючої голівки у рамках робочої зони.

## 2 АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНОЇ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ І ТЕХНОЛОГІЙ ДРУКУ

### 2.1 Кінематична схема

Після аналізу кінематичних систем було обрано кінематику H-bot завдяки простоті використання та доступності ПЗ, електроніки, та компонентів.

Основною перевагою є низька ціна, оскільки не використовуються пропрієтарне ПЗ або компоненти, що робить прототипи дешевшими і простішими у використанні.

Однак після створення 3D-моделі було виявлено, що ремінь не може переміщати всю систему наведено на рисунку 2.1, по осі Y без втрати еластичності та розтягування, тому, щоб уникнути цього, вісь була замінена на металевий зубчастий стержень і рухалася за рахунок обертання двигуна з фіксованими шестернями.

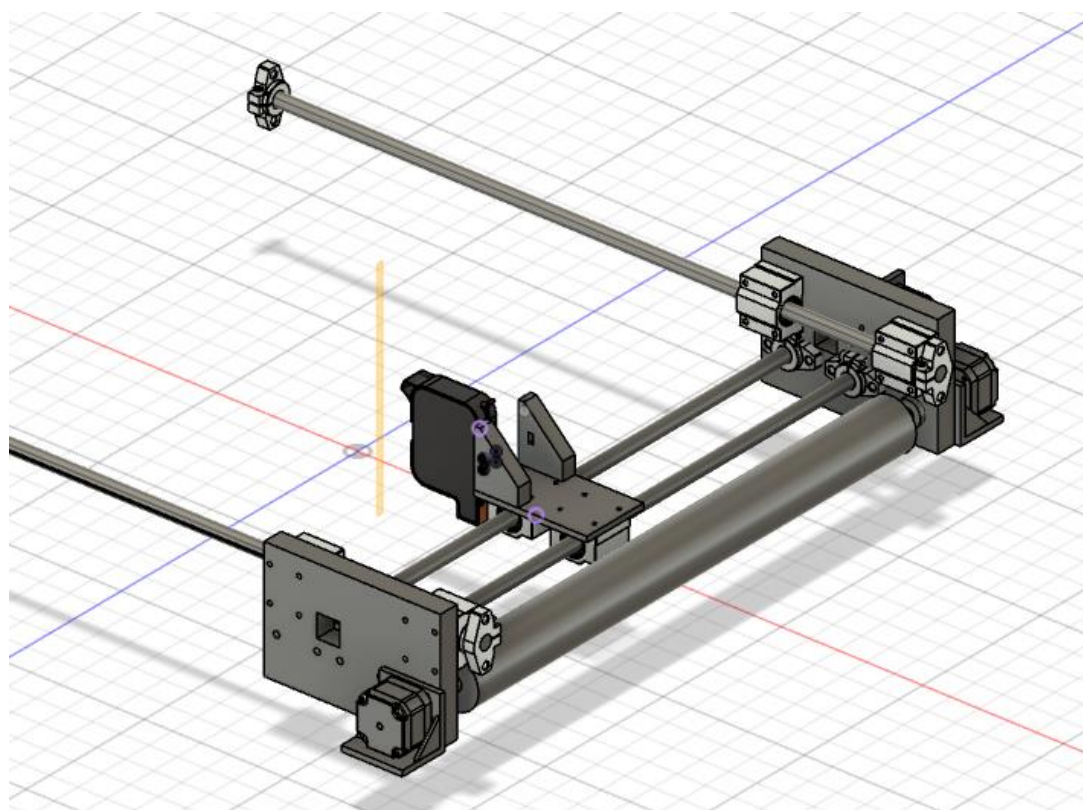


Рисунок 2.1 – Розроблена кінематична система

Нова система вже не є кінематиною H-bot, така конструкція зветься Maker-Bot і не має проблем з переміщенням важкої частини нашого принтера, що виконує функцію переміщення друкуючої голівки, та вирівнювача порошку, також ми позбавились однієї з проблем H-принтерів – перекосу в один бік, що продемонстровано на рисунку 2.2.

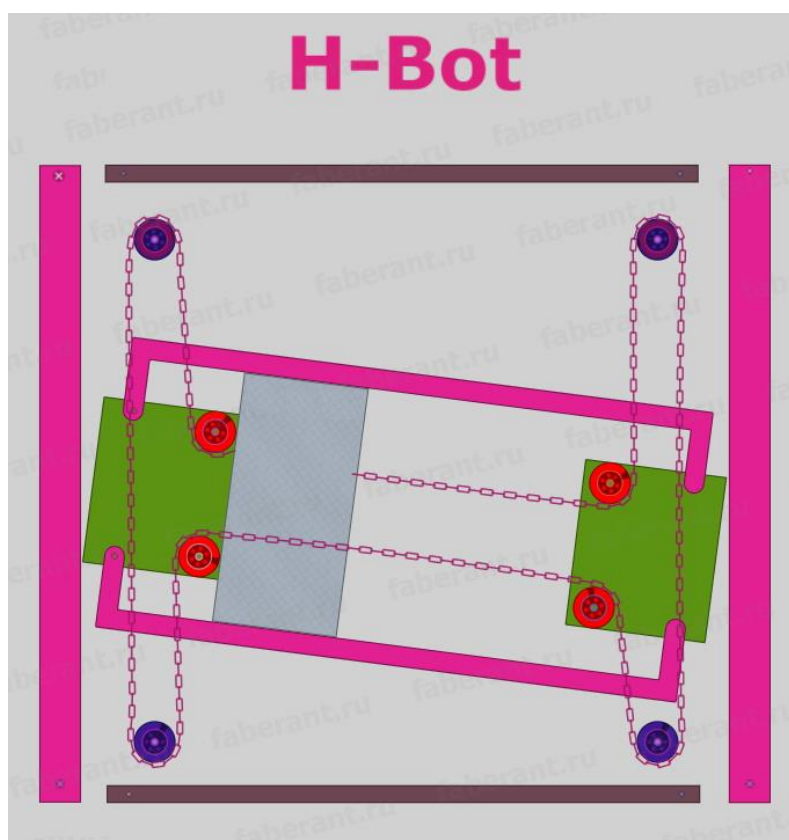


Рисунок 2.2 – Можлива несправність кінематики H-bot

## 2.2 Аналіз розробленої 3D моделі системи подачі порошку

У процесі розробки механічної частини була вигадана принципово нова система подачі порошку до робочої зони, – це зроблено завдяки використанню двох зв'язаних поршнів, що будуть переміщувати порошок.

3D модель пристрою для подачі порошку можна побачити на рисунку 2.3.

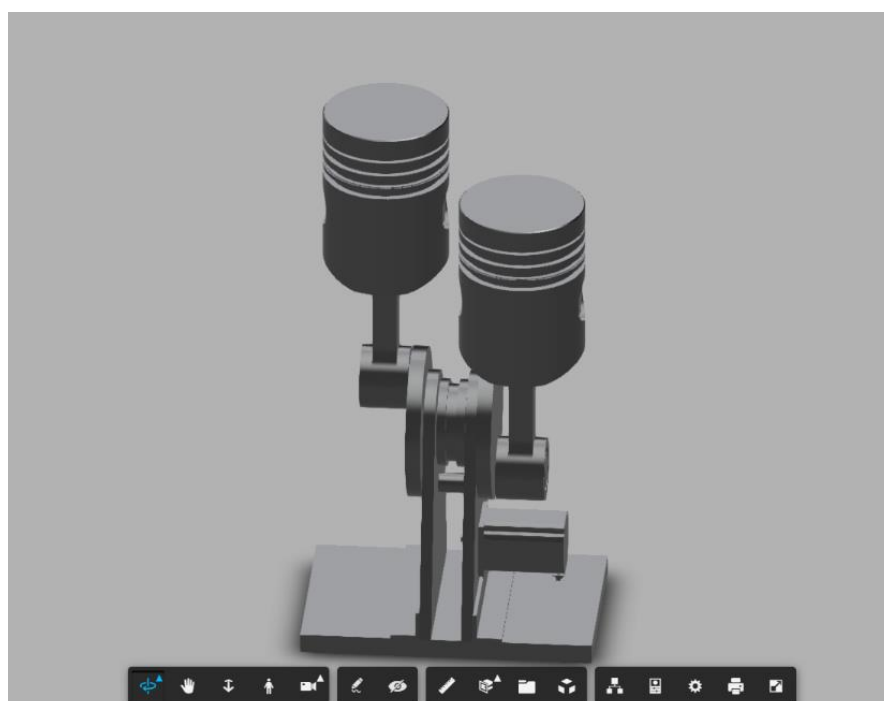


Рисунок 2.3 – Розроблена система подачі порошку

Нова система подачі порошку має серйозні переваги перед стандартними рішеннями, що існували раніше, більшість систем використовує два двигуна, що не є дуже ефективним, на рисунку 2.4 наведено стандартну систему подачі.

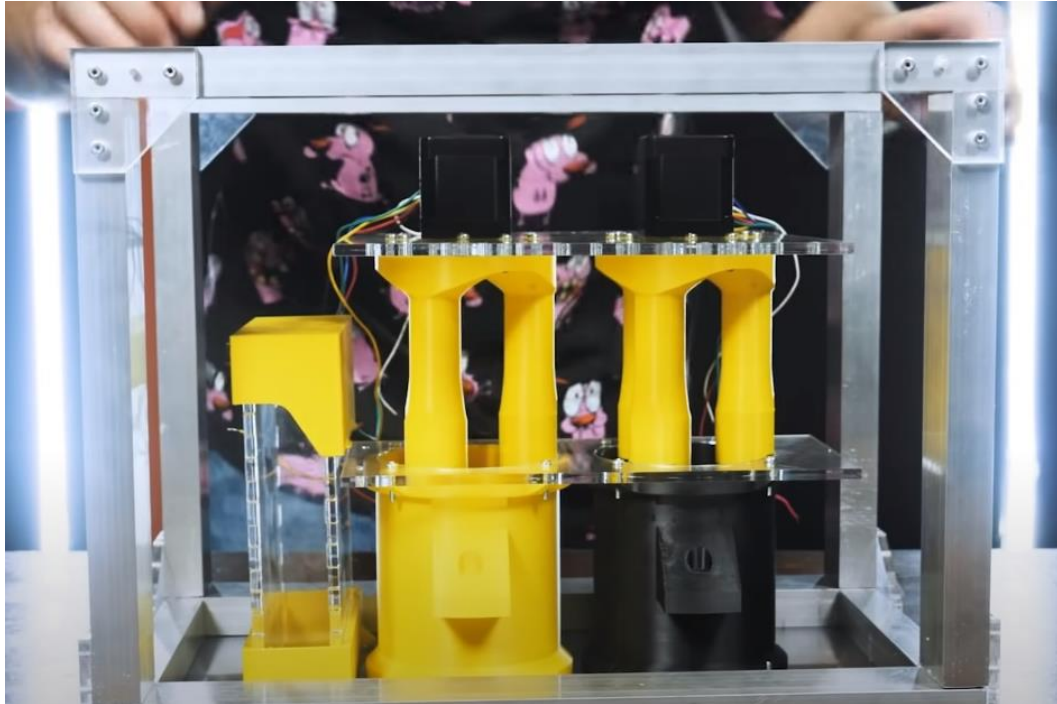


Рисунок 2.4 – Система подачі порошку принтера-аналога

Двигуни є на кожному поршні, це робить конструкцію складнішою в плані ПЗ, бо кожен двигун керується окремо, також з часом двигуни втрачають деяку частину своєї потужності, є багато факторів що знижують потужність двигунів: від зносу механічних компонентів та електромагнітної деградації до впливу пилу та температури на роботу двигунів, і якщо один двигун буде працювати потужніше за інший, то буде або подаватись занадто багато або мало порошку, або робоча область буде переміщуватись або швидше, або повільніше, що може вплинути на результат друку

Нова система якщо і деградує, то це не приведе до дисбалансу подачі та переміщення робочої області.

### 2.3 Опис конструкції принтера

Детальний макет розробленого принтера наведено на рисунку 2.5. Головною задачею всіх елементів конструкції є забезпечення переміщення друкуючої голівки.

Як відомо у 3DP принтерах відсутня ось Z через те, що принтер не виконує ніяких переміщень у цій площині, переміщення виконує система подачі, що з часом опускає конструкцію вниз, завдяки чому і надається об'єм деталі.

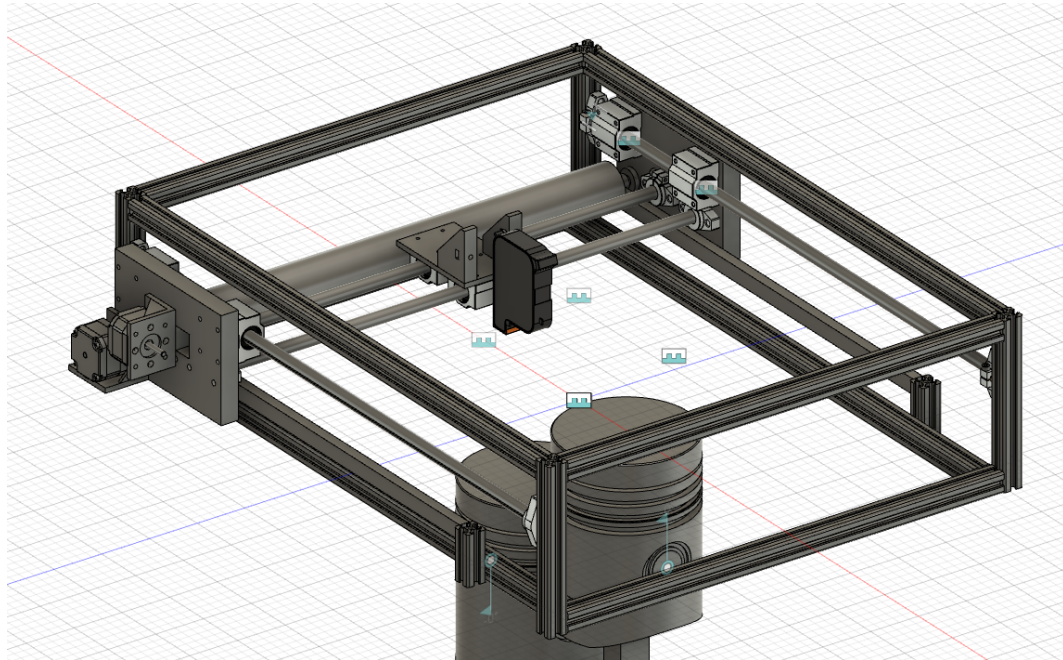


Рисунок 2.5 – Макет принтера

Вісь X є найпростішою в системі, вона складається з каркаса осі, двох валів та фіксаторів для них, а також двох лінійних підшипників, завдяки яким переміщується каретка з друкуючою головкою. 3D модель осі X наведено на рисунку 2.6.

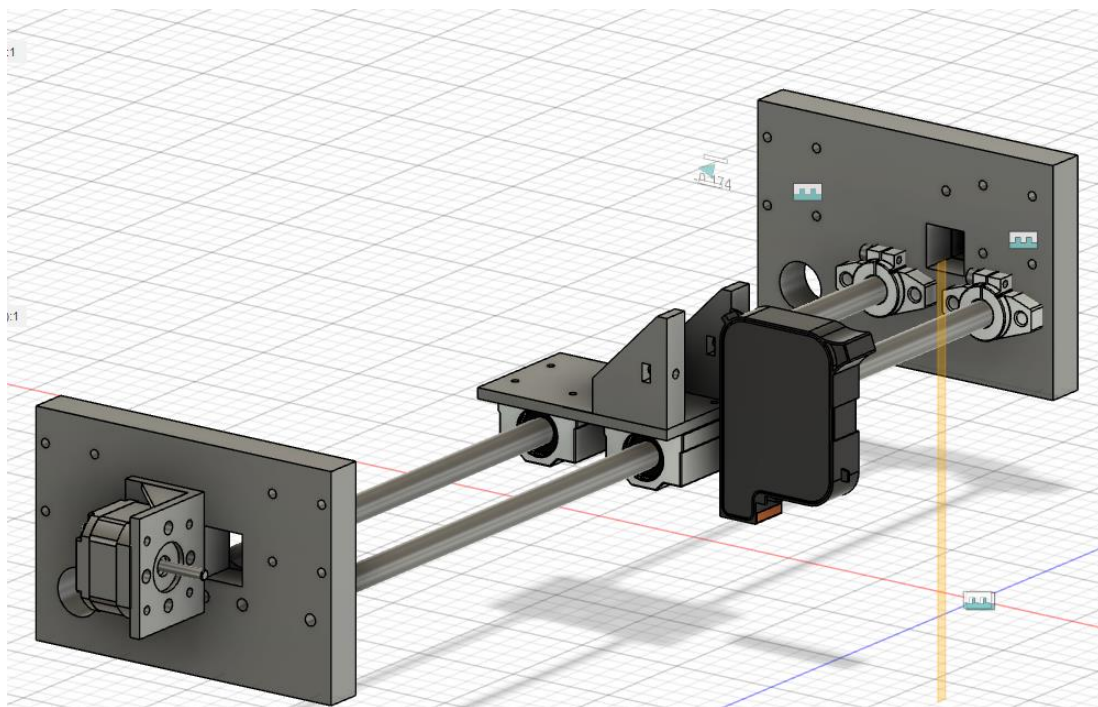


Рисунок 2.6 – Ось X

Для переміщення по осі Y використовується зубчаста лінійна передача, рисунок 2.7. Використання ременів для переміщення всієї Осі X є неефективним, ремені можуть деформуватись, а шестеренна лінійна передача забезпечує надійне переміщення і менше схильна до деформації та пошкоджень, через здатність металевих конструкцій витримувати досить значні навантаження.



Рисунок 2.7 – Зубчаста лінійна передача

Для реалізації переміщення за осями X та Y використовуються крокові двигуни Nema 17 моделі 4401, наведено на рисунку 2.8. Крокові двигуни цього типу є найбільш поширеним та ефективним варіантом для побудови саморобного станка з ЧПУ, цей тип двигуна вже доказав свою здібність працювати на виробництвах. Таке розповсюдження зумовлене сукупністю технічних характеристик, низької вартості, та компактного розміру [9].

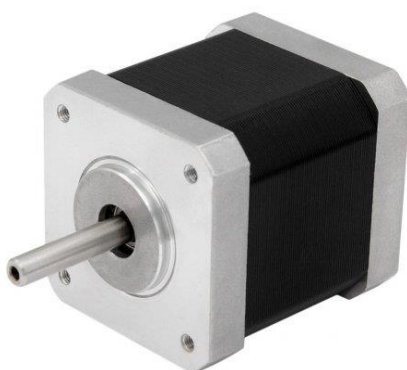


Рисунок 2.8 – Nema 17 4401

Технічні характеристики двигуна Nema 17 4401 наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики крокового двигуна Nema 17 4401

Параметр	Значення
Струм	1.7 А
Індуктивність	2.8 мГн
Утримуючий момент	4 кг/см
Кутовий крок	1.8°
Діаметр валу	5 мм
Розміри	42x37x40 мм
Маса	0.28 кг

Переміщення по осі Y об'єднано з обертанням валу, щоб вирівняти порошок, необхідно обертати вал і це роблять двигуни, розташовані з двох боків вирівнювача, вони одночасно і обертають вирівнювач, і переміщують систему по осі Y, тобто двигуни одночасно виконують дві задачі: обертання шестерні, розташованій на металевій зубчастій рейці і вирівнювання порошку валом. Розташування двигунів наведено на рисунку 2.9.

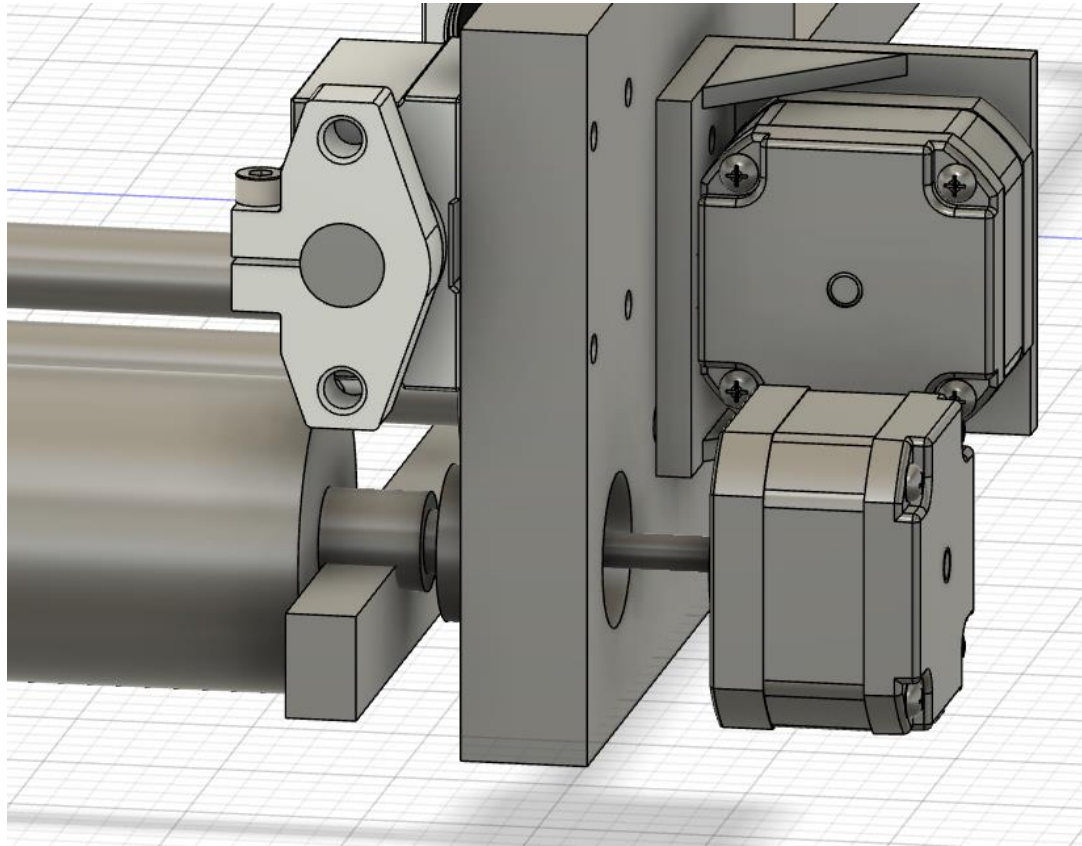


Рисунок 2.9 – Розташування двигуна для переміщень по осі Y

#### 2.4 Аналіз технологій друку

Екструдер це основний елемент подачі або зв'язувальної речовини, або самої речовини, який саме буде використовуватись екструдер залежить від технології яка використовується.

У технології екструзії термопластичного матеріалу (англ. Fused Modeling Deposition, FDM), екструдер виконує не тільки задачу нанесення пластику, але і його термообробку, щоб матеріал ставав м'яким та придатним до друку. Схему екструзії наведено на рисунку 2.10.

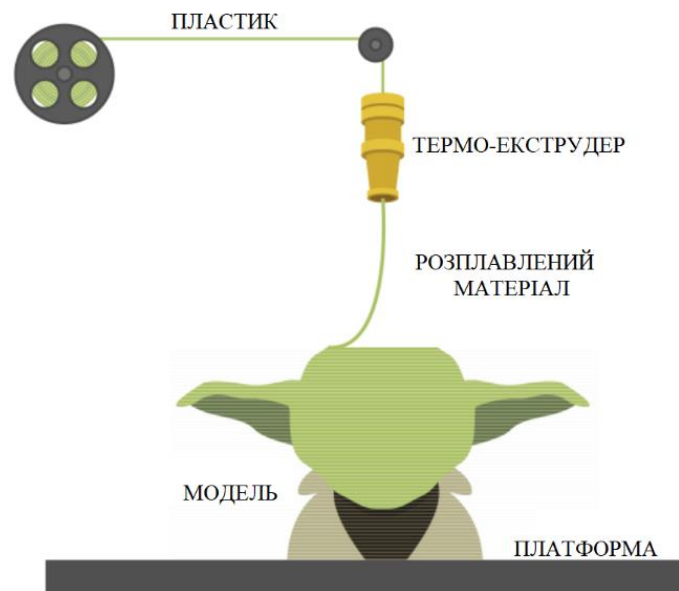


Рисунок 2.10 – Схема термопластичної екструзії

Термоекструдери відносять до непорошкового друку, однак вони також вважаються екструдерами.

Технологія лазерного плавлення не використовує екструдери, замість них використовується спікання лазером.

Технологія лазерного плавлення використовує замість зв'язувальної речовини лазерний промінь, особливість лазерних технологій полягає в тому, що вони можуть бути використані і для не порошкових принтерів, на рисунку 2.11 наведено плавлення смоли. Така технологія використовує лише один поршень, під час роботи він уходить під смолу, а лазер плавить рідку речовину у зазначених місцях, таким чином вона твердіє і приймає форму об'єкту друку.

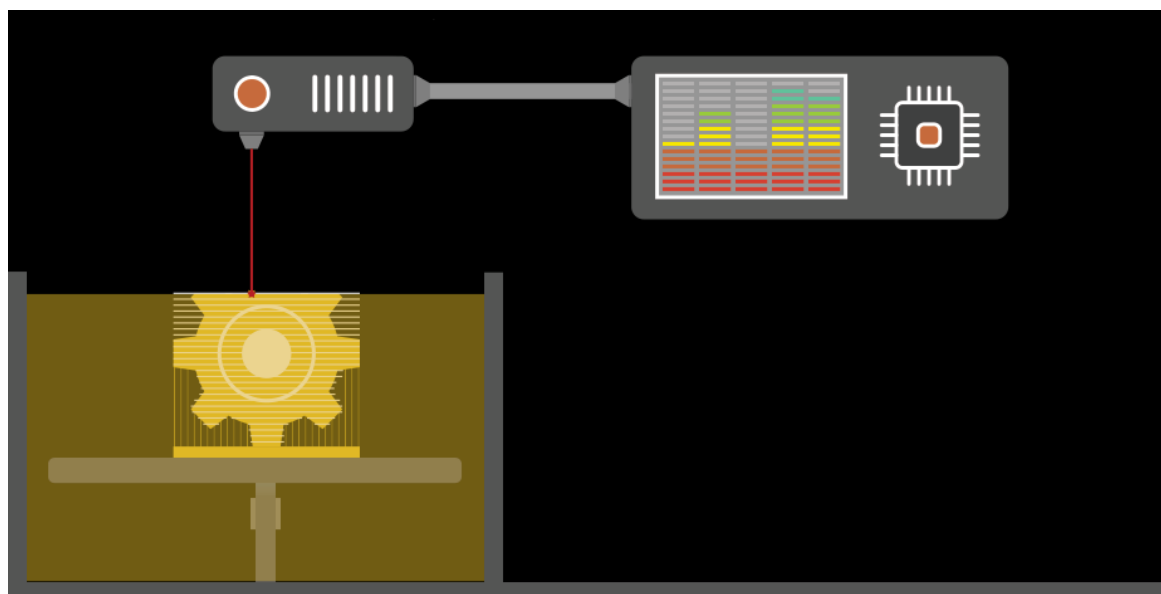
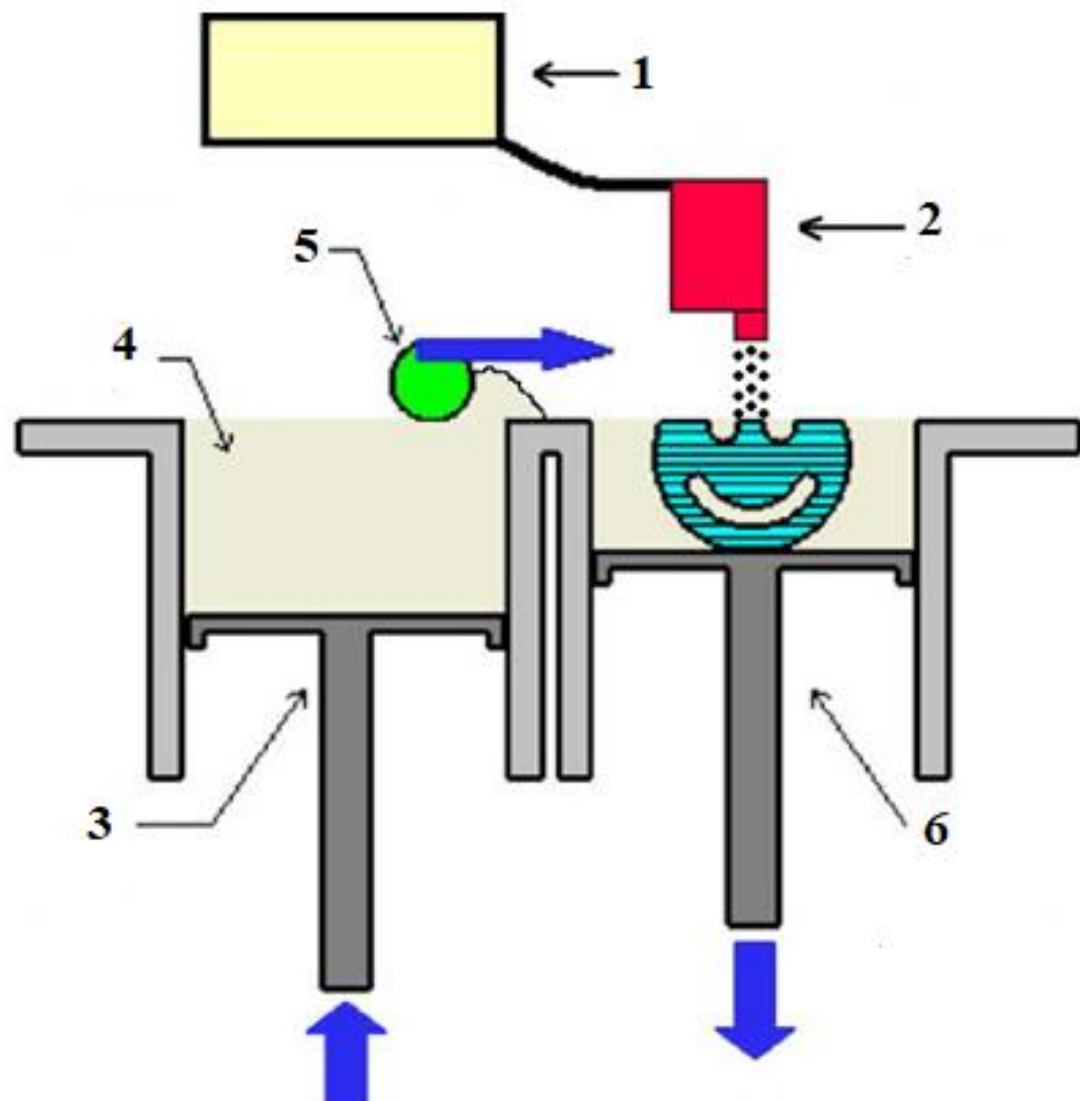


Рисунок 2.11– Схема принтеру технології плавлення лазерним променем

Технологія плавлення смоли є точною, але потребує використання опорних конструкцій, бо смола не може виконувати цю функцію, на відміну від порошку.

Порошковий друк може бути як лазерним, що базується на технології плавлення, так інжекційним, – з застосуванням для друку екструдерів, що вприскують зв'язувальну речовину, порошкові принтери мають єдиний принцип побудови, що дає можливість переробити принтер інжекційного типу у лазерний, на рисунку 2.12 наведено загальну схему принтера заснованого на 3DP технології.

Функції картриджу та друкуючої голівки можуть відрізнитися від технології, при інжекційному друку картридж подає сполучний матеріал, при лазерному плавленні замість картриджу встановлюється акумулятор, а замість екструдера – генератор лазерного променя.



1 – картридж з сполучним матеріалом; 2 – друкуюча голівка; 3 – система подачі порошкового матеріалу; 4 – ємність з порошком; 5 – розподільний валик; 6 – система подачі робочої області

Рисунок 2.12 – Загальна схема принтера, заснованого на 3DP технології

До переваг інжекційного друку можна віднести такі властивості, як:

- висока точність та швидкість друку;
- можливість друку об'єктів складної форми за рахунок того, що під час друку виріб оточений матеріалом з усіх боків;
- охоплює до 90% кольорового спектру, що робить технологію однією з найбільш зручних при кольоровому друку;
- можливість одночасного друку декількох виробів;
- відсутність токсичних виділень під час виробничого процесу;
- низька вартість порошкових матеріалів та можливість їх повторного використання.

Інжекційний друк також об'єднує в собі декілька різних технологій: струменевий друк, валковий друк і друк з застосуванням електростатичних систем.

Струменеві головки – це основний компонент принтерів, заснованих на технології порошкового 3D-друку із застосуванням інжекції сполучного елемента через екструдер. Струменеві головки в порошкових 3D-принтерах використовуються для точного розпилення зв'язувальної речовини з поверхнею порошку. Зв'язувальний елемент може бути рідким або у вигляді пасти, і він відіграє роль клею, який склеює частинки порошку разом, утворюючи шар.

За конструкцією струменеві головки мають невеликі отвори, через які сполучний елемент виходить у вигляді найдрібніших крапель. Ці отвори мають різні діаметри, в залежності від точності принтеру, деякі головки мають отвори в межах декількох мікрометрів, саме від розміру залежить точність розпилення, але також важливу роль грає відстань від екструдера до порошкової речовини, чим більше відстань, тим менше точність роботи системи.

Струменеві екструдери забезпечують високу точність і роздільну здатність під час 3D-друку. Це особливо важливо для виготовлення деталей з високою деталізацією, однак ця властивість відноситься лише до принтерів, що враховують всі особистості інжекційного друку, принтери що мають великий отвір друкуючої голівки та велику відстань від друкуючої голівки до порошкової речовини – втрачають цю властивість, для точного друку треба використовувати якісні екструдери і налаштовану систему переміщення.

Невід'ємною перевагою струменевих екструдерів є можливість працювати з різними типами зв'язувальних елементів, включно з рідкими полімерами, біополімерами та іншими, навіть вода може виступати зв'язувальною речовиною, при роботі з гіпсом. Також екструдери зазвичай застосовуються з пультами управління, що

дають змогу точно контролювати кількість і місце розташування перенесеного зв'язувального елемента.

Електростатичні системи (англ. Electrostatic Systems) – це ще один тип екструдерів, заснований на технології порошкового 3D-друку із застосуванням сполучного елемента. У цьому методі використовуються електростатичні поля для розпилення і нанесення зв'язувального елемента на шар порошку.

Принцип роботи електростатичних систем полягає у використанні електростатичних полів у робочій зоні, в якій знаходиться порошок і зв'язувальний елемент. Електростатичне поле призводить до того, що зв'язуючий елемент заряджається і може бути притягнутий до поверхні порошку, щоб викликати його зчеплення, технологія використовується для з'єднання металевої порошкової речовини. Електростатичні системи включають в себе електроди і генератори електростатичних полів, які створюють заряджену атмосферу в робочому середовищі.

Зв'язувальний елемент, розпорошується на порошок за допомогою екструдерів, а потім заряджені частинки зв'язувального елемента притягуються до заряджених частинок порошку, ця технологія забезпечує рівномірність і точний розподіл зв'язувального елемента, крім того, вони дозволяють легко контролювати вплив електростатичних полів і, як наслідок, склеювання порошку, параметри електростатичної системи, такі як напруга і поля регулювання, регулюються відповідно до вимог друку, вони забезпечують керування процесом.

#### 2.4 Аналіз типів точних насосних систем

Перистальтичні насоси – це тип об'ємного насоса, який використовується для перекачування великої кількості різних рідин. Рідина транспортується всередині гнучкої трубки з використанням ефективного принципу відкачування, що називається перистальтикою. Ця операційна система заснована на дії стиснення за допомогою роликів, що чергуються з дією розслаблення трубки, що дозволяє всмоктувати вміст шляхом видавлення рідини насоса [10].

Перистальтичний насос оснащений гнучкою трубкою, яка забезпечує циркуляцію рідини навіть у разі високої в'язкості, його наведено на рисунку 2.13. Перистальтичні насоси можуть перекачувати дуже агресивні рідини, забезпечуючи точне перекачування, що робить їх придатними для управління процесами дозування. Конструкція, яка утримує рідину всередині труби, у поєднанні з відсутністю механічних ущільнень знижує ризик забруднення, а також забезпечує чудовий рівень

стійкості до стирання з подальшим скороченням часу обслуговування, але трубка, яка використовується для транспортування речовини схильна до зносу і потребує регулярної заміни.

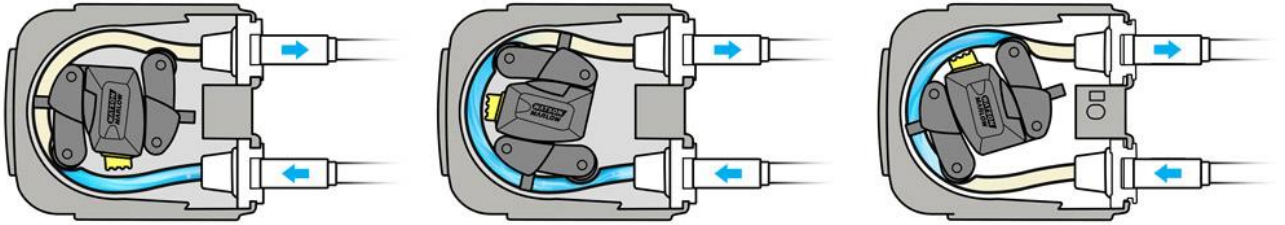


Рисунок 2.13 – Конструкція та принцип роботи перистальтичного насосу

Перевагою такої системи є здібність працювати з речовинами, що мають високу в'язкість, але треба враховувати знос трубки і необхідність регулярної заміни, цей тип насосу потребує регулярного обслуговування.

Шестерний насос – один з видів об'ємних роторних машин, його робочий механізм зроблено у вигляді двох шестерень, розташованих у корпусі, що під час прокручення транспортують речовину у вільних пазах (бо через центральні пази рідина пройти не може, вони заблоковані іншою шестернею). Експлуатація таких насосів дуже проста через простоту своєї конструкції. Вони надійні та довговічні в роботі. І що важливо, такі агрегати мають невеликі розміри. Маючи однаковий принцип роботи, їхня будова може значно відрізнятися. Тому їх використання широко поширене й актуальне для багатьох галузей в тому числі і для тривимірного друку [11].

Під час переміщення речовини вона розділяється шестернями на 2 потоки, шестерні при прокрученні переміщують речовину, після чого вона об'єднується і єдиний потік, який і подається через друкуючу голівку, принцип роботи і конструкцію шестерного насосу наведено на рисунку 2.14.

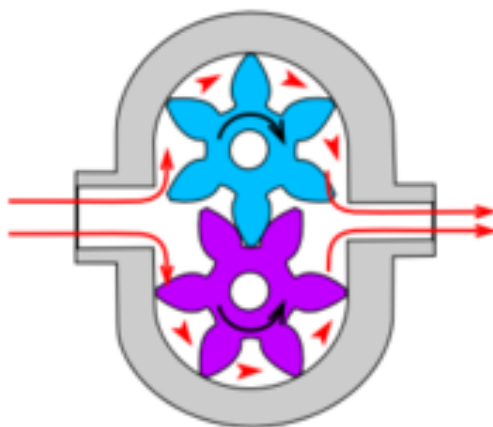


Рисунок 2.14 – Конструкція та принцип роботи шестерного насосу

Єдиним недоліком є складність роботи з в'язкими речовинами, шестерні також потребують заміни, бо будь-які системи схильні до зносу, однак процес стирання шестерень є настільки довгим, що довговічність шестерних систем можна віднести до переваг.

Мембранний насос – об'ємний насос, робочий орган якого – гнучка пластина (мембрана), закріплена з країв; пластина згинається під дією поршня.

Мембранні насоси можуть застосовуватися коли необхідно перекачувати рідини під невеликим тиском.

У мембранному насосі перекачування середовища здійснює мембрана, забезпечуючи циклічну зміну внутрішнього об'єму робочої камери, поперемінне створення в ній зон низького і високого тиску.

Принцип дії побудовано на переміщенні поршня, до якого закріплено дві мембрани, коли поршень йде в одну сторону – одна з камер зменшує свій об'єм і подає рідину у робочу зону, а інша камера збільшує свій об'єм, вбираючи в себе рідину, після чого поршень починає хід в інший бік і цикл повторюється, але цього разу повна камера буде зменшувати об'єм і подавати рідину у робочу зону, а інша – збільшувати, вбираючи в камеру рідину, принцип дії та загальну конструкцію мембранного насосу наведено на рисунку 2.15.

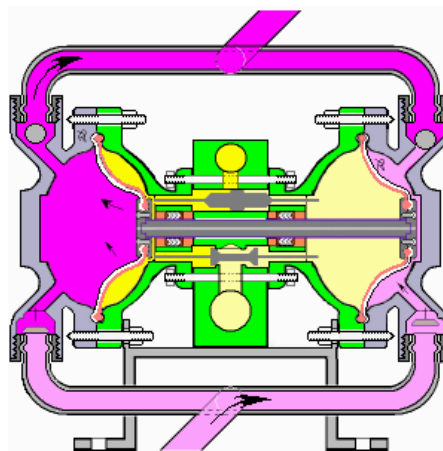


Рисунок 2.15 – Конструкція та принцип роботи мембранного насосу

До переваг мембранних насосів відносять:

- Універсальність, мембранні насоси можуть використовуватися для перекачування різних типів рідин, включно з агресивними та в'язкими рідинами;
- надійність, мембранні насоси зазвичай міцні і прості, так як вони мають невелику кількість рухомих частин, їх конструкція забезпечує тривалий термін служби;
- якісне прокачування, мембранні насоси зазвичай мають хорошу функцію

прокачування, що означає, що вони можуть почати перекачувати рідину навіть за невеликої кількості рідини в системі.

Мінуси мембранних насосів:

– Обмежена продуктивність, на відміну від інших типів насосів, мембранні насоси можуть мати обмежену продуктивність, особливо за високого тиску;

– погана ефективність при роботі з в'язкими речовинами, у разі перекачування високов'язких рідин мембранні насоси можуть стикатися з обмеженнями, бо не кожна система зможе протидіяти силі в'язкості високов'язких рідин, а робота з такими речовинами може призвести до поломки;

– потрібне обслуговування, хоча мембранні насоси в своїй основі виключені, мембрани можуть зношуватися і вимагати періодичної заміни, що може забезпечувати технічне обслуговування;

– обмеження щодо тиску та продуктивності, мембранні насоси можуть мати обмеження за тиском і продуктивністю на відміну від деяких інших типів насосів, що робить їх менш придатними для роботи з деякими рідинами [12].

## 2.5 Висновки другого розділу

У другому розділі було наведено оптимальну кінематичну схему, проаналізовано технології тривимірного друку, а також приведена нова систему подачі порошку, інформація другого розділу є основною базою для подальшої розробки і розрахунків. Також було проаналізовано різні насосні системи серед яких було обрано шестеренну, бо вона краще за інші працює з не в'язкими речовинами і менше за інші потребує ремонту.

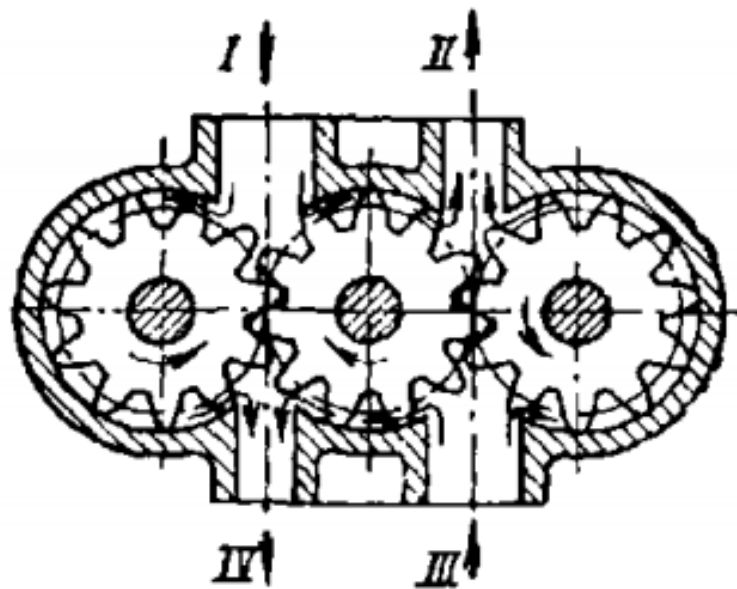
### 3 ВИБІР ШЕСТЕРНІ І РОЗРАХУНКИ РОЗМІРУ

#### 3.1 Типи конструкції шестеренного насосу.

Подавання рідини в об'ємних насосах здійснюється за принципом зміни об'єму робочої камери, розглянемо докладніше роботу шестерень у зубчастому зачепленні в момент виходу зубів із зачеплення утворюється додатковий об'єм, а в момент входу зубів у зачеплення цей об'єм зменшується, якщо помістити шестерні в герметичну камеру й розмістити їх так, щоб ділянку виходу зубів із зачеплення з'єднати з лінією всмоктування, а ділянка входу зубів у зачеплення з'єднається з лінією всмоктування, а область виходу зубів із зачеплення з'єднається з лінією всмоктування.

Розглянемо його роботу в герметичному корпусі на втулках підшипниках розміщені дві шестерні й одна ведуча з'єднана з приводним двигуном 2 ведена під час виходу зубів із зачеплення об'єм камери збільшується, що спричиняє падіння тиску нижче атмосферного рідина з бака під дією тиску атмосфери надходить до насоса та заповнює простір між зубами та корпусом перетворення шестерень на рідину, що рухається по периметру до ділянки нагнітання, де зуби знов входять у зачеплення, у цей момент об'єм камери зменшується та єдиний шлях для рідини з'єднується з лінією всмоктування. Цей принцип зветься принципом зовнішнього зачеплення його наведено на рисунку 3.1.

Відмінністю таких насосів є те, що вони можуть мати декілька каналів, що дозволяє будувати більш складні системи.



1,3 – Канали всмоктування; 2,4 – Канали нагнітання.

Рисунок 3.1 – Шестеренний насос зовнішнього зачеплення

Існує декілька типів шестеренних насосів, з різними видами зачеплення і варіаціями застосування основними вважаються шестеренні насоси зовнішнього та внутрішнього зачеплення, а також кулачкові насоси (вони також використовують шестерні і базуються на схожих методах роботи)

Оскільки зубчасте зачеплення може бути не тільки зовнішнім, а й внутрішнім, отже, і насос можна створити не тільки на основі зовнішнього зачеплення, а й на основі внутрішнього, насос на принципі внутрішнього зачеплення наведено на рисунку 3.2. Розглянемо докладніше роботу внутрішнього зубчастого зачеплення: як і в зовнішньому, в ньому зуби входять у зачеплення в одній зоні, а виходять в іншій. У місці виходу зубів із зачеплення розташований канал всмоктування, а разом входу – канал нагнітання, тож тепер у момент виходу зубів із зачеплення рідина заповнюватиме простір між зубами за подальшого обертання шестерні рідину доставлятимуть у ділянку входу зубів у зачеплення, звідки її витіснять у канал нагнітання.

Шестеренні насоси з внутрішнім зачепленням працюють плавніше за насоси із зовнішнім зачепленням, але й коштують вони дорожче, через більш високу складність виготовлення насос дає змогу перетворити механічну енергію на гідравлічну. При роботі можливі несправності шестеренних насосів: зношення шестерень унаслідок зношення шестерень порушується геометрія зубчастого зачеплення, і вона стає негерметичною, насос зі зношеними шестернями не зможе розвинути високий тиск, а його подача буде нижчою, це проблема не стільки насосів внутрішнього зачеплення, скільки всіх шестеренних насосів, однак насоси внутрішнього зачеплення складніше ремонтувати, саме через високу точність побудови конструкції.



Рисунок 3.2 – Шестеренний насос внутрішнього зачеплення

Для перекачування великих об'ємів рідини за відносно невисокого тиску застосовують насоси із зубчастим профілем спеціальної форми яку наведено на рисунку 3.3.

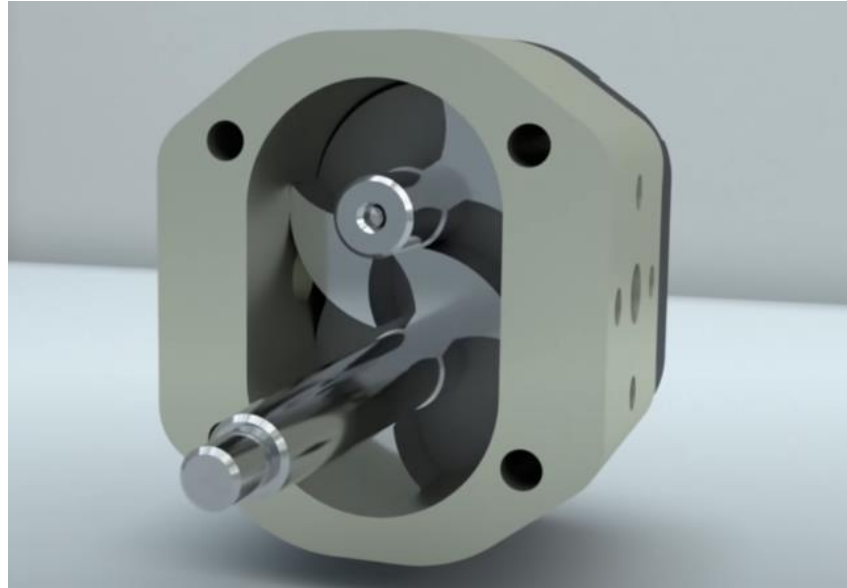


Рисунок 3.3 – Нестандартний насос роторного типу

Робочі органи цих насосів забезпечують герметичний поділ ліній всмоктування і нагнітання, геометричне замикання робочої камери, але передати обертання від ведучого ротора до веденого не можуть. Для цих цілей у таких насосах використовують окрему зубчасту передачу, її наведено на рисунку 3.4, шестеренна передача встановлена поза робочою камерою насоса, що ускладнює конструкцію, але зате за тих самих габаритів ці насоси можуть забезпечувати більшу подачу, ніж шестеренні.

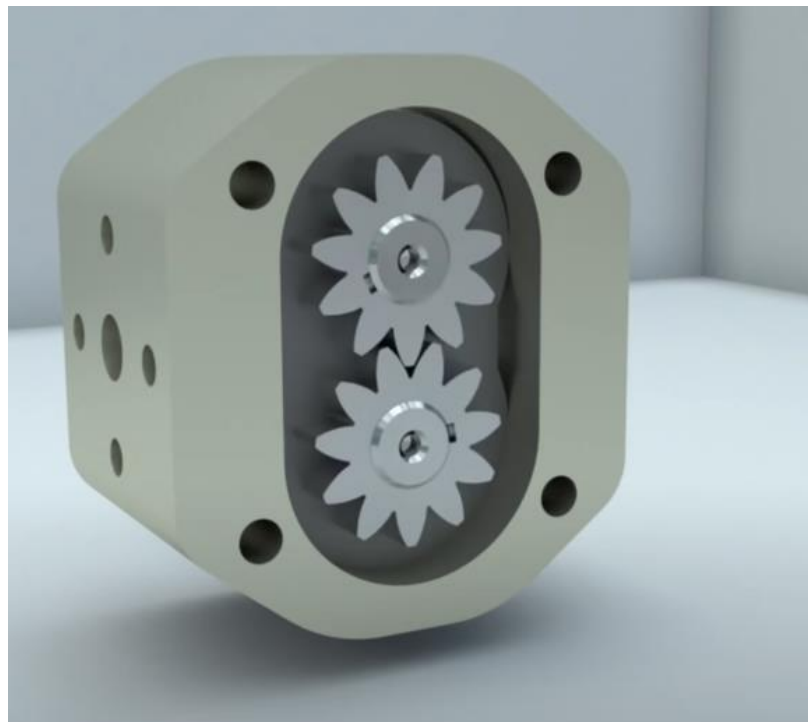


Рисунок 3.4 – Система передачі обертання

Для даного типу насосів не існує єдиної назви, його можуть називати насос з обертовими поршнями, а у перекладах іноземної літератури зустрічається термін – кулачковий насос.

Але назва не впливає на принцип роботи насоса, а він полягає в такому: Під час обертання роторів об'єм камери праворуч збільшуватиметься, рідина з каналу всмоктування заповнюватиме об'єм, що звільнився. Об'єм камери зліва зменшуватиметься, рідина витіснитиметься роторами в напірну магістраль. Форма роторів може бути різною, головною умовою роботи є геометричне замикання роторів між собою та корпусом наведено на рисунку 3.5, що забезпечує герметичний поділ каналів всмоктування і нагнітання.

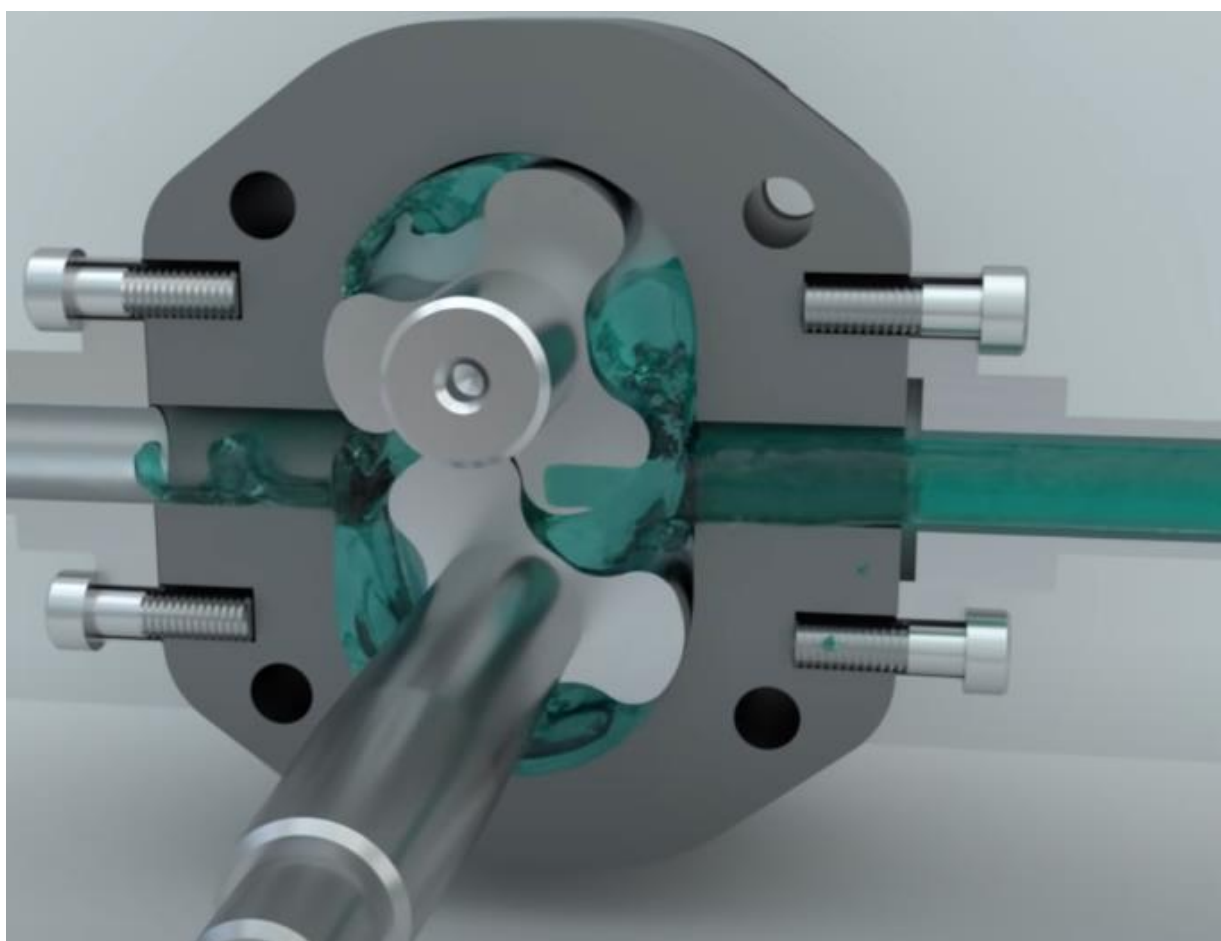


Рисунок 3.5 – Геометричне замикання роторів у корпусі

Під час перекачування в'язкої рідини допустима наявність мінімальних зазорів між роторами, що дає змогу значно підвищити ресурс насосів. Проте для забезпечення високого ККД ці зазори мають бути мікроскопічними, отже, ротори мають бути виконані з високою точністю. При перекачуванні середовищ з малою в'язкістю, наприклад газів, для забезпечення герметичності в ротори можуть поміщатися додаткові пластини, їх зображено на рисунку 3.6.

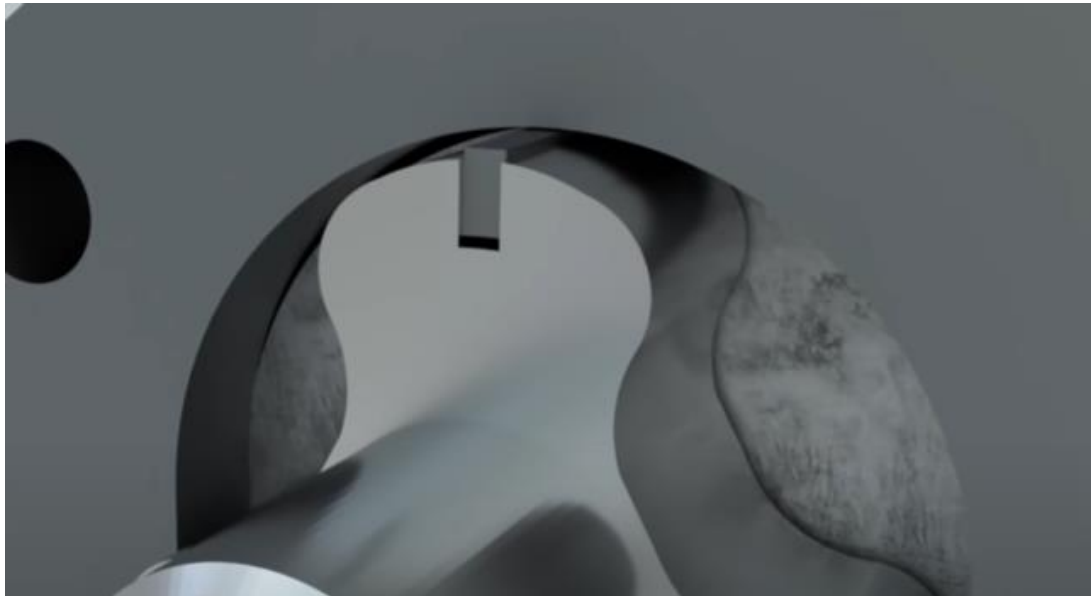


Рисунок 3.6 – Пластини для забезпечення максимальної герметичності

Кулачкові машини підходять як для перекачування газів, так і для рідини, зокрема й дуже в'язкої і навіть пастоподібних речовин.

### 3.2 Вибір конструкції насосу і розрахунки розміру шестерні у насосі

Усі з зазначених видів насосів мають свої переваги та недоліки і було б нерозумним виявляти серед усіх кращій, бо властивості деяких насосів можуть бути надмірними ,або недостатніми для певних технологічних задач.

Найбільш точним та ефективним з усіх є кулачковий насос, він вільно працює як з рідинами так і з газами, а насоси зроблені з нержавіючих елементів можуть використовуватись у харчовій промисловості, велика варіативність робить саме ці насосні системи ідеальними для переміщення рідини, а також вони мають великий ККД, однак для принтерів він є найгіршим. Тривимірні принтери це бюджетні системи орієнтовані на виготовлення точних деталей, кулачковий насос ефективний, коли треба перекачувати великий об'єм речовини, однак для друку він не підходить, особисто через те, що він дуже потужний, а також його неможна назвати бюджетним через те, що кулачкові насоси потребують мінімального зазору між роторами, мікроскопічні зазори точно не роблять цей варіант бюджетним, він підходить для роботи в багатьох областях и показує себе ефективно, але для роботі з принтерами тривимірного друку він не підходить.

Шестеренний насос внутрішнього зачеплення також потребує точності виготовлення і є занадто дорогим для бюджетного принтеру, хоча для перекачування рідини він підходить, його точність робить його майже ідеальним для 3DP.

Шестеренні насоси зовнішнього зчеплення набагато простіші в обслуговуванні і роботі з ними, а також вони не потребують ідеального зчеплення, що дає простір для експериментів з геометрією насоса.

Для розрахунку розмірів шестерні необхідно знати площу робочої ділянки, вона в свою чергу дорівнює площі поршня, на якому будується конструкція. Заміри розміру наведено на рисунку 3.7. Виходячи з результатів радіус дорівнює 63.75 мм.

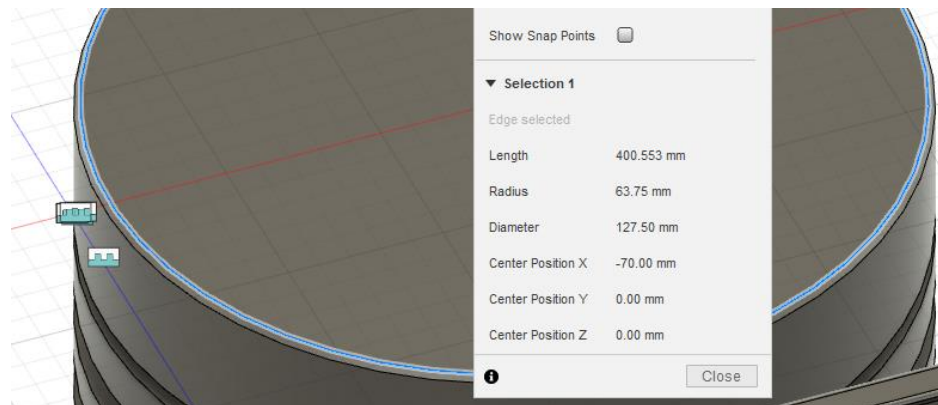


Рисунок 3.7 – Точні заміри робочої ділянки

Щоб розрахувати розміри деталей насосу необхідно дізнатись який об'єм він має прокачувати за хвилину. Принтер має бути достатньо потужним, щоб за хвилину повністю робити один шар висотою в 2 мкм, процент рідини ставить 30%, бо це з'єднувальна речовина, а не матеріал. Для розрахунків використовуємо формулу для об'єму циліндру:

$$V = \pi r^2 h \quad (3.1)$$

де  $V$  – об'єм, л;  
 $r$  – радіус, м;  
 $h$  – висота, м.

Застосуємо формулу об'єму циліндру, враховуючи, що процент рідини становить 30%.

$$3.14 * 0.06375^2 * 0.000002 * 0.3 = 0.0000765669375 \text{ (л)} \quad (3.2)$$

Маючи об'єм що прокачується за хвилину розраховуємо розміри шестерні. Задаючись об'ємним ККД насоса, що дорівнює 85% отримуємо необхідну теоретичну продуктивність насоса за формулою:

$$V_T = \frac{V}{\eta} \quad (3.3)$$

де  $V$  – об'єм, л;

$V_T$  – теоретичний об'єм, л;

$\eta$  – ККД.

Застосуємо формулу і знайдемо теоретичний об'єм, що враховує ККД:

$$\frac{0.0000765669375}{0.85} = 0.000009 \quad (3.4)$$

Для того щоб знайти розміри шестерні, треба використати формулу, що використовується для розрахунку об'єму. Знаючи об'єм ми можемо використати формулу для розрахування оптимальних розмірів шестерні. Основним параметром у шестерні є її модуль та кількість зубців, модуль це параметр, що відповідає за розмір кожної шестерні, 2 шестерні з однаковим модулем – можуть працювати разом, навіть коли кількість зубців різна, але у шестеренних насосах використовується пара однакових шестерень. Об'єм, що прокачує насос знаходиться за формулою:

$$V_T = 2\pi b n m^2 (z + 0.2) * 10^{-6} \quad (3.5)$$

де  $V_T$  – об'єм, л;

$b$  – ширина шестерні, мм;

$n$  – об/хв;

$m$  – модуль;

$z$  – кількість зубців.

Зазвичай цю формулу використовують для того, щоб знайти максимальний об'єм, який прокачує насос, якщо використовувати її для знаходження модуля і кількості зубців з'являються певні обмеження. Ширина і модуль шестерні залежать від двигуна, який використовується для роботи, для насоса було обрано двигун NEMA 17 17HS4401S-0.9°, його зображено на рисунку 3.8, діаметр вала якого становить 5 мм, а довжина 24мм, тому шестерні вже мають бути достатньо широкими, щоб забезпечити максимальний контакт з валом і запобігти розшатувань, а також отвір має бути 5мм у діаметрі, щоб шестерні були спроможні працювати з валом двигуна [13].

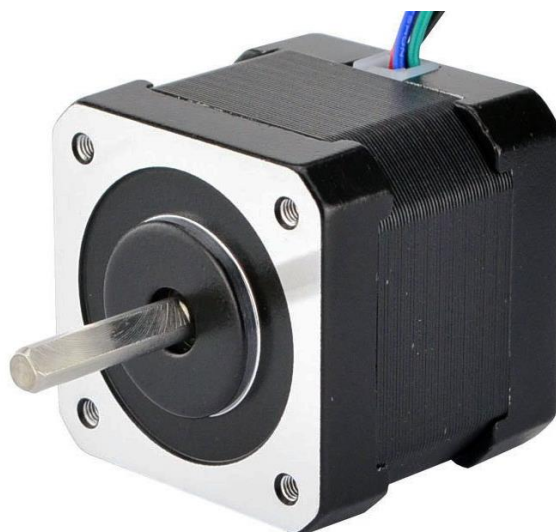


Рисунок 3.8 – Двигун NEMA 17 17HS4401S-0.9°

Технічні характеристики двигуна NEMA 17 17HS4401S-0.9° наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристики крокового двигуна NEMA 17 17HS4401S-0.9°.

Параметр	Значення
Струм	1.7 А
Індуктивність	5.7 мГн
Утримуючий момент	4 кг/см
Кутовий крок	1.8°
Діаметр валу	5 мм
Розміри	42x37x40 мм
Маса	0.28 кг

Важливо враховувати, що чим більше зубців – тим менше модуль (розмір зубців), якщо зубців буде занадто багато, то модуль може стати настільки малим, що виготовити таку деталь буде неможливо. На рисунку 3.9 наведено шестерню з малою кількістю зубців і великим модулем, а також шестерню з малим модулем та великою кількістю зубців, як можна побачити на варіанті з малим модулем буде більше внутрішній діаметр, що робить таку конструкцію більш придатною для розташування всередині вала, однак виготовлення такої деталі буде завдавати складнощів. Тому при розробці і розрахунках важливо враховувати як складність виготовлення деталі, так і спроможність працювати з валом діаметром 5мм.

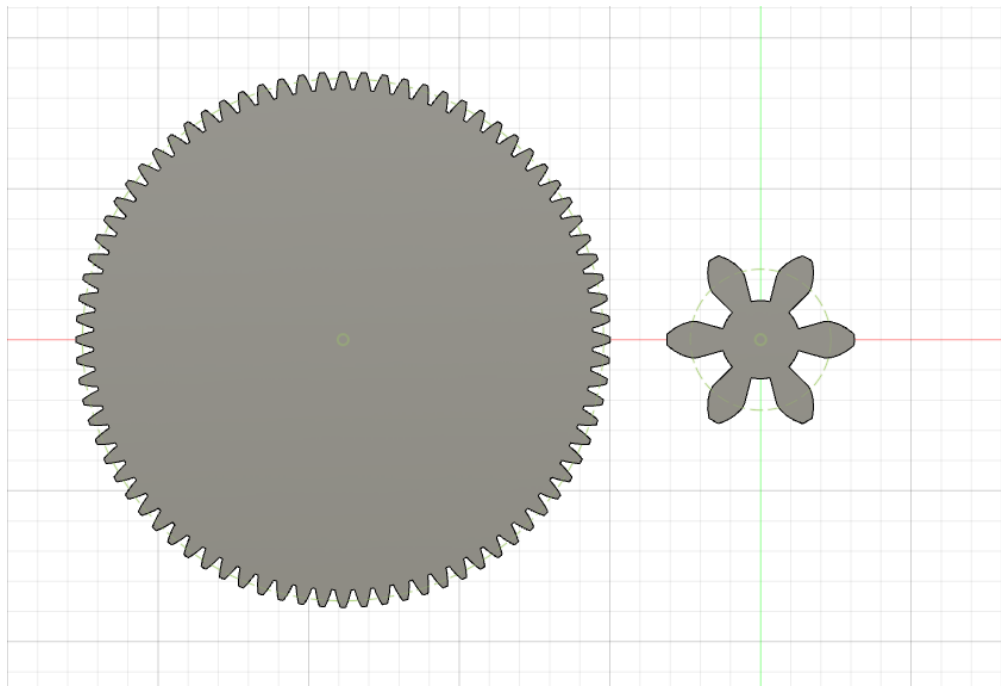


Рисунок 3.9 – Вплив модуля і кількості зубців на розмір шестерні

При розрахунках треба також обрати швидкість двигуна у оборотах в секунду, NEMA 17 17HS4401S-0.9° це шаговий двигун, і його мінімальний крок становить 0.9 градусів, усього він робить 400 кроків, мінімальне значення для формули становить 0.0025, однак двигун, що робить лише 1 крок у хвилину це дуже не точна конструкція, бо весь об'єм буде розподілятися не на всю площу робочої ділянки, а лише на малу її частину через те, що весь об'єм виходить лише за 1 крок.

Для того, щоб зробити насос більш точним треба використати спеціальні драйвера, що здатні розбити 1 крок на мікрокроки, для цього нам знадобиться спеціалізований драйвер 2208/2209, рисунок 3.10 . Драйвер TMC2208 v1.2 [14] здатен розбити 1 крок на 256 мікрокроків, що зробить точність насоса достатньою, бо тепер кожен мікрокрок пркачує 35.15625 нл, що робить точність достатньою для роботи принтера.



Рисунок 3.10 – TMC2208 v1.2

Маючи усі вхідні дані застосовуємо формулу для знаходження об'єму для знаходження модулю:

$$0.000009 = 2\pi * 15 * 0.0025 * m^2(24 + 0.2) * 10^{-6} \quad (3.6)$$

$$m = 1.257529131$$

Отримавши значення модулю, ширини та кількості зубців можна переходити до побудови моделі.

### 3.4 Висновки третього розділу

У третьому розділі було проаналізовано різні типи роторних насосів серед яких найбільш ефективним для нашої системи є шестеренний насос зовнішнього зачеплення, було розраховано модуль і інші основні характеристики для шестерні.

## 4 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПОДАЧІ З'ЄДНУВАЛЬНОЇ РЕЧОВИНИ

### 4.1 Базові відомості про точні насосні системи

Інжекційний тривимірний друк (ЗДР) базується на технології вприскування з'єднувальної речовини на порошковий матеріал, що призводить до зв'язування порошку у цільну конструкцію, однак те, наскільки якісним буде результат – залежить від екструдера. Важливу роль грає багато факторів, від дистанції між друкуючою голівкою та матеріалом, до діаметру отвору, через який відбувається вприскування з'єднувальної речовини, однак сам процес друку був би неможливим без точних насосів, що подають з'єднувальну речовину.

### 4.2 Моделювання системи

Маючи усі необхідні характеристики можна переходити до моделювання шестерні, корпусу та інших елементів.

Розроблену шестерню наведено на рисунку 4.1, вона має усі необхідні характеристики для нормальної роботи такі як достатньо великий розмір для розташування в центрі отвору для валу двигуна.

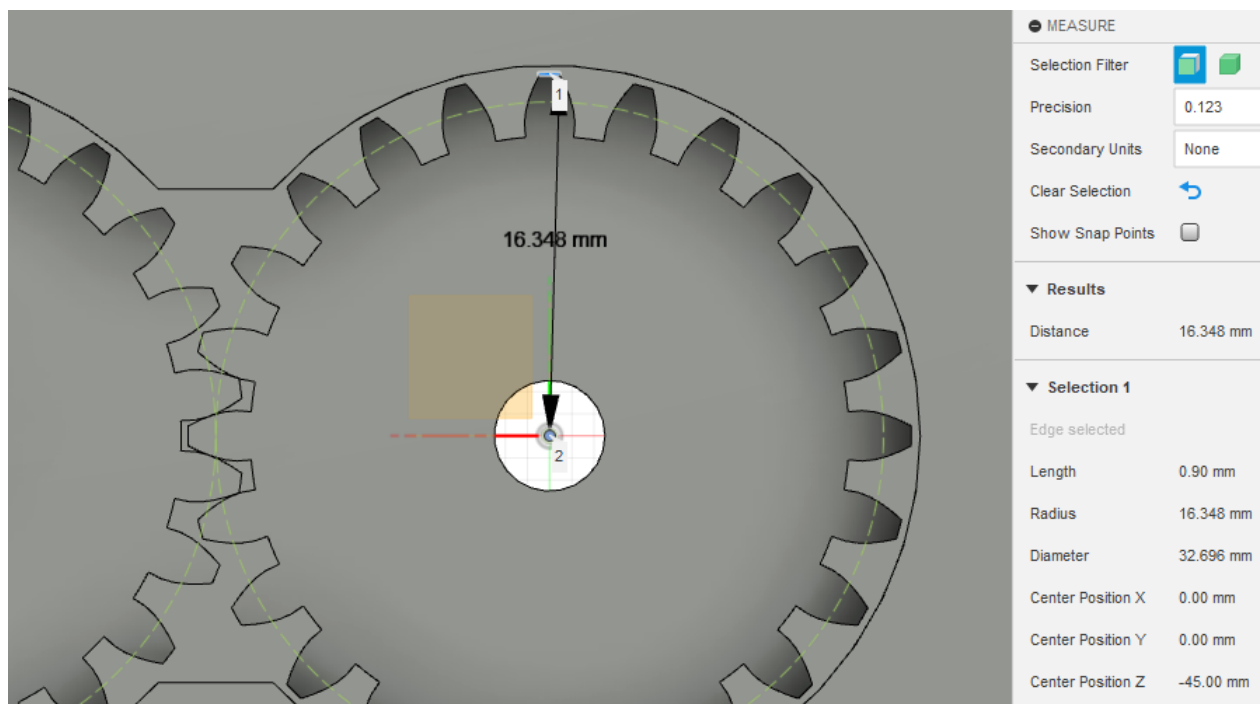


Рисунок 4.1 – Розроблена шестерня

Для правильного розташування елементів використовується ділительне коло, наведене на рисунку 4.2, діаметр цього кола зветься ділительним діаметром або pitch diameter. Дві шестерні ідеально зчіплюються у випадку, коли їх ділительні діаметри проходять по дотичній



Рисунок 4.2 – Pitch diameter

На рисунку 4.3 наведено конструкцію корпусу насоса, отвір для рідини становить 5мм. Розмір конструкції в цілому становить 80x28x50 мм.

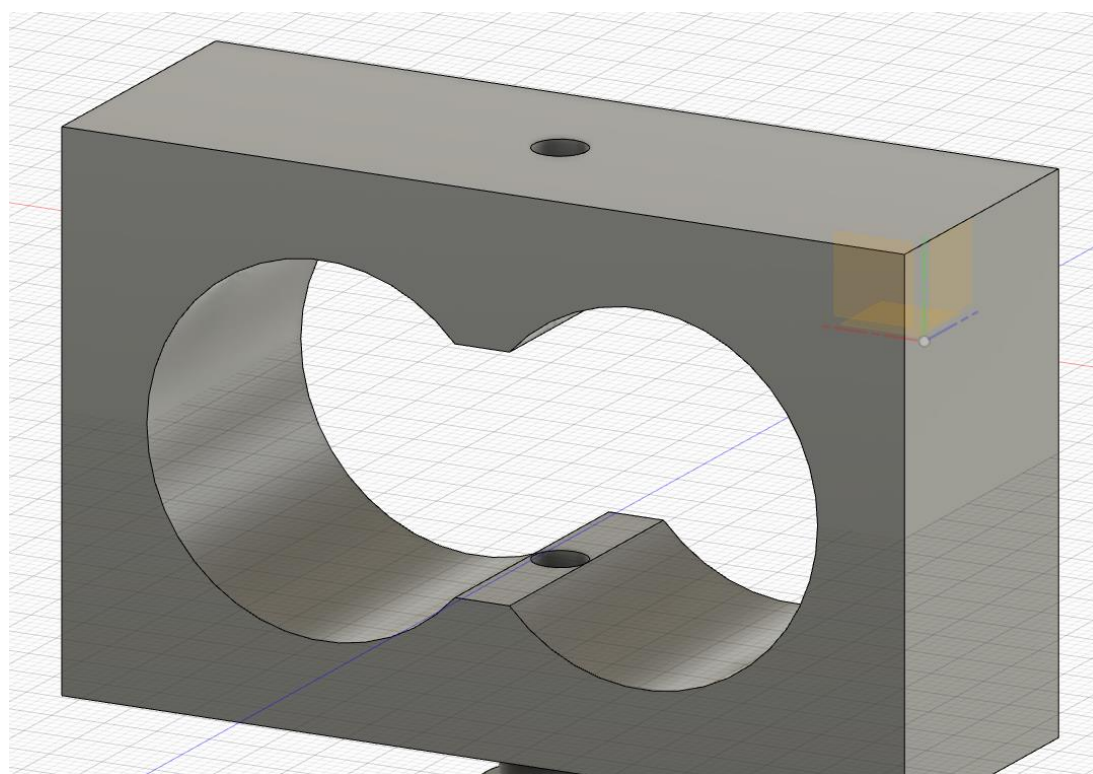


Рисунок 4.3 – Корпус насоса

Вал закріплюється всередині шестерні, а шестерні в свою чергу закриті з двох боків кришками, кришки наведені на рисунку 4.4, ширина кришек становить 6.5 мм, діаметр отворів для розташування підшипників становить 8 мм у діаметрі і 2.5 мм у ширині, за виключенням одного, через який проходить вал двигуна.

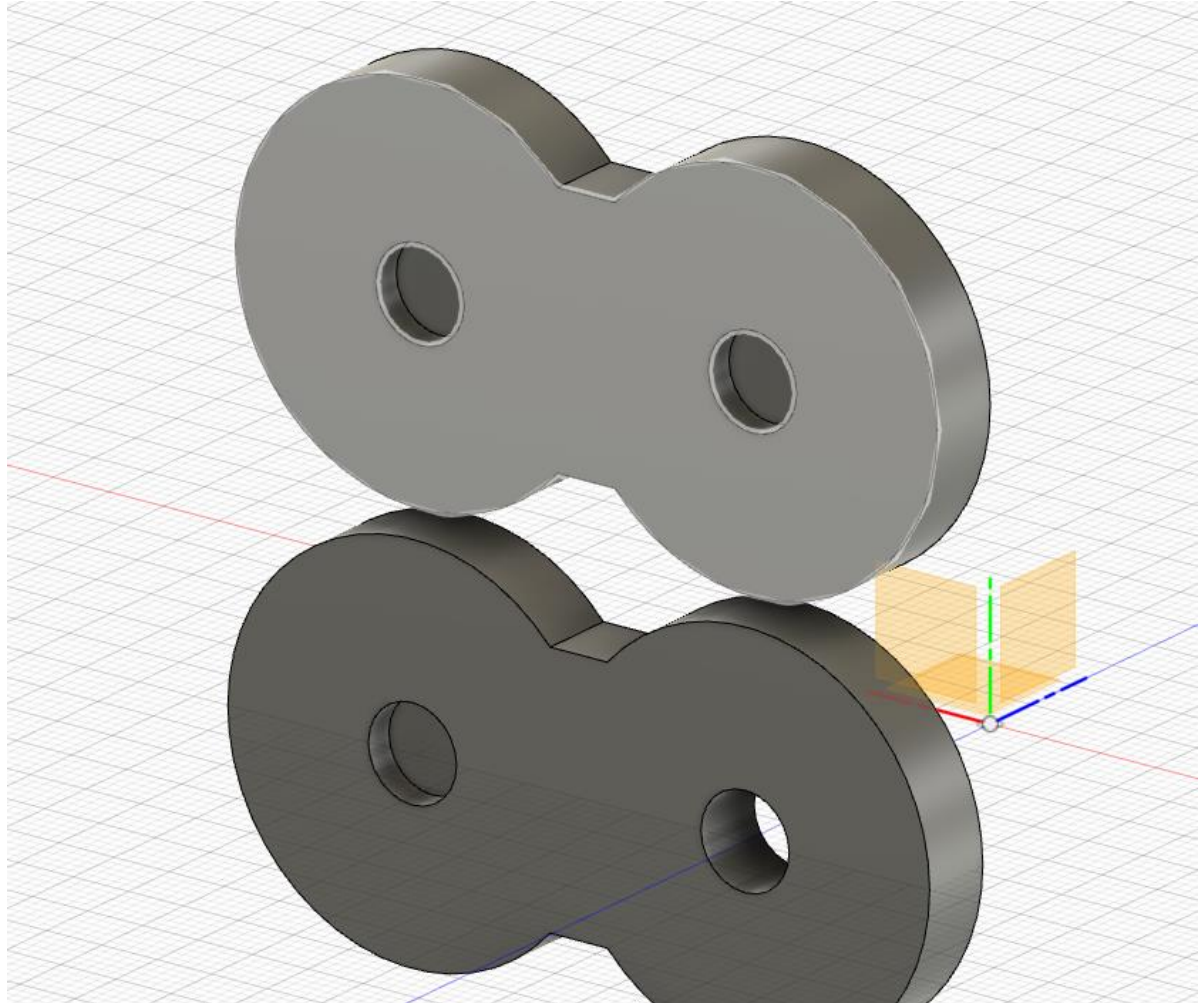


Рисунок 4.4 – Бокові заслонки (кришки)

Задля забезпечення герметичності конструкції і надання валам можливості вільно обгортатись було використано підшипники MR85ZZ з внутрішнім діаметром 5 мм, зовнішнім діаметром 8 мм і шириною в 2.5 мм (саме під ці підшипники зроблені спеціалізовані отвори в кришках). MR85ZZ це закритий тип підшипників, що можна побачити на рисунку 4.5, такі підшипники використовують для герметичності конструкції, тому було обрано саме закриту версію [15].

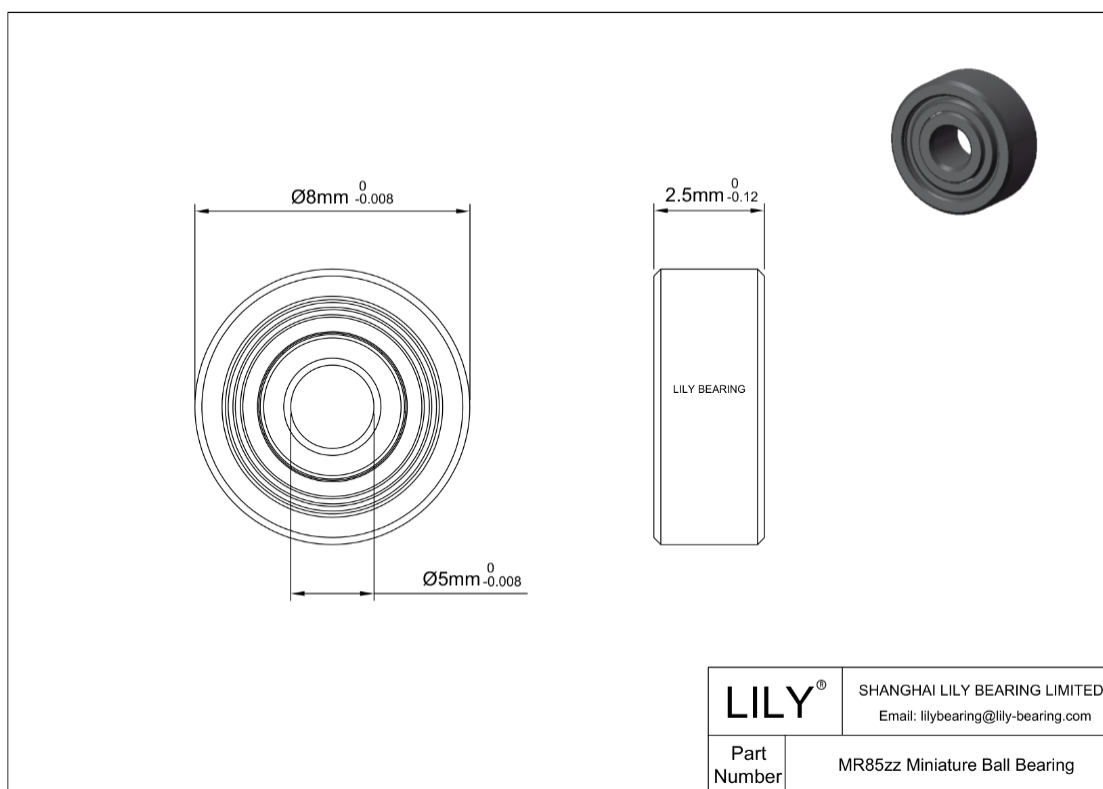


Рисунок 4.5 – Підшипник моделі MR85ZZ

Усі необхідні елементи вже обрано, і насос може прокачувати необхідну кількість рідини, однак екструзія має бути точною, для цього використовуються різні сопла, це точні системи екструзії, приклад роботи екструдера наведено на рисунку 4.6.



Рисунок 4.6 – Приклад роботи екструдера

Для реалізації максимально точної екструзії було обрано сопло solid-stream spray nozzle 0.1, який наведено на рисунку 4.7. Завдяки діаметру отвору в 100 мікрон це сопло може забезпечити максимальну точність друку.



Рисунок 4.7 – Сопло solid-stream spray

Одна шестерня знаходиться на валу двигуна, а інша розташована на внутрішньому валу, який розташовано всередині насоса і закріплено кришками. Діаметр внутрішнього валу також становить 5 мм, але, на відміну від валу двигуна, довжина внутрішнього валу становить 20 мм. Закріпленний внутрішній вал наведено на рисунку 4.8.

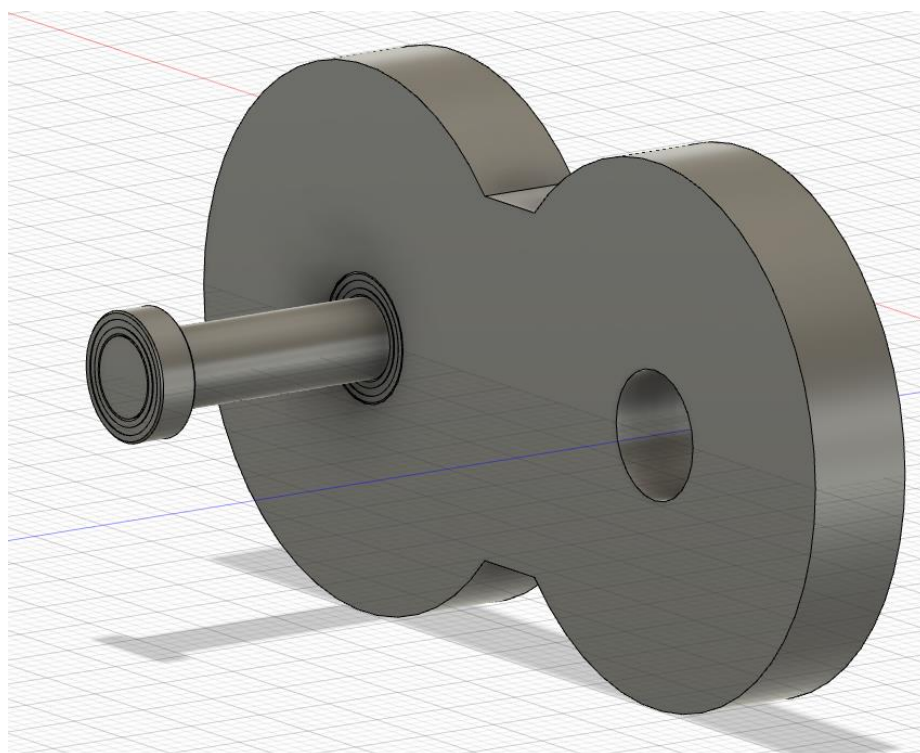


Рисунок 4.8 – Внутрішній вал (з підшипниками та кришкою)

Зібравши всі розроблені та обрані елементи в єдину конструкцію отримаємо насосну систему базовану на зовнішній шестеренній передачі, її наведено на рисунку 4.9. Двигун обертає ведучу шестерню, а вона в свою чергу працює в парі з веденою, виконуючи роботу по переміщенню рідини в робочу зону, з двох боків конструкція закрита кришками в яких вмонтовано підшипники, що забезпечують обертання валів. Рідина у робочій зоні потрапляє в споло з діаметром отвору в 0.1 мм, яке надає максимальну точність екструзії.

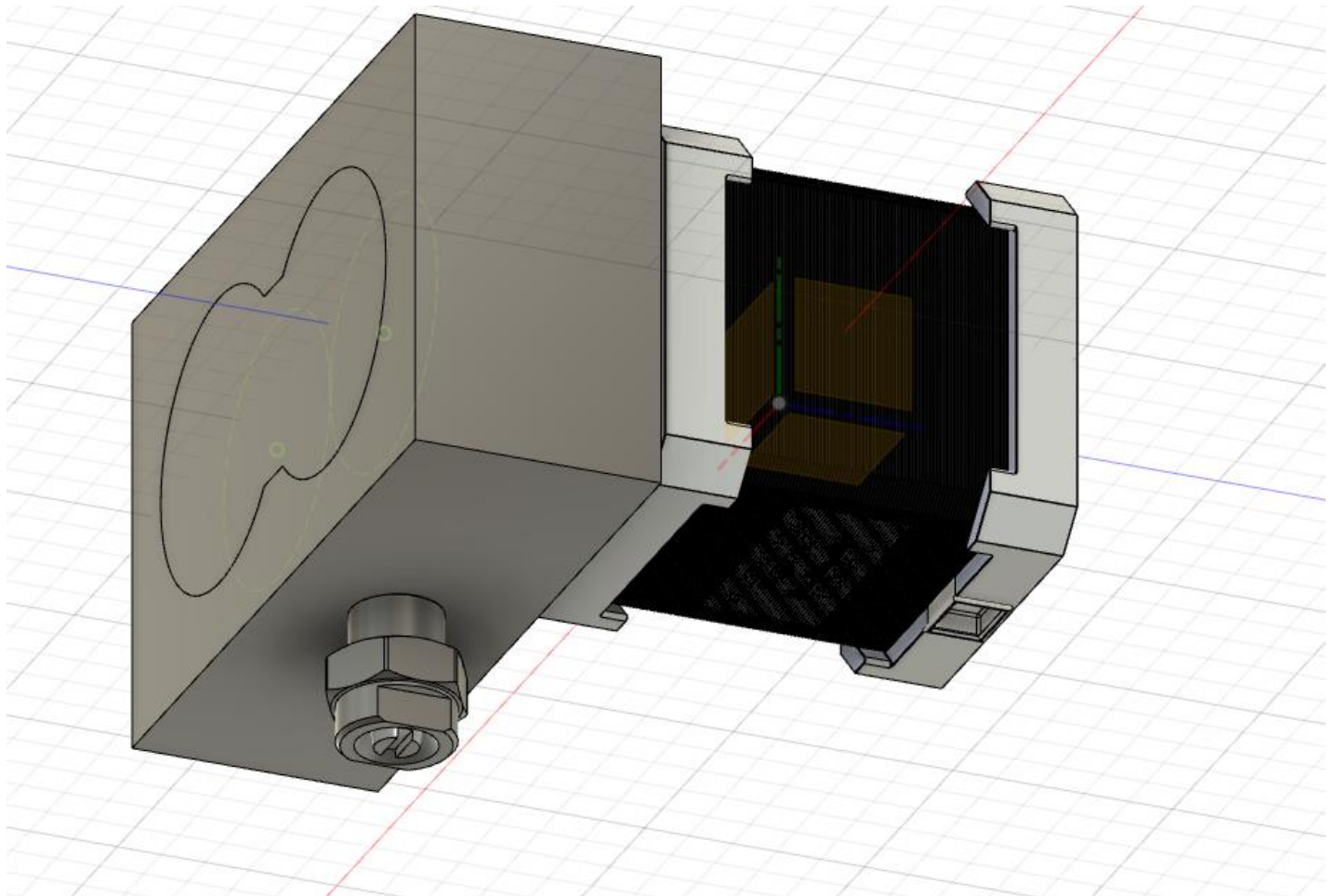


Рисунок 4.9 – Шестеренний насос з вмонтованим соплом діаметром 0.1 мм

#### 4.3 Висновки третього розділу

У третьому розділі було обрано або розроблено конструкційні елементи насосу, розроблений насос є базою для експериментів в області пропускної здібності насосу при різних зазорах між шестернею і елементами корпусу.

## 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДІБНОСТІ ЕКСТРУДЕРУ

### 5.1 Симуляція роботи екструдеру

Для того, щоб дізнатись на скільки надійна насосна система, необхідно проаналізувати наскільки вона може стримувати рідину, не дючи їй пройти скрізь насос. Для підвищення надійності треба зменшити відстань між шестернями і елементами корпусу, але це призводить до складнощів у реалізації конструкції, бо зробити проміжок в 0.1 мм є занадто складним завданням навіть для дуже точних станків, 0.1 мм це найменший варіант отворів в екструдерах, використовувати такі значення для зазорів не ефективно, однак з використанням функціоналу Fusion 360 ми можемо провести серію симуляцій з кроком в 0.1 мм щоб виявити де система буде зазнавати неприйнятних втрат, таким чином ми зможемо обрати проміжок, що одночасно є і достатньо ефективним задля стримання рідини, і не буде завдавати труднощів з реалізацією системи.

Для того щоб провести симуляцію необхідно аналізувати лише частину, що не зайнята елементами конструкції, тобто весь вільний простір в насосі, для цього ми створюємо об'ємну фігуру, що повторює корпус, після чого віднімаємо від нового об'єкту усі деталі, процес і результат цієї операції наведено на рисунку 5.1.

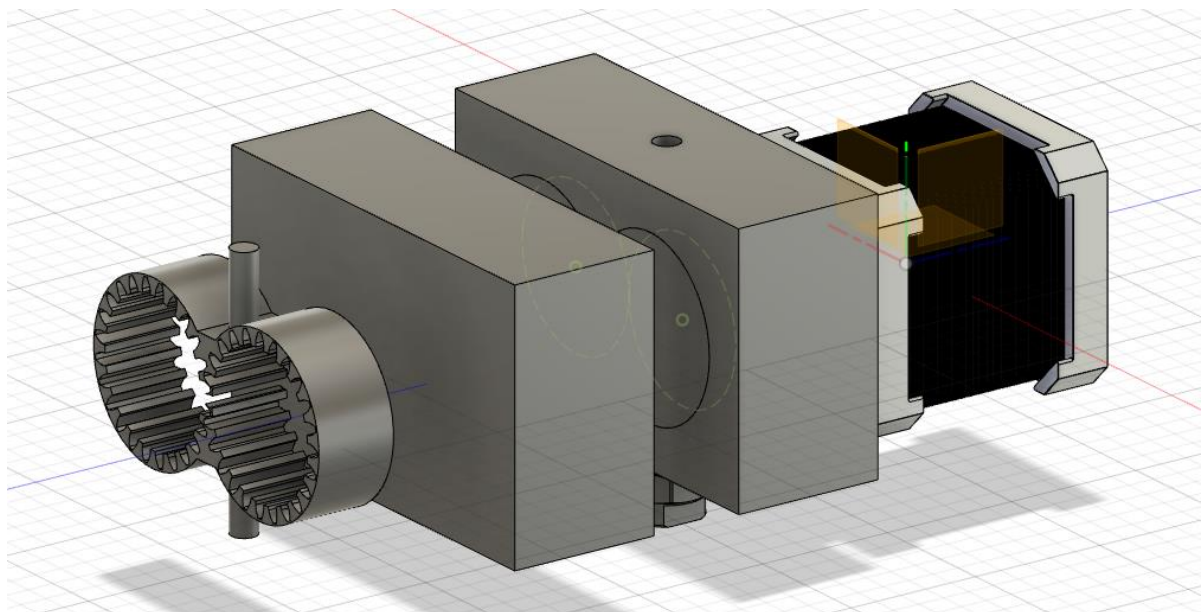


Рисунок 5.1 – Виявлення вільної частини насосу

Відокремлена частина добре демонструє відстань від шестерні до внутрішньої частини корпусу, впровадження цього методу наведено на рисунку 5.2.

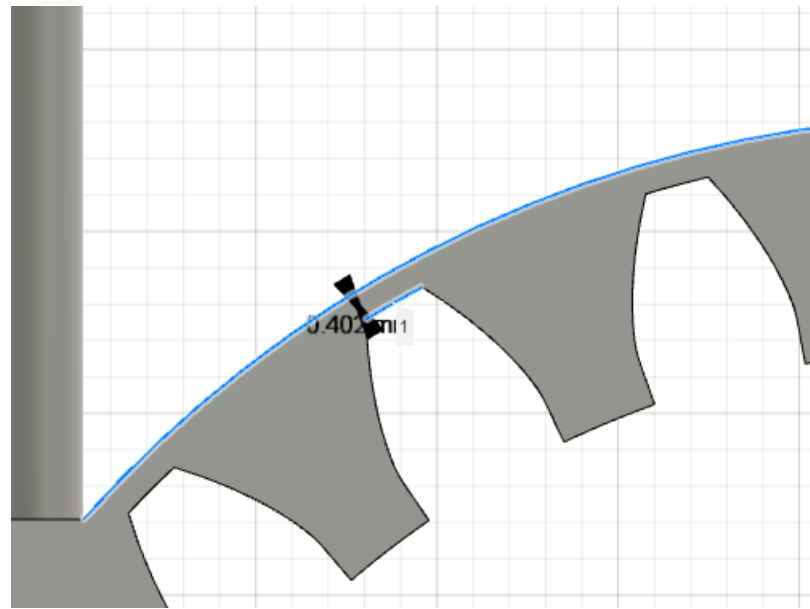


Рисунок 5.2 – Заміри відстані від шестерні до корпусу

Коли ми отримали макет вільної частини можна використовувати її для симуляції подачі води в насос, таким чином ми дізнаємось наскільки велика ймовірність заповнити насос при зазначеному проміжку.

Після всіх вимірювань переходимо до симуляції протікання рідини через вільну область. Для того щоб почати симуляцію необхідно обрати тип симуляції який ми хочемо провести. Вибір типу симуляції наведено на рисунку 5.3.

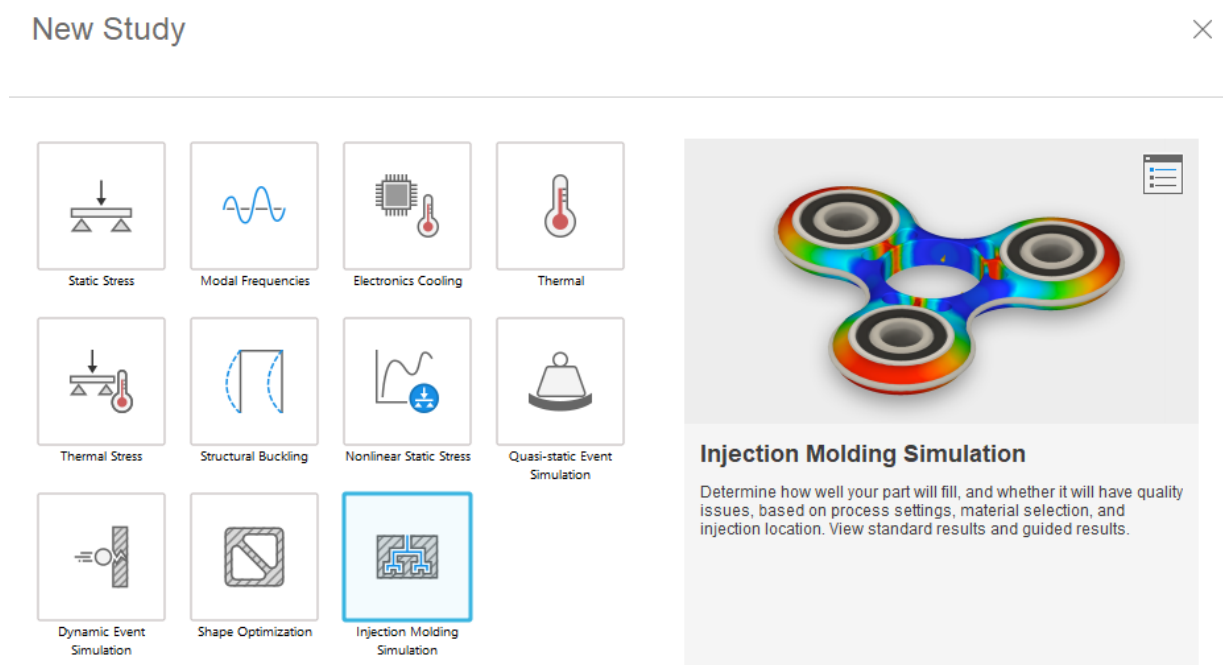


Рисунок 5.3 – Варіанти симуляцій

Fusion 360 дає можливість провести різні типи симуляції, від перевірки міцності конструкції до нагрівання електронних компонентів, але нам потрібна симуляція інжекції.

Щоб почати симуляцію важливо обрати точку інжекції, щоб вода заходила з боку де знаходиться вхід і йшла в сторону робочої зони, також важливо обрати матеріалом саме воду, бо у Fusion 360 можна працювати з різними видами рідин. Налаштування симуляції наведено на рисунку 5.4.

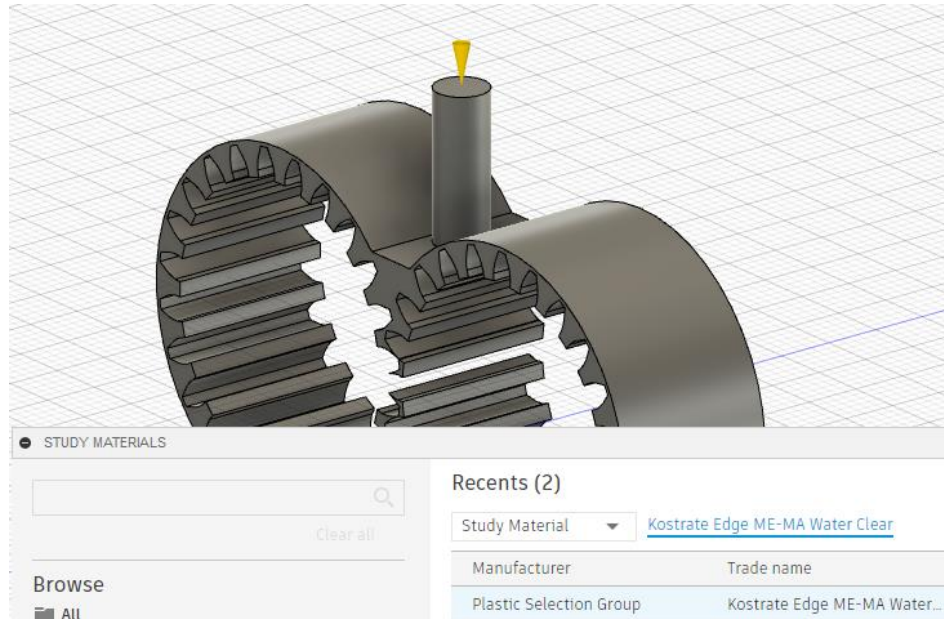


Рисунок 5.4 – Вибір матеріалу і зазначення точки інжекції

Коли всі параметри обрані залишається лише почати симуляцію, результати симуляції для проміжку в 0.4 мм наведено на рисунку 5.5.

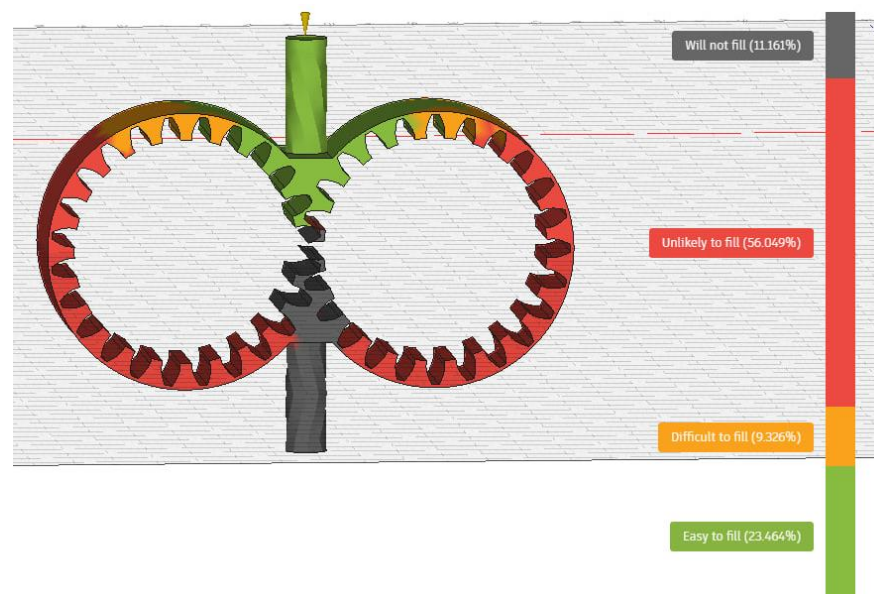


Рисунок 5.5 – Результати симуляції для проміжку в 0.4 мм

Сіра зона демонструє де вода точно не пройде, червона зона демонструє де шанс того, що вода пройде є малим, жовта зона це участок де пройти буде складно, а зелена зона це участок де вода може вільно проходити.

Тепер проведемо симуляцію для всіх проміжків від 0.1 мм до 2 мм.

Симуляцію для 0.1 мм наведено на рисунку 5.6.

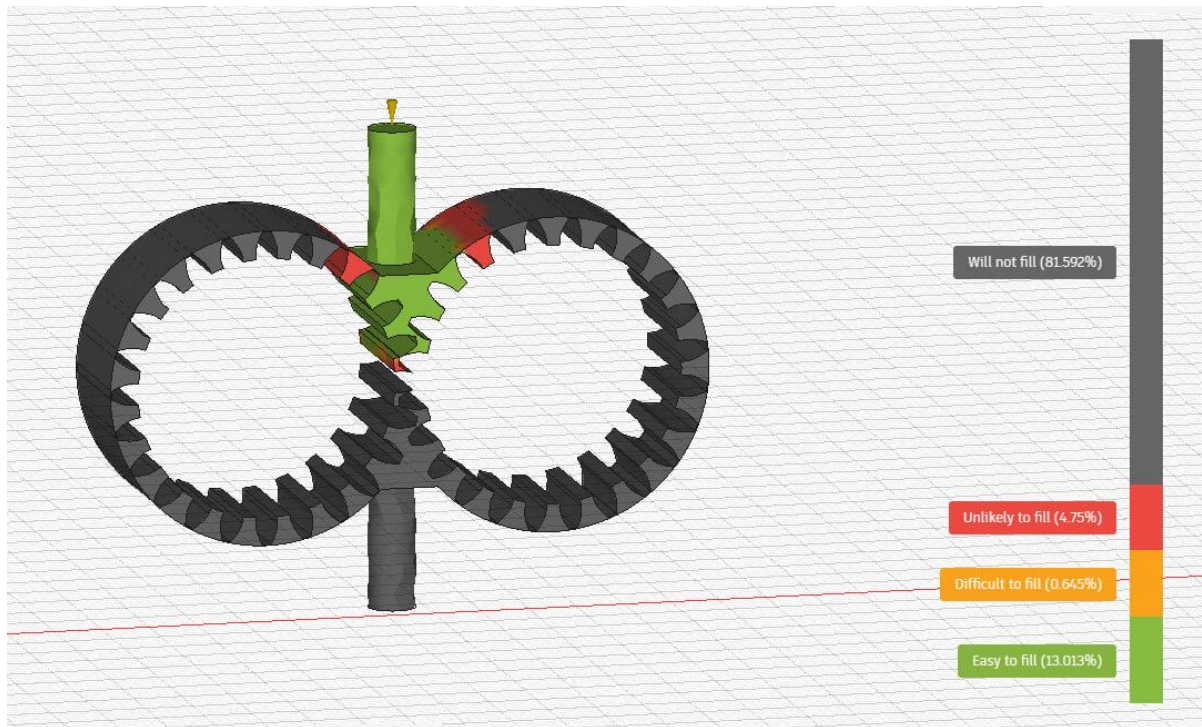


Рисунок 5.6 – Результати симуляції для проміжку в 0.1 мм

Симуляцію для 0.2 мм наведено на рисунку 5.7.

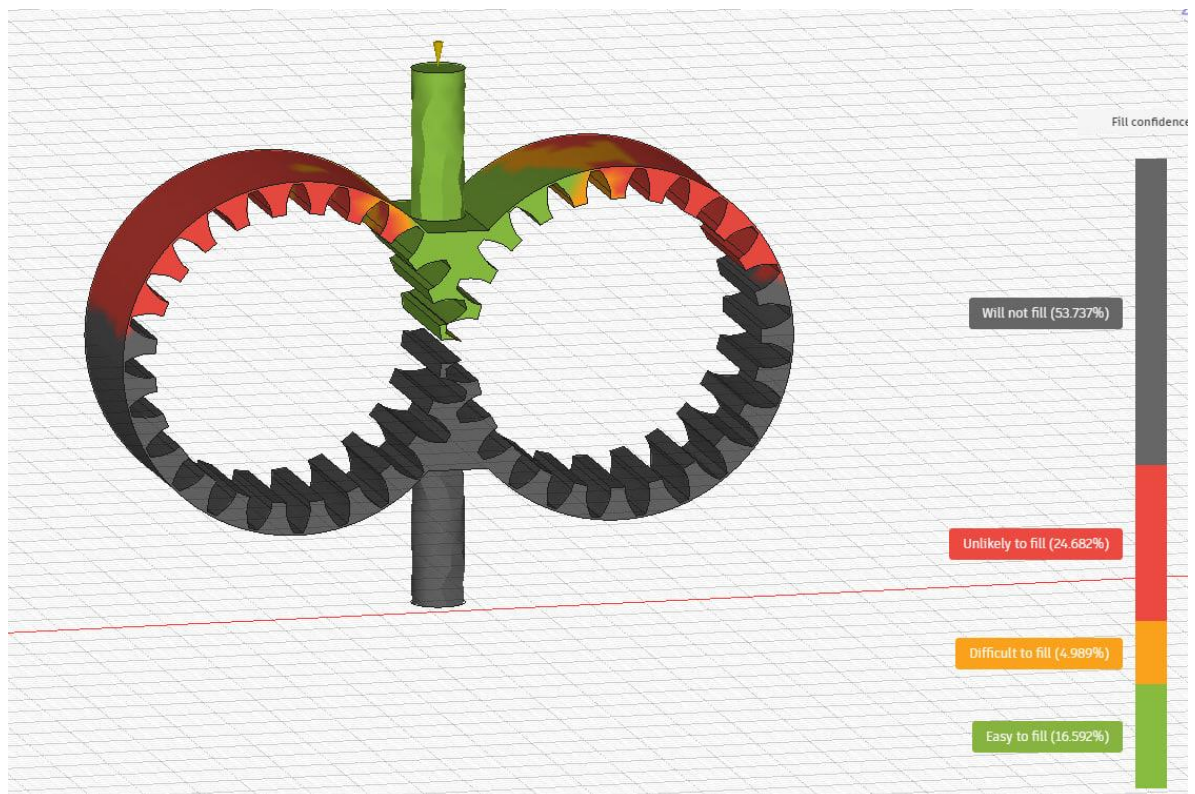


Рисунок 5.7 – Результати симуляції для проміжку в 0.2 мм

Симуляцію для 0.3 мм наведено на рисунку 5.8.

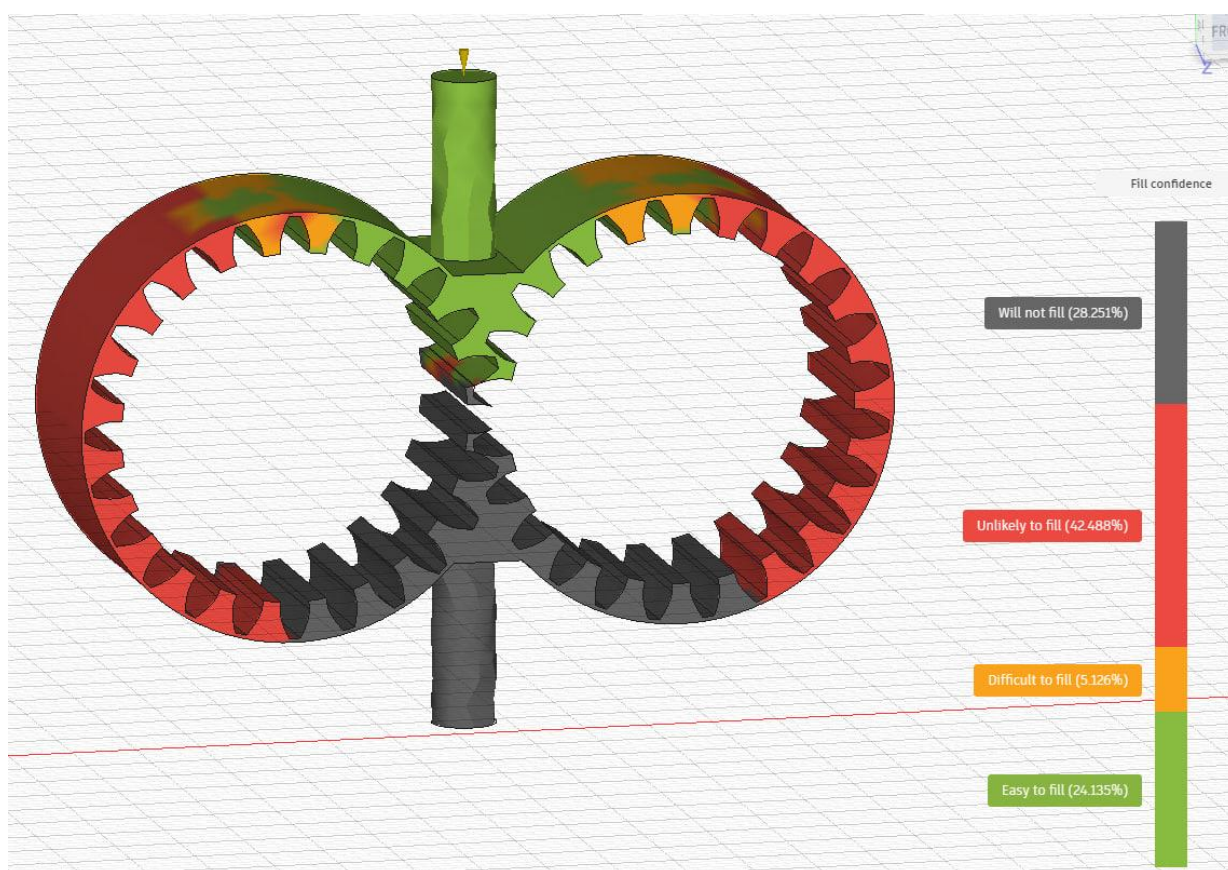


Рисунок 5.8 – Результати симуляції для проміжку в 0.3 мм

Симуляцію для 0.5 мм наведено на рисунку 5.9.

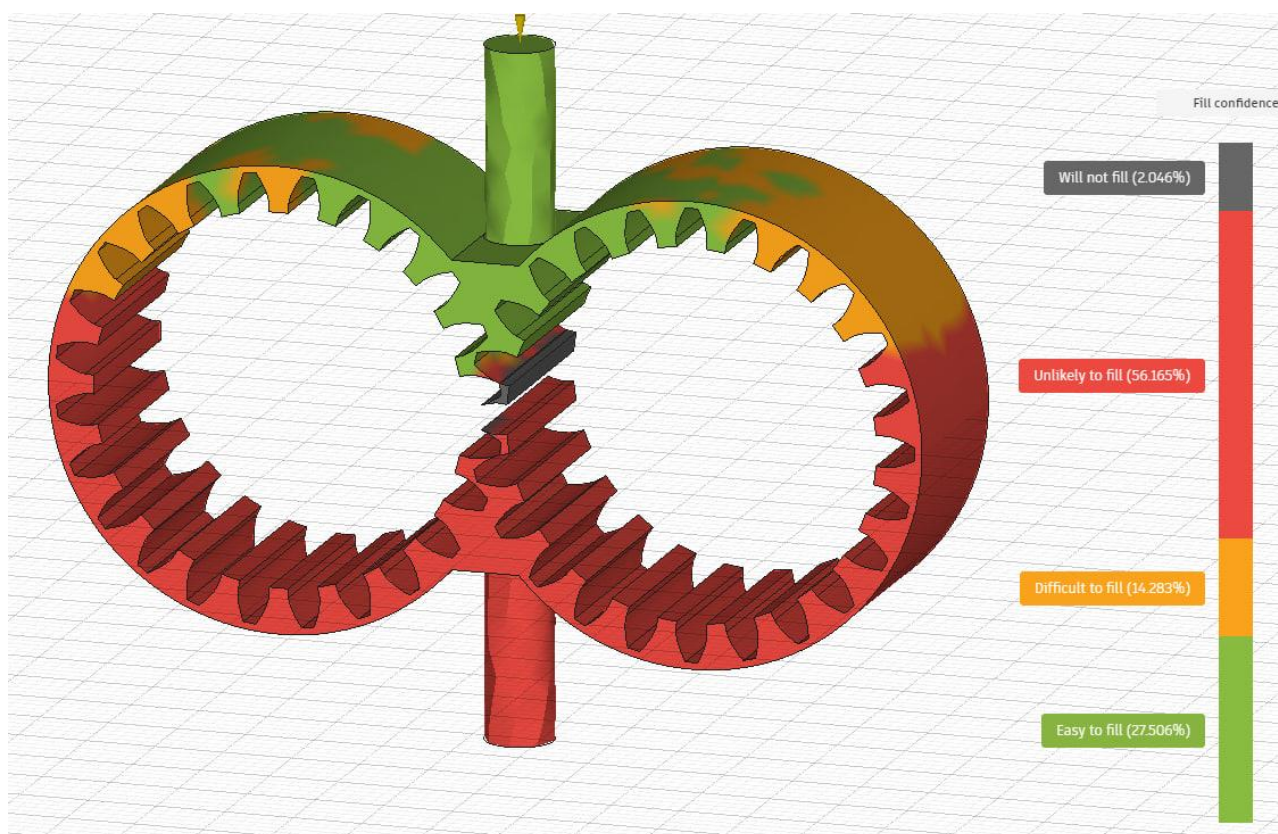


Рисунок 5.9 – Результати симуляції для проміжку в 0.5 мм

Симуляцію для 0.6 мм наведено на рисунку 5.10.

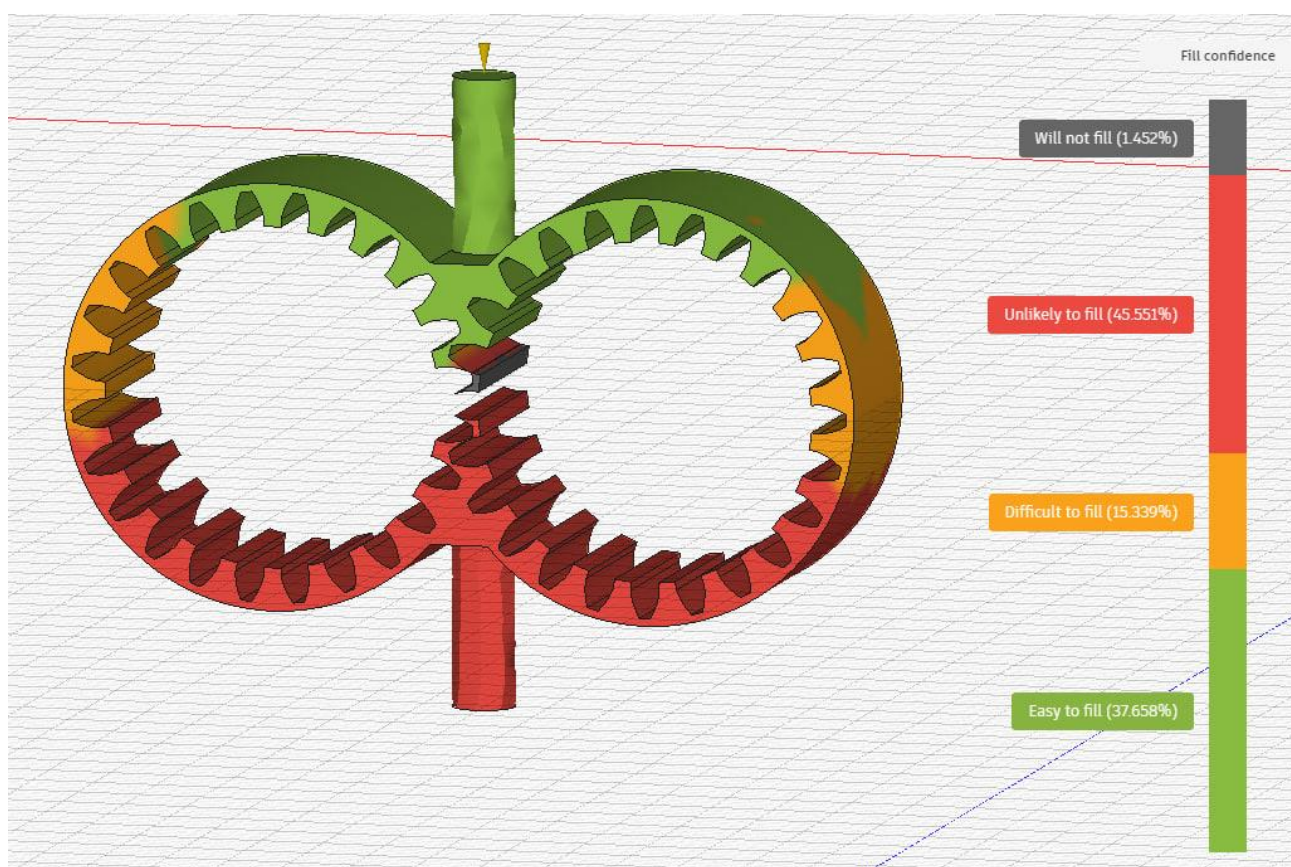


Рисунок 5.10 – Результати симуляції для проміжку в 0.6 мм

Симуляцію для 0.7 мм наведено на рисунку 5.11.

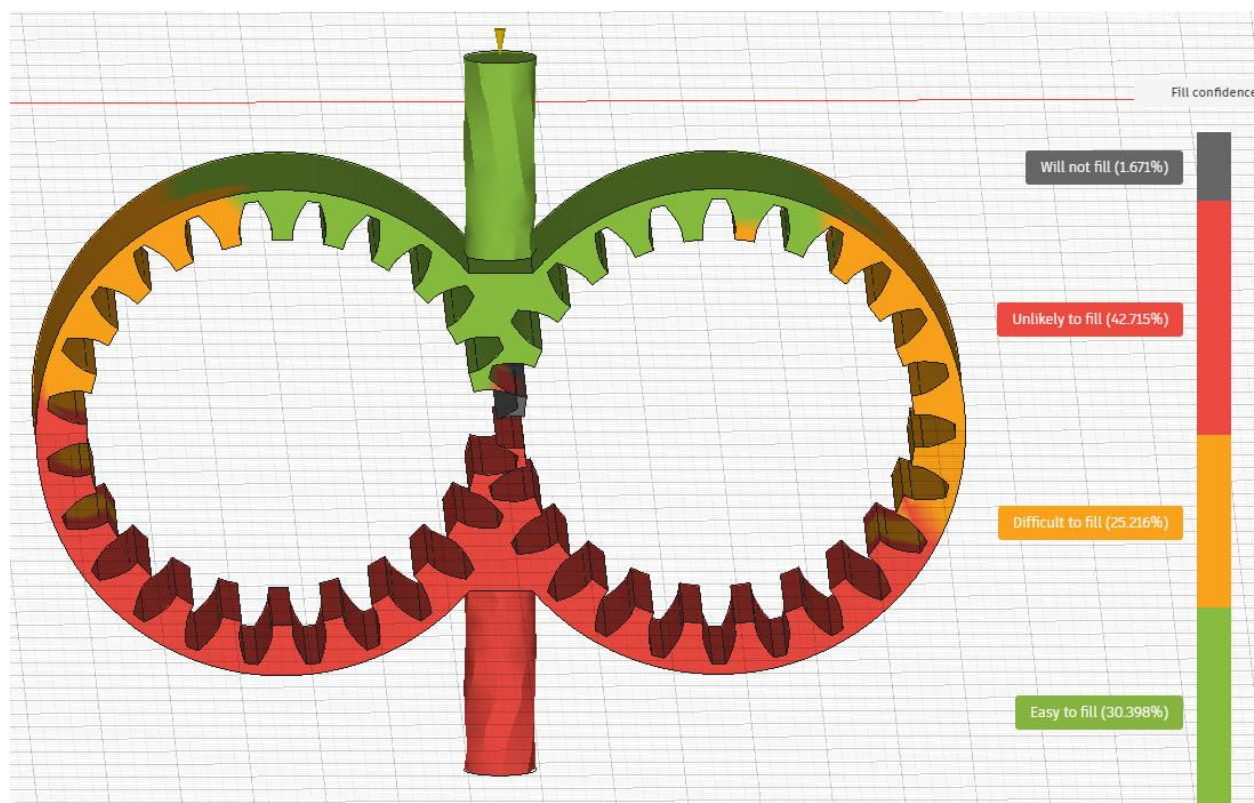


Рисунок 5.11 – Результати симуляції для проміжку в 0.7 мм

Симуляцію для 0.75 мм наведено на рисунку 5.12.

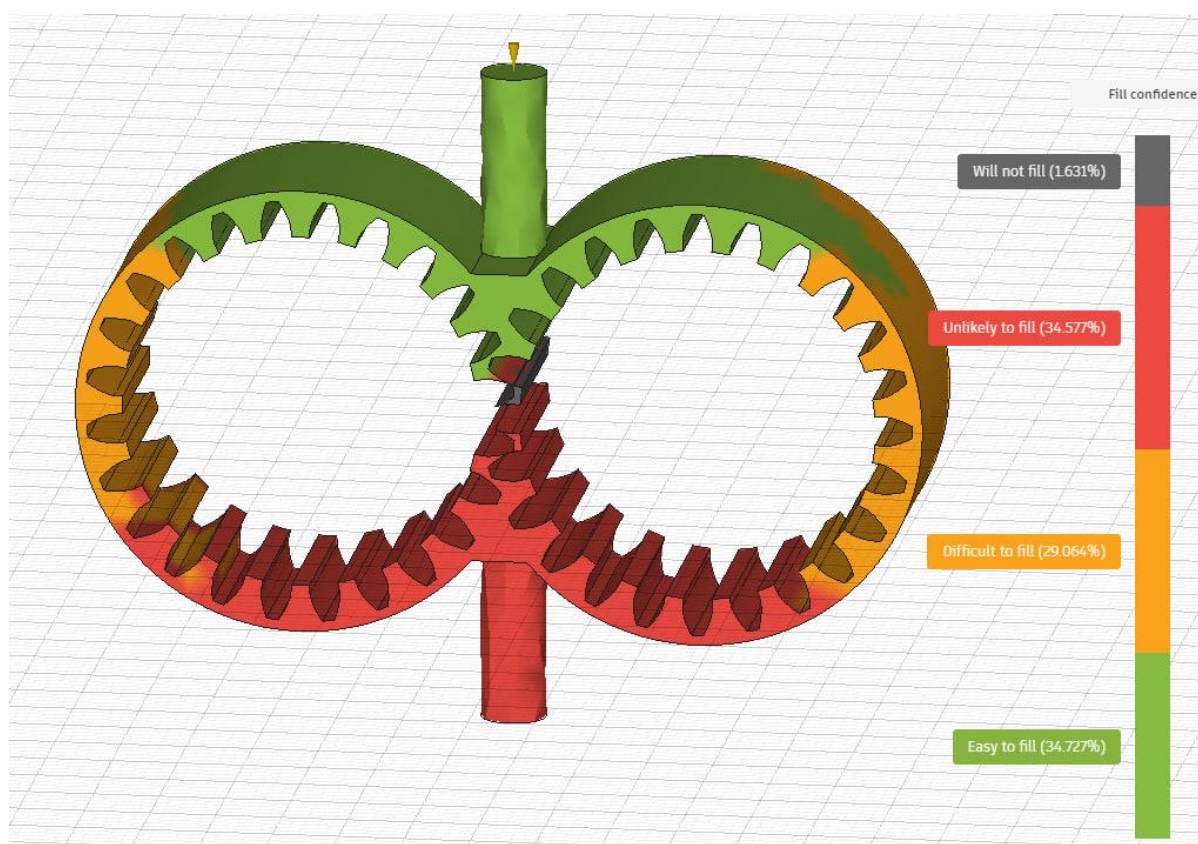


Рисунок 5.12 – Результати симуляції для проміжку в 0.75 мм

Симуляцію для 0.85 мм наведено на рисунку 5.13.

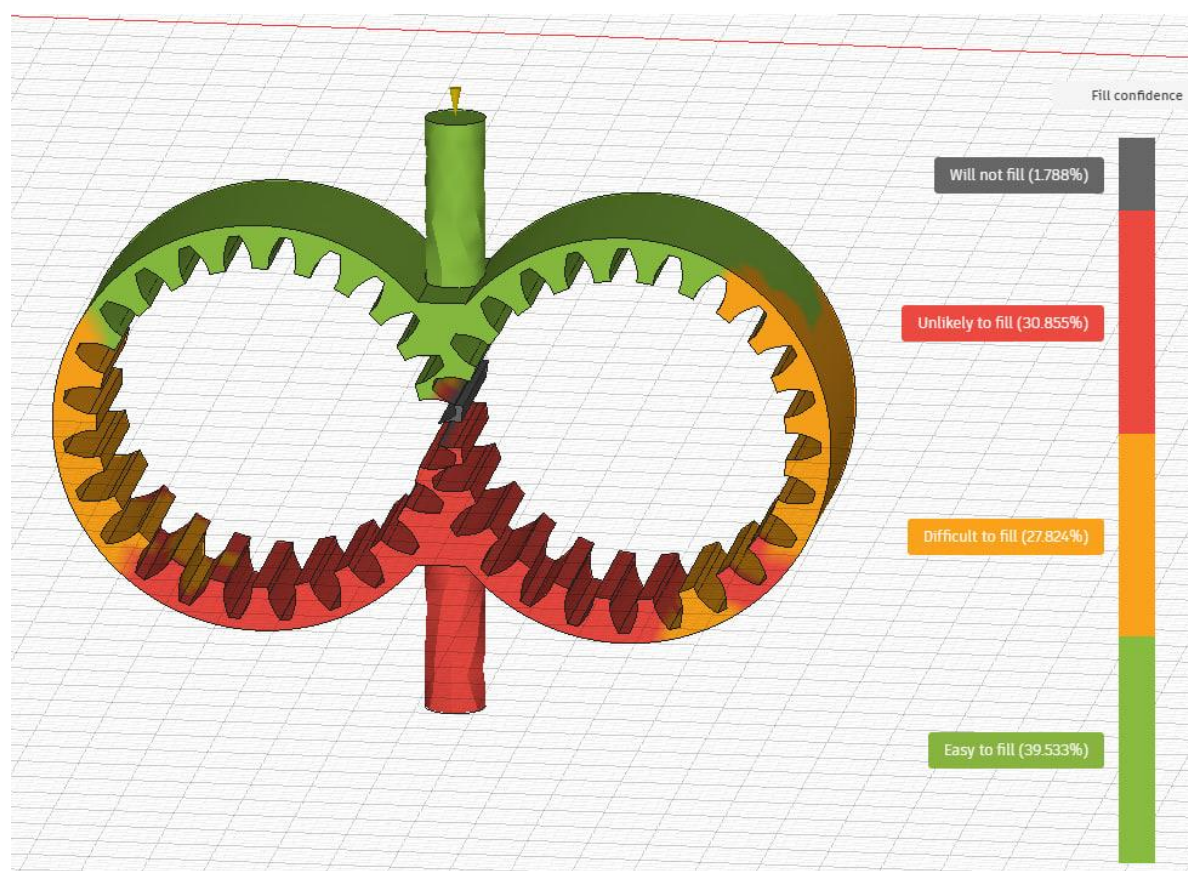


Рисунок 5.13 – Результати симуляції для проміжку в 0.85 мм

Симуляцію для 0.9 мм наведено на рисунку 5.14.

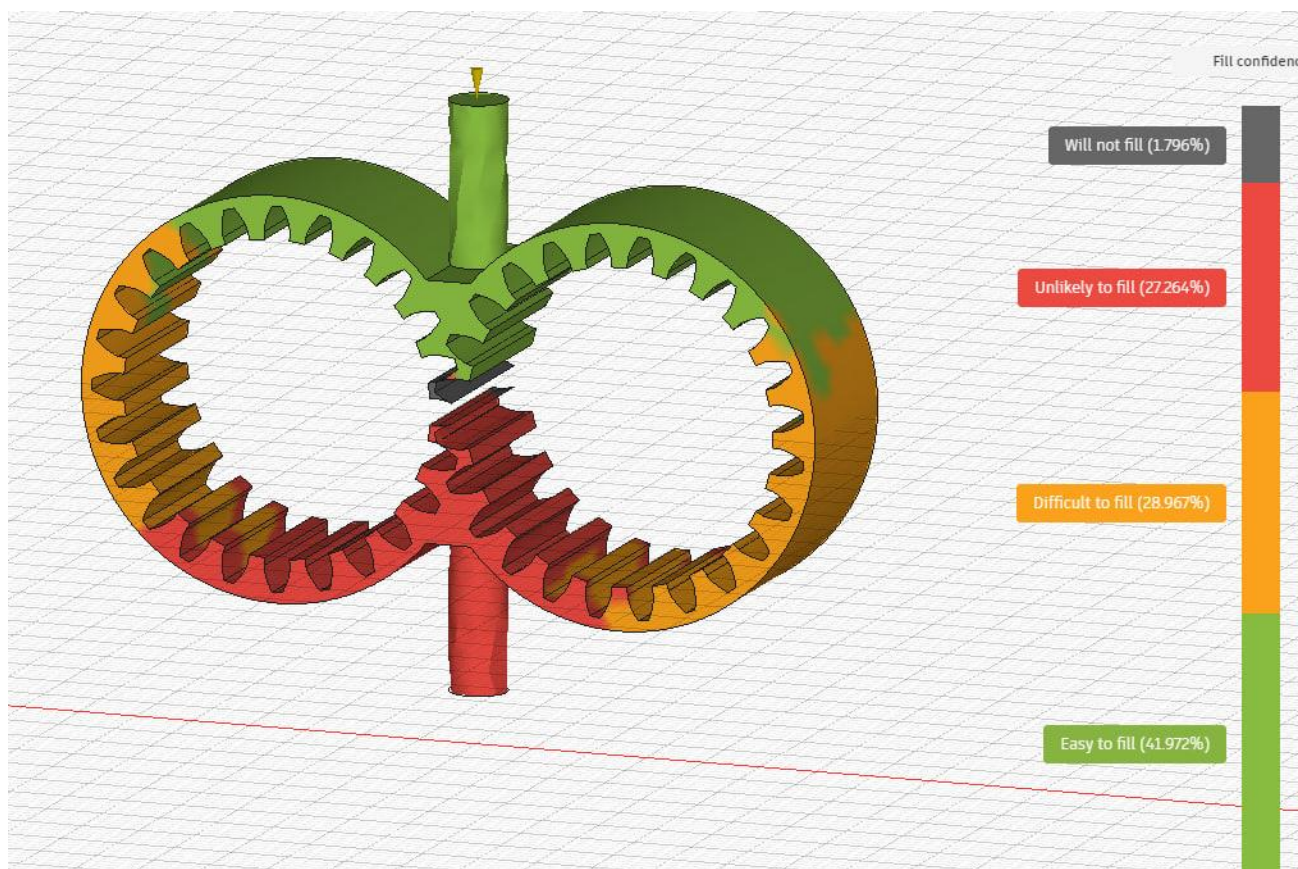


Рисунок 5.14 – Результати симуляції для проміжку в 0.9 мм

Симуляцію для 1 мм наведено на рисунку 5.15.

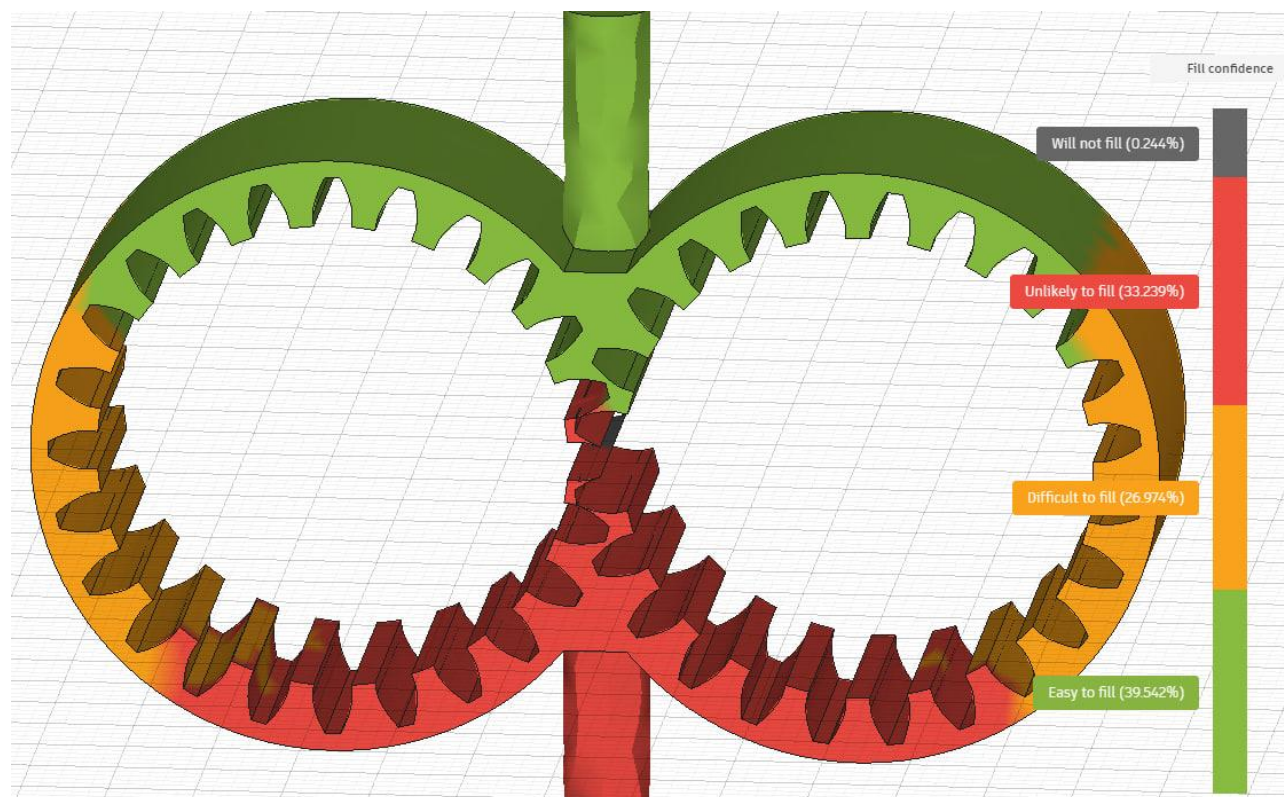


Рисунок 5.15 – Результати симуляції для проміжку в 1 мм

Симуляцію для 1.1 мм наведено на рисунку 5.16.

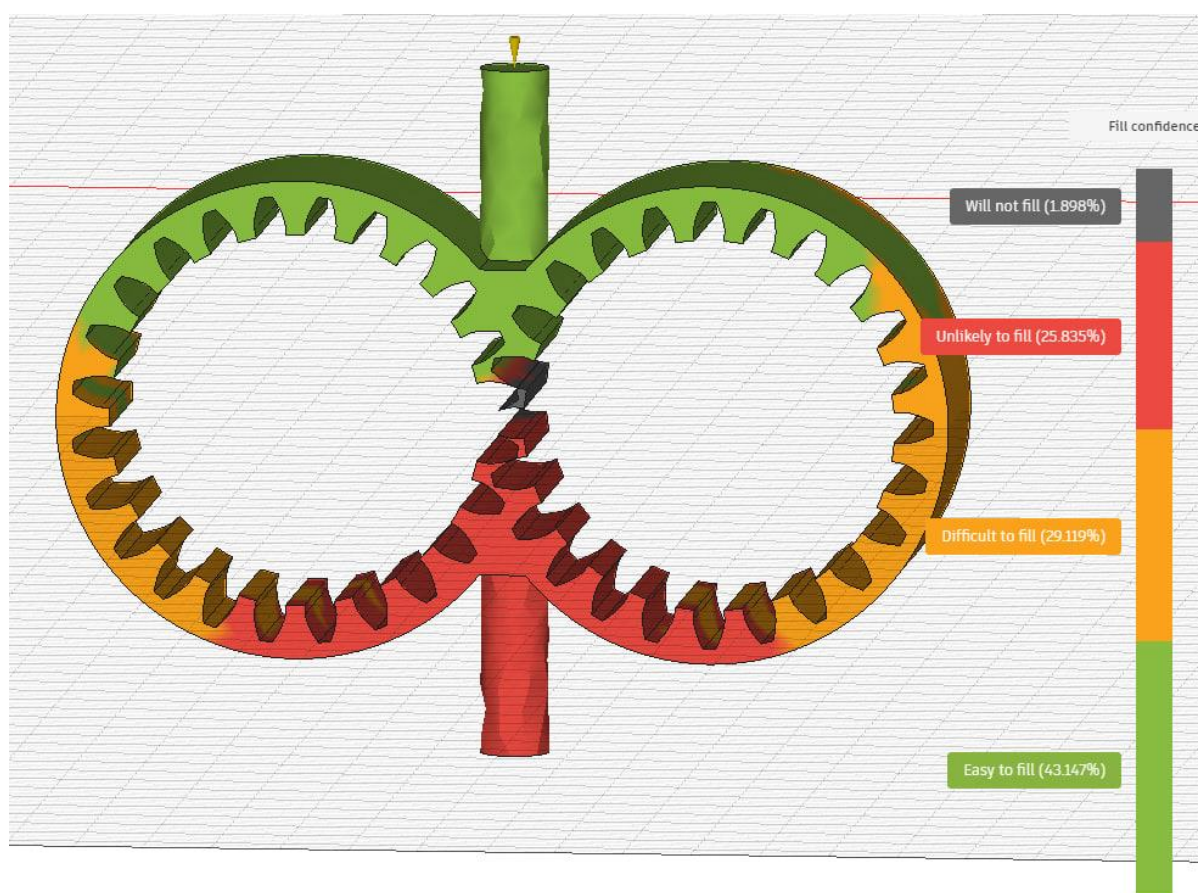


Рисунок 5.16 – Результати симуляції для проміжку в 1.1 мм

Симуляцію для 1.2 мм наведено на рисунку 5.17.

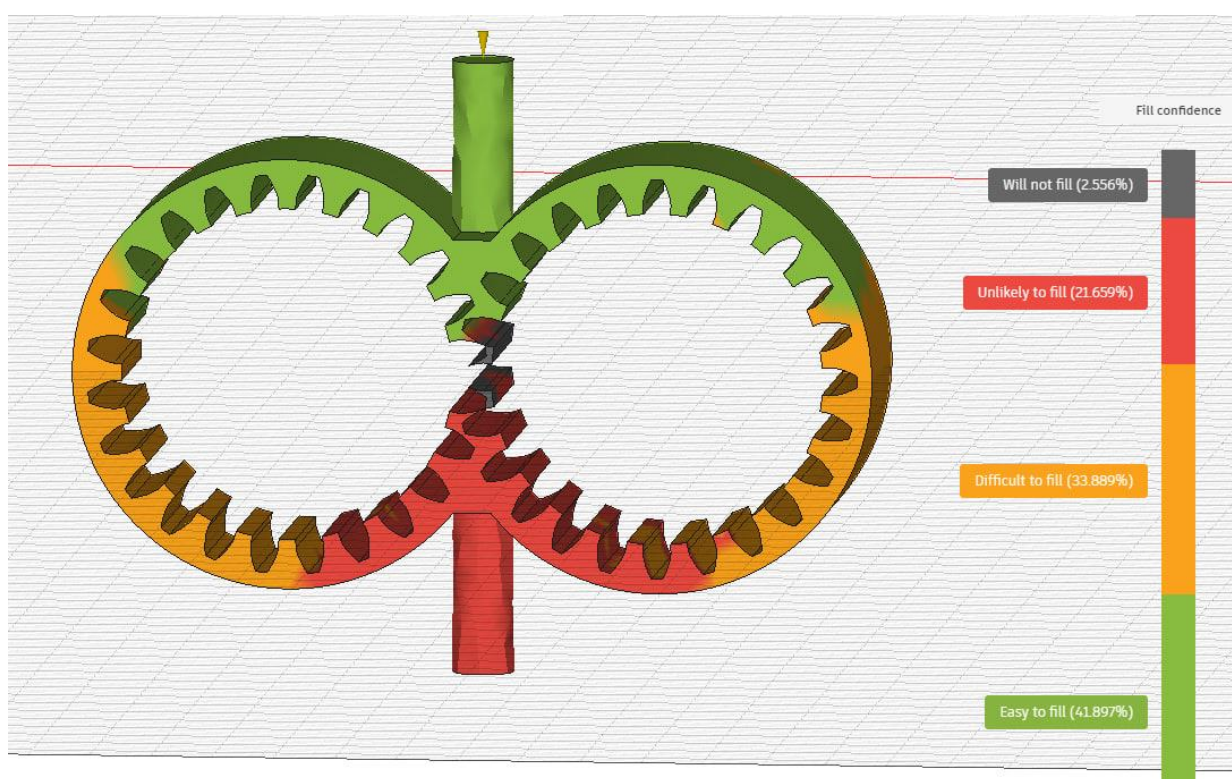


Рисунок 5.17 – Результати симуляції для проміжку в 1.2 мм

Симуляцію для 1.25 мм наведено на рисунку 5.18.

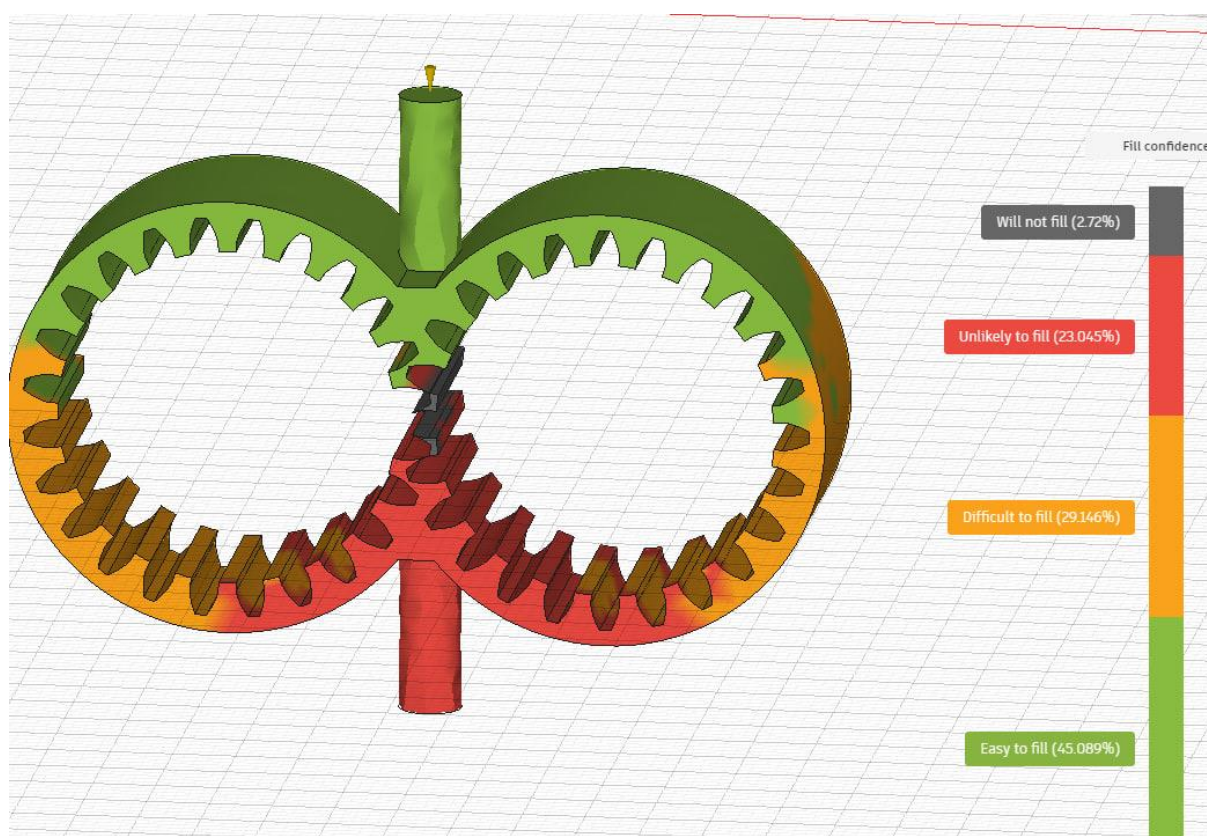


Рисунок 5.18 – Результати симуляції для проміжку в 1.25 мм

Симуляцію для 1.35 мм наведено на рисунку 5.19.

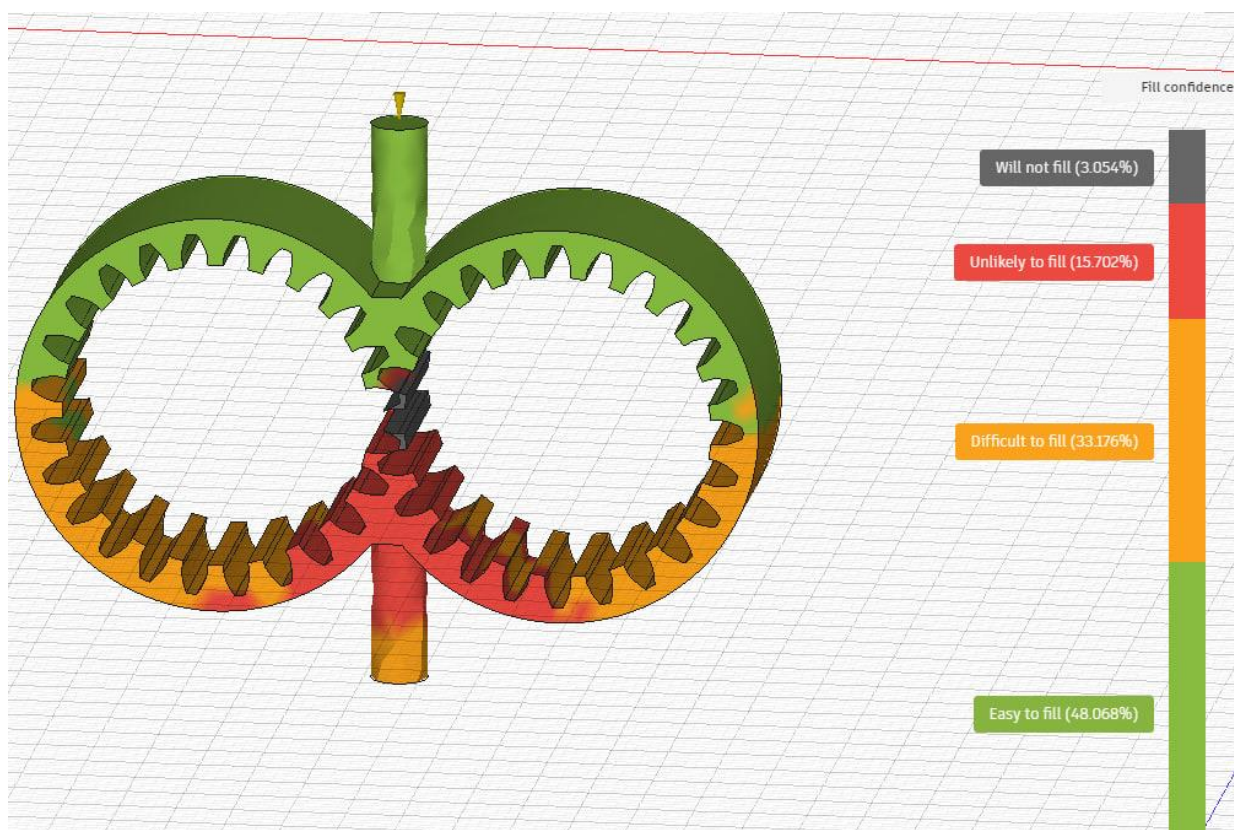


Рисунок 5.19 – Результати симуляції для проміжку в 1.35 мм

Симуляцію для 1.45 мм наведено на рисунку 5.20.

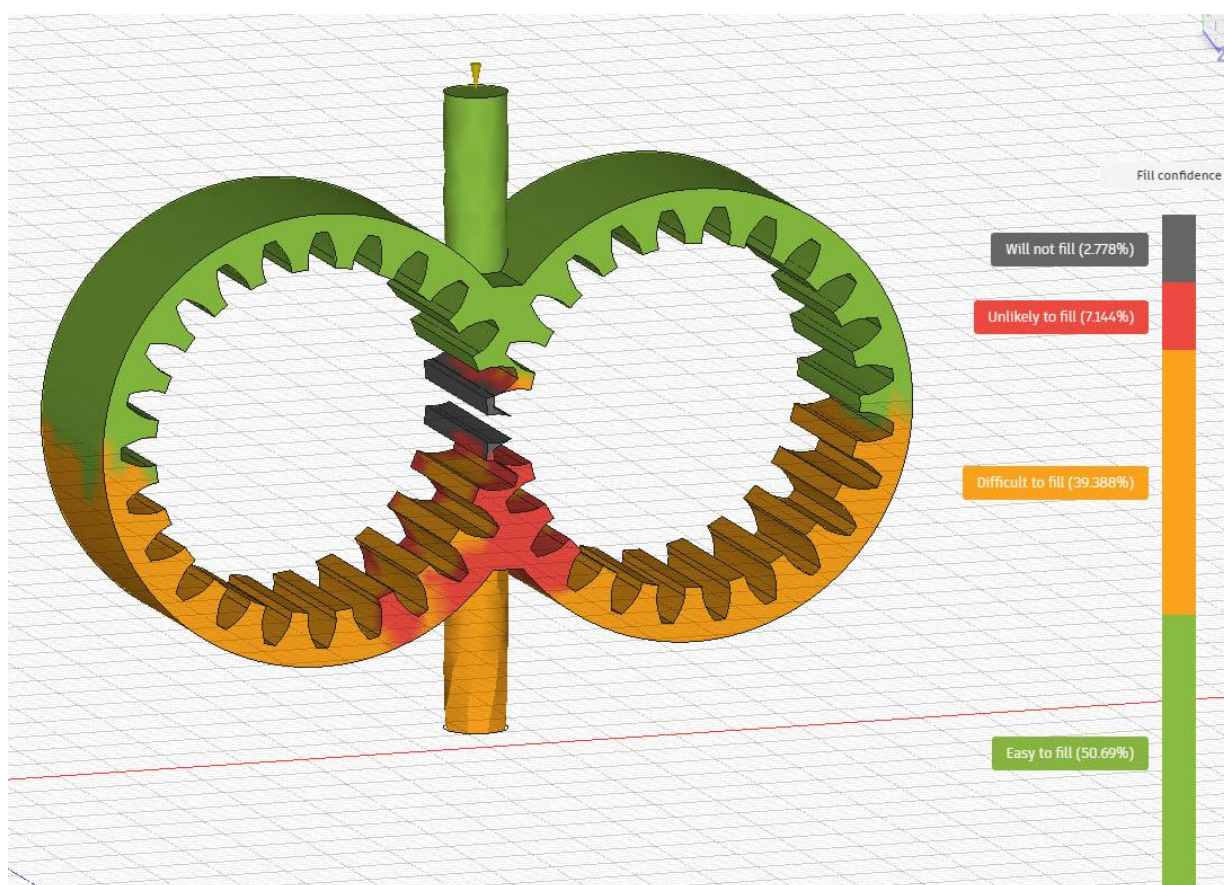


Рисунок 5.20 – Результати симуляції для проміжку в 1.45 мм

Симуляцію для 1.55 мм наведено на рисунку 5.21.

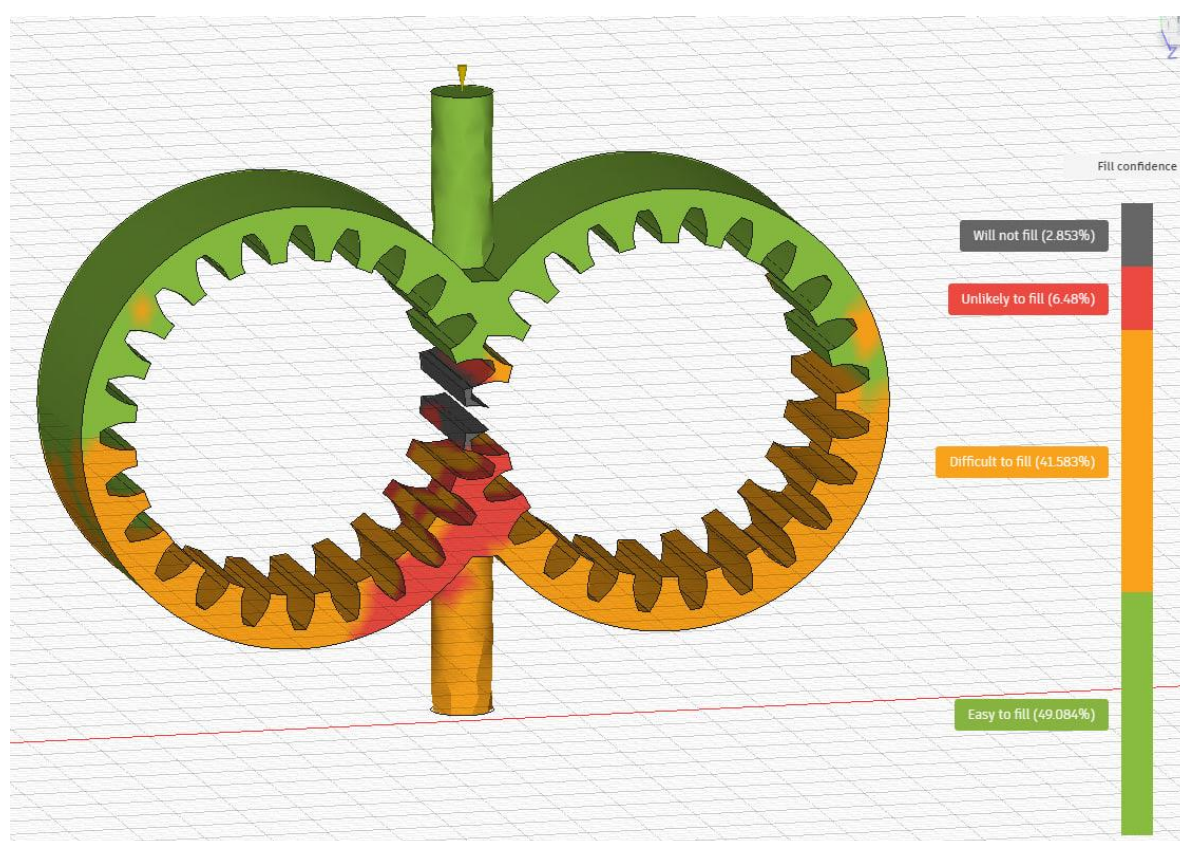


Рисунок 5.21 – Результати симуляції для проміжку в 1.55 мм

Симуляцію для 1.65 мм наведено на рисунку 5.22.

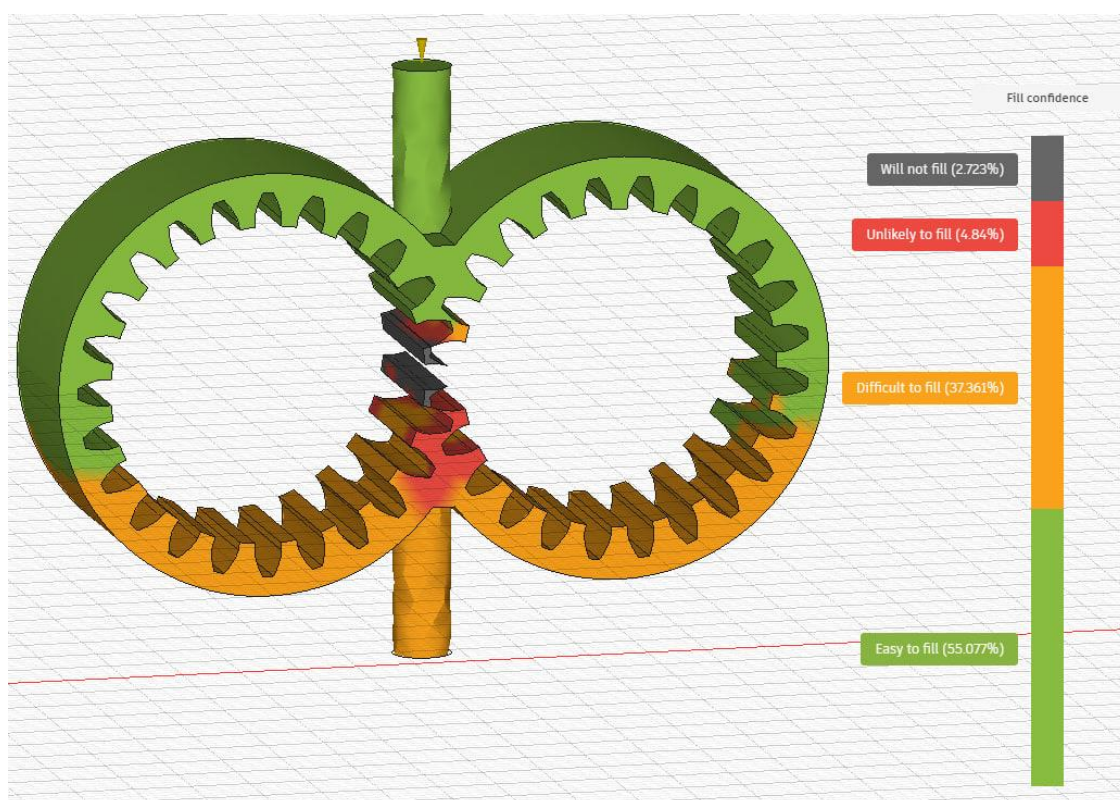


Рисунок 5.22 – Результати симуляції для проміжку в 1.65 мм

Симуляцію для 1.75 мм наведено на рисунку 5.23.

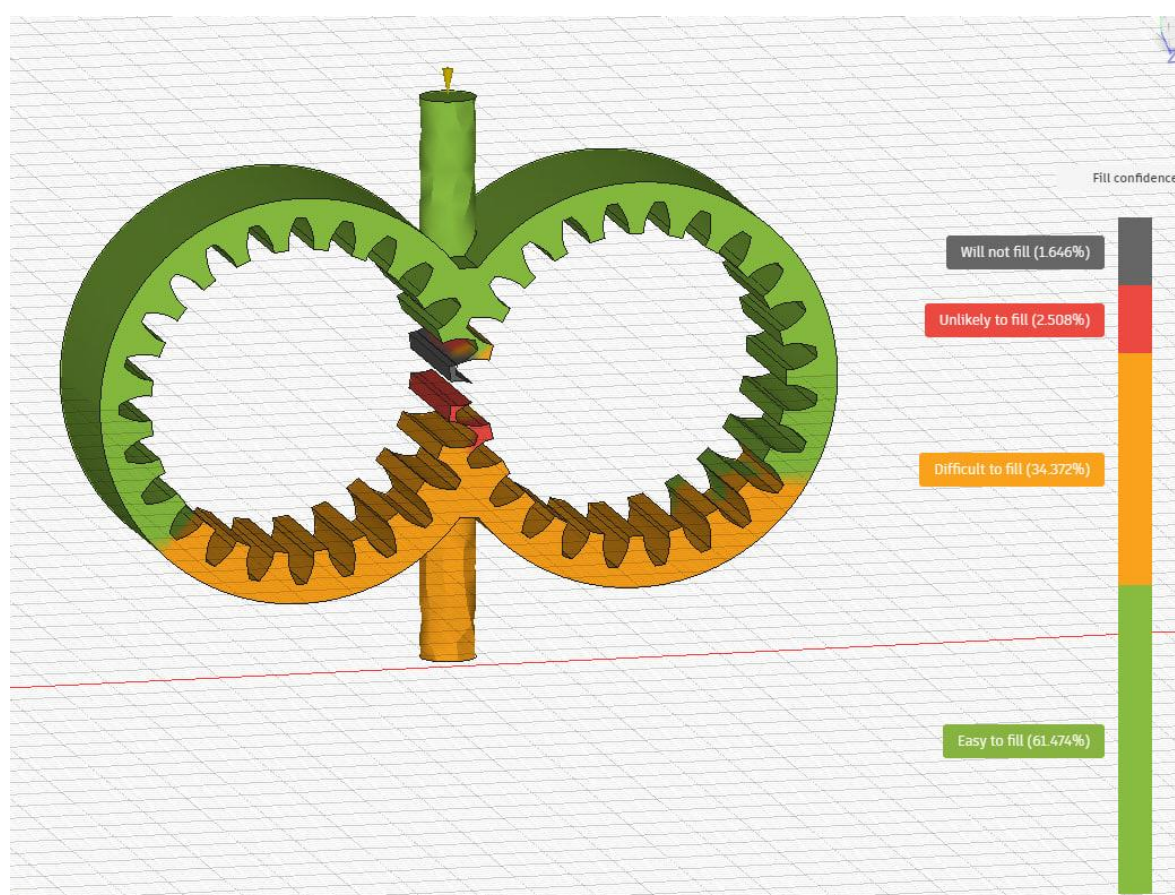


Рисунок 5.23 – Результати симуляції для проміжку в 1.75 мм

Симуляцію для 1.85 мм наведено на рисунку 5.24.

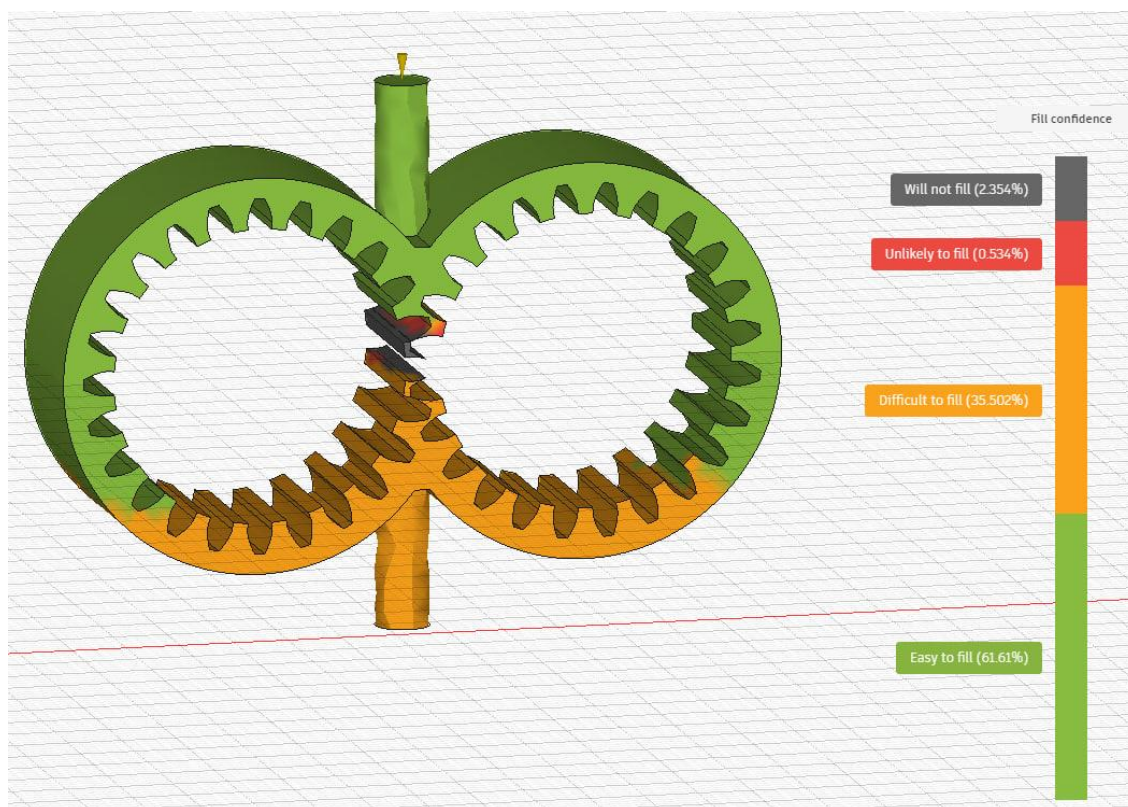


Рисунок 5.24 – Результати симуляції для проміжку в 1.85 мм

Симуляцію для 1.95 мм наведено на рисунку 5.25.

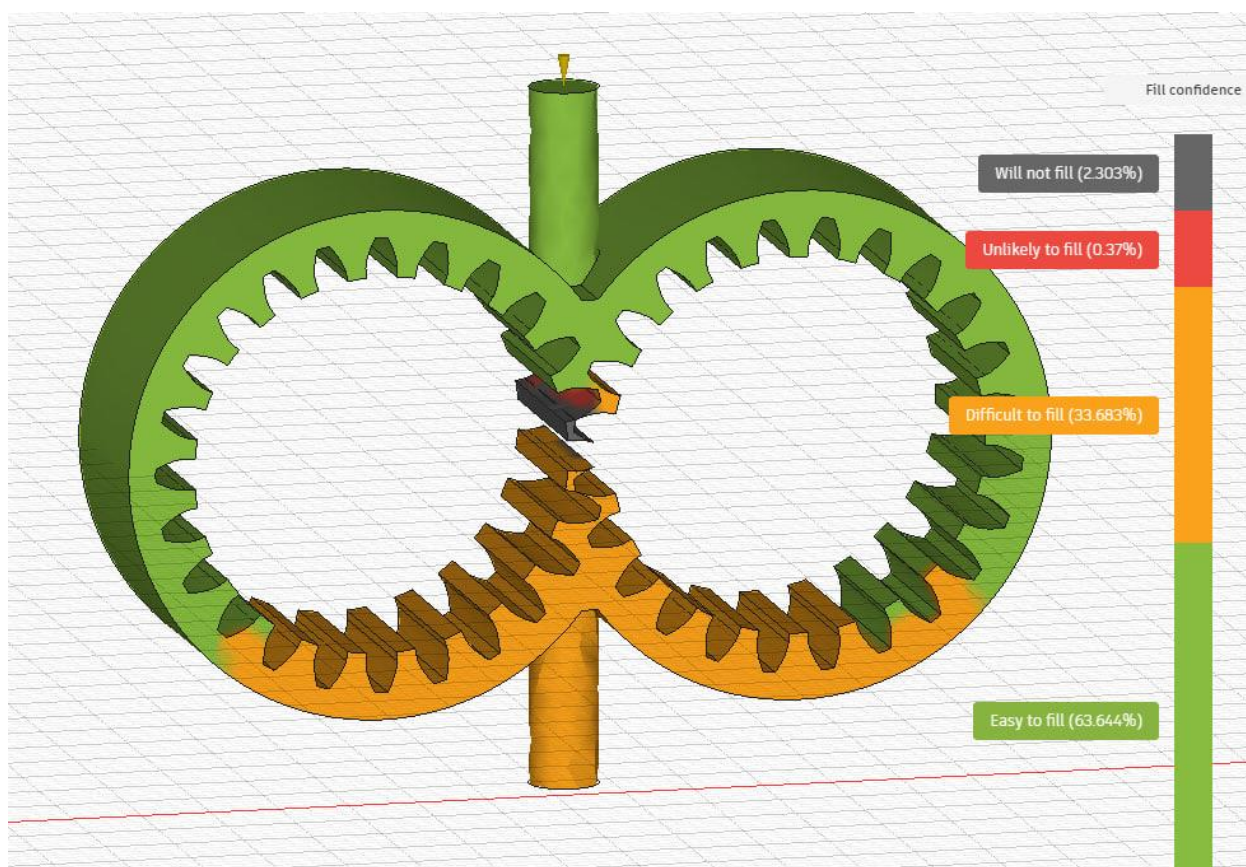


Рисунок 5.25 – Результати симуляції для проміжку в 1.95 мм

В результаті проведеної серії симуляцій ми довели розміри проміжку до 1.95 мм, незважаючи на це шанс скрізьної протікання залишається низьким, але головне – запобігти протікання в робочу зону, на відстані 1.25 мм шлях до робочої зони повністю знаходиться на червоному участку, рисунок 5.26.

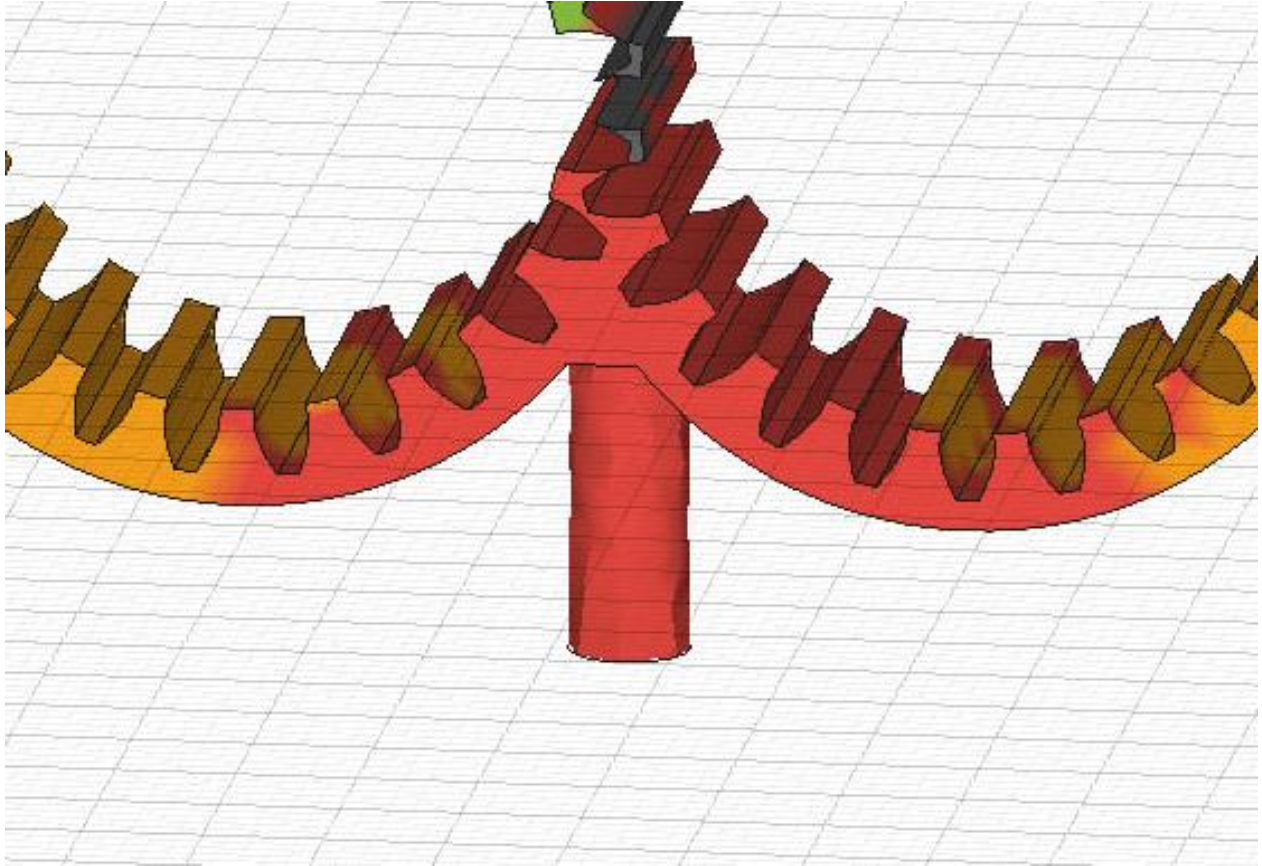


Рисунок 5.26 – Демонстрація низького шансу протікання при проміжку у 1.25 мм

Для подальшого аналізу перенесемо всі значення проміжків і відповідні до них проценти протікання на графік, зображений на рисунку 5.27.

Графік демонструє зменшення непротічності з збільшенням проміжку, коли проміжок становить 0.1 мм така система є максимально захищеною від протікання, але настільки ж вона складна у реалізації, а проміжок близький до 2 мм робить насос повністю непридатним для роботи.



Зелена лінія – Нульова вірогідність протікання ; Червона лінія – Низька вірогідність протікання.

Рисунок 5.27 – Графік залежності вірогідності протікання від величини зазору

## 5.2 Висновки п'ятого розділу

У п'ятому розділі було наведено результати симуляції протікання, а також побудовано графік на якому можна побачити відстані найбільшої ефективності, на відстані від 0.9 мм до 1.35 мм розташована область балансу ефективності і простоти побудови.

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ

Основними факторами небезпеки, при роботі з 3D принтерами можуть бути:

- небезпека ураження електричним струмом, від відкритих елементів проводки;
- відсутність або недолік необхідного природного освітлення;
- відсутність або недоліки необхідного штучного освітлення;
- знижена світлова і колірна контрастність;
- підвищена пульсація світлового потоку;
- підвищений рівень загальної вібрації;
- підвищений рівень локальної вібрації;
- рухомі тверді, рідкі або газоподібні об'єкти, що завдають удар по тілу працюючого (в тому числі рухомі машини і механізми; рухомі частини виробничого обладнання);
  - нерухомі ріжучі, колючі, обдирають, що розривають (наприклад, гострі кромки, задирки і шорсткість на поверхнях заготовок) частини твердих об'єктів
  - дія сили тяжіння в тих випадках, коли воно може викликати падіння твердих, сипучих, рідких об'єктів на працюючого;
  - підвищений рівень шуму;
  - небезпека і шкідливого впливу газових компонентів (включаючи пари), що забруднюють природне повітря;
  - підвищена або знижена температура в приміщенні;
  - підвищена або знижена відносна вологість.

Щоб захиститись від будь-яких пошкоджень, які можуть виникнути у процесі роботи з принтером необхідно поровести заходи з охорони праці, такі як:

- забезпечення надійної ізоляції електронних компонентів;
- проведення інструктажу з техніки безпеки;
- видання засобів індивідуального захисту;
- забезпечення достатньої вентиляції у робочій зоні;
- використовувати природну вентиляцію для необхідних параметрів повітря в приміщенні;
- окреслення небезпечної частини робочої зони;
- впровадження закритого боксу з системою пило пригнічення для очистки виробів;
- проведення профілактичних оглядів електромережі.

## ВИСНОВКИ

У роботі було розглянуто різні технології 3D-друку, окрему увагу було приділено технології 3DP (порошкового 3D-друку). У процесі виконання кваліфікаційної роботи також було розглянуто різні види точних насосних систем, з яких шестерінчасті найбільш надійні. Для аналізу шестерний насосів в програмі Fusion 360 був розроблений макет, що включає в себе дві ідентичні шестерні, корпус, кришки, що герметично закривають внутрішню конструкцію, а також двигун Nema 17, що приводить шестерні в рух. Для дослідження конструкції була проведена серія симуляцій протікання систем, при різних значеннях проміжку, результатом яких були дані з просочування води при різних проміжках між шестернею та корпусом системи. Насос з зазором у 1 мк пропускає найменшу кількість рідини, проте виготовлення подібного насоса є трудомістким, проте зазор у 2 мм робить насос практично непридатним для роботи, зважаючи на можливість просочування води через більшу частину насосної системи. Унаслідок симуляції було виявлено, що для такої конструкції оптимальним зазором є 1 мм, – менше значення зазору призводить до ускладнення створення конструкції, більше значення зазору призводить до критичного протікання, що робить насос неефективним.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

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 та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва». «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Неклюдов, Р В Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євєств, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2021 65 с.
3. Пархоменко Д. В. Дослідження сучасного стану технології інжекційного тривимірного друку (3DP) // матеріали міжнародного наукового журналу «ВІСНИК НАУКИ» № 37: Одеса, 26 грудня, 2021р. 56-60 с.
4. Види порошкового 3D друку [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://3d-week.ru/vidy-poroshkovoij-3d-pechatj> дата звернення 21.10.2022.
5. Технологія 3DP [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://3dprofy.ru/strujjnaya-trekhmernaia-pechat-3dp> Дата звернення 13.09.2022
6. ExOne M-Flex [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.exone.com/en-US/3D-printing-systems/metal-3d-printers/M-Flex> Дата звернення 13.09.2022.
7. Oasis 3DP [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hackaday.io/project/86954-oasis-3dp> дата звернення 13.09.2022.
8. Кінематика 3D принтерів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3d-diy.ru/wiki/3d-printery/raznovidnosti-kinematik-fdm-3d-printerov/> Дата звернення 24.11.2022
9. Кроковий двигун NEMA 17 17HS4401 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mini-tech.com.ua/17hs4401-nema17-shagoviy-motor>
10. Перистальтичні насоси [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.debem.com.ua/ukr/news/?sid=760>.
11. Шестеренний насос [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://proagregat.com/nasosy/vodyanye-nasosy/shesterennyu-nasos/>.

12. Пархоменко Д. В. Аналіз систем інжекції з'єднувальної речовини у технології 3D друку 3DP // матеріали збірника студентських наукових статей «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023 [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – Вип. 2. – 370-373 с.

13. Кроковий двигун NEMA 17 17HS4401S-0.9° 400 кроків/об. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.mini-tech.com.ua/ua/motor-nema17-0\\_9-gradusa](https://www.mini-tech.com.ua/ua/motor-nema17-0_9-gradusa).

14. Драйвер крокового двигуна ультратихий TMC2208 v1.2 <https://www.mini-tech.com.ua/drayver-shagovogo-dvigatelya-tmc2208>.

15. Підшипник MR85ZZ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vprk-podshipnik.com.ua/product/5825-mr-85-zz>.