

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)

Розробка багатоканальної системи подачі філаменту для багатокольорового 3D
друку

Виконала: здобувач 2 курсу, гр. КІТІВм23-1
Івашиненко Катерина Володимирівна

(прізвище, ініціали)

Спеціальність

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

освітньої програми Комп'ютерно-інтегровані
технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва напрямку)

Тип програми Освітньо-професійна

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Омаров Ш.А.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.

(прізвище, ініціали)

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

12.01.2025

A square image showing a handwritten signature in blue ink on a light-colored background. The signature is stylized and appears to be 'K.V.'.

Івашиненко К.В.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет	<u>Автоматики і комп'ютеризованих технологій</u>
Кафедра	<u>Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки</u>
Рівень вищої освіти	<u>другий (магістерський)</u>
Спеціальність	<u>Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології</u>
Тип програми	<u>освітньо-професійна</u>
Освітня програма	<u>Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва</u>

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Івашиненко Катерині Володимирівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка багатоканальної системи подачі філаменту для багатокольорового 3D друку

затверджена наказом по університету від 22.11.2024

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 15.01.2025

3. Вихідні дані до роботи Технологія 3D-друку: FDM/FFF
Пластики: ABS, PLA, CoPET, NYLON, TPU, Elasthan.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

4.1 Аналіз предметної області

4.2 Розробка програмного забезпечення для мультикольорового друку

4.3 Розробка багатоканальної системи подачі філаменту

4.4 Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (2025_KITAM Івашиненко К В презентація.pptx) –с. формату А4

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області	01.11.2024	виконано
2	Розробка програмного забезпечення для мультикольорового друку	29.11.2024	виконано
3	Розробка багатоканальної системи подачі філаменту	04.12.2024	виконано
4	Охорона праці	20.12.2024	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	25.12.2024	виконано
6	Подання у ЕК	22.01.2025	виконано

Дата видачі завдання 22.11.2024

Студент

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Івашиненко К. В.

(прізвище, ініціали)

проф. Омаров Ш.А.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 93с., 70 рисунків, 26 джерел посилань.

3D-PRINTER, FDM, FFF, FLEX, NYLON, CURA, PRUSA, МОДЕЛЮВАННЯ, 3D-ДРУК.

Актуальність теми – 3D-друк на сьогодні використовується у всіх сферах нашого життя і становиться все більш популярним серед різних верств населення. Популярність 3D-друку забезпечує його безперервний розвиток, тим самим вдосконалюючи існуючі технології та створюючи нові, які займають власні позиції серед великого різноманіття інших технологій. Однак на сьогодні друк деталей одного кольору або матеріалу вже є недостатнім для подальшого розвитку. Тому зараз актуальним є розробка та дослідження систем, що дозволяють друкувати декількома різними матеріалами або кольорами. Однією з технологій що потребує використання різних матеріалів є технологія FDM, бо саме вона є однією з основних технологій, яка використовується в різних напрямках, від медицини до приладобудування і однією з основних задач є перехід від однокольорового друку до мультиматеріального друку.

Об'єкт дослідження – технологія 3D-друку методом пошарового наплавлення ниток.

Предмет дослідження – система мультикольорового друку.

Мета роботи – покращення точності суміщення елементів, що друкуються окремими матеріалами або кольорами за рахунок розробки системи мультиматеріального друку для 3D-принтерів за технологією FDM/FFF.

Методи дослідження – в якості методів дослідження використовувалися змішані методи, що включають в себе емпіричний метод, зокрема використовувалися експериментальні дослідження, порівняння та виміри

Із теоретичного методу використовувалися аналіз, моделювання, синтез та формалізація.

Отримані результати можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме п. 9.4 «Сприяти прискореному розвитку високо- та середньовисокотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» та кластерного підходу за напрямками: розвиток інноваційної екосистеми; розвиток інформаційно-телекомунікаційних технологій (ІКТ); застосування ІКТ в АПК, енергетиці, транспорті та промисловості; високотехнологічне машинобудування; створення нових матеріалів; розвиток фармацевтичної та біоінженерної галузей».

ABSTRACT

Explanatory note: 91 page, 70 drawings, 26 additions, sources.

3D-PRINTER, FDM, FFF, FLEX, NYLON, CURA, PRUSA, MODELING, 3D PRINTING

Relevance of the Topic – 3D printing is currently used in all areas of our lives and is becoming increasingly popular among different segments of the population. The popularity of 3D printing drives its continuous development, thereby improving existing technologies and creating new ones that find their place among a wide variety of other technologies. However, printing single-color or single-material parts is no longer sufficient for further advancement. Therefore, the development and research of systems that allow printing with multiple materials or colors are highly relevant today. One of the technologies requiring the use of different materials is FDM (Fused Deposition Modeling), as it is one of the key technologies used in various fields, from medicine to instrumentation, with a major challenge being the transition from single-color printing to multimaterial printing.

Object of Research – the technology of 3D printing using the method of layer-by-layer filament deposition.

Subject of Research – a multicolor printing system.

Objective of the Work – to improve the accuracy of aligning elements printed with separate materials or colors by developing a multimaterial printing system for 3D printers based on FDM/FFF technology.

Research Methods – mixed research methods were used, including empirical methods such as experimental studies, comparisons, and measurements. Theoretical methods included analysis, modeling, synthesis, and formalization.

The results obtained can be attributed to Sustainable Development Goal 9, "Industry, Innovation, and Infrastructure", specifically paragraph 9.4: "Promote accelerated development of high- and medium-high-tech sectors of manufacturing industries based on the 'education–science–production' chain and cluster approaches in

the following areas: development of an innovation ecosystem; development of information and telecommunication technologies (ICT); application of ICT in agriculture, energy, transport, and industry; high-tech mechanical engineering; creation of new materials; development of pharmaceutical and bioengineering industries."

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	10
Вступ.....	11
1 Аналіз предметної області	13
1.1 Огляд та аналіз технології 3D-друку FDM.....	13
1.2 Огляд та аналіз багатокольорового друку технології FDM.....	16
1.3 Висновки до першого розділу.....	29
2. Розробка програмного забезпечення для мультикольорового друку	30
2.1 Аналіз програмного забезпечення, яке використовується для друку в технології FDM.....	30
2.2 Висновки до другого розділу	45
3. Розробка багатоканальної системи подачі філаменту.....	47
3.1 Розробка конструкції системи	47
3.2 Розробка програмного забезпечення.....	64
3.3 Розробка моделі управління кроковим двигуном системи вибору філаменту	72
3.4 Висновки до третього розділу	76
4. Охорона праці.....	77
4.1 Охорона праці при роботі із розплавленими термопластмасами ...	77
4.2 Вимоги до безпеки виробничого обладнання та організації робочих місць.....	80
4.3 Вимоги до безпеки персоналу під час виробничого процесу та застосування засобів захисту	84
Висновки	88
Перелік джерел посилань	90

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ДСТУ – державний стандарт України;

КГП – кулько-гвинтова передача;

ПЗ – програмне забезпечення;

ЧПК – числове програмне керування;

AMS – Automatic Material System;

ABS – Acrylonitrile butadiene styrene;

IDEX – Independent Double Extruder;

FDM – fused deposition modeling;

FFF – fused filament fabrication;

PET – Polyethylene terephthalate;

PLA – Polylactic acid.

ВСТУП

3D-друк на сьогодні є дуже популярним в різних сферах виробництва, побуту та ін. Він має багато різних технологій, що можуть задовільнити всі потреби, від друку металами до друку високоточних виробів, але основним недоліком всіх технологій є те, що мало яка технологія може друкувати різними матеріалами та кольорами. Всі ті технології, які дозволяють такий друк є складними в розробці та дорогими в експлуатації. Основною технологією 3D-друку є технологія пошарового нашарування, яка постійно розвивається в різних напрямках. І так як ця технологія є найпопулярнішою, матеріали для друку в цій технології досить дешеві тому є необхідність розвитку цієї технології в напрямку мультиматеріальності, що дасть змогу друкувати різними матеріалами та кольорами, що значно розширить сфери використання цієї технології.

Таким чином метою магістерської випускної кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності 3D-друку шляхом розробки системи мультикольорового друку, її програмування для використання в технології друку методом пошарового наплавлення ниток.

Об'єкт дослідження – технологія 3D-друку методом пошарового наплавлення ниток.

Предмет дослідження – система мультикольорового друку.

Методи дослідження – в якості методів дослідження використовувалися змішані методи, що включають в себе емпіричний метод, зокрема використовувалися експериментальні дослідження, порівняння та виміри.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати технологію 3D-друку FDM/FFF;
- проаналізувати системи багатокольорового друку;
- проаналізувати програмне забезпечення, яке підтримує мультикольоровий друк;
- розробити конструкцію системи мультикольорового друку;
- розробити програмне забезпечення для використання системи.

Кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1] та керуючись навчальним посібником з дипломного проекту [2], методичними вказівками [3] та публікацією, що була надрукована в збірнику студентських наукових статей «Автоматизація та приладобудування» ADED 2024(випуск 2) [4].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Огляд та аналіз технології 3D-друку FDM

3D-друк на сьогодні є невід'ємною частиною нашого життя, він використовується в різних сферах та напрямках, від будівництва домів до використання у протезуванні в медицині. Велика різноманітність сфер використання можлива через різноманітні технології, які відрізняються як матеріалами, починаючи від бетонної суміші для будівництва будинків, закінчуючи 3D-друком органів з використанням ствольних клітин.

Основною технологією, що отримала широке використання у побуті є технологія FDM.

Технологія FDM, основна технологія, що популяризувала 3D друк у світі та надала можливість іншим технологіям продовжити розвиток. Дана технологія, як і інші технології 3D друку є адитивним виробництвом моделей. Процес роботи FDM технології полягає в пошаровому нанесенні розігрітого філаменту, який вкладається по заданій траєкторії [5]. В якості матеріалу в даній технології слугує твердий термопласт, який після розігріву переходить у в'язкотекучий стан і наноситься на поверхню, після чого переходить знову у твердий стан і набуває задані фізичні характеристики. Основними такими матеріалами є поліетилен(PEТ), полілактид(PLA), акрилонітрил бутадиєн стирол(ABS) та ін.

Основним елементом даної технології є екструдер, що забезпечує нагрів, охолодження пластику та його видавлювання. Екструдер зображений на рисунку 1.1. Основними його елементами є кроковий двигун, на валу якого є шестерня яка забезпечує переміщення філаменту у вигляді прутка через механізм подачі в радіатор, яким має наскрізний отвір з термобар'єром, який забезпечує градієнт температур для того, щоб пластик який знаходиться в радіаторі зберігав твердий стан і проштовхував пластик в через нагрівальний блок в сопло. Нагрівальний блок забезпечує нагрів сопла та перехід пластика у в'язкотекучий

стан за допомогою нагрівального елемента та містить у собі термістор для точного контролю температури [6].

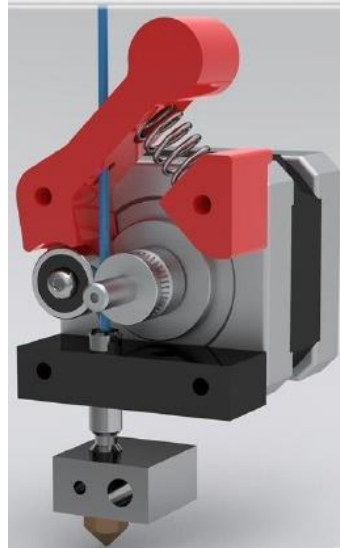


Рисунок 1.1 – Екструдер 3D принтера по технології FDM

Точність вищевказаної технології залежить від роздільної здатності механічних частин, та діаметра сопла, яке може бути від 0.1 мм до 1.4 мм. Основною особливістю технології є те, що збільшуючи розмір сопла шорсткість поверхні збільшується відповідно, при цьому час друку зі збільшенням сопла буде зменшуватися.

Для переміщення екструдера існує велика кількість кінематик, в основі яких є фрезерні верстати ЧПУ. В подальшому розвитку технології через низьку вагу екструдера використовується ремінна передача яка забезпечує швидке переміщення по основним осям XY, для осі Z використовуються переміщення на основі гвинт-гайки та кулько-гвинтова передачі(КГП) [7].

Із основних видів кінематик існують декілька, що є найбільш використаними на сьогодні, першою є кінематика що має назву компанії, яка вперше її використала Prusa кінематика. Вона полягає в тому, що екструдер переміщуються лише по осі X та Z, по осі Y переміщується платформа, що слугує основною особливістю даної кінематики. Швидкість такої кінематики обмежується інертністю робочого стола, чим більше і важче робочий стіл тим

менше буде швидкість переміщення осі Y та друку в загалом. Дана кінематика зображена на рисунку 1.2.

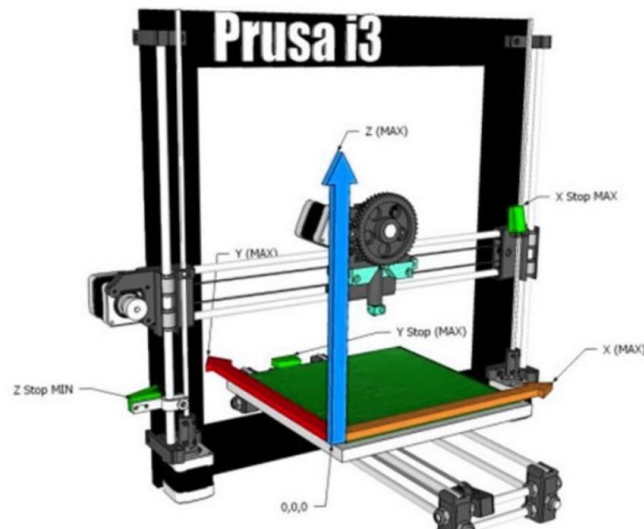


Рисунок 1.2 – Кінематика Prusa

Другою кінематикою, яка на сьогодні є найпопулярнішою і використовується у багатьох принтерах є кінематика CoreXY, вона полягає у переміщення екструдера по осям X та Y за допомогою двох крокових двигунів та двох ременів, які кільцево закріплені на екструдері. При переміщенні одного двигуна екструдер зміщуються одразу по двом осям. Для використання даної кінематики програмне забезпечення(ПЗ) принтера розраховує переміщення використовуючи спеціальні математичні формули.

Вищевказана кінематика зображена на рисунку 1.3.

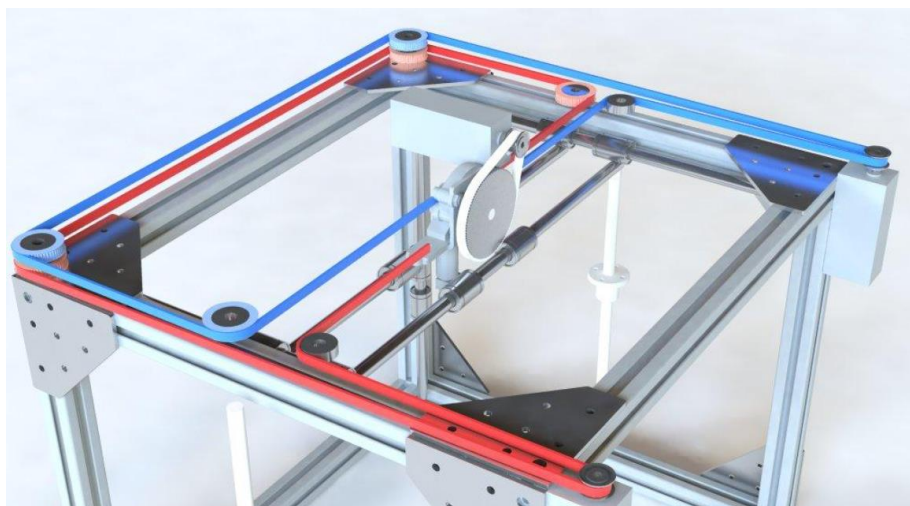


Рисунок 1.3 – Кінематика CoreXY

Деталі надруковані за технологією FDM знайшли широке використання у різних сферах, в основному слугуючи аналогом лиття під тиском. Так як лиття під тиском використовується для виготовлення великої кількості деталей і потребує матриці, які є досить дорогими. В той же самий час 3D-друк по технології FDM використовуючи ті ж самі матеріали, забезпечує подібну якість деталей, але дозволяє друкувати деталі в невеликій кількості з мінімальними фінансовими витратами та з можливістю вдосконалення деталей без необхідності переналагоджувати 3D принтери під конкретний вид деталей.

Таким чином деталі надруковані по вищевказаній технології використовуються у військовій сфері, медичній сфері, у приладобудуванні, та ін.

Надруковані вироби за технологією FDM зображені на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 – Корзінка надрукована на 3D принтері за технологією FDM

1.2 Огляд та аналіз багатокольорового друку технології FDM

3D-друк різними кольорами та матеріалами дає можливість розширити сферу використання надрукованих на 3D принтері моделей, зменшити необхідність постобробки, отримати деталі, які будуть мати унікальні властивості за рахунок поєднання різних матеріалів. Однак на сьогоднішні технології, які б дозволяли друкувати різними кольорами та матеріалами

небагато. Першою технологією, яка має такі можливості є FDM друк, який описаний вище. Так як FDM є найпопулярнішою технологією друку в світі, для цієї технології було розроблено декілька методів та систем друку різними матеріалами [8].

Першою системою для друку різними матеріалами є встановлення на каретку, двох або більше окремих екструдерів, які мають окремі крокові двигуни для подачі пластика та окремі нагрівальні блочки з нагрівачами та термісторами. Дана система зображена на рисунку 1.5. Система може бути як окремими екструдерами з власним охолодженням так і одним радіатором і декількома нагрівальними блочками.

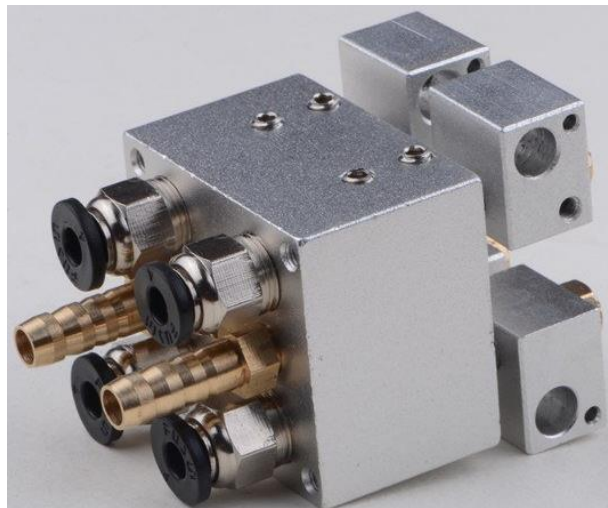


Рисунок 1.5 – Екструдер «химера» на 4 сопла

Ця система була розроблена самою першою, тому вона мала багато недоліків і з переваг мала тільки можливість друку різними матеріалами. Недоліків в даній системі досить багато, першим з них є те, що для друку необхідно встановити однакову відстань від сопла до столу, що зробити майже неможливо і при обслуговуванні такого екструдеру необхідно перекалібрувати відстань заново, що ускладнює користування таким принтером. Також для такої системи необхідно мати плату керування, яка підтримує багатокольоровий друк, що полягає в наявності на платі виходів для додаткових крокових двигунів, термісторів, нагрівачів та додаткових вентиляторів для обдува радіатора, для

зберігання градієнту температур в екструдері. Приклад такої плати зображений на рисунку 1.6.

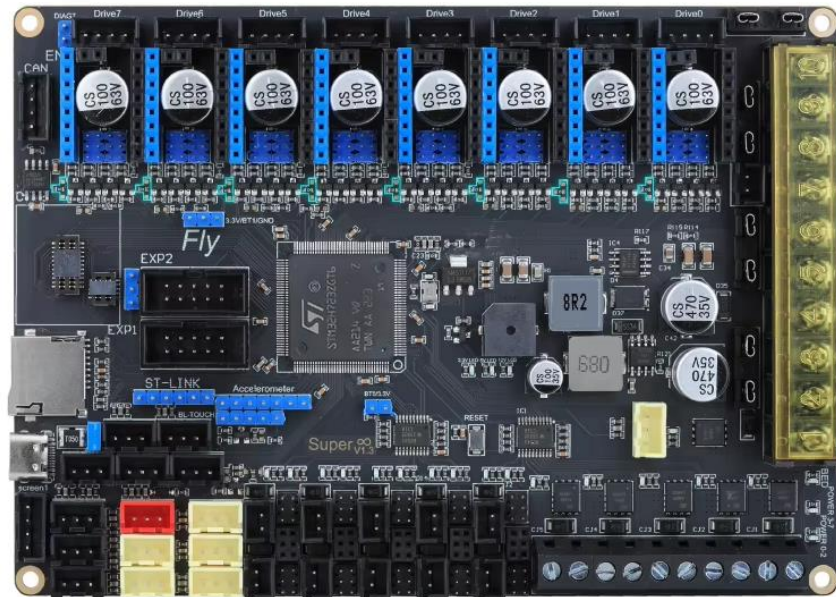


Рисунок 1.6 – Плата керування принтером з підтримкою 5 крокових двигунів екструдерів

Перевагою такої системи полягає в можливості друку різними матеріалами, які можуть мати зовсім різні температурні параметри, прикладом є поєднання пластику CoPET, який має температуру друку 235°C , PLA у якого температура друку 190°C та Neylonе, який друкується зазвичай при температурі 255°C . Також дана система дозволяє друкувати матеріалами, які розчиняються у хімічних речовинах, що зменшить необхідність постобробки деталі після друку. Матеріалів, які розчиняються є декілька, першим з них є PVA пластик, який добре розчиняється у воді та пластик HIPS, який розчиняється у лимонені, при цьому основний матеріал залишається неушкодженим.

Наступною системою є друк одним соплом з одним нагрівальним блоком, що містить лише один термістор та один нагрівач. Особливість полягає в будові радіатора, який має декілька вхідних каналів для пластика. Дана система як і попередня потребує встановлення крокових двигунів відповідно до кількості вхідних отворів у радіаторі. Дана система зображена на рисунку 1.7.



Рисунок 1.7 – Система «single nozzle» на 5 пластиків

Перевагою даної системи є використання лише одного сопла, яке калібрується відповідно робочій поверхні стандартно для принтерів системи FDM. Також перевагою є і відсутність декількох нагрівачів та термісторів, що спрощує конструкцію і зменшує вірогідність поломки, так як нагрівачі та термістори є розхідним матеріалом у FDM друці. Останньою перевагою є можливість змішування різних кольорів для утворення плавного переходу від одного кольору до іншого.

Недоліками даної системи є те, що унеможлиблюється друк різними матеріалами з різною температурою плавлення за рахунок одного нагрівального блоку.

Наступною системою, яка схожа систему друку різними кольорами з одним соплом – «single nozzle» є система типу «diamond nozzle», вона будовою дуже схожа на попередню але відмінністю є те, що пластик змінюється не в радіаторі а в самому соплі, тим самим дозволяючи співвідношенням кольорів створювати більш плавну зміну кольорів та змішуючи між собою отримувати нові кольори, які були поєднанням попередніх і радіатори в даному випадку використовуються окремі з окремим охолодженням. Зазвичай така система містить у собі 3 кольори. Diamond nozzle зображено на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8 – Diamond nozzle

Перевагою такої системи в порівнянні з Single Nozzle є менші габарити та більш якісне змішування кольорів, всі інші недоліки і переваги однакові.

Наступна система багатокольорового друку, яка кардинально відрізняється від попередніх є система Dual X Carriage. Принцип роботи даної системи полягає у встановленню на вісь X двох кареток з екструдерами, які можуть рухатися паралельно, або переключатися між собою. Дана система зображена на рисунку 1.9.

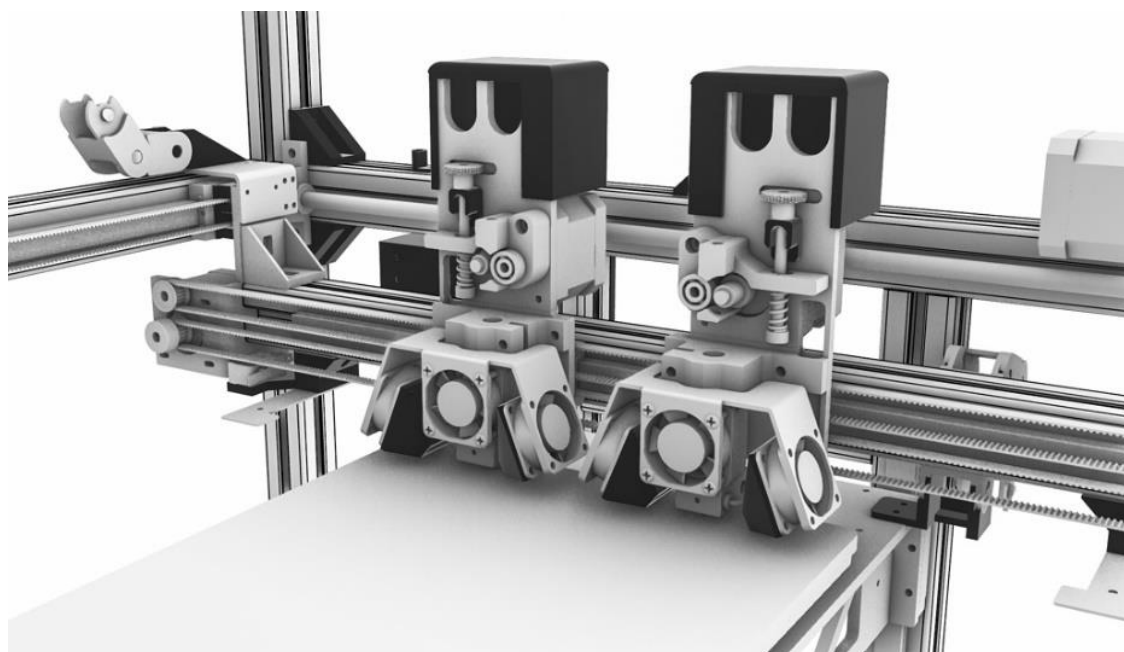


Рисунок 1.9 – Dual X Carriage

Перевагою такої системи у порівнянні з вищевказаними системами є те, що Dual X Carriage дає можливість паралельно друкувати дві моделі. Це можливо завдяки паралельній роботі двох кареток які переміщуються на визначеній відстані друг від друга. Для заміни матеріалу або кольору одна каретка зупиняється в процесі друку і переходить в домашнє положення, замість неї на ті ж самі координати переходить друга каретка і після нагріву до виставленої в слайсері температури, продовжує друк.

Недоліком такої системи є те, що через додаткову вагу другої каретки з екструдером та двигуна, який нею керує ось X стає важкою, відповідно швидкість друку такою системою зменшується.

Наступною системою багатокольорового друку є система Tool Change. Ця система побудована на основі систем з числовим програмним керуванням(ЧПК), що зображено на рисунку 1.10.

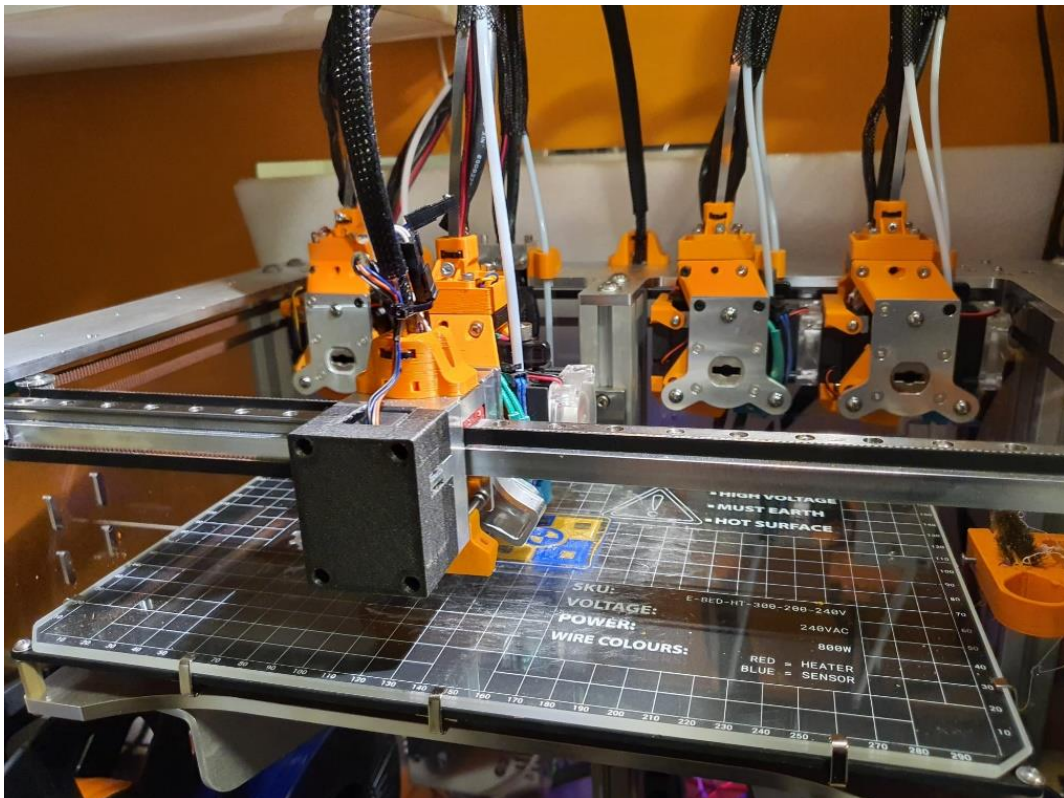


Рисунок 1.10 – Зміна інструменту у фрезерних верстатах з ЧПК

Дана система полягає в зміні інструменту – екструдерів, в результаті чого зберігається можливість друку різними матеріалами та кольорами, також можливе встановлення в такій системі лазерного модуля, що робить цю систему універсальною і багатфункціональною. Принцип роботи даної системи полягає в тому, що каретка, яка переміщується по осям X та Y незалежна від екструдерів, які знаходяться окремо. Для початку роботи каретка переміщується до місця

зберігання екструдерів, які мають власні координати, по яким ПЗ принтера орієнтується, та робить захват екструдерів за допомоги або магнітів, або серводвигуна, який перемикає механізм захоплення екструдерів, тим самим приєднуючи екструдер до каретки. Такі захвати можуть бути різної конструкції та видів, їх об'єднує те, що після захвату екструдер міцно тримається на каретці і при переміщеннях у нього відсутні люфти, що забезпечує якісні показники друку незалежно від екструдеру, що встановлено на каретці.

Система Tool Change зображена на рисунку 1.11.



Рисунк 1.11 – Система Tool Change

Перевагою такої системи зміни екструдерів є те, що в процесі друку всі екструдери вже містять в собі пластик і після зміни не потребують додаткових дій для того, щоб друкувати на відміну від попередніх методів. Також великою перевагою є те, що дана система дозволяє використовувати необхідну кількість екструдерів, яка обмежена розмірами корпусу, куди кріпляться самі екструдери а також платою керування, яка повинна мати необхідну кількість роз'ємів для підключення екструдерів.

Також перевагою є універсальність, яка полягає в можливості використання додаткових екструдерів, які можуть мати різне сопло, будову і які можуть швидко мінятися містами з робочими екструдерами, які знаходяться в принтері, це дозволяє зменшити час обслуговування принтера у випадку якщо один з екструдерів забився пластиком в результаті роботи або вийшов з ладу.

Ця можливість також дає змогу в процесі роботи переходити між різними діаметрами сопла, для отримання більш якісних друкованих моделей.

Недоліками такої системи є те, що кожен екструдер повинен підлаштовуватися один до одного та до робочої поверхні. Це необхідно для того, щоб відстань між кожним соплом та поверхнею було однаковою і дозволяла друкувати будь-якою товщиною шару. В даному випадку необхідно враховувати, що різниця між соплами не можуть бути більшою ніж 50 мкм, чого досягти досить складно.

Також сама будова принтера є складною, що збільшує ймовірність виходу з ладу принтера і унеможливить його користування. Також ця система впливає на швидкісні характеристики принтера, за рахунок встановлення на каретку додаткових елементів, що будуть використані для зчеплення каретки та екструдера.

Загалом дана система є багатофункціональною але складною як в налаштуванні так і в використанні а велика ціна робить її не дуже розповсюдженою серед усіх систем подібного типу.

Останньою системою, яка використовує багатокольоровий друк є автоматична система подачі матеріалу(AMS). Це система для зміни кольорів, яка знаходиться окремо принтера, взаємодія виконується лише інформаційно. На сьогодні декілька великих виробників 3D принтерів використовують її у своєму складі і всі вони відрізняються між собою в тому числі і технологією, що закріплена в патентах. Першою такою AMS є система, що використовується в принтерах BambuLab і підтримує до чотирьох матеріалів, але принтер дозволяє використовувати декілька таких систем одночасно, що збільшує кількість матеріалів до 16 [9].

Вищевказана система зображена на рисунку 1.12.



Рисунок 1.12 – Система AMS від Bambulab

Будова принтера для такої системи використовується стандартна, без зміни основних частин екструдеру.

Дана система встановлюється лише на принтери Bambulab за рахунок програмного забезпечення принтера та самої АМС, в якій встановлений мікроконтролер, що керує АМС. Будова даної системи зображена на рисунку 1.13.

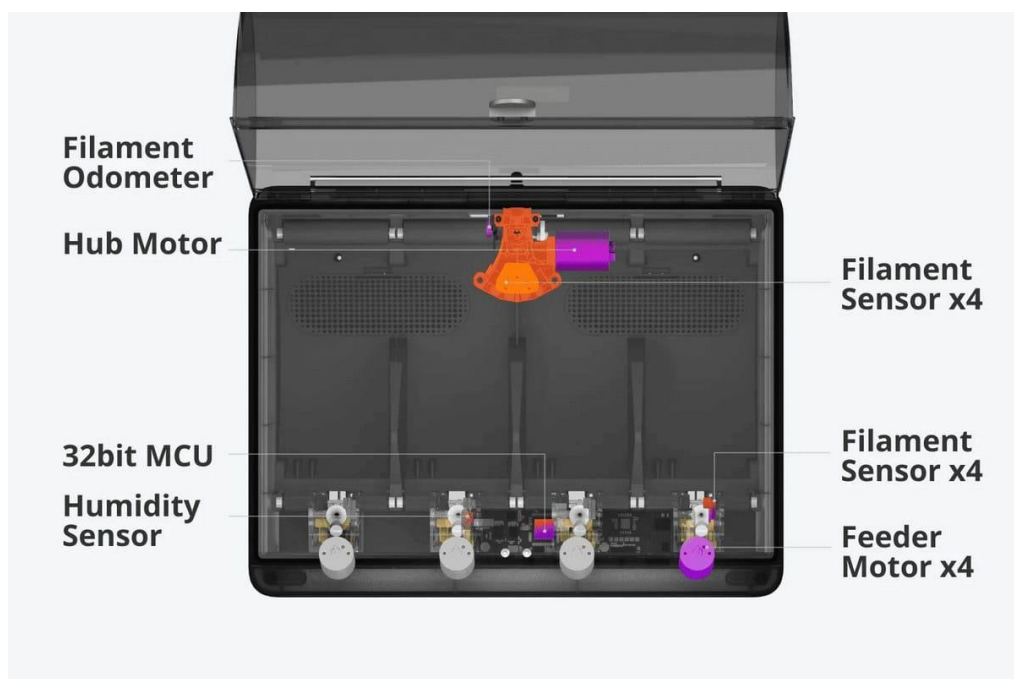


Рисунок 1.13 – Будова АМС

В своєму складі АМС має 4 двигуна, що здійснюють оберти бобіни з філаментом, 8 сенсорів філаменту, одометр, для визначення витраченого

пластику, датчик вологості, та двигун, що змінює пластик. Так як в цій системі є власний мікрокомп'ютер, тому він також має можливість визначати заплутаність філаменту через навантаження на двигун, що змінює пластик. В даній системі для коректної роботи використовуються бобіни що мають RFID-мітку, тому вона може самотужки визначати використаний матеріал. Всі ці можливості синхронізуються з принтером та виводяться на його екран. Додатковими можливостями є те, що при закінченні однієї з бобін ця система перемикає на іншу, тим самим продовжуючи друк.

Для зміни екструдера в принтері в екструдері використовуються спеціальні різачки, які після команди на зміну пластику відрізають кінець нитки, що знаходиться в гарячій зоні екструдера, після чого AMS змотує поточний пластик і подає наступний, що проштовхує попередній пластик і відбувається плавна зміна кольору.

Приклади друку такою системою зображено на рисунку 1.14.



Рисунок 1.14 – Результат друку з системою Bambulab AMS

Перевагами даної системи є наявність великої кількості датчиків, за допомогою яких мікропроцесор системи інтелектуально визначає стан системи в цілому та за допомоги якого принтер керує всім друком, що дає можливість отримувати високі показники якості на надрукованих деталях. Наступною перевагою є відсутність бобін з матеріалом, які в подальшому не можуть бути використаними через недостатню кількість самого матеріалу, тобто в цій системі пластик використовується повністю не залишаючи на бобіні обрізків пластика, так як в принтері використовується пряма подача, яка знаходиться біля сопла, тим самим матеріал, який закінчується доходить майже до розплавленої зони, після чого продавлюється наступним матеріалом.

Недоліками такої системи є:

- неможливість встановлення на принтери інших компаній окрім BambuLab;
- замкнена система, що не дозволяє редагувати параметри та підлаштовувати під себе;
- використання матеріалу з RFID міткою та нестандартною бобіною, що зменшує різноманітність використаних матеріалів;
- неможливість друку м'якими матеріалами як TPU та Elastan та матеріалами з наповненням зі скловолокном та вуглецевонаповненими;
- висока ціна даної системи;
- повільна зміна пластику та необхідність переходу від матеріалу до матеріалу, що потребує або так званої чорнової башти, або створення великої кількості відходів пластику, яка виникає в процесі очищення сопла при зміні кольору.

Подібно до AMS BambuLab є ще дві системи, які подібним чином змінюють пластик окремо від принтера та не потребують вдосконалення стандартної конструкції екструдера. Першою є Mosaic Palette, ця система універсальна і можливе використання в будь-якому принтері. Дана система зображена на рисунку 1.15 [10].

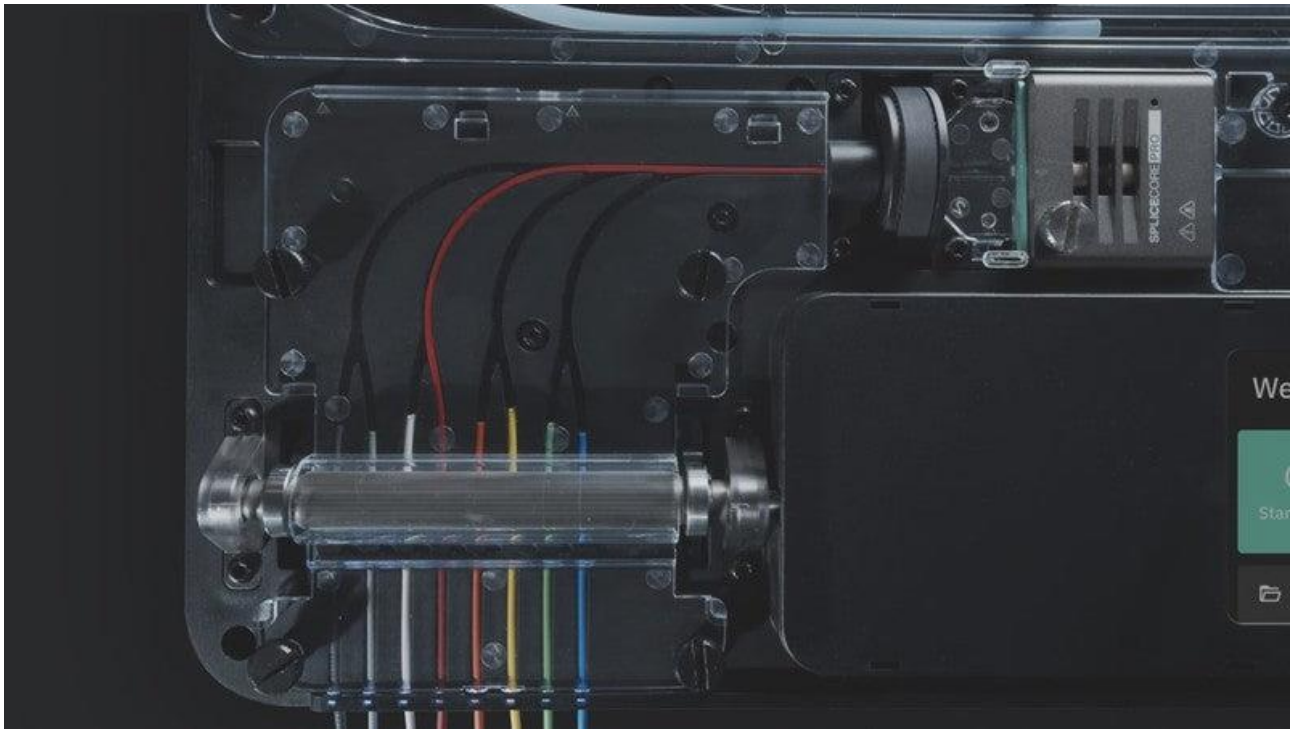


Рисунок 1.15 – Система Mosaic Palette

Принцип роботи даної системи полягає у тому, що при заміні кольору дана система відрізає використаний колір та поєднує новий колір зі старим, тим самим плавно змінюючи колір друку моделі. Ця система також дозволяє поєднувати різні матеріали з різними фізичними характеристиками. Результат поєднання матеріалів зображено на рисунку 1.16.

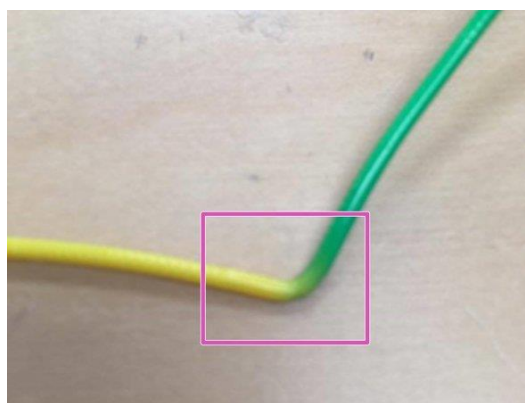


Рисунок 1.16 – Поєднання матеріалів за допомоги Mosaic Palette

В своєму складі система має мікроконтролер, датчик кінці нитки. Дозволяє одночасно використовувати до 8 бобін матеріалів. Перевагами даної системи є:

- різкий перехід між кольорами, що досягається за допомоги розрахунку витрати матеріалу;
- можливість встановлення 8 матеріалів з різними властивостями;
- універсальність, яка дає змогу встановлювати на будь-який принтер;
- для використання даної системи створено спеціальну програму, що дозволить встановити перехід кольору;
- при закінченні матеріалу змінює на інший.

Недоліками такої системи є :

- висока вартість устаткування;
- складність з підготовкою моделі до друку, через необхідність налаштування системи зміни кольору;
- повільна заміна філаменту.

Останньою системою є Prusa Multi Material Upgrade. Ця система зображена на рисунку 1.17 [11].

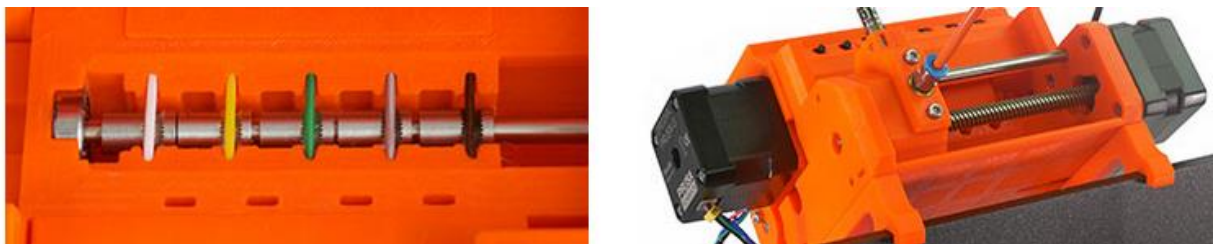


Рисунок 1.17 – Prusa Multi Material Upgrade

Принцип роботи даної системи полягає у зміні пластику за допомоги одного крокового двигуна подачі та двигуна зміни пластику. Процес роботи такої системи полягає в тому, що перед зміною кольору, екструдер подачі відкатує попередній пластик на певну довжину після чого кроковий двигун зміни кольору переміщує гвинт-гайку на положення наступного кольору, після чого двигун подачі пластику знову затягує матеріал в екструдер, таким чином виконуючи зміну матеріалу.

Перевагою даного методу зміни кольору полягає в тому, що принтер не потрібно значно модернізувати, використовуючи ту ж саму плату керування для принтера і для системи. Наступною перевагою є те, що всі деталі надруковані на

3D принтери і у випадку поломки можлива заміна деталі на надруковану, що значно здешевлює її технічне обслуговування. А відкритий код і доступні 3D-моделі цієї системи дозволяють взагалі її робити власноруч і не покупати її в магазині або з принтером.

Недоліком такої системи є великі витрати матеріалу при переході між матеріалами на чорнову башту, яка в даній системі є необхідною. Надруковані деталі з використанням вищевказаної системи зображені на рисунку 1.18.

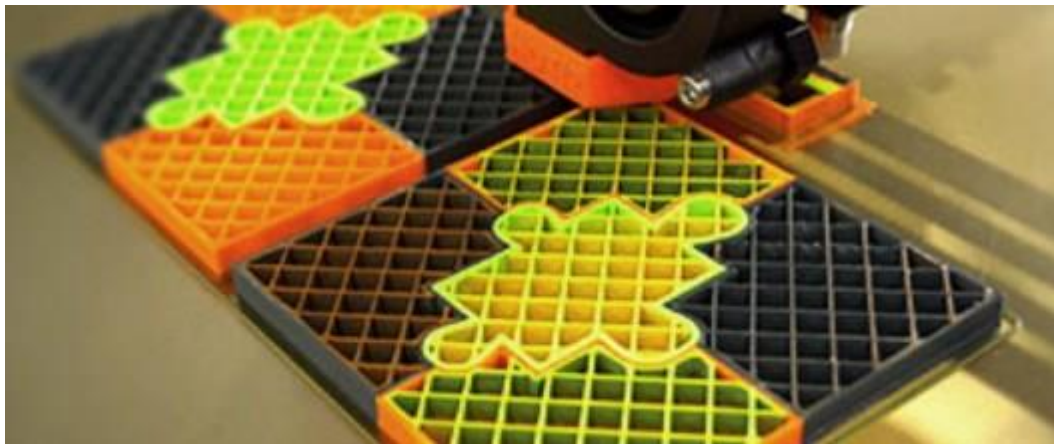


Рисунок 1.18 – Надруковані деталі з використанням Prusa Multi Material Upgrade

1.3 Висновки до першого розділу

В результаті аналізу предметної області було :

- проаналізовано FDM технологію 3D-друку, її особливості, переваги та недоліки;
- визначено та проаналізовано основні методи, які дозволяють друкувати різними матеріалами, їх переваги та недоліки.

2 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МУЛЬТИКОЛЬОРОВОГО ДРУКУ

2.1 Аналіз програмного забезпечення, яке використовується для друку в технології FDM

На сьогодні для 3D-принтерів за технологією FDM є досить багато різних програмних засобів(ПЗ), які дозволяють конвертувати G-Code у фізичні переміщення по осям XYZ. G-Code це мова програмування для ЧПК верстатів, яка модифікована для використання в 3D-принтерах. Ця мова складається з набору команд, які включають в себе переміщення, керування вентиляторами, нагрівачами та ін. В загальному виді G-code зображений на рисунку 2.1.

```
G1 Z15.0 F6000 ;Move the platform down 15mm
;Prime the extruder
G92 E0
G1 F200 E3
G92 E0
G92 E0
G92 E0
G1 F1800 E-4.5
;LAYER_COUNT:8
;LAYER:0
M107
G1 F600 Z0.6
G0 F3000 X80.532 Y72.724 Z0.6
;TYPE:SKIRT
G1 F600 Z0.3
G1 F1800 E0
G1 X81.079 Y72.205 E0.03762
G1 X81.828 Y71.57 E0.08661
G1 X82.545 Y71.041 E0.13106
G1 X83.216 Y70.589 E0.17143
G1 X83.772 Y70.247 E0.20399
G1 X84.474 Y69.856 E0.24408
G1 X85.147 Y69.524 E0.28152
G1 X86.283 Y69.06 E0.34274
G1 X87.672 Y68.696 E0.41438
G1 X88.606 Y68.555 E0.4615
G1 X89.875 Y68.481 E0.52492
G1 X90.537 Y68.484 E0.55795
G1 X91.25 Y68.516 E0.59106
```

Рисунок 2.1 – G-code для керування FDM 3D-принтером

Для створення G-Code використовуються спеціальні програми, що переводять 3D-модель у набір команд, в результаті чого принтер друкує необхідну деталь. Ці програми мають назву слайсери. Типовий слайсер зображений на рисунку 2.2.

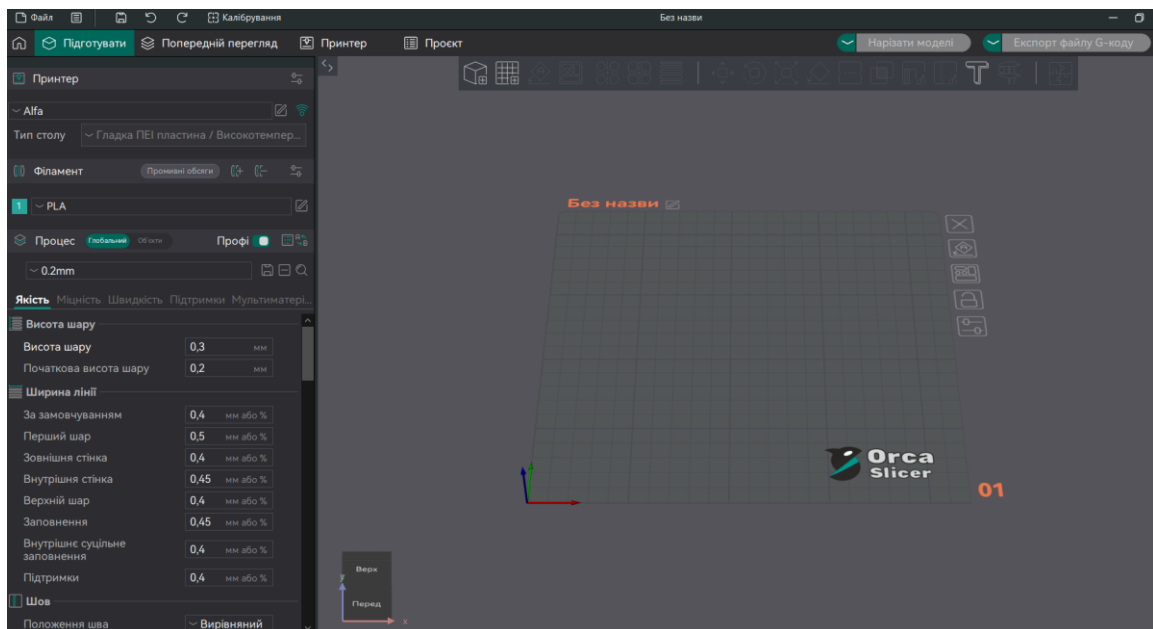


Рисунок 2.2 – Слайсер Orca

Вищевказані програми в своєму складі мають технологічні параметри, які керують процесом 3D-друку, такі як висота шару, температура плавлення пластику, швидкість та ін.

Також в процесі підготовки моделі для друку на принтері можливе керування самої моделі, зменшення або збільшення розмірів, її віддзеркалення, розташування, тощо. Також в цій програмі налаштовується мультиматеріальний друк, вона дозволяє встановлювати на принтер визначену кількість екструдерів, їх параметри а також дає можливість виділяти поверхні, які будуть друкуватися окремими пластиками.

Приклад таких налаштувань зображено на рисунку 2.3. В якості параметрів задається кількість екструдерів, тип методу, який використовується в принтері, їх відстань один від одного, кількість філаменту який необхідно видавити для переходу від одного матеріалу до іншого та ін.

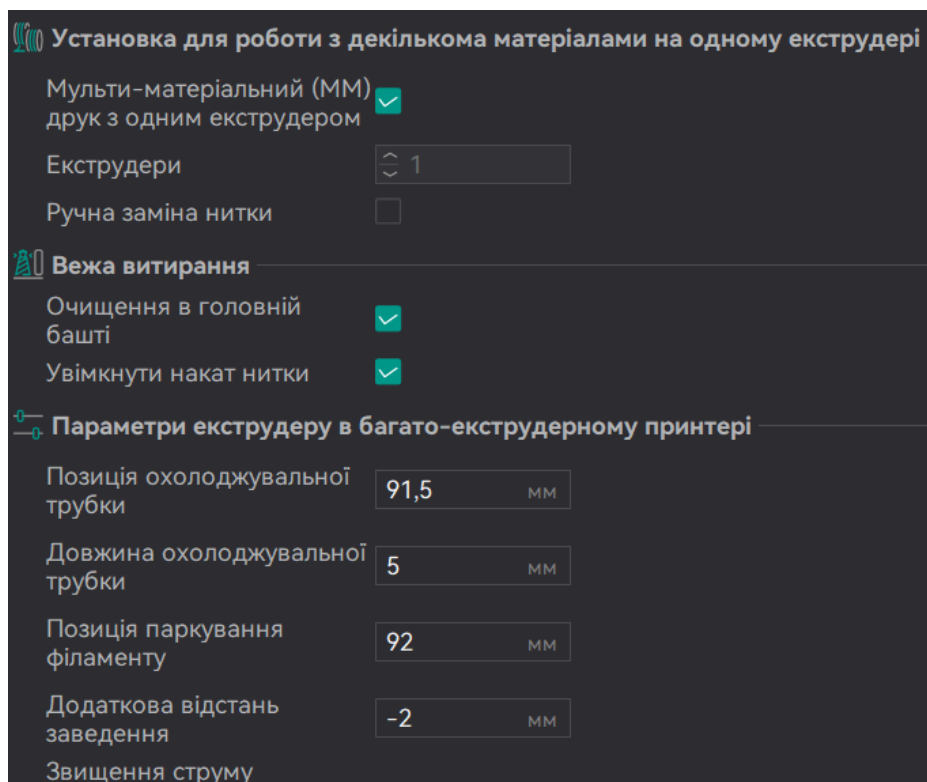


Рисунок 2.3 – Технологічні параметри для друку декількома матеріалами

Таким чином використовуючи слайсери ми налаштовуємо технологічні параметри, розташування моделі, її розмір. Також слайсер дає можливість попередньо оцінити кількість матеріалу необхідного для друку деталі та її ціна.

На сьогодні основними слайсерами є Orca, яка вказана вище та Cura. Cura слайсер можна побачити на рисунку 2.4 [12].

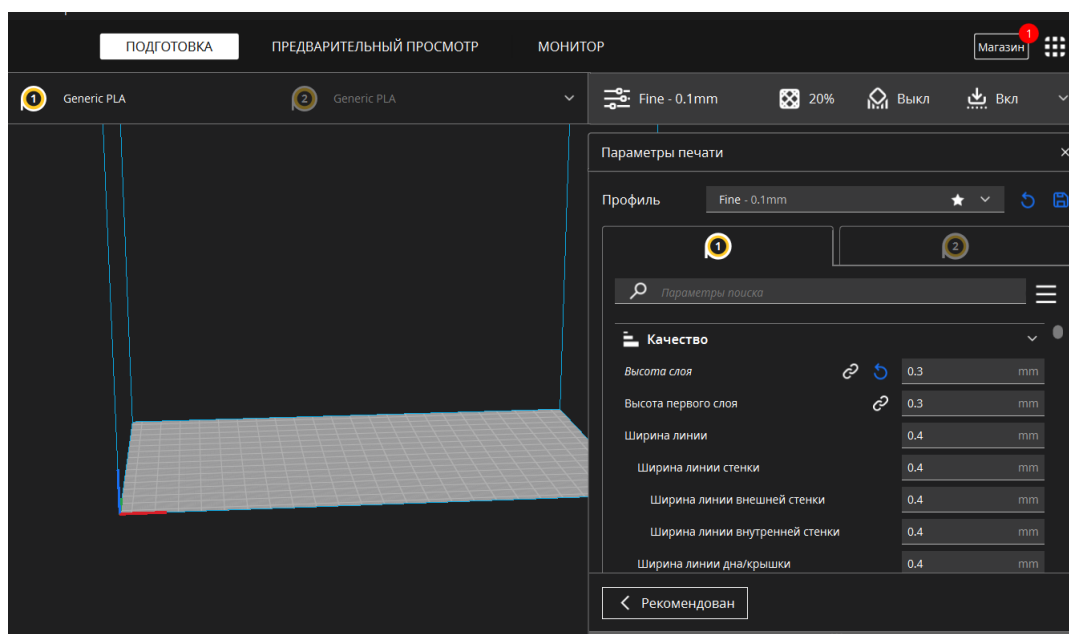


Рисунок 2.4 – Слайсер Cura

Вищевказані слайсери мають повну підтримку мультиматеріального друку, з використанням різних методів.

Однак, для повноцінної роботи мультиматеріального друку необхідно мати ПЗ в принтері, яке підтримує декілька екструдерів. В прошивці, яка знаходиться на платі, вказується тип мультиматеріального друку, їх параметри, на основі яких відбувається робота принтера.

Основними прошивками, що підтримують мультиматеріальний друк є Marlin, Repetier, Klipper, RepRap.

Marlin, прошивка з відкритим вихідним кодом, яка постійно оновлюється і включає в себе всі основні можливості, які забезпечують використання всіх можливих функцій, які мають відкриті вихідні дані. Додавання нових функцій відбувається самими користувачами, так як прошивка модульна, існує обмін інформацією між розробниками і користувачами. Після додавання функціоналу користувачами, модуль перевіряється після чого розробники ПО додають його до прошивки [13].

Для мультикольорового друку в Marlin необхідно налаштувати визначені функції.

Вказати кількість екструдерів, які встановлені в принтері, командою що зображена на рисунку 2.5.

```
// This defines the number of extruders  
// :[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]  
#define EXTRUDERS 2
```

Рисунок 2.5 – Кількість екструдерів, що будуть використовуватися для друку

Для екструдерів, що мають в своєму складі одне сопло, через яке проходять різні пластики встановлена команда, що зображена на рисунку 2.6.

```
// For Cyclops or any "multi-extruder" that shares a single nozzle.  
#define SINGLENOZZLE
```

Рисунок 2.6 – Встановлення режиму Single Nozzle

Для мультиматеріального друку типу Prusa Multi Material Upgrade, який використовується в подальшій роботі, необхідно вказати параметри, що зображені на рисунку 2.7.

```
/**
 * Multi-Material Unit
 * Set to one of these predefined models:
 *
 * PRUSA_MMU1      : Průša MMU1 (The "multiplexer" version)
 * PRUSA_MMU2      : Průša MMU2
 * PRUSA_MMU2S     : Průša MMU2S (Requires MK3S extruder with motion sensor, EXTRUDERS = 5)
 * EXTENDABLE_EMU_MMU2 : MMU with configurable number of filaments (ERCF, SMuFF or similar with Průša MMU2 compatible firmware)
 * EXTENDABLE_EMU_MMU2S : MMUS with configurable number of filaments (ERCF, SMuFF or similar with Průša MMU2 compatible firmware)
 *
 * Requires NOZZLE_PARK_FEATURE to park print head in case MMU unit fails.
 * See additional options in Configuration_adv.h.
 */
//#define MMU_MODEL PRUSA_MMU2
```

Рисунок 2.7 – Визначення типу Multi Material Upgrade

Наступним типом, що має налаштування в Marlin є Tool Change, і в залежності від типу захвату екструдера встановлюється необхідний параметр із наступних:

- за допомогою серводвигуна;
- за допомогою магніту;
- за допомогою електромагніту.

Дані параметри зображені на рисунку 2.8.

```
/**
 * Switching Toolhead
 *
 * Support for swappable and dockable toolheads, such as
 * the E3D Tool Changer. Toolheads are locked with a servo.
 */
//#define SWITCHING_TOOLHEAD

/**
 * Magnetic Switching Toolhead
 *
 * Support swappable and dockable toolheads with a magnetic
 * docking mechanism using movement and no servo.
 */
//#define MAGNETIC_SWITCHING_TOOLHEAD

/**
 * Electromagnetic Switching Toolhead
 *
 * Parking for CoreXY / HBot kinematics.
 * Toolheads are parked at one edge and held with an electromagnet.
 * Supports more than 2 Toolheads. See https://youtu.be/JolbsAKTKf4
 */
//#define ELECTROMAGNETIC_SWITCHING_TOOLHEAD
```

Рисунок 2.8 – Параметри для вибору типу захвату

Наступними параметрами є параметри, що спільні для всіх типів захватів, вони керують позицією доку, де містяться всі екструдери по осі Y, відстані для безпечного переходу від одного екструдера до іншого, позиції кожного екструдера по осі X, для магнітів та електромагнітів додаються специфічні параметри, які уточнюють їх переміщення, для коректної зміни екструдерів. Ці параметри зображені на рисунку 2.9.

```
#if ANY(SWITCHING_TOOLHEAD, MAGNETIC_SWITCHING_TOOLHEAD, ELECTROMAGNETIC_SWITCHING_TOOLHEAD)
#define SWITCHING_TOOLHEAD_Y_POS      235      // (mm) Y position of the toolhead dock
#define SWITCHING_TOOLHEAD_Y_SECURITY  10       // (mm) Security distance Y axis
#define SWITCHING_TOOLHEAD_Y_CLEAR     60       // (mm) Minimum distance from dock for unobstructed X axis
#define SWITCHING_TOOLHEAD_X_POS       { 215, 0 } // (mm) X positions for parking the extruders
#if ENABLED(SWITCHING_TOOLHEAD)
  #define SWITCHING_TOOLHEAD_SERVO_NR   2       // Index of the servo connector
  #define SWITCHING_TOOLHEAD_SERVO_ANGLES { 0, 180 } // (degrees) Angles for Lock, Unlock
#elif ENABLED(MAGNETIC_SWITCHING_TOOLHEAD)
  #define SWITCHING_TOOLHEAD_Y_RELEASE  5       // (mm) Security distance Y axis
  #define SWITCHING_TOOLHEAD_X_SECURITY { 90, 150 } // (mm) Security distance X axis (T0,T1)
  //#define PRIME_BEFORE_REMOVE        // Prime the nozzle before release from the dock
  #if ENABLED(PRIME_BEFORE_REMOVE)
    #define SWITCHING_TOOLHEAD_PRIME_MM  20     // (mm) Extruder prime length
    #define SWITCHING_TOOLHEAD_RETRACT_MM 10     // (mm) Retract after priming length
    #define SWITCHING_TOOLHEAD_PRIME_FEEDRATE 300 // (mm/min) Extruder prime feedrate
    #define SWITCHING_TOOLHEAD_RETRACT_FEEDRATE 2400 // (mm/min) Extruder retract feedrate
  #endif
#elif ENABLED(ELECTROMAGNETIC_SWITCHING_TOOLHEAD)
  #define SWITCHING_TOOLHEAD_Z_HOP      2       // (mm) Z raise for switching
#endif
#endif
```

Рисунок 2.9 – Параметри для всіх типів захвату екструдерів

Наступною опцією є опція змішування кольорів, яка підходить для Diamand Extruder, який був вказаний в першому розділі, де змішування кольорів відбувається в самому соплі, з окремими радіаторами. Даний параметр зображений на рисунку 2.10.

```
//#define MIXING_EXTRUDER
#if ENABLED(MIXING_EXTRUDER)
  #define MIXING_STEPPERS 2      // Number of steppers in your mixing extruder
  #define MIXING_VIRTUAL_TOOLS 16 // Use the Virtual Tool method with M163 and M164
  //#define DIRECT_MIXING_IN_G1  // Allow ABCDHI mix factors in G1 movement commands
  //#define GRADIENT_MIX        // Support for gradient mixing with M166 and LCD
  #if ENABLED(GRADIENT_MIX)
    //#define GRADIENT_VTOOL    // Add M166 T to use a V-tool index as a Gradient alias
  #endif
#endif
```

Рисунок 2.10 – Параметри, що відносяться до змішування у соплі

Додаткові параметри вказують кількість кольорів, які входять в саме сопло, для змішування додаються віртуальні екструдери, які в залежності від номеру будуть змінювати колір, що виходить зі сопла.

Наступні команди уточнюють спосіб в який прошивка буде змінювати градієнт кольорів.

Для Dual X Carriage необхідні додаткові команди, які будуть керувати другим двигуном для осі X, ці параметри зображені на рисунку 2.11.

```

// #define X_DUAL_STEPPER_DRIVERS
#if ENABLED(X_DUAL_STEPPER_DRIVERS)
  // #define INVERT_X2_VS_X_DIR    // Enable if X2 direction signal is opposite to X
  // #define X_DUAL_ENDSTOPS
  #if ENABLED(X_DUAL_ENDSTOPS)
    #define X2_USE_ENDSTOP _XMAX_
    #define X2_ENDSTOP_ADJUSTMENT 0
  #endif
#endif
#endif

```

Рисунок 2.11 – Налаштування кінчовиків та двигунів на осі X

Далі йдуть основні команди для керування Dual X Carriage. Першою командою є налаштування позицій екструдерів відносно початку осей та один одного, також задається режим, в якому працюють два екструдера, першим типом є повний контроль слайсером переміщення, тобто всі переміщення враховуються в налаштуваннях слайсера, прошивка в цьому участі не приймає.

Наступним є контроль паркування екструдерів, в результаті чого після переходу до домашнього положення спочатку перейде перший екструдер а потім другий, після чого можливе подальше керування екструдерами.

Третій режим це режим дублювання, тобто екструдери рухаються однаково зі встановленим зміщенням.

Останній режим це режим віддзеркалення, коли в результаті друку будуються одночасно дві дзеркальні моделі. Всі ці параметри зображені на рисунку 2.12.

Всі ці режими можливо перемикає перед друком на встановленому екрані в загальних налаштуваннях.

```

//#define DUAL_X_CARRIAGE
#if ENABLED(DUAL_X_CARRIAGE)
  #define X1_MIN_POS X_MIN_POS // Set to X_MIN_POS
  #define X1_MAX_POS X_BED_SIZE // Set a maximum so the first X-carriage can't hit the parked second X-carriage
  #define X2_MIN_POS 80 // Set a minimum to ensure the second X-carriage can't hit the parked first X-carriage
  #define X2_MAX_POS 353 // Set this to the distance between toolheads when both heads are homed
  #define X2_HOME_DIR 1 // Set to 1. The second X-carriage always homes to the maximum endstop position
  #define X2_HOME_POS X2_MAX_POS // Default X2 home position. Set to X2_MAX_POS.
  // However; In this mode the HOTEND_OFFSET_X value for the second extruder provides a software
  // override for X2_HOME_POS. This also allow recalibration of the distance between the two endstops
  // without modifying the firmware (through the "M218 T1 X???" command).
  // Remember: you should set the second extruder x-offset to 0 in your slicer.

  // This is the default power-up mode which can be later using M605.
  #define DEFAULT_DUAL_X_CARRIAGE_MODE DXC_AUTO_PARK_MODE

  // Default x offset in duplication mode (typically set to half print bed width)
  #define DEFAULT_DUPLICATION_X_OFFSET 100

  // Default action to execute following M605 mode change commands. Typically G28X to apply new mode.
  //#define EVENT_GCODE_IDEX_AFTER_MODECHANGE "G28X"
#endif

```

Рисунок 2.12 – Налаштування режимів Dual X Carriage

Також у файлі Configuration_adv.h є додаткові налаштування для всіх типів змін екструдерів, ці параметри задають переміщення для осі Z, для того щоб в процесі зміни екструдерів на моделі не залишалися краплі попереднього матеріалу і також встановлюють процес заміни матеріалу, від довжини пластику, який необхідно витягти зі сопла, щоб подати наступний, швидкість подачі, та ін. Всі ці параметри показані на рисунку 2.13.

```

#define ADVANCED_PAUSE_FEATURE
#if ENABLED(ADVANCED_PAUSE_FEATURE)
  #define PAUSE_PARK_RETRACT_FEEDRATE 60 // (mm/s) Initial retract feedrate.
  #define PAUSE_PARK_RETRACT_LENGTH 4 // (mm) Initial retract.
  // This short retract is done immediately, before parking the nozzle.
  #define FILAMENT_CHANGE_UNLOAD_FEEDRATE 10 // (mm/s) Unload filament feedrate. This can be pretty fast.
  #define FILAMENT_CHANGE_UNLOAD_ACCEL 25 // (mm/s^2) Lower acceleration may allow a faster feedrate.
  #define FILAMENT_CHANGE_UNLOAD_LENGTH 100 // (mm) The length of filament for a complete unload.
  // For Bowden, the full length of the tube and nozzle.
  // For direct drive, the full length of the nozzle.
  // Set to 0 for manual unloading.
  #define FILAMENT_CHANGE_SLOW_LOAD_FEEDRATE 6 // (mm/s) Slow move when starting load.
  #define FILAMENT_CHANGE_SLOW_LOAD_LENGTH 0 // (mm) Slow length, to allow time to insert material.
  // 0 to disable start loading and skip to fast load only
  #define FILAMENT_CHANGE_FAST_LOAD_FEEDRATE 6 // (mm/s) Load filament feedrate. This can be pretty fast.
  #define FILAMENT_CHANGE_FAST_LOAD_ACCEL 25 // (mm/s^2) Lower acceleration may allow a faster feedrate.
  #define FILAMENT_CHANGE_FAST_LOAD_LENGTH 0 // (mm) Load length of filament, from extruder gear to nozzle.
  // For Bowden, the full length of the tube and nozzle.
  // For direct drive, the full length of the nozzle.
  //#define ADVANCED_PAUSE_CONTINUOUS_PURGE // Purge continuously up to the purge length until interrupted.
  #define ADVANCED_PAUSE_PURGE_FEEDRATE 3 // (mm/s) Extrude feedrate (after loading). Should be slower than load feedrate.
  #define ADVANCED_PAUSE_PURGE_LENGTH 50 // (mm) Length to extrude after loading.
  // Set to 0 for manual extrusion.

```

Рисунок 2.13 – Параметри, які впливають на заміну філаменту процесі переходу між матеріалами

Параметри, що вказані вище повністю задовольняють потребу в налаштуваннях для будь-якого методу друку декількома матеріалами.

Недоліками цієї прошивки є висока складність налаштування, за рахунок того, що всі налаштування знаходяться в двох файлах Configuration.h та Configuration_adv.h і всі параметри можуть між собою пересікатися тим самим ускладнюючи роботу по налаштуванню принтера. Наступним недоліком є використання в якості керуючого елемента мікроконтролера плати, яка може бути 8-bit, наприклад Arduino Mega 2560 та і 32-bit на основі мікроконтролерів STM32. Для 8-bit плат додаткові функції, в які входить і мультиматеріальність може бути недоступною через недостачу EEPROM, що включає в себе всі значення, що містяться в прошивці. В наступному ПЗ Klipper всі параметри зберігаються на мікропроцесорі Raspberry, який забезпечує зв'язок між платою і периферією принтера, тим самим переносить навантаження з мікропроцесора на саме Raspberry, яке має більші можливості.

Наступним недоліком є можлива відсутність працездатності деяких функцій, так як всі додатки, що входять в прошивку написані сторонніми людьми з обмеженим використанням, в результаті чого можуть виникати ситуації, коли унікальні можливості, які підтримуються прошивкою повноцінно працювати не будуть. Такі недоліки можуть мати досить тривалий час, доки в новій версії розробники не виправлять її.

Наступними ПЗ, які є подібними один до одного є Repetier та RepRap firmware, ці прошивки також підтримують мультиматеріальність, але на відміну від Marlin всі налаштування відбуваються на сайті виробників у конфігураторі, де можна вибирати параметри, які після цього будуть скопійовані у прошивку.

RepRap Firmware на відміну від Repetier використовується лише на обмеженій кількості плат, в яких заявлена підтримка цієї прошивки, редагування параметрів відбуваються через спеціальний файл конфігурації, який знаходиться на флешці, яка вставлена в саму плату [14].

Також RepRap Firmware підтримує обмін даними та керування через інтерфейс Ethernet, який підключається до плати через дрiт.

Налаштування екструдерів в конфігураторі зображені на рисунку 2.14.



Рисунок 2.14 – Налаштування екструдерів в RepRap Firmware

Наступними параметрами, що відносяться мультиматеріального друку є відношення екструдерів, до конкретних нагрівачів, термісторів та вентиляторів. Ці параметри зображені на рисунку 2.15.

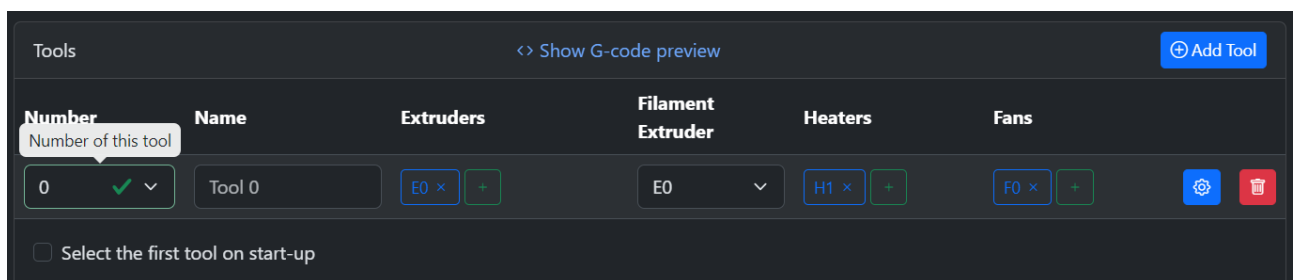


Рисунок 2.15 – Налаштування екструдерів з нагрівачами, термісторами та вентиляторями

На цьому в даній прошивці робота з мультиматеріальністю закінчена, що є недоліком прошивки і робить її непридатною для роботи з нашим методом мультиматеріального друку.

Repetier Firmware, як було вказано вище, також має функції мультиматеріального друку, але його можливості подібні до можливостей RepRap Firmware, яка обмежується встановлення відстані між екструдерами, відповідністю до конкретних нагрівачів, термісторів та вентиляторів, вибір типу зміни екструдерів відсутні. Налаштування зображені на рисунку 2.16. Вони включають в себе налаштування офсетів – відстані від екструдера до початку робочої області, стартову швидкість, налаштування крокового двигуна,

прискорення, типу термістора, визначення пінів нагрівача та додаткові команди [15].

Extruder 0

Extruder stepper	<input type="text" value="Extruder 0"/>	
	<input type="checkbox"/> Invert motor direction (EXT0_INVERSE) <input type="checkbox"/> Invert enable signal (EXT0_ENABLE_ON) <input type="checkbox"/> Enable motor mirroring (EXT0_MIRROR_STEPPER)	
Offset X <small>EXT0_X_OFFSET</small>	<input type="text" value="0"/>	[mm]
Offset Y <small>EXT0_Y_OFFSET</small>	<input type="text" value="0"/>	[mm]
Offset Z <small>EXT0_Z_OFFSET</small>	<input type="text" value="0"/>	[mm]
Start speed <small>EXT0_MAX_START_FEEDRATE</small>	<input type="text" value="20"/>	[mm/s]
Maximum speed <small>EXT0_MAX_FEEDRATE</small>	<input type="text" value="50"/>	[mm]
Resolution <small>EXT0_STEPS_PER_MM</small>	<input type="text" value="370"/>	[steps per mm]
Acceleration <small>EXT0_MAX_ACCELERATION</small>	<input type="text" value="5000"/>	[mm/s ²]
Preheat Temperature <small>EXT0_PREHEAT_TEMP</small>	<input type="text" value="190"/>	[°C]
Temperature sensor <small>EXT0_TEMPSENSOR_TYPE</small>	<input type="text" value="100k Epcos B57560G0107F000"/>	
Temperature sensor pin <small>EXT0_TEMPSENSOR_PIN</small>	<input type="text" value="Temp 0 normally used for extruder 0"/>	
Heater pin	<input type="text" value="Heater 0 normally used for extruder 0"/>	

Рисунок 2.16 – Налаштування екструдерів у Repetier Firmware

Наступним ПЗ, яке кардинально відрізняється від попередніх ПЗ тим, що всі основні розрахунки виконуються на мікрокомп'ютері Raspberry. І якщо всі попередні прошивки були написані на C++, то Klipper був розроблений на основі Python, це дало змогу прискорити та вдосконалити будову ПЗ для принтера, додаючи до стандартних можливостей, що представлені у попередніх прошивках, нові можливості. Першою такою унікальною функцією є те, що Klipper є модульною системою, в результаті чого до мікрокомп'ютера можливо підключення декількох хостів, які відповідають за різні функції, такі як на одній платі керування встановлені двигуни та подачі, на іншу керуючу плату

термістори, нагрівачі та вентилятори, на третю ж плату можливо встановлення додаткових елементів, таких як керування LED стрічкою, акселерометр, нагрівач внутрішнього простору, схема з розподіленням плат, що керують принтером, зображена на рисунку 2.17 [16].

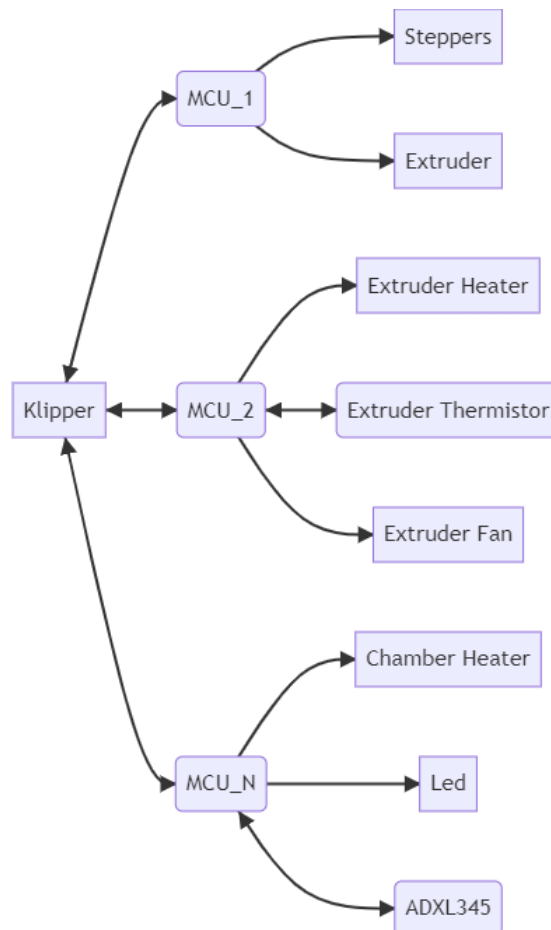


Рисунок 2.17 – Схема розподілення керуючих плат

Керування додатковими платами можливе через встановлення на ці плати прошивки, яка повністю передає керування власними пінами мікрокомп'ютеру raspberry, підключення відбувається різними способами, через USB, UART, CAN Bus.

Для кожної плати в Klipper є спеціальний файл конфігурації, який налаштовує піни плати, швидкості та всі інші основні налаштування. Приклад таких налаштувань зображено на рисунку 2.18. Основною секцією, яка задає взаємодію між платою та Raspberry є секція mcu, яка задає тип підключення та швидкість обміну інформацією. Таких секцій може бути декілька, для взаємодії

між різними платами. Наступною секцією, яка є загальна для всіх налаштувань є секція [printer], яка задає кінематику принтера, основні швидкості та прискорення.

```

[include fluidd.cfg]
[mcu]
serial: /dev/serial/by-id/usb-1a86_USB2.0-Serial-if00-port0
baud: 250000

[printer]
kinematics: corexy
max_velocity: 300
max_accel: 3000
max_z_velocity: 5
max_z_accel: 100

[virtual_sdcard]
path: /home/pi/printer_data/gcodes
on_error_gcode: CANCEL_PRINT

[stepper_x]
step_pin: PF0
dir_pin: PF1
enable_pin: !PD7
microsteps: 16
rotation_distance: 64.384
endstop_pin: ^PE5
#endstop_pin: ^PE4

```

Рисунок 2.18 – Файл конфігурації Klipper

Так як Klipper модульна система, то це дає широкі можливості для мультиматеріального друку. Всі процеси зміни матеріалу відбуваються за допомоги макросів, в макросах містяться самі команди, які виконуються двигунами.

Так як в нас система побудована на основі Prusa MMU і містить в собі лише один додатковий двигун окрім двигуна подачі, тоді відповідно в Klipper можна знайти готовий модуль, який включає в себе налаштування такої системи, і містить в собі набір файлів Python та файл з макросами, які керують системою в цілому [17].

Для користування нашою системою необхідно задати відстань між каналами, щоб двигун переміщувався на зазначену відстань.

Сам макрос керування екструдерами зображений на рисунку 2.19 де секція [gcode_macro variables] задає вибір конкретного екструдера, а Gcode M115

означає поточний екструдер. Секція [gcode_shell_command TS0] викликає код Python, який знаходиться за адресою /home/klipper/klippy/myMacros/MMU2s/TS0.py і містить в собі протокол обміну інформацією з платою, що керує, для визначення статусу 1 екструдера.

```
# MMU2s commands
[gcode_macro variables]
variable_current_extruder: 0
gcode:
    M115 ; must provide something

[gcode_shell_command TS0]
command: python2 /home/NikodemPrusa/klipper/klippy/myMacros/MMU2s/TS0.py
timeout: 2.
verbose: True

[gcode_macro TS0]
gcode:
    # Heat up hotend to provided temp or 220 as default as that should work OK with most filaments.
    {% if params.TEMP is defined or printer.extruder.can_extrude|lower == 'false' %}
    M117 Heating...
    M109 S{params.TEMP|default(220, true)}
    {% endif %}
    SET_HEATER_TEMPERATURE HEATER=extruder TARGET=220
    UNLOAD_FILAMENT|
    RUN_SHELL_COMMAND CMD=TS0
```

Рисунок 2.19 – Код макросів для зміни екструдера в Klipper

Секція [gcode_macro TS0] регулює процес переходу між екструдерами, перевіряє нагрівання екструдера, витягує філамент.

Файл TS0.py, який описаний вище, зображений на рисунку 2.20.

```
#!/usr/bin/python

import serial

ser = serial.Serial('/dev/serial/by-id/usb-Arduino_LLC_Arduino_Leonardo-if00') # open serial port
ser.write("TS0") # write a string
ser.close() # close port
```

Рисунок 2.20 – Файл TS0

Наступною секцією, яка виконує перехід між екструдерами є [gcode_macro T0], ця секція зображена на рисунку 2.21. Вона також перевіряє температуру екструдера, витягує філамент, виконує перехід на наступний екструдер і

завантажує його на визначену довжину, після чого змінює статус екструдера на вибраний.

```
[gcode_macro T0]
gcode:
  {% if printer["gcode_macro variables"].current_extruder != 0 %}
    # Heat up hotend to provided temp or 220 as default as that should work OK with most filaments.
    {% if params.TEMP is defined or printer.extruder.can_extrude|lower == 'false' %}
      M117 Heating...
      M109 S{params.TEMP|default(220, true)}
    {% endif %}
    UNLOAD_FILAMENT
    RUN_SHELL_COMMAND CMD=T0
    # Load the filament into the hotend area.
    G92 E0.0
    G91
    #G1 E20 F100
    G1 E30 F705
    G1 E10 F400
    #G1 E70 F400
    #G1 E40 F100
    G90
    G92 E0.0
    M400
    SET_GCODE_VARIABLE MACRO=variables VARIABLE=current_extruder VALUE=0
  {% else %}
    RESPOND TYPE=command MSG="Extruder is in use"
  {% endif %}
```

Рисунок 2.21 – Секція [gcode_macro T0]

Файл T0.py містить в собі обмін даними з платою, що керує системою мультиматеріального друку. Код даного файла зображений на рисунку 2.22.

```
1  #!/usr/bin/python
2
3  import serial
4
5  ser = serial.Serial('/dev/serial/by-id/usb-Arduino_LLC_Arduino_Leonardo-if00') # open serial port
6  ser.write("T0") # write a string
7  while True:
8      if(ser.inWaiting() != 0):
9          ser.close() # close port
```

Рисунок 2.22 – Файл T0.py

Таким чином, з використанням вищевказаних макросів можливо виконати мультиматеріальний друк моделі. Вікно вибору екструдера зображено на рисунку 2.23.

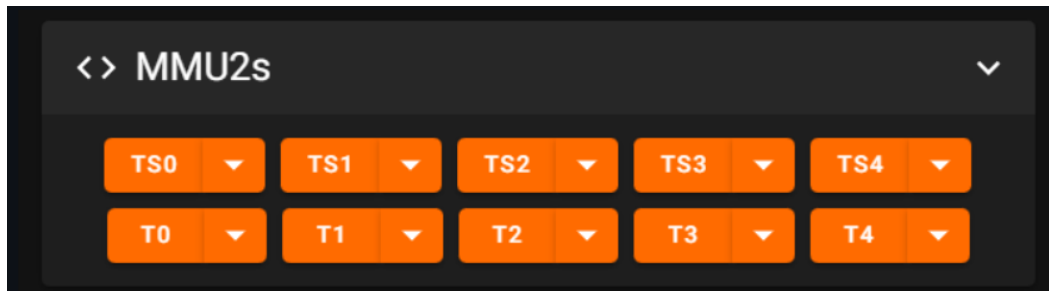


Рисунок 2.23 – Вікно переходу між екструдерами

При друці моделі, перехід виконується за допомоги посилання на макрос T0, T1, T2, T3. Результат такого друку зображено на рисунку 2.24.



Рисунок 2.24 – Результат друку з використанням мультиматеріальної системи

2.2 Висновки до другого розділу

В результаті аналізу ПЗ для забезпечення мультиматеріального друку було визначено недоліки та переваги різних ПЗ з загальною можливістю друку різними матеріалами та кольорами, із чотирьох проаналізованих систем під необхідні критерії та систему було визначено два можливих ПЗ – Marlin та Klipper. Marlin є складним ПЗ, який потребує складного налаштування, має недоліки в коді, повільний у порівнянні з наступним ПЗ Klipper та всі розрахунки відбуваються на платі керування.

ПЗ Klipper на відміну від Marlin є швидким, багатофункціональним ПЗ, який керує додатковими функціями принтера за допомогою макросів, які написані на мові Python. Також на ПЗ Klipper вже є розроблені макроси, які можуть бути використаними в різних системах мультиматеріального друку за що і був вибраний в якості ПЗ для принтера.

3 РОЗРОБКА БАГАТОКАНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПОДАЧІ ФІЛАМЕНТУ

3.1 Розробка конструкції системи

Розробку багатоканальної системи подачі пластику виконано у CAD системі Autodesk Fusion. Система є універсальною, тобто використовувати її можна на різних типах 3D принтерів, що працюють за технологією FFF/FDM. Єдиною умовою є пряма подача філаменту, тобто коли механізм подачі знаходиться поруч із гарячою частиною екструдеру. Система, що розроблено, лише замінює філамент і підводить його системи подачі екструдеру, проштовхування пластика виконується безпосередньо механізмом подачі. Систему подачі розраховано на одночасного використання восьми філаментів. Зовнішній вигляд системи подачі філаменту зображено на рисунках 3.1 та 3.2.

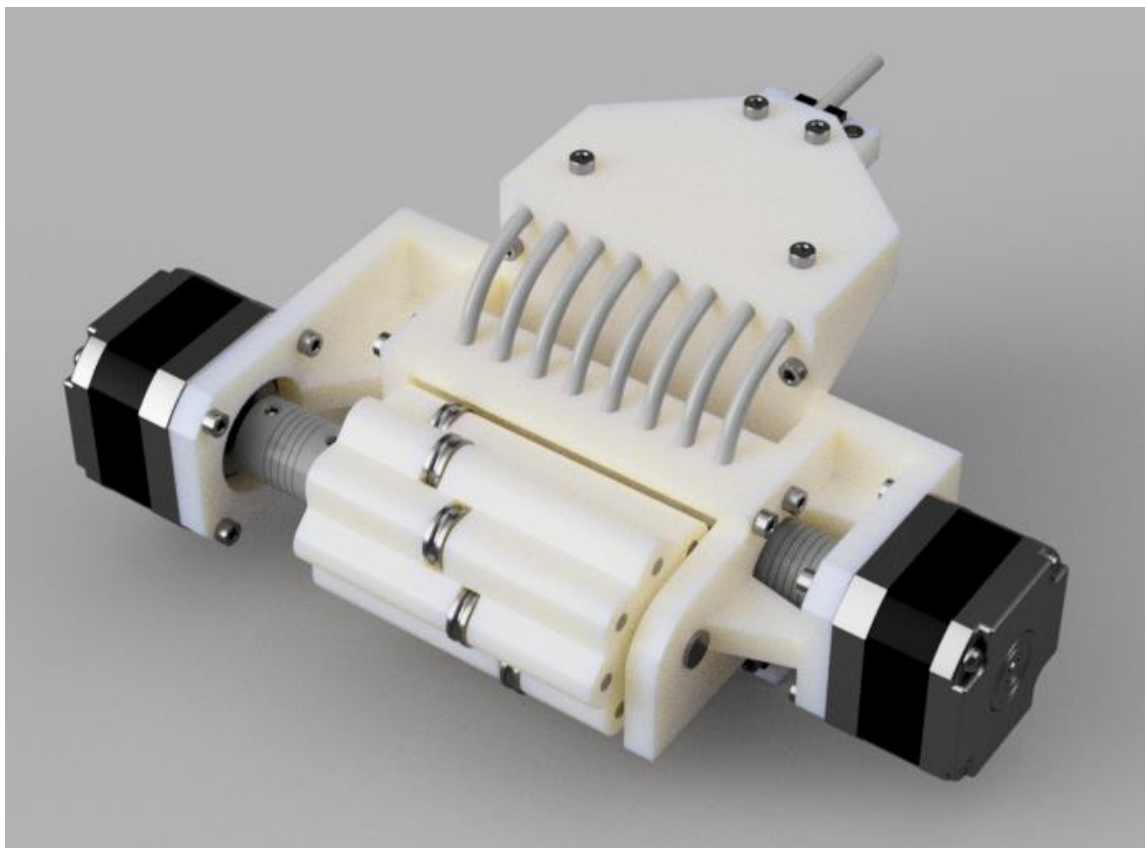


Рисунок 3.1 – Багатоканальна система подачі пластику

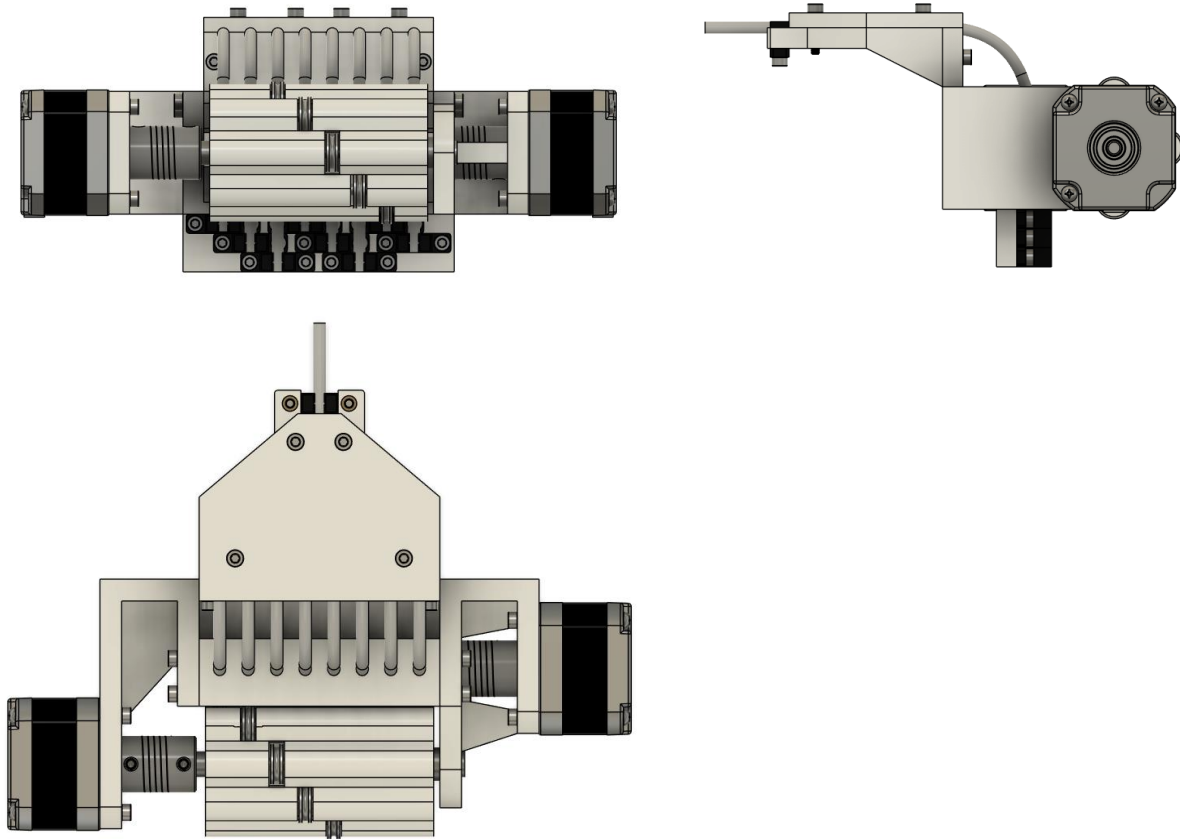


Рисунок 3.2 – Ескіз багатоканальної системи подачі пластику

Для зручності багатоканальну систему подачі пластику можна поділити на кілька окремих частин для зручності опису:

- притискуючий механізм;
- механізм прошовхування філаменту;
- корпус системи.

Притискуючий механізм складається з наступних стандартних компонентів (рисунок 3.3 – 3.5):

- кроковий двигун Nema 17, 1 шт;
- муфта перехідна пружинна 5x8 мм, 1 шт;
- підшипник MR 148 ZZ, 1 шт;
- вал 8 мм довжиною 93 мм, 1 шт;
- притискаючі ролики філаменту, 8 шт;
- вал 5 мм довжиною 73 мм, 8 шт.

Та наступних нестандартні компоненти:

- барабан;
- проставка.

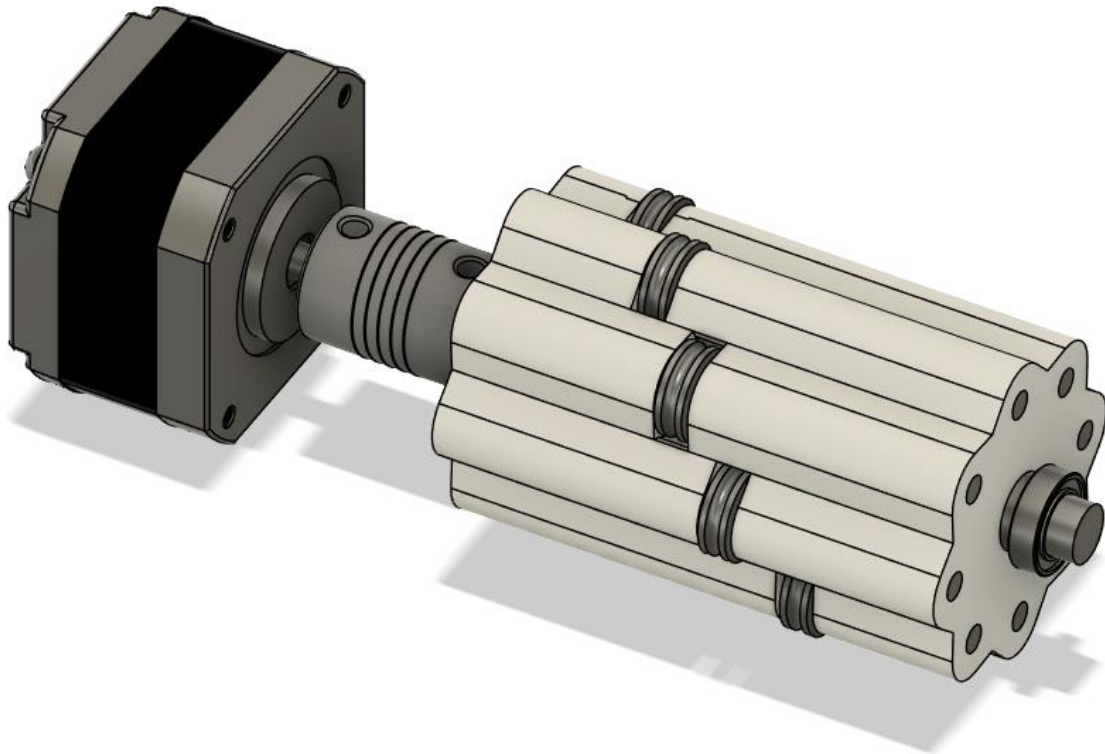


Рисунок 3.3 – Притискуючий механізм

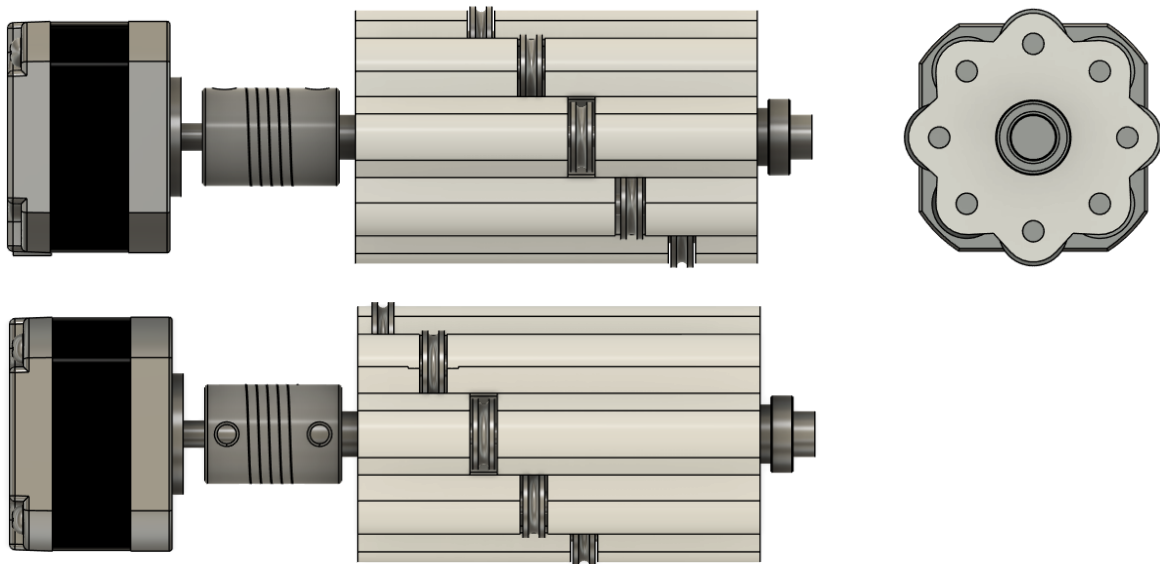


Рисунок 3.4 – Ескіз притискуючого механізму

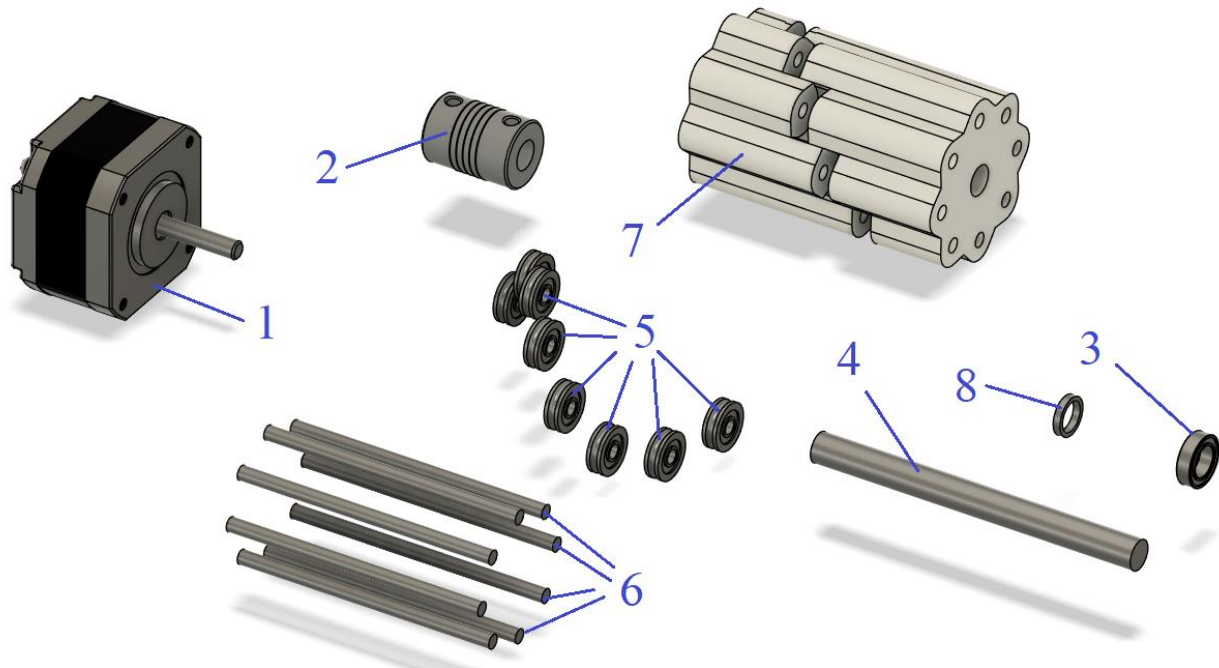


Рисунок 3.5 – «Вибух-схема» притискуючого механізму

Притискуючий механізм забезпечує вибір одного із восьми пластикових філаментів. На барабані розташовані ролики, що притискають філамент. Ці ролики розташовуються під кутом 45° і одночасно притискає філамент лише один із них. Обертання барабану забезпечується кроковим двигуном Nema 17. В барабані ролики центруються завдяки валам 5 мм. Сам барабан жорстко з'єднаний із валом 8 мм та обертається навколо нього. 8 мм вал з'єднаний із кроковим двигуном за допомогою муфта перехідної пружинної 5x8 мм. Для рівномірності обертання барабану протилежна частина валу фіксується у підшипнику MR 148 ZZ.

Барабан виготовляється із пластмаси PETG за допомогою FFF технології 3D друку. Щільність заповнення 90%, висота шару 0,2 мм. 3D модель розроблено з урахуванням технології виготовлення (рисунок 3.6 та 3.7). Для забезпечення точності обертання з двох боків кожного притискаючого ролика філаменту знаходяться шайби м5. Вали м5 в барабані фіксуються або за допомогою діхлоретану, або конtringються з двох боків гвинтами м2 із шайбами. У останньому випадку у валах з торців має бути отвори із різьбою м2.

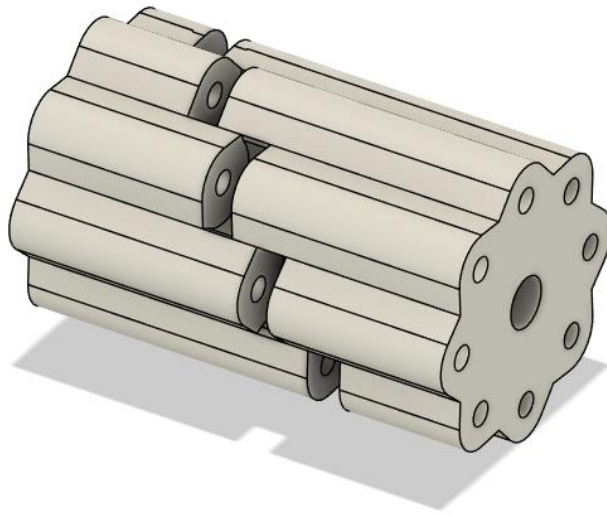


Рисунок 3.6 – Барабан

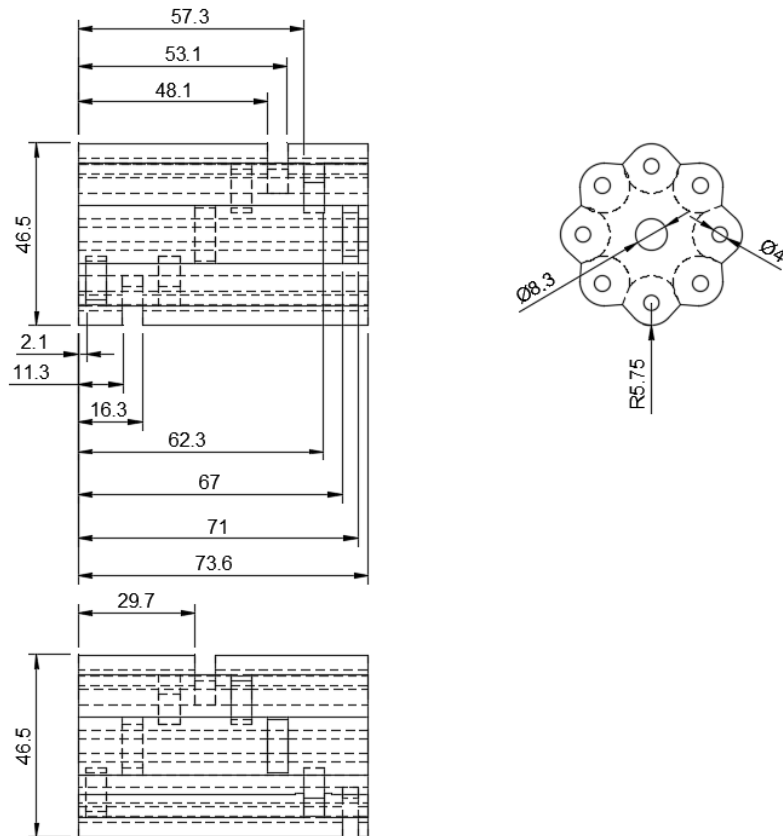


Рисунок 3.7 – Ескіз барабану

Для уникнення тертя на валу м8 між барабаном та підшипником MR 148 ZZ встановлюється проставка (рисунок 3.8 та 3.9). Проставка виготовляється із пластмаси PETG за допомогою FFF технології 3D друку.

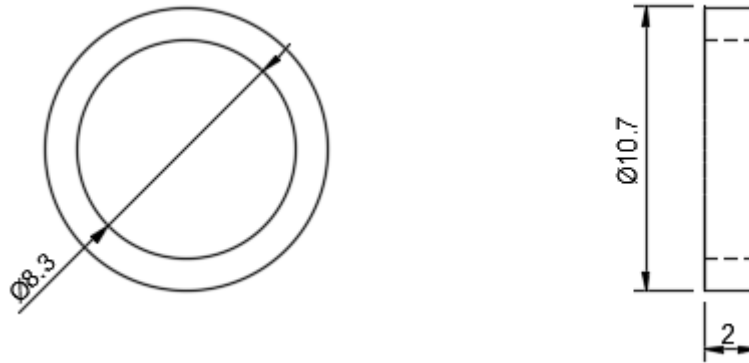


Рисунок 3.8 – Ескіз проставки



Рисунок 3.9 – Проставка

Механізм проштовхування філаменту складається з наступних стандартних компонентів (рисунок 3.10 – 3.12):

- кроковий двигун Nema 17, 1 шт;
- муфта перехідна пружинна 5x5 мм, 1 шт;
- вал 5 мм довжиною 88 мм, 1 шт;
- підшипник MR 105 ZZ, 1 шт;
- зубасті шківни подачі, 8 шт.

Нестандартні компонентів в даному блоці відсутні.

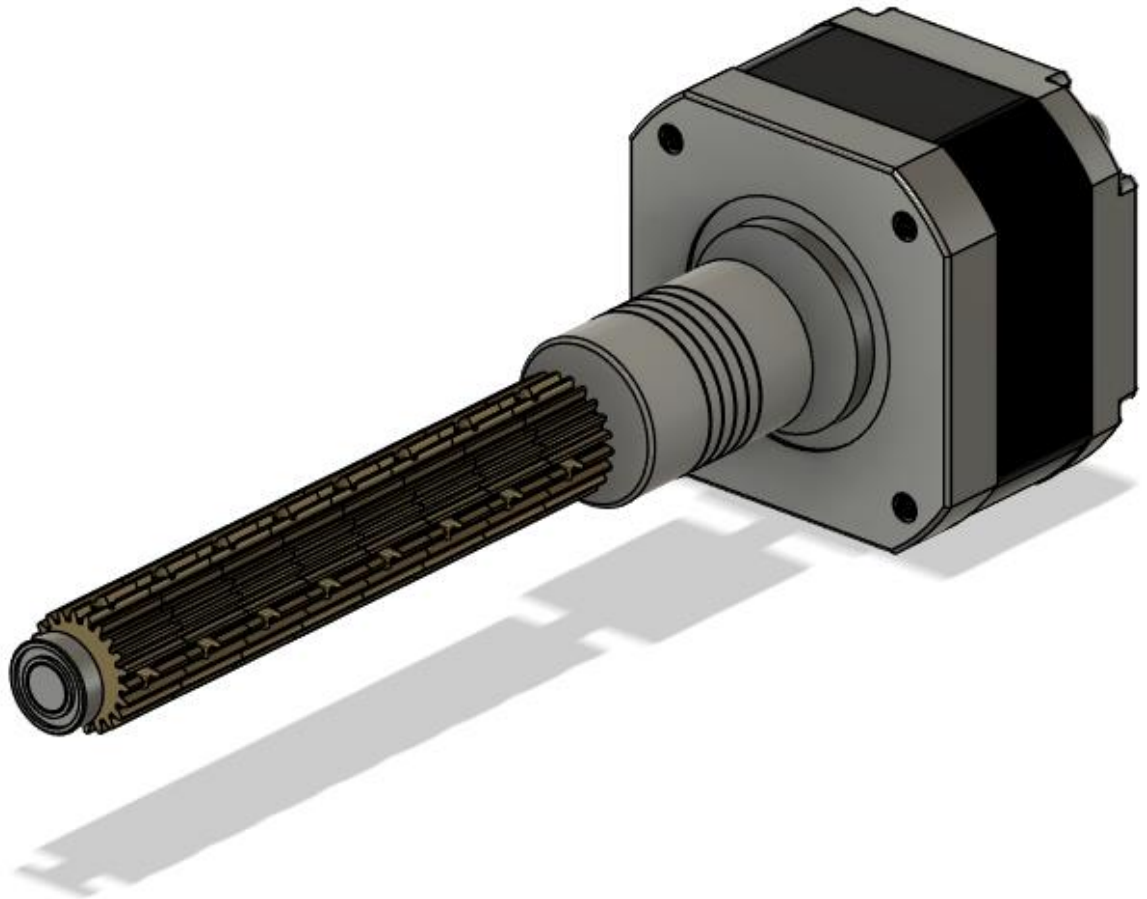


Рисунок 3.10 – Механізм проштовхування філаменту

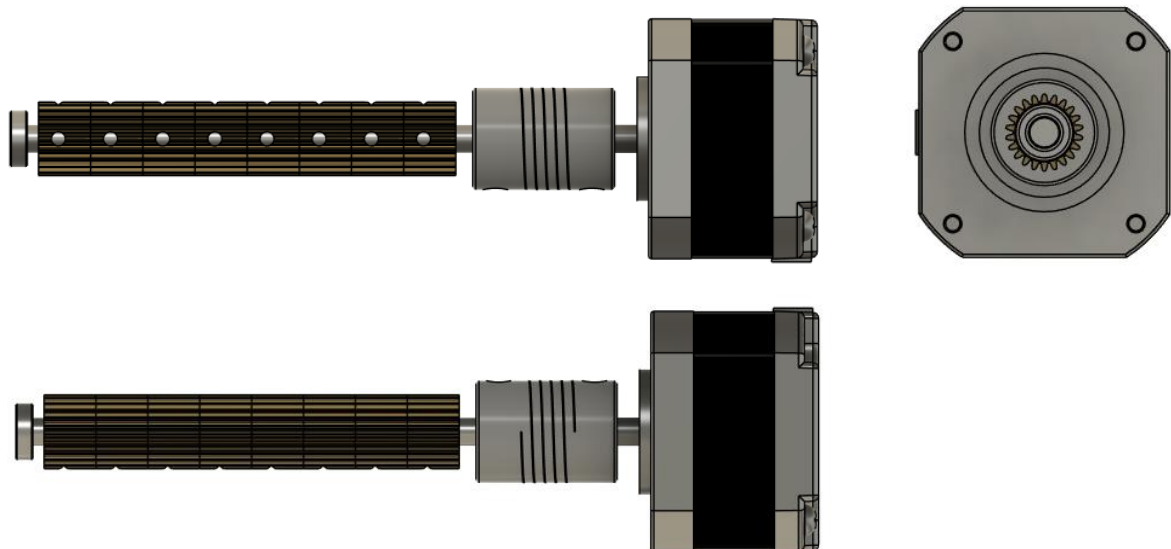


Рисунок 3.11 – Ескіз механізму проштовхування філаменту

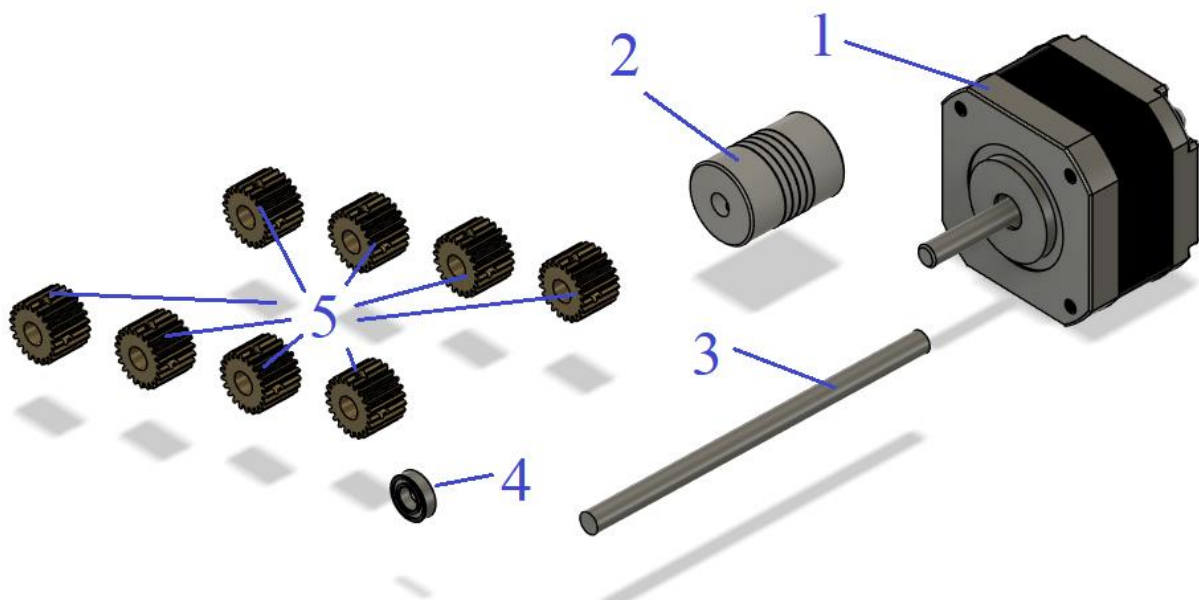


Рисунок 3.12 – «Вибух-схема» механізму проштовхування філаменту

Механізм проштовхування філаменту працює наступним чином. Зубасті шківни подачі проштовхують пластиковий філамент у екструдер або роблять ретракт, тобто виводить філамент із екструдеру. Але одночасно рухається лише той пруток пластику, який притиснений притискаючим роликком філаменту на барабані. Всі вісім зубастих шківнів подачі жорстко зафіксовані на валу 5мм завдяки гвинтовим елементам. Вал у свою чергу за допомогою муфти перехідної пружинної 5x5 мм з'єднується із кроковим двигуном Nema 17. Саме кроковий двигун Nema 17 забезпечує і проштовхування філаменту і його ретракт.

Корпус системи складається із наступних стандартних компонентів (рисунок 3.13 -3.15):

- оптопари TCST 2103, 9 шт;
- фторопластова трубка 4x2 мм, 17 шт;

Та наступні нестандартні компоненти:

- рама корпусу, 1 шт;
- направляюча рамка, 1 шт;
- об'єднувач каналів філаментів, 1шт;
- кришка об'єднувача філаментів, 1шт.

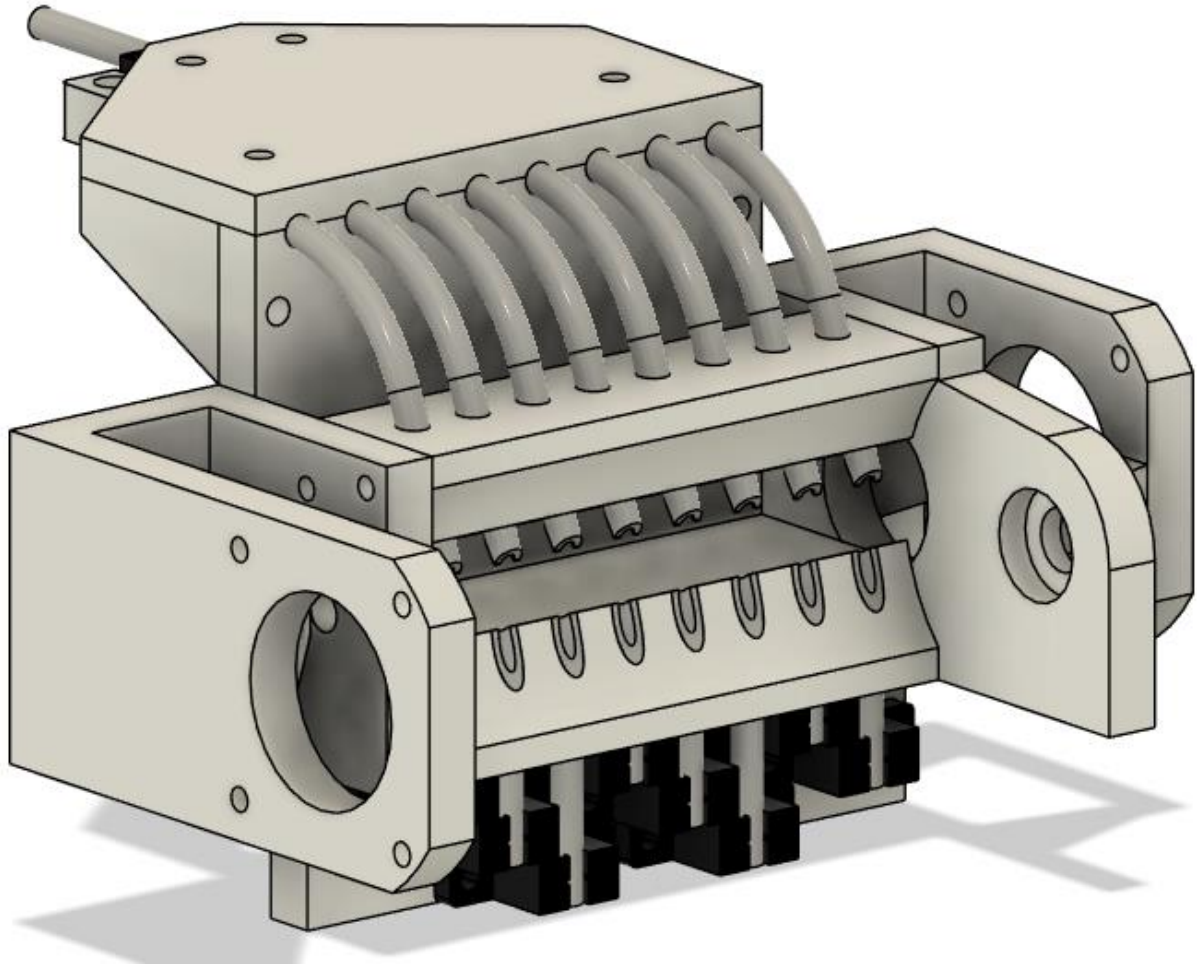


Рисунок 3.13 – Корпус системи

Корпус системи створює канали направлення філаменту. Ці канали направляють пластик через оптопари на вході системи в зубасті шківни подачі та у об'єднувач каналів філаментів. Після якого філамент, що зараз подається у екструдер. На вході корпусу встановлено вісім оптопара, по одному на кожен канал. Оптопари необхідні для контролю наявності пластику в каналі. На виході з об'єднувач каналів філаментів також знаходиться оптопара, що контролює проходження прутку пластику скрізь систему

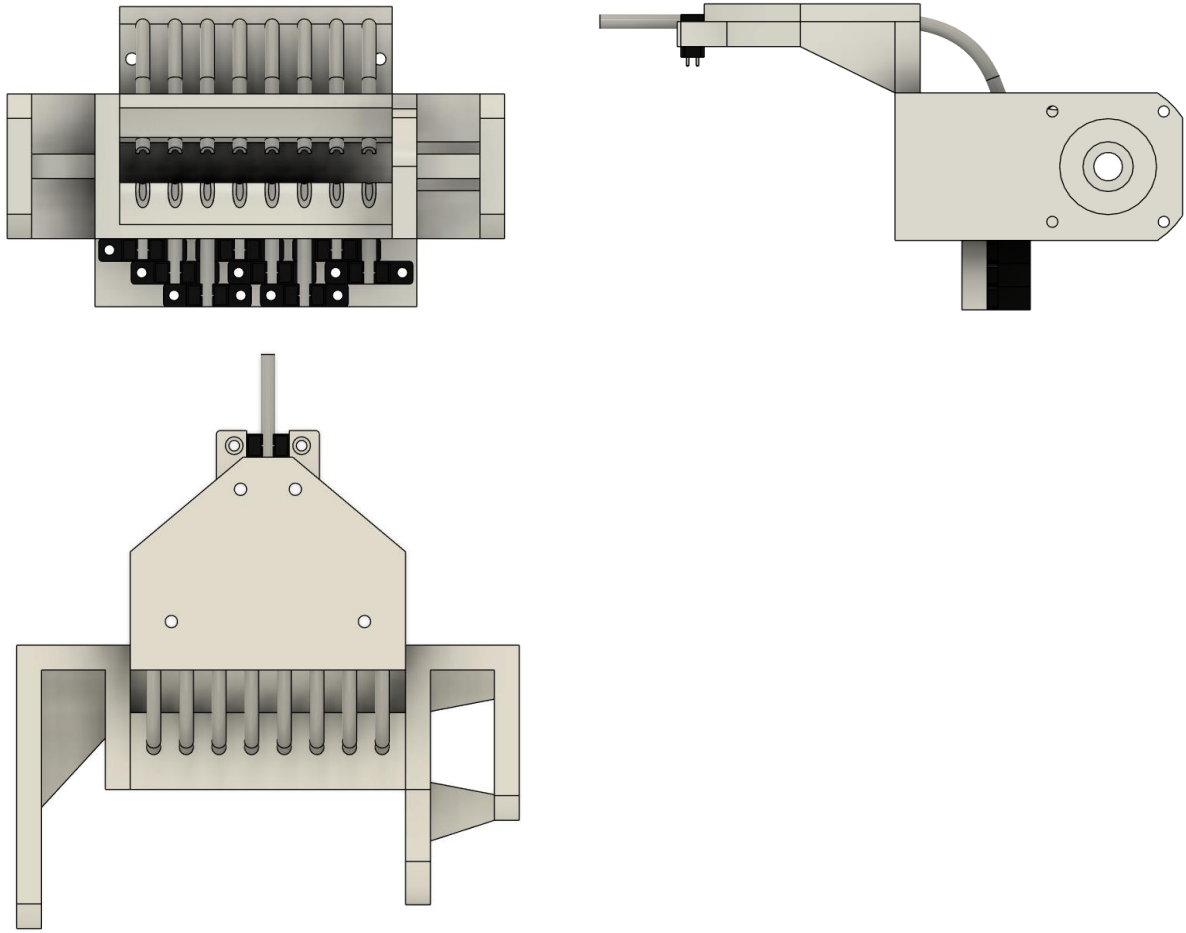


Рисунок 3.14 – Ескіз корпусу системи

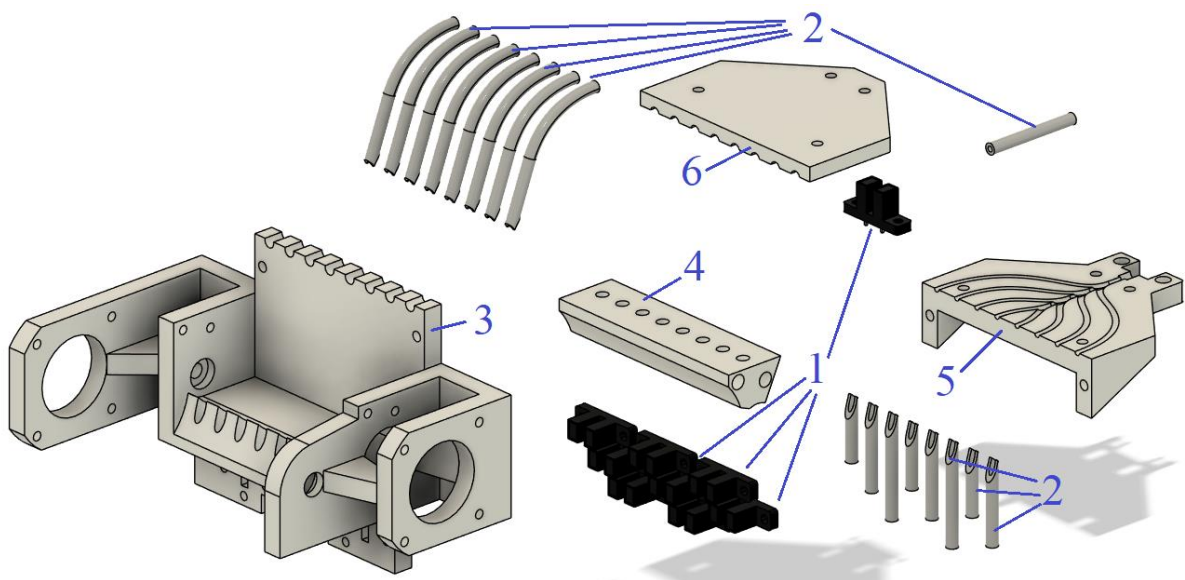


Рисунок 3.15 – «Вибух-схема» корпусу системи

Базовою деталлю всієї системи є рама корпусу (рисунок 3.16 та 3.17). Рама корпусу виготовляється із пластмаси PETG за допомогою технології FFF 3D друку. На цій деталі фіксуються за допомогою гвинтів крокові двигуни Nema 17, що обертають барабан та зубчасті шківни подачі філаменту. В рамі корпусу передбачені пази для фіксації підшипників MR 148 ZZ та MR 105 ZZ. До рами за допомогою гвинтів та різьбових бонок кріпляться оптопари контролю наявності філаменту, в ній передбачені отвори для направляючих фторопластових трубок.

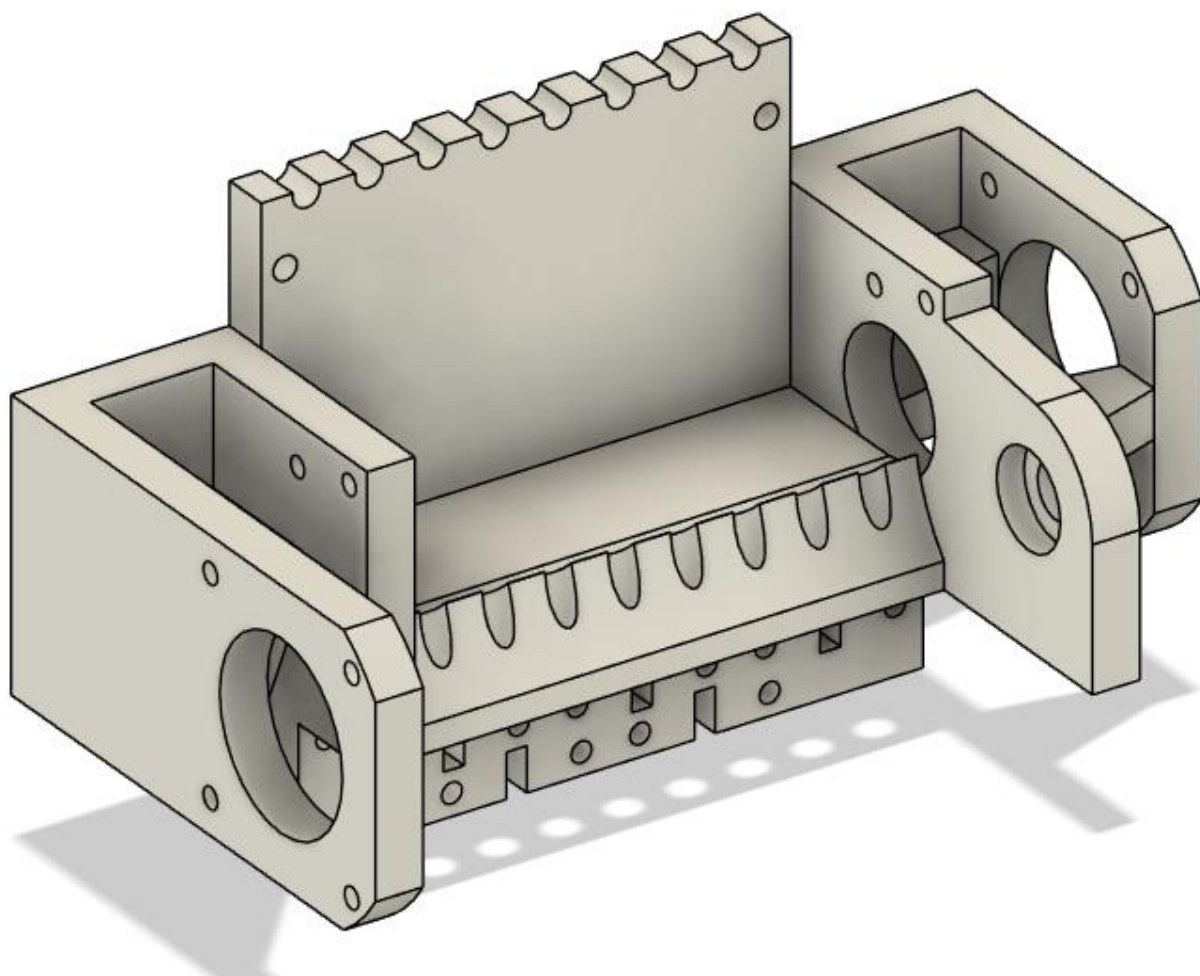


Рисунок 3.16 – Рама корпусу

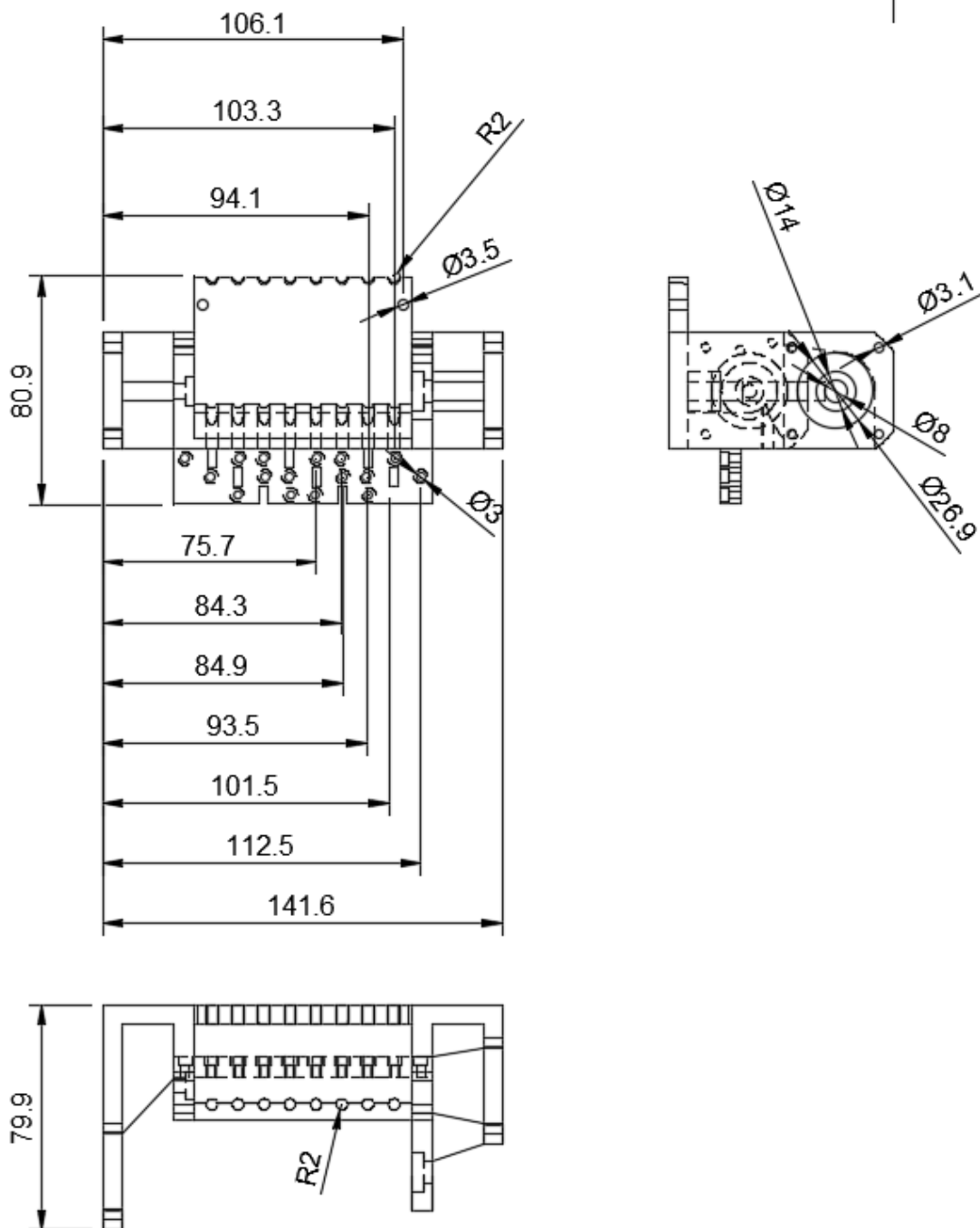


Рисунок 3.17– Ескіз рами корпусу

Направляюча рамка фіксує кінці фторопластових трубок, що підводяться до зубастих шківів подачі (рисунок 3.18 та 3.19). В направляюча рамка містить чотири циліндричні отвори під латунні різьбові бонки для кріплення до рамки корпусу.

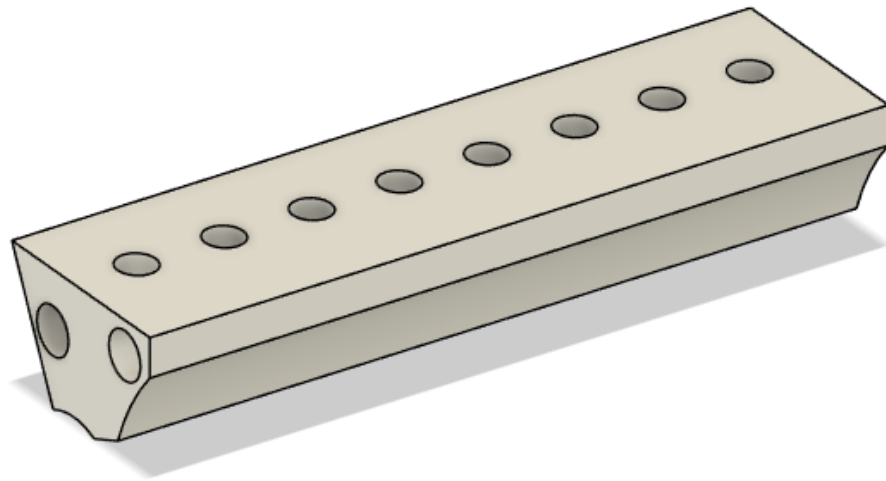


Рисунок 3.18 – Направляюча рамка

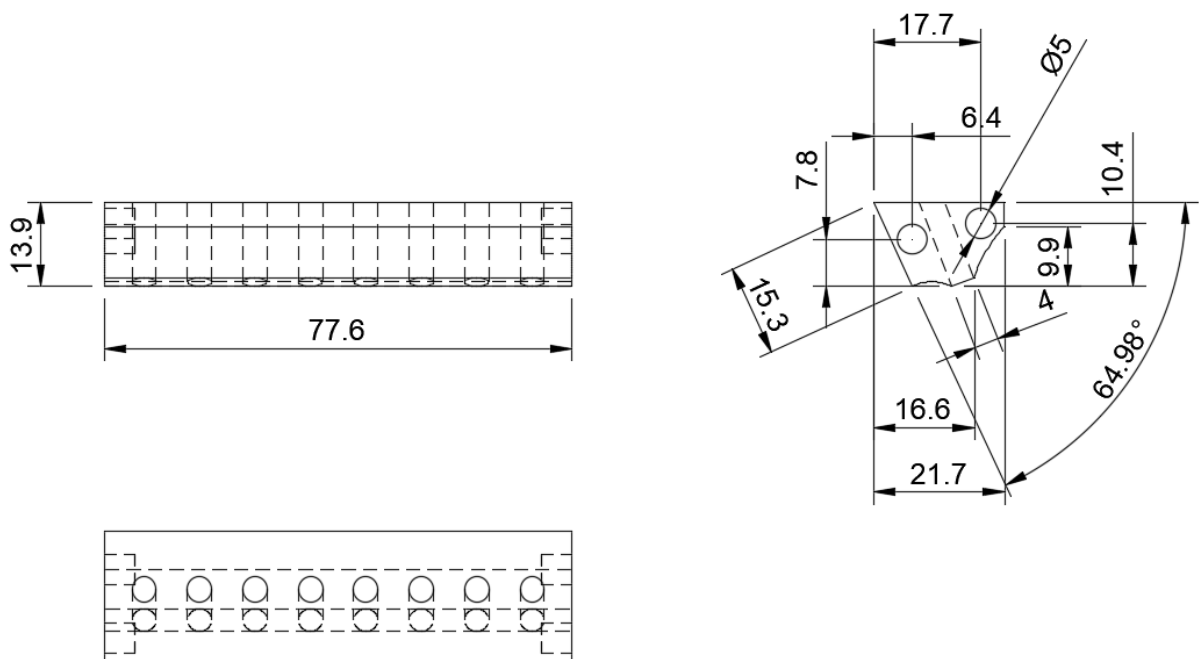


Рисунок 3.19 – Ескіз направляючої рамки

Направляюча рамка виготовляється з пластмаси PETG за допомогою FFF технології 3D друку.

Об'єднувач каналів філаментів необхідний для того щоб об'єднати в один канал філаменти з восьми фторопластових трубок. Це своєрідний мільтіплексер,

якій дозволяє по чергово подавати пластиковий філамент у канал екструдеру. об'єднувач каналів філаментів кріпиться до рами корпусу двома гвинтовими з'єднанням, також до нього кріпиться оптопара, що контролює наявність філаменту на виході системи.

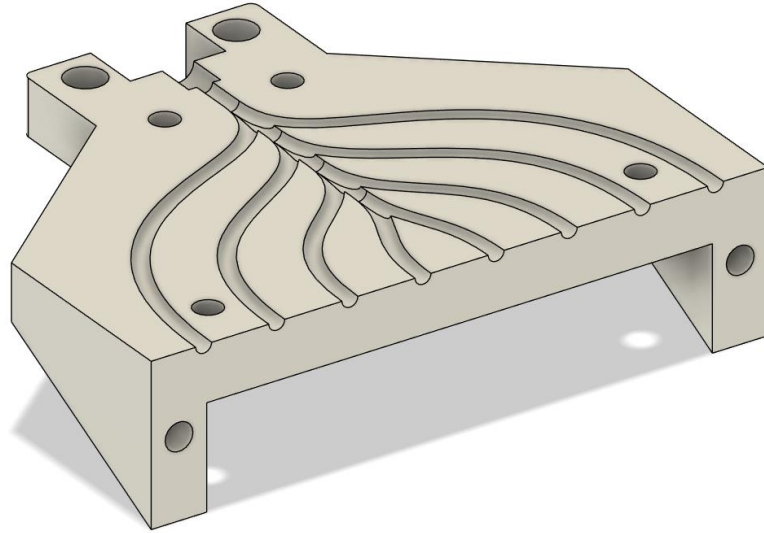


Рисунок 3.20 – Об'єднувач каналів філаментів

Об'єднувач каналів філаментів виготовляється за допомогою пластмаси PETG за допомогою FFF технології 3D друку.

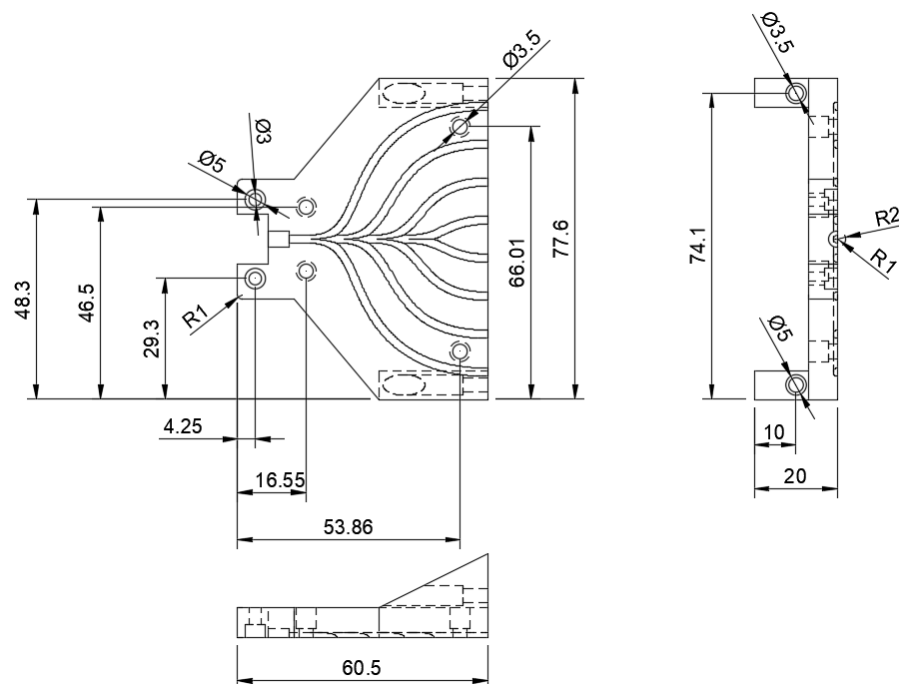


Рисунок 3.21 – Ескіз об'єднувача каналів філаментів

Кришка об'єднувача філаментів (рисунок 3.22 та 3.23) містить такі самі канали для об'єднання філаментів як і в об'єднувачі каналів філаментів. Кришка об'єднувача філаментів кріпиться до об'єднувача філаментів за допомогою чотирьох різьбових з'єднань. На виході об'єднаного каналу філаментів фіксується фторопластова трубка, що підводить пластиковий пруток до механізму подачі екструдера. Кришка об'єднувача філаментів виготовляється за допомогою пластмаси PETG за допомогою FFF технології 3D друку.

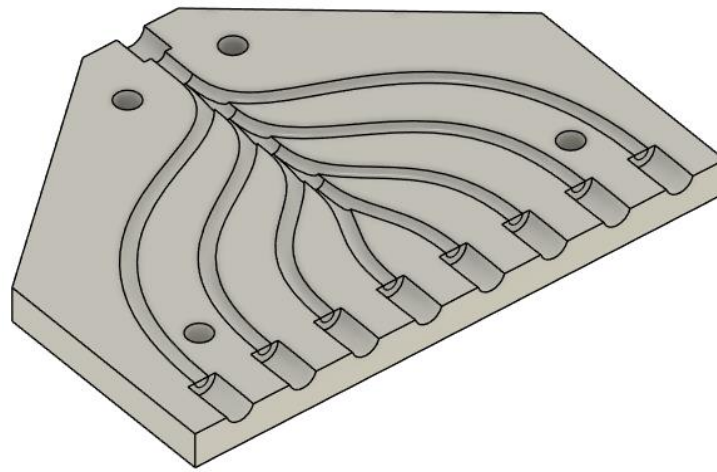


Рисунок 3.22 – Кришка об'єднувача філаментів

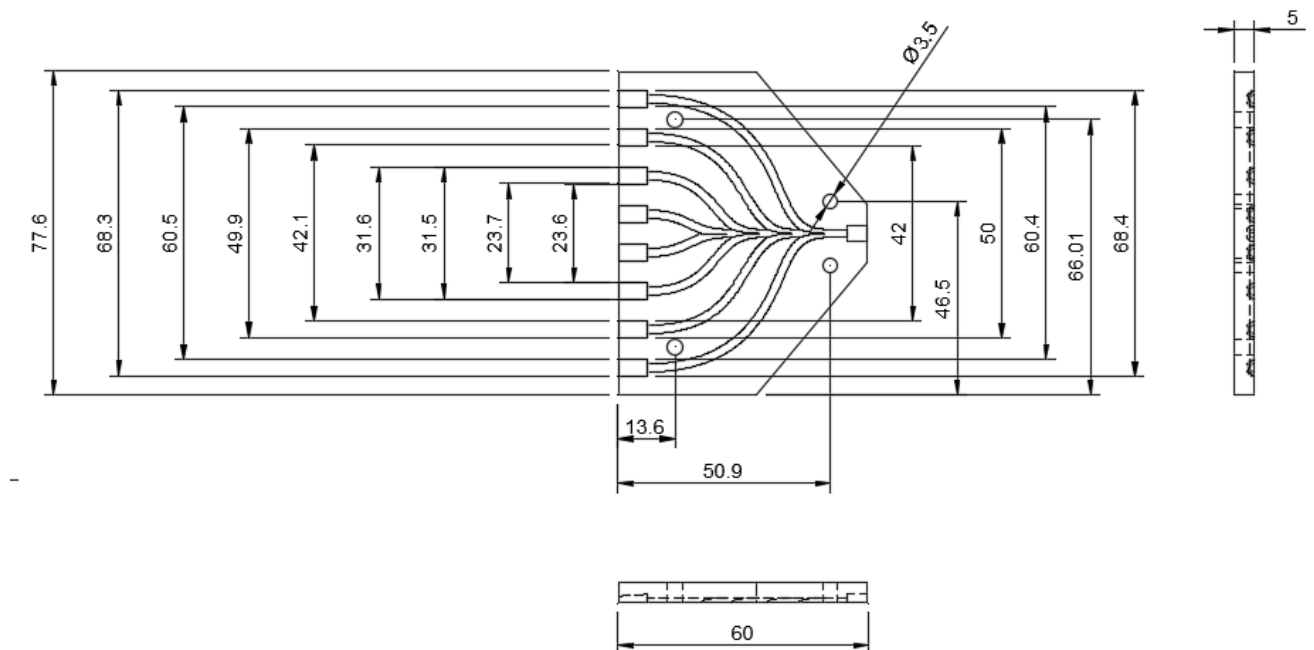


Рисунок 3.23 – Ескіз кришки об'єднувача філаментів

Дана система працює наступним чином:

- на початку друку філамент заправляється або декілька каналів пластику таким чином щоб пластмасовий пруток проходив у другу трубку за зубастий шків подачі. Наявність філаменту відстежується оптопарою на вході кожного каналу;

- у разі необхідності подачі філаменту з певного каналу барабан повертається таким чином щоб відповідний притискаючий ролик філаменту був повернутий до зубастого шківу подачі потрібного каналу. Кроковий двигун, що повертає зубчасті шківви подачі починає обертатися, філамент проходить через трубку та об'єднувач філаменту і подається до екструдеру (рисунок 3.24);

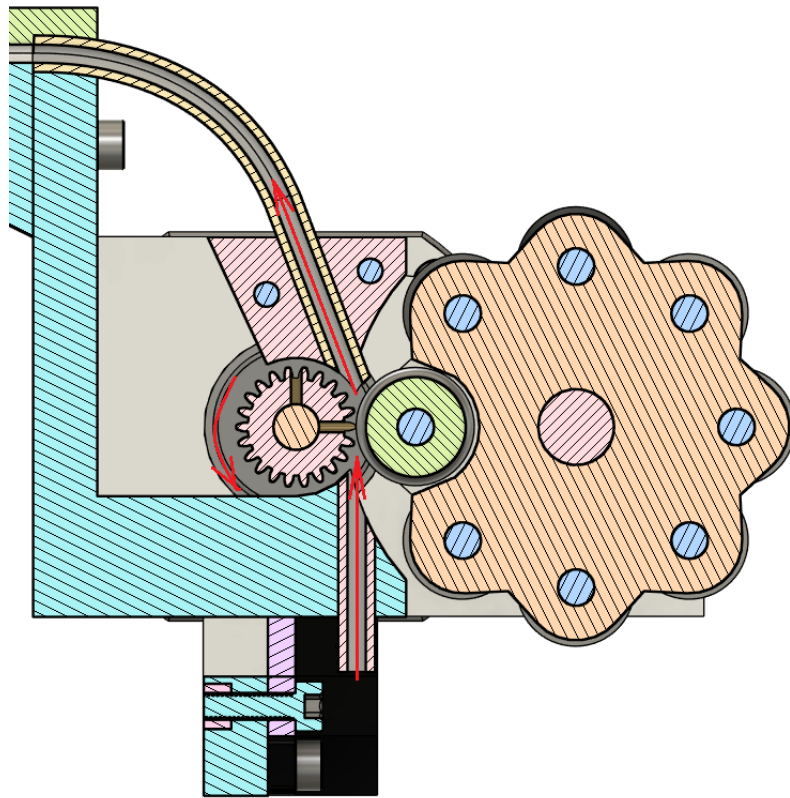


Рисунок 3.24 – Подача філаменту в екструдер

- після завершення друку даним філаментом система робить ретракт – кроковий двигун починає обертатися у інший бік, філамент висмикується із екструдеру (рисунок 3.25). Наявність чи відсутність філаменту на виході системи перевіряється оптопарою;

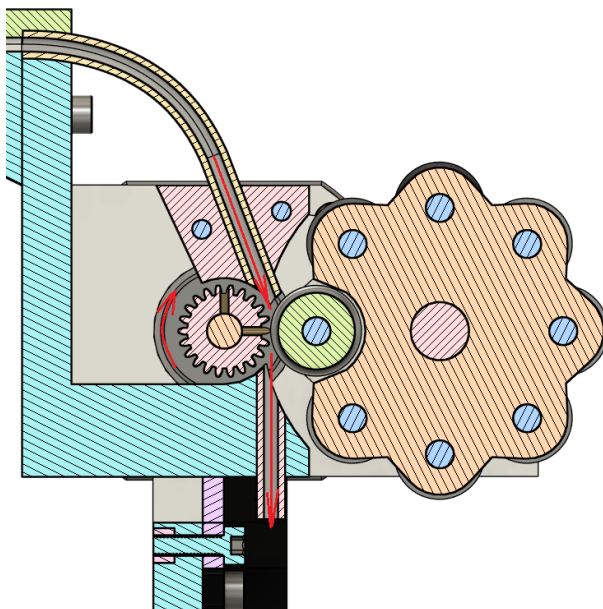


Рисунок 3.25 – Ретракт філаменту з екструдеру

– барабан повертається щоб забезпечити друк наступним філаментом. Кроковий двигун, що повертає зубчасті шківни подачі починає обертатися, новий філамент проходить через трубку та об'єднувач філаменту і подається до екструдеру (рисунок 3.26).

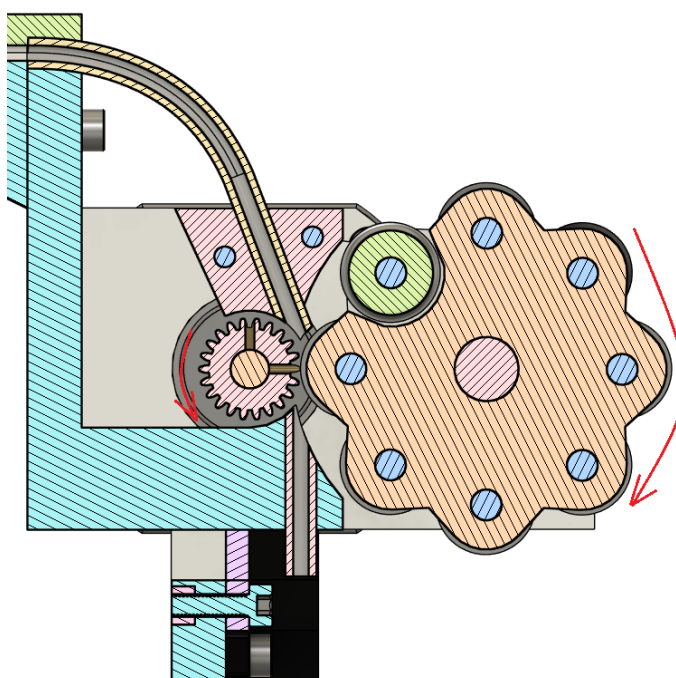


Рисунок 3.26 – Подача нового філаменту в екструдер

3.2 Розробка програмного забезпечення

Для реалізації програмної системи, де зміна екструдерів відбувається за командою G-коду, можна використовувати Python та бібліотеку RPi.GPIO для керування кроковими двигунами. У програмі основне завдання — інтерпретувати команди G-коду (T0, T1, ..., T7), і на їх основі повертати кроковий двигун для вибору потрібного каналу пластику - «екструдера».

Управління двигунами: Програма керує двома кроковими двигунами через драйвер DRV8825:

- один двигун подає/втягує пластиковий пруток;
- другий двигун повертає механізм вибору каналу пластику – «екструдера».

Зміна екструдерів:

- кожен екструдер вибирається шляхом повороту на 45 градусів проти годинникової стрілки.
- після отримання команди G-коду, програма визначає поточний екструдер і цільовий екструдер, потім обчислює скільки поворотів (по 45 градусів) потрібно зробити для перемикання.

Розроблена програма працює наступним чином. Першим етапом є виконання ініціалізації змінних та констант:

- налаштовуються параметри для шестерні подачі, обчислюються кроки для подачі та втягування;
- задається кут повороту та кількість кроків для вибору екструдерів.

Другим етапом є функції управління:

- `feed_filament(steps, delay)`: Подає або втягує пластиковий пруток. Позитивне значення `steps` – подача, негативне – втягування;
- `select_extruder(target_extruder, delay)`: Повертає двигун вибору екструдерів на потрібний кут зміни. Обчислює різницю в кроках між поточним та цільовим екструдером. Під екструдером у даному випадку слід розуміти канал філаменту, по у САМ системі різні канали будуть мати значення окремих екструдерів.

Третім етапом є функція обробки команди `process_gcode_command(command)`:

- приймає команду G-коду (наприклад, T0, T1) та визначає цільовий екструдер;
- виконує втягування пластику на 400 мм, дана відстань залежить від довжини вихідної фторопластової трубки, що підводить філамент до фізичного екструдера;
- повертає двигун вибору (кроковий двигун, що обертає барабан) на потрібний кут нового екструдера;
- подає пластик на 400 мм для нового екструдера.

Останнім етапом є основний цикл:

- очікує введення команди G-коду;
- обробляє команду через `process_gcode_command()`.

Перед початком експлуатації системи необхідно впевнитися у безпеці системи: завжди завершувати роботу з GPIO викликом `GPIO.cleanup()`, щоб уникнути збоїв у роботі. Також необхідно провести тестування: Переконайтеся, що кроки та кути повороту збігаються з налаштуваннями реальної системи, за потреби налаштувати параметри.

Ця програма виконує автоматичне перемикання між екструдерами (каналами системи подачі філаменту) за командами G-коду, гарантуючи, що кожен пруток пластику подається та втягується в потрібний момент.

```
import RPi.GPIO as GPIO
import time
import math
```

```
# Константи для двигуна подачі пластику
STEPPER_PIN_FEED = 17 # Пін подачі пластику
STEP_ANGLE = 1.8 # Кут кроку двигуна (градуси)
STEPS_PER_REV = 360 / STEP_ANGLE # Кроків на оборот
```

```

# Параметри зубчатого шківа подачі
GEAR_DIAMETER = 13 # мм
GEAR_CIRCUMFERENCE = math.pi * GEAR_DIAMETER # мм

# Константи для подачі/втягування
FEED_LENGTH = 400 # мм подачі пластику
FEED_STEPS = int((FEED_LENGTH / GEAR_CIRCUMFERENCE) *
STEPS_PER_REV) # кроки для подачі/втягування

# Константи для двигуна вибору каналу-екструдера
STEPPER_PIN_SELECT = 27 # Пін вибору екструдера
ANGLE_PER_EXTRUDER = 45 # кут повороту для зміни екструдерів
CHANGE_STEPS = int((ANGLE_PER_EXTRUDER / 360) *
STEPS_PER_REV) # кроки для 45 градусів

# Налаштування GPIO
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(STEPPER_PIN_FEED, GPIO.OUT)
GPIO.setup(STEPPER_PIN_SELECT, GPIO.OUT)

# Стан поточного екструдера
current_extruder = 0 # T0 — початковий екструдер

# Функція подачі пластику на 400 мм.
def feed_filament(steps, delay=0.001):
    for _ in range(abs(steps)):
        GPIO.output(STEPPER_PIN_FEED, GPIO.HIGH)
        time.sleep(delay)
        GPIO.output(STEPPER_PIN_FEED, GPIO.LOW)
        time.sleep(delay)

```

```

# Функція для вибору наступного екструдера
def select_extruder(target_extruder, delay=0.001):
    global current_extruder

    steps_needed = ((target_extruder - current_extruder) % 8) *
CHANGE_STEPS
    for _ in range(steps_needed):
        GPIO.output(STEPPER_PIN_SELECT, GPIO.HIGH)
        time.sleep(delay)
        GPIO.output(STEPPER_PIN_SELECT, GPIO.LOW)
        time.sleep(delay)

    # Оновлюємо поточний екструдер
    current_extruder = target_extruder

# Головна функція обробки команди G-коду
def process_gcode_command(command):
    global current_extruder

    if command.startswith("T") and command[1:].isdigit():
        target_extruder = int(command[1:])
        if target_extruder >= 0 and target_extruder < 8:
            print(f" Перемикання на екструдер T{target_extruder}")

            # Втягуємо поточний пруток
            print("Втягування 400 мм пластику...")
            feed_filament(-FEED_STEPS)

            # Повертаємо до цільового екструдера
            select_extruder(target_extruder)

```

```
# Подаємо пруток для нового екструдера
print("Подача 400 мм пластику...")
feed_filament(FEED_STEPS)
```

Приклад основного циклу програми

```
try:
```

```
    while True:
```

```
        # Отримуємо команду G-коду від користувача або з файлу
        command = input("Введіть G-код (наприклад, T0, T1, ... T7):")
        process_gcode_command(command)
```

```
finally:
```

```
    GPIO.cleanup()
    print("Програма завершена, GPIO очищено.")
```

Головні частини програми наступні:

Першою частиною є ініціалізація змінних та констант:

- налаштовуються параметри для шестерні подачі, обчислюються кроки для подачі та втягування;

- задається кут повороту та кількість кроків для вибору екструдерів.

Другою частиною є функції управління:

- `feed_filament(steps, delay)`: подає або втягує пластиковий пруток.

Позитивне значення `steps` – подача, негативне – втягування;

- `select_extruder(target_extruder, delay)`: повертає двигун вибору екструдерів на потрібний кут зміни. Обчислює різницю в кроках між поточним та цільовим екструдером.

Третьою частиною є функція обробки команди `process_gcode_command(command)`:

- приймає команду G-коду (наприклад, T0, T1) та визначає цільовий екструдер;

- виконує втягування пластику на 400 мм (відстань до фізичного екструдера);
- повертає двигун вибору на потрібний кут нового екструдера;
- подає пластик на 400 мм для нового екструдера.

Четвертою частиною є основний цикл:

- очікує введення команди G-коду – обробляє команду через `process_gcode_command()`.

Програма для керування системою заміни екструдера у FDM-принтері реалізує автоматичний вибір та подачу пластикового прутка залежно від команд G-коду (T0, T1, ..., T7). Основний алгоритм включає ініціалізацію, обробку команд на зміну екструдерів, керування подачею пластику, поворот на необхідний кут для вибору екструдера та завершальні операції. Програма має наступний алгоритм.

На першому кроці відбувається ініціалізація змінних та налаштувань GPIO.

Конфігурація GPIO полягає в наступних діях:

- налаштовується бібліотека `RPi.GPIO` для керування висновками Raspberry Pi, до яких підключено два двигуни через драйвери DRV8825;
- перший двигун (подачі пластику) підключений до виведення `STEPPER_PIN_FEED`, другий двигун (вибору екструдера) підключений до `STEPPER_PIN_SELECT`.

Визначення параметрів системи:

- подача пластику, де задаються параметри шестерні подачі діаметром 13 мм. Обчислюється коло шестерні і кількість кроків для подачі (або втягування) 400 мм пластику, що дорівнює кількості кроків, необхідних одного повного циклу подачі;
- вибір екструдера, що полягає у визначенні кута повороту 45 градусів, необхідного для перемикання на наступний екструдер. Шляхом розподілу повного кола (360 °) на кут кроку двигуна (1.8 °) обчислюється кількість кроків для повороту на 45 градусів.

Встановлення початкового значення екструдера, що полягає у використанні на початку роботи екструдера T0.

На другому кроці виконуються функції керування рухом двигунів. У програмі визначено дві основні функції управління двигунами.

Функція `feed_filament (steps, delay = 0.001)`.

Ця функція керує подачею або втягуванням пластикового філаменту, обертаючи двигун подачі.

- Якщо `steps` – позитивне, пруток подається, якщо негативне – втягується;
- Цикл виконується задану кількість разів (`steps`), по черзі подаючи сигнали HIGH та LOW на виведення `STEPPER_PIN_FEED`, що змушує двигун крокувати;
- `delay` між кожним кроком дозволяє контролювати швидкість руху та забезпечує плавність роботи двигуна.

Функція `select_extruder (target_extruder, delay = 0.001)`.

Ця функція відповідає за вибір потрібного екструдера, повертаючи двигун вибору:

- розраховується різниця між поточним та цільовим екструдером. Наприклад, для переходу з T0 на T3 буде потрібно поворот на 135 градусів (3 кроки по 45 градусів);
- на основі цієї різниці (`steps_needed`) функція виконує необхідну кількість кроків, повертаючи двигун на потрібний кут для вибору цільового екструдера;
- після повороту оновлюється стан `current_extruder` на номер вибраного екструдера.

На третьому кроці виконується головна функція обробки команд G-коду `process_gcode_command(command)`.

Функція `process_gcode_command` – основа роботи програми, яка виконує всі дії із заміни екструдера на основі вхідної команди G-коду.

– Парсинг команди G-коду: Функція перевіряє, чи починається введена команда з літери T і чи є наступний символ числом (від 0 до 7). Якщо команда є коректною (наприклад, T2), функція визначає номер цільового екструдера (`target_extruder`);

Втягування прутка поточного екструдера:

– перш ніж перейти на новий екструдер, поточний пруток втягується назад на 400 мм для звільнення подачі;

– Реалізація викликом `feed_filament(-FEED_STEPS)`.

Поворот до цільового екструдера:

– функція `select_extruder(target_extruder)` викликає двигун вибору та повертає його на потрібний кут, щоб встановити новий екструдер;

– перехід до нового екструдера здійснюється за мінімальною кількістю кроків проти годинникової стрілки, використовуючи модульне обчислення (тобто поворот по колу).

Подача пластику для нового екструдера. Після встановлення нового екструдера виконується подача пластикового прутка на 400 мм за допомогою `feed_filament(FEED_STEPS)`.

В процесі подачі пластику виконується основний цикл програми. Наприкінці програми запускається цикл, який безперервно очікує команди G-коду від користувача:

– Програма прочитує введення команди (наприклад, T1, T3, ... T7);

– Передає введenu команду в `process_gcode_command(command)`, яка виконує всі необхідні дії з втягування, перемикання та подачі пластику;

– Після завершення всіх операцій з екструдером програма знову переходить у стан очікування нової команди.

На п'ятому кроці виконується завершення та очищення GPIO. У разі завершення програми (наприклад, при перериванні) виконується `GPIO.cleanup()`, очищуючи стан усіх GPIO-пінів. Це важливо для запобігання збоям у роботі крокових двигунів та захисту Raspberry Pi.

Сценарій роботи програми наступний:

Першим етапом є запуск. Включається початковий екструдер T0, Raspberry Pi готовий приймати команди.

В подальшому Raspberry Pi отримує команди G-коду (наприклад, T3):

- програма втягує поточний пруток (400 мм), щоб звільнити подачу;
- повертає механізм вибору на 135 градусів (3 кроки по 45 градусів), щоб переключитися на T3;
- подає пруток для нового екструдера (400 мм).

Очікування нової команди: Після завершення програми переходить в очікування наступної команди.

Таким чином, програма забезпечує гнучке та автоматизоване керування 8 екструдерами на FDM-принтері, виконуючи точне та плавне перемикання прутків за командами G-коду.

3.3 Розробка моделі управління кроковим двигуном системи вибору філаменту

Недоліком приводу крокового двигуна, що застосовується в системі вибору філаменту, є часті помилки регулювання. Це створює потребу в забезпеченні високої статичної та динамічної точності під час позиціонування крокового двигуна. Для розробки приводів такого типу необхідно створювати математичні моделі, здатні точно описувати перехідні процеси, які виникають при зміні режиму роботи приводу. Особливості перехідного процесу значною мірою залежать від системи керування з використанням ПІД-регулятора. Імітаційну модель системи управління із зворотним зв'язком для крокового двигуна, який використовується в системі подачі філаменту, розроблено у середовищі MATLAB&Simulink. Параметричний синтез регулятора виконаний за допомогою блоку Function Block Parameters: PID Controller у середовищі Simulink.

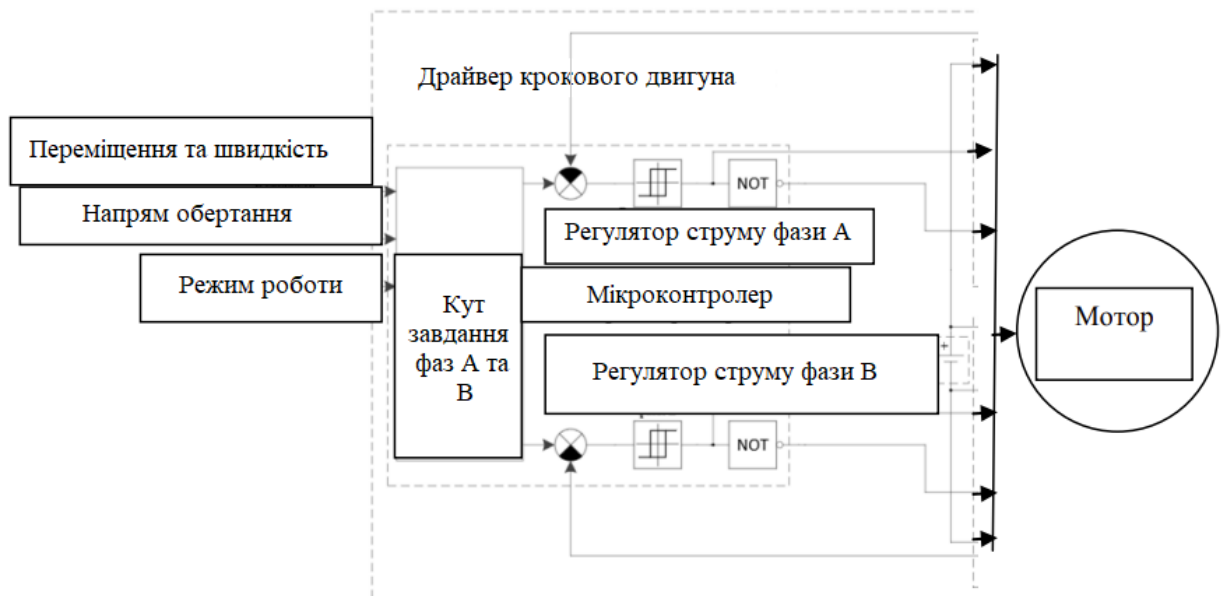


Рисунок 3.27 – Функціональна схема керування живленням крокового двигуна

Синтезовані параметри безперервного ПІД-регулятора для моделі керування кроковим двигуном дорожнього принтера забезпечують задані показники якості перехідного процесу. Час регулювання складає 0,036 с, а перехідний процес проходить без перерегулювання, що є важливим для забезпечення точного дозування пластику. Завдяки моделюванню динамічних процесів у приводі крокового двигуна вдалося визначити мінімальний час спрацьовування безперервного ПІД-регулятора.

Розглядається система керування кроковим двигуном із використанням ПІД-регулятора[18]. Такі регулятори застосовуються в системах управління для покращення характеристик перехідного процесу та підвищення точності в сталому режимі. Передатна функція ідеального ПІД-регулятора $W_{PID}(s)$ має вигляд:

$$W_{PID}(s) = K_p + \frac{K_1}{s} + K_D s, \quad (3.1)$$

де K_p , – параметр пропорційного елемента регулятора;

K_1 – інтегрального елемента регулятора;

K_D – диференціюючого елемента регулятора;

s – оператор.

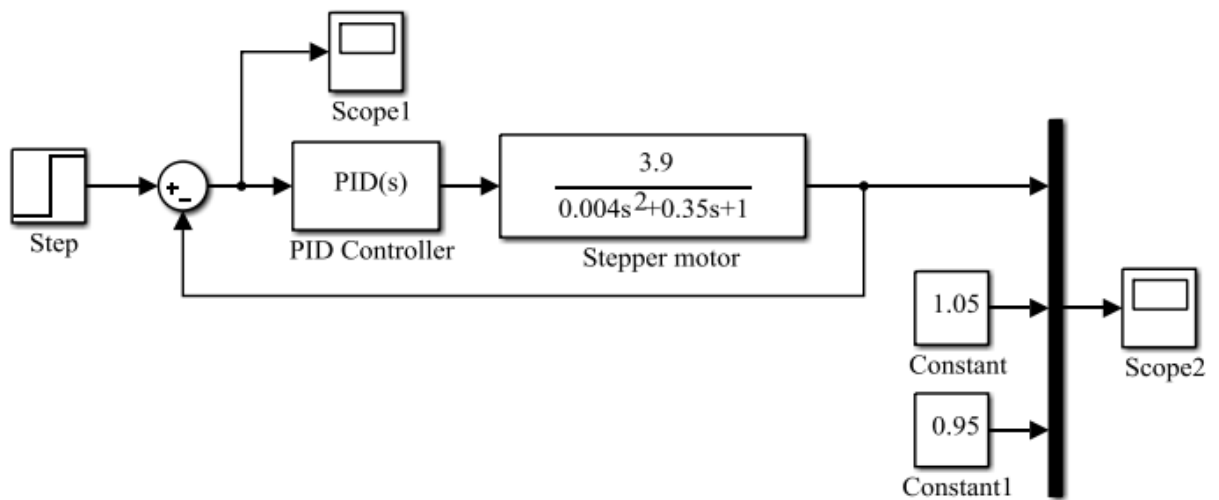


Рисунок 3.28 – Імітаційна модель системи управління з ПІД-регулятором

Імітаційну модель системи управління із зворотним зв'язком для крокового двигуна принтера розроблено в програмному середовищі MATLAB&Simulink, що зображено на рисунку 3.28. Новизна роботи визначається застосуванням сучасної технології 3D-друку.

Задано такі показники якості перехідного процесу:

- аперіодичний процес без перерегулювання;
- час регулювання менше ніж 0,05 с.

Дослідження стійкості системи у відкритому стані проведено на основі критерію Найквіста (рисунок 3.29). Параметричний синтез ПІД-регулятора виконано за допомогою функціонального блоку Function Block Parameters: PID Controller у середовищі Simulink.

Результати параметричного синтезу моделі безперервного ПІД-регулятора, виконані в MATLAB&Simulink, представлені на рисунку 3.30. Також на рисунку 3.30 наведено результати моделювання перехідного процесу системи з досліджуваним об'єктом.

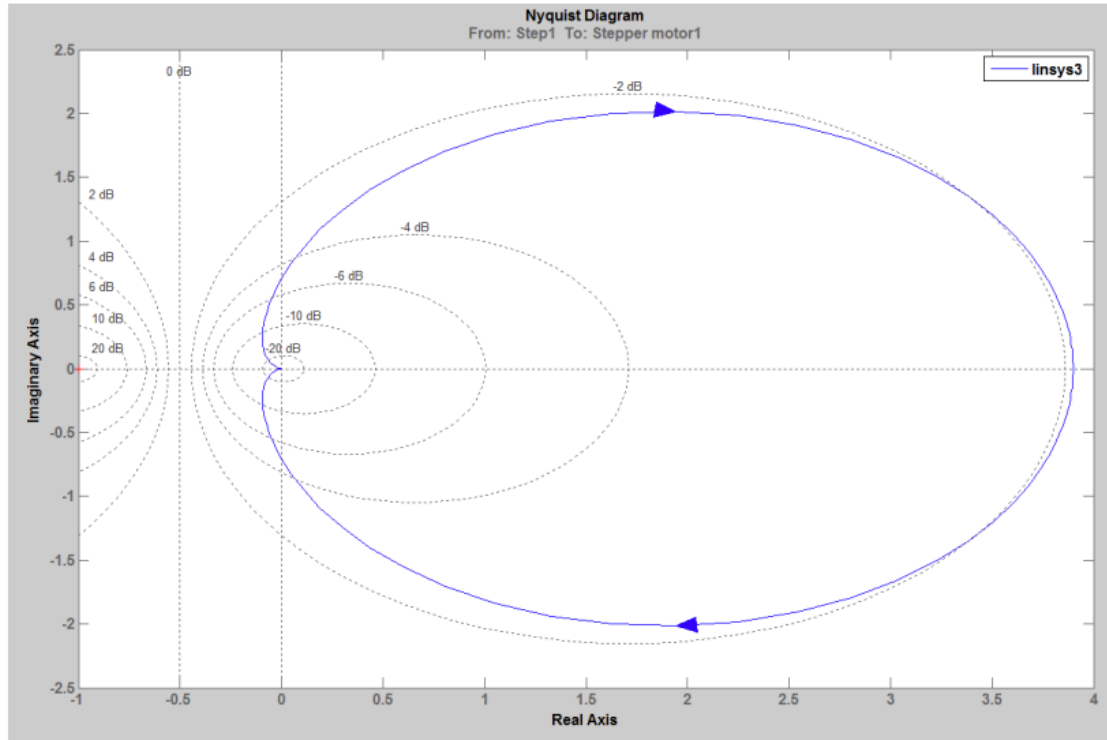


Рисунок 3.29 – Годограф Найквіста (система стійка)

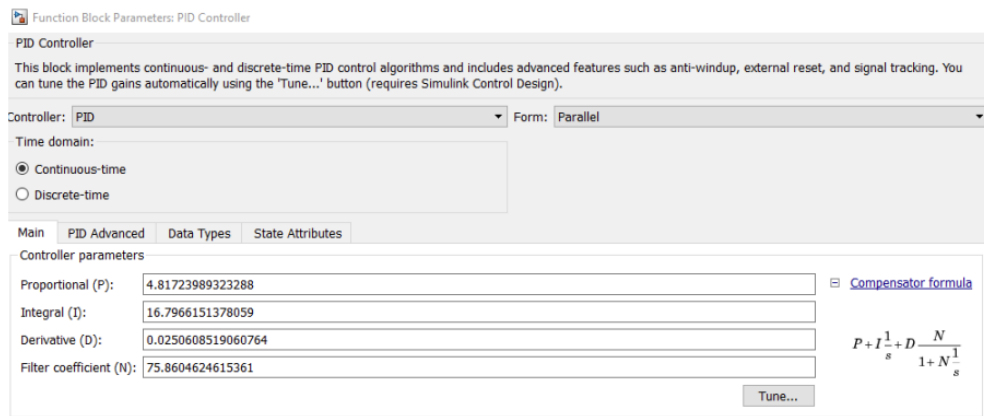


Рисунок 3.30 – Панель функціонального блоку Function Block Parameters середовища Simulink

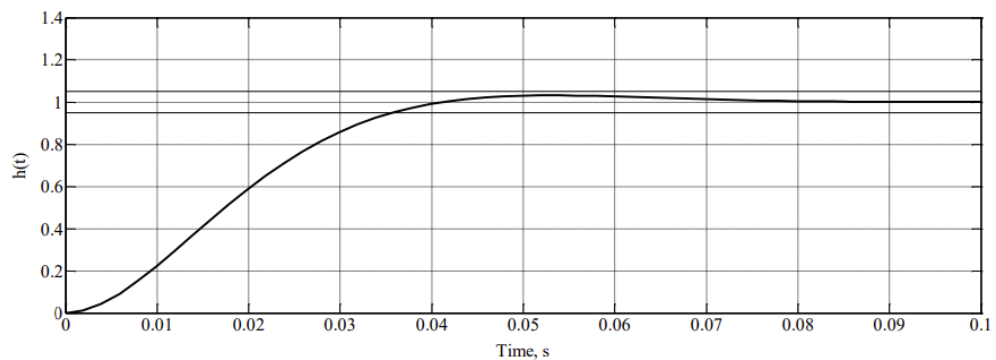


Рисунок 3.31 – Перехідна характеристика процесу управління

Синтезовані параметри моделі безперервного ПІД-регулятора для керування кроковим двигуном дорожнього принтера забезпечують досягнення заданих показників якості перехідного процесу. Час регулювання становить 0,036 с, а сам перехідний процес проходить без перерегулювання. Ця характеристика є ключовою для забезпечення високої точності руху виконавчих органів, що особливо важливо для систем дорожнього принтера.

3.4 Висновки до третього розділу

В результаті виконання робіт, що наведено у третьому розділі виконано:

- розробку принцип роботи системи подачі філаменту;
- розробку конструкції системи подачі філаменту та її 3D модель у CAD системі Autodesk Fusion;
- описано алгоритм її функціонування;
- розроблено програмне забезпечення для автоматичної заміни філаменту з керуванням командами G-коду на мові Python;
- розроблено модель управління кроковим двигуном системи вибору філаменту.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Охорона праці при роботі із розплавленими термопластмасами

Одним із найнебезпечніших факторів при роботі із FDM 3D принтерами є вплив пластмас, що знаходяться у в'язкотікучому стані. Тема охорони праці при роботі з розплавленими пластмасами вимагає серйозної уваги до всіх аспектів виробничого процесу, починаючи з підготовки робочого місця та використання засобів індивідуального захисту, закінчуючи регулярними інструктажами працівників. Нижче представлено повний огляд правил, заходів безпеки та основних вимог охорони праці при роботі з розплавленими пластмасами.

Підготовка робочого місця. Правильна організація робочого місця є одним із найважливіших аспектів безпечної роботи:

- розміщення обладнання: обладнання, таке як прес-форми, термопластавтомати та інші машини для обробки пластмас, слід розташовувати з урахуванням вимог ергономіки та безпеки. Відстань між пристроями має бути достатньою для вільного доступу, а також для забезпечення можливості швидкої евакуації у разі аварії;

- вентиляція: робоча зона повинна бути обладнана ефективною системою витяжної вентиляції, що забезпечує видалення шкідливих випарів, які можуть виділятися при нагріванні пластмас. Вентиляційні системи повинні відповідати нормативним вимогам щодо гранично допустимих концентрацій (ГДК) забруднюючих речовин;

- організація освітлення: рівень освітлення на робочому місці має відповідати стандартам, оскільки недостатня видимість підвищує ризик травмування під час роботи;

- засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): перед початком роботи кожен працівник повинен отримати засоби захисту, такі як термостійкі рукавички, захисні окуляри, маски, щитки та спецодяг, який знижує ризик опіків та інших пошкоджень.

Основні небезпеки та шкідливі фактори. При роботі з розплавленими пластмасами виникає кілька небезпечних та шкідливих факторів, які слід враховувати:

- термічні опіки: можливість отримання опіків при контакті з розплавленим пластиком або нагрітим обладнанням. Це один з найбільш поширених ризиків у цій галузі;
- хімічне отруєння: деякі види пластмас, при розплавленні, виділяють токсичні речовини, такі як фенол, формальдегід, стирол. Тривалий контакт з цими речовинами може призвести до хронічних захворювань дихальної системи;
- механічні травми: використання механічного обладнання з рухомими частинами вимагає обережності для запобігання випадковим травмам;
- ураження електричним струмом: оскільки обладнання працює на електриці, існує ризик ураження струмом у разі несправностей або неправильної експлуатації.

Вимоги до обладнання. Для забезпечення безпечної роботи обладнання має відповідати низці вимог:

- системи захисту: всі частини обладнання, що можуть становити небезпеку, повинні бути оснащені захисними кожухами, огорожами та іншими елементами, що запобігають випадковому контакту;
- матеріали з термостійкими властивостями: деталі обладнання, що контактують з розплавленими матеріалами, мають бути виготовлені з матеріалів, стійких до високих температур;
- автоматичні системи контролю: сучасні пристрої оснащені автоматикою для моніторингу температури, тиску та інших параметрів, що знижує ймовірність виникнення аварійних ситуацій;
- аварійне відключення: кнопки для аварійного відключення обладнання повинні бути розташовані в доступних місцях для швидкого доступу у разі необхідності.

Навчання та інструктаж працівників. Щоб працювати з розплавленими пластмасами, працівники повинні пройти спеціальне навчання та інструктаж з охорони праці:

- первинний інструктаж: проводиться перед початком роботи і включає загальні вимоги безпеки та правила роботи з обладнанням;
- повторний інструктаж: проводиться періодично для актуалізації знань працівників щодо нових вимог безпеки або оновлених правил;
- перевірка знань: працівники повинні регулярно підтверджувати знання з охорони праці.

Засоби індивідуального захисту. Для безпечної роботи з розплавленими пластмасами використовуються такі засоби індивідуального захисту:

- захисні окуляри або щитки: для захисту очей від бризок розплавленого матеріалу;
- термостійкі рукавички: захищають руки від опіків при контакті з гарячими поверхнями;
- захисний одяг: спецодяг повинен бути виготовлений з матеріалів, стійких до високих температур;
- протигази або респіратори: необхідні у випадках, коли виділяються токсичні пари, що можуть вплинути на здоров'я дихальних шляхів.

Надзвичайні ситуації та аварійні процедури. Робота з розплавленими пластмасами передбачає готовність до дій у випадку надзвичайних ситуацій:

- протипожежна безпека: наявність вогнегасників, встановлення систем пожежної безпеки та забезпечення належного плану евакуації є обов'язковими вимогами;
- гасіння пожежі: у випадку загоряння пластмас не можна використовувати воду, оскільки це може призвести до бризок і поширення розплаву. Найкращим рішенням є застосування порошкових вогнегасників;
- перша медична допомога: наявність аптечки та інструкцій з надання допомоги при опіках та отруєннях є обов'язковою умовою на робочому місці.

Контроль стану навколишнього середовища та здоров'я працівників. В процесі роботи слід забезпечувати постійний моніторинг стану робочого середовища та здоров'я персоналу:

- моніторинг повітря: регулярні вимірювання рівня концентрації шкідливих речовин у повітрі, використання систем оповіщення при перевищенні допустимих норм;
- медичні огляди: профілактичні огляди працівників для своєчасного виявлення симптомів захворювань, які можуть розвиватися внаслідок роботи з токсичними речовинами.

Завершення робіт та прибирання робочого місця. Після завершення роботи працівники повинні дотримуватись певних правил для безпечного завершення робочого процесу:

- охолодження обладнання: перед прибиранням необхідно дочекатися повного охолодження обладнання;
- очищення та дезактивація: очищення поверхонь робочих зон від залишків пластмас, обробка спеціальними засобами для видалення небезпечних речовин;
- перевірка стану обладнання: огляд обладнання на наявність пошкоджень, перевірка надійності кріплень, стану електричних вузлів.

Застосування всіх цих заходів охорони праці знижує ризик виникнення нещасних випадків та забезпечує створення безпечних умов праці для працівників, задіяних у роботі з розплавленими пластмасами.

Головним нормативним документом, що регламентує роботу із термопластами є «Правила охорони праці на об'єктах з переробки пластичних мас» НПАОП 25.0-1.01-12.

4.2 Вимоги до безпеки виробничого обладнання та організації робочих місць

Розміщення технологічного обладнання та засобів вибухо- і пожежозахисту у виробничих приміщеннях та на відкритих майданчиках має забезпечувати зручну і безпечну їх експлуатацію, можливість проведення ремонтних робіт та організації оперативних заходів щодо запобігання аварійним ситуаціям або локалізації аварій.

На кожному об'єкті, у приміщеннях (на ділянках) з переробки пластмас має бути схема розташування та взаємозв'язку технологічного обладнання і трубопроводів, виконана в умовних кольорах, із зазначенням запірної та регулювальної арматури, контрольно-вимірювальних приладів і автоматики (КВПіА).

Системи КВПіА виробничих процесів, системи протиаварійного автоматичного захисту (ПАЗ), а також зв'язку і сповіщення про аварійні ситуації на об'єктах необхідно монтувати та експлуатувати відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2004, НПАОП 40.1-1.21-98 та Правил безпечної експлуатації електроустановок, затверджених наказом Державного комітету України по нагляду за охороною праці від 06 жовтня 1997 року № 257, зареєстрованих в Міністерстві юстиції України 13 січня 1998 року за № 11/2451 (далі – НПАОП 40.1-1.01-97).

Основні проходи по загальному фронту обслуговування виробничого обладнання повинні бути не менше 1,5 м. Відстань між суміжними машинами з обладнанням для них повинна бути не менше 1,2 м. Робочі проходи між основними машинами, а також між машинами і стінками виробничого приміщення при необхідності кругового обслуговування повинні бути не менше 0,8 м.

Шлях руху технологічного транспорту необхідно позначити обмежувальними лініями шириною не менше 50 мм, швидкість руху транспорту не повинна перевищувати 5 км/год. Ширина проїзду для технологічного транспорту повинна становити ширину транспортного засобу плюс 1,6 м (по 0,8 м з кожного боку) до найближчого обладнання.

Транспортування вантажів необхідно проводити транспортними засобами (електрокари, автокари тощо), які відповідають вимогам. Експлуатувати транспортні засоби в несправному стані не допускається. Перевозити працівників автокарами, автотранспортом та електрокарами не допускається.

Крани усіх типів, ручні та електричні талі, лебідки для підймання вантажу, підймальні вантажозахватні механізми та пристрої необхідно установлювати та

експлуатувати відповідно до вимог Правил будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів, затверджених наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 18 червня 2007 року № 132, зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 09 липня 2007 року за № 784/14051 (далі – НПАОП 0.00-1.01-07). Забороняється стояти, проходити і працювати під підвішеним вантажем.

При розміщенні виробничого устаткування рекомендується використовувати пневмо- або вакуум-транспортери для подачі вихідного матеріалу до місця його переробки і переміщення готових деталей до місць їх пакування та складування, які не повинні ускладнювати переміщення оператора в робочій зоні.

Виробниче устаткування і оснащення об'єктів з переробки пластичних мас повинно відповідати вимогам ДСТУ 7234:2011 «Дизайн і ергономіка. Обладнання виробниче. Загальні вимоги дизайну та ергономіки», затвердженого наказом Держспоживстандарту України від 02 лютого 2011 року № 37, ДСТУ 12.2.061-2009, затвердженого наказом Держспоживстандарту України від 22 грудня 2008 року № 495.

Пускові пристрої основних машин, механізмів і апаратів мають бути заблоковані із запобіжними огорожувальними конструкціями таким чином, щоб було унеможливлено запускання їх у роботу зі знятими запобіжними огорожувальними конструкціями.

Пуансони і матриці пресів, нагрівальні пояси роторних ліній, матеріальні циліндри термопластавтоматів, головки екструдерів тощо повинні мати надійну теплоізоляцію зовнішніх поверхонь, щоб температура їх поверхонь не перевищувала 45 °С, або запобіжні пристосування для уникнення прямого контакту людини з гарячими поверхнями, якщо обладнання не дозволяє використовувати теплоізоляцію.

При звільненні обладнання (термопластавтоматів, екструдерів або іншого) від гарячих полімерних матеріалів (під час аварії, виходу браку, зупинці машин тощо) скидання матеріалу повинно здійснюватися в спеціально призначені для цього пересувні ємності з кришками і вивозитися з цеху в спеціально

встановлене місце. Місця можливих викидів розплавленого матеріалу пластмас (зона сопла термопластавтоматів, головки екструдерів тощо) повинні бути обладнані захисними екранами.

Запобіжні клапани, які встановлено на апарати, що працюють під тиском, мають відповідати вимогам ДСТУ 12.2.085:2007 «Посудини, що працюють під тиском. Клапани запобіжні. Вимоги щодо безпеки», затвердженого наказом Держспоживстандарту України від 17 жовтня 2007 року № 267.

Система очищення прес-форм після знімання готових виробів на всіх видах обладнання, що використовується, повинна виключати потрапляння газоподібних продуктів і пилу в робоче приміщення. При обробці виробів з пластмас у камерах машин (при нагріванні, промивці, обробці виробів тощо) перебування працівників усередині камер не допускається.

Електричні установки та електричні мережі необхідно улаштувати, утримувати, експлуатувати і обслуговувати відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.01-97, НПАОП 40.1-1.21-98, Державних санітарних норм і правил при роботі з джерелами електромагнітних полів, затверджених Міністерством охорони здоров'я України від 18 грудня 2002 року № 476, зареєстрованих в Міністерстві юстиції України 13 березня 2003 року за №203/7524 (далі - ДСанПіН 3.3.6.096-2002).

Роботодавець повинен забезпечувати працівників під час виконання робіт у технологічних процесах на об'єктах з переробки пластичних мас, пов'язаних з обслуговуванням електроустановок, засобами електрозахисту від ураження електричним струмом та від впливу електричного поля. Перелік засобів електрозахисту, вимоги до них, обсяги і норми випробувань, порядок застосування, зберігання їх, а також норми комплектування повинні відповідати Правилам експлуатації електрозахисних засобів, затвердженим наказом Мінпраці України від 05 червня 2001 року № 253.

Усе електрообладнання (корпуси електричних машин, апаратів, світильників, розподільних пристроїв, металеві корпуси пересувних та переносних електроприймачів) повинно мати надійне захисне заземлення або/та занулення відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.01-97, НПАОП 40.1-1.21-98,

затверджених постановою Державного комітету СРСР по стандартах від 15 травня 1981 року № 2404.

Виробниче обладнання з електричним приводом повинно мати засоби (пристрої) захисту від ураження електричним струмом (зокрема у випадках помилкової дії працівників, які обслуговують обладнання) згідно з вимогами ДСТУ 7237:2011 «Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту», затвердженого наказом Держспоживстандарту України від 02 лютого 2011 року № 37.

На приводах комунікаційних апаратів мають бути чітко зазначені положення «Включено» та «Відключено» відповідно до технологічної схеми розташування та взаємозв'язку технологічного обладнання і трубопроводів.

Робоче місце не повинно бути захищене сторонніми предметами, готовою продукцією та відходами виробництва. 5. Вимоги до безпеки персоналу під час виробничого процесу та застосування засобів захисту

4.3 Вимоги до безпеки персоналу під час виробничого процесу та застосування засобів захисту

Сторонні особи можуть допускатися до виробничих приміщень та робочих місць тільки в супроводі інженерно-технічних працівників підприємства.

Для захисту працюючих від дії небезпечних та шкідливих виробничих факторів необхідно використовувати засоби колективного захисту відповідно до вимог ДСТУ 7238:2011 «ССБП. Засоби колективного захисту працюючих. Загальні вимоги та класифікація», затвердженого наказом Держспоживстандарту України від 02 лютого 2011 року № 37. Обладнання, робота якого створює підвищений рівень шуму, повинно бути розміщене в окремих приміщеннях з виключенням можливості акустичного зв'язку між приміщеннями, або ці приміщення повинні оснащуватись огорожувальними та звукопоглинальними пристроями (обличкувальні, штучні звукопоглиначі), глушниками аеродинамічного шуму. Саме обладнання повинно мати звукоізолювальні пристрої (кожухи, екрани, кабіни). Обладнання, під час роботи якого виникає

підвищений рівень вібрації, повинно оснащуватись віброізолювальними, віброгасильними, вібропоглинальними або огорожувальними пристроями. Для захисту від підвищеної запиленості та загазованості, а також нормалізації повітряного середовища виробничих приміщень і робочих місць необхідно застосовувати вентиляційні системи, які забезпечують рівномірну температуру та стан повітряного середовища. Для уникнення дії шуму та вібрації, механічної дії, уражень електричним струмом та підвищених температур поверхонь устаткування, матеріалів, підвищеної запиленості та загазованості, а також відхилень від нормальних параметрів повітряного середовища виробничих приміщень і робочих місць також можуть застосовуватися пристрої дистанційного керування обладнанням та технологічним процесом.

Працівники, зайняті на роботах зі шкідливими та небезпечними умовами праці, а також роботах, пов'язаних із забрудненням або несприятливими метеорологічними умовами, повинні забезпечуватися спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту відповідно до Положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту, затвердженого наказом Держгірпромнагляду України від 24 березня 2008 року № 53, зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 21 травня 2008 року за № 446/15137 (далі – НПАОП 0.00-4.01-08).

Засоби індивідуального захисту мають відповідати вимогам Технічного регламенту засобів індивідуального захисту, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 27 серпня 2008 року № 761, ДСТУ 7239:2011 «ССБП. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація», затвердженого наказом Держспоживстандарту України від 02 лютого 2011 року № 37, ГОСТ 12.4.103-83 «ССБТ. Одежда специальная защитная, средства индивидуальной защиты ног и рук. Классификация», затвердженого постановою Державного комітету СРСР по стандартах від 17 грудня 1983 року № 6082, ГОСТ 12.4.013-85 «ССБТ. Очки защитные. Общие технические условия», затвердженого постановою Державного комітету СРСР по стандартах від 13 травня 1985 року № 1336, інших чинних нормативних документів на відповідний

вид виробів і бути придатними за розмірами. Працівники, зайняті на роботах з переробки пластичних мас, повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту відповідно до вимог Норм безплатної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту працівникам хімічних виробництв, затверджених наказом Державного комітету України з нагляду за охороною праці від 07 27 вересня 2004 року № 194, зареєстрованих в Міністерстві юстиції України 26 жовтня 2004 року за № 1362/9961 (далі - НПАОП 24.0-3.01-04), Норм безплатної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту працівникам хімічних виробництв, затверджених наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 13 грудня 2007 року № 305, зареєстрованих в Міністерстві юстиції України 31 березня 2008 року за № 264/14955 (далі – НПАОП 24.0-3.03-07).

Працівники при отриманні спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту повинні бути проінструктовані про

правила користування цими засобами та ознайомлені з вимогами по догляду за ними. При навчанні та інструктажі з охорони праці працівників необхідно зазначати, що на робочих місцях, де концентрація пилу перевищує або може перевищувати встановлені ГДК, носіння респіраторів є обов'язковим. Роботодавцем повинні бути визначені типи респіраторів для кожного робочого місця з урахуванням найбільшого рівня концентрації пилу, заміряного на робочому місці, і коефіцієнта затримки пилу, властивого для даного типу респіратора.

Кожен працівник повинен знати місце розташування засобів пожежогасіння та вміти користуватися ними, бути ознайомленим з основними вимогами виробничої та особистої гігієни, правилами надання першої медичної допомоги.

Працівники, на робочому місці яких еквівалентний рівень шуму перевищує допустимий рівень, повинні забезпечуватися засобами індивідуального захисту органів слуху, а саме: вкладками для вух та іншими аналогічними засобами (протишумовими вкладками); протишумовими

науушниками; протишумовими шоломами; протишумовими захисними пристроями – відповідно до вимог ГОСТ 12.4.051-87 «ССБТ. Средства индивидуальной защиты органов слуха. Общие технические требования и методы испытаний», затвердженого постановою Державного комітету СРСР по стандартах від 29 жовтня 1987 року № 4082, ДСТУ EN 352-1-2002 «Засоби індивідуального захисту органів слуху. Вимоги безпеки і випробовування. Частина 1. Протишумові науушники», затвердженого наказом Держстандарту України від 12 липня 2002 року № 433, та інших чинних нормативних документів.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи на рівень магістра було отримано такі результати:

- проаналізовано технологію 3D-друку FDM, конструкцію основних частин принтера та їх кінематики;
- проаналізовано системи, що використовуються для друку декількома матеріалами, їх переваги та недоліки;
- проаналізовано ПЗ, яке дозволяє друкувати декількома матеріалами, їх переваги та недоліки. Визначено ПЗ, яке має більше переваг серед аналогів;
- розроблено конструкцію система багатокольорового друку в ПЗ Autodesk Fusion 360, визначено основні компоненти, що використовуються в складі системи;
- розроблено ПЗ системи мультиматеріального друку на основі ПЗ Klipper з використанням макросів для роботи системи;
- розроблена система керування кроковим двигуном, що використовується в мультиматеріальній системі;
- розроблена охорона праці для роботи з термопластавтоматами.

Завдяки особливостям конструкції, що розроблено, отримана 100% сумісність філаментів, що використовуються у одному шарі в порівнянні з іншими системами, що використовують в своєму складі заміну інструментів такими як Tool change або Dual X Carriage, або мають в своїй конструкції декілька сопіл, з нагрівальними блоками, що потребують встановлення відстані в прошивці. Це обумовлено використанням стандартного екструдера з одним соплом та радіатором і системою заміни філаменту.

В подальшому планується впровадження системи мультиматеріального друку в лабораторне устаткування з подальшим його використанням для навчання.

Було опубліковано 1 публікацію, що була надрукована в «Автоматизація та приладобудування» ADED 2024(випуск 2) [електронне видання] [4].

Отримані результати можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме п. 9.4 «Сприяти прискореному розвитку високо- та середньовисокотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» та кластерного підходу за напрямками: розвиток інноваційної екосистеми; розвиток інформаційно-телекомунікаційних технологій (ІКТ); застосування ІКТ в АПК, енергетиці, транспорті та промисловості; високотехнологічне машинобудування; створення нових матеріалів; розвиток фармацевтичної та біоінженерної галузей».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008-15. документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення [Текст] – Введ. 2015 – 06 – 22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29с.

2.Методичні вказівки з «Розробки й оформлення магістерської атестаційної роботи» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, В.В. Косенко, В.В. Євсєєв. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 55 с.

3. Невлюдов, І.Ш. дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Текст] / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова – Київ – 58, пр. Космонавта Комарова, 1, 2016 – 320с.

4. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ («Automation and Development of Electronic Devices» ADED–2018) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.].–Харків : ХНУРЕ, 2024.–Вип. 2.– с.

5. 3D ДРУК методом наплавлення (FDM) ; режим доступу (https://3ddevice.com.ua/eu/3d-pechat-fdm/?srsltid=AfmBOopUDJF1itiBs_Ts9hneDd5JXUIaL8bPRUMfYh103HjtQ68sbCkl.) дата використання [25.11.24].

6.Екструдер E3D V6 Пряма подача; режим доступу (<https://3dreams.com.ua/ua/product/экструдер-e3d-v6-прямая-подача/>) дата використання [25.11.24].

7. Кінематика 3D-принтерів. Види та особливості. Робимо свій вибір; режим доступу (<https://3dreams.com.ua/ua/product/экструдер-e3d-v6-прямая-подача/>) дата використання [25.11.24].

8. Двоколірний та триколірний друк на FDM 3D принтерах. Мультіколірний 3D друк. 3D принтери з двома екструдерами; режим доступу (<https://www.3dprinter.ua/dvokolirnyj-ta-trykolirnyj-druk-na-fdm-3d-prynterah-multykolornyj-3d-druk-3d-pryntery-z-dvoma->

19. Євсєєв В.В. Проектування мобільних роботів на базі одноплатних комп'ютерів (Raspberry Pi и мови Python 3.6) // Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В. Підручник. – Харків : 2020. С. 257.
20. Nevliudov, I., & et al. (2022). Object Recognition for a Humanoid Robot Based on a Microcontroller. In 2022 IEEE XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), IEEE, 61-64.
21. Nevliudov, I., & et al.. (2020). Method of Algorithms for Cyber-Physical Production Systems Functioning Synthesis. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 8(10), 7465-7473.
22. Невлюдов І.Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації. Збірник задач: Навчальний посібник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, Г.В. Пономарьова, А.О. Функендорф. Кривий Ріг: КК НАУ. 2018. – 332 с.
23. Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В., Максимова С.С. ВЕАМ робототехніка: Навчальний посібник. – Oktan Print – Prague.: 2024.- 276 с.
24. Невлюдов І.Ш. Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації. Частина 1: підручник. Харків: ФОП Панов А.М., 2021. – 604 с.
25. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2023. 49 с.
26. Охорона праці на виробництві // Сайт GCC, 2024. URL: <https://gc.ua/uk/oxorona-pracivofisivimogidorobochogomiscyaofisnogopracivnika/> (дата звернення: 10.12.2024).