

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

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

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

рівень вищої освіти другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

Розроблення автоматизованого управління температурою при екструзії полімерного матеріалу в процесі тривимірного друку  
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,  
групи КІТПВзм-24-1

Дмитро БОНДАРЕНКО

(прізвище, ініціали)

Спеціальності 174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва  
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Миколай ЗАМІРЕЦЬ  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Я, Бондаренко Дмитро Миколайович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

14 грудня 2025 р.

Handwritten signature in black ink, appearing to read 'ДБонч'.

Дмитро БОНДАРЕНКО

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики та комп'ютеризованих технологій  
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані та технології  
робототехніка  
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна  
Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р. (підпис)

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Бондаренку Дмитру Миколайовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматизованого управління температурою при екструзії полімерного матеріалу в процесі тривимірного друку

Затверджена наказом університету від 11.03.2025 р. №192 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 30 грудня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи: \_\_\_\_\_

3.1 Аналіз технологій 3D-друку;

3.2 Фізико-теплові процеси під час екструзії полімерних матеріалів;

3.3 Методи вимірювання та регулювання температури;

3.4 Модуль адаптивного керування температурою;

3.5 Методика проведення експериментів;

3.6 Дослідження стабільності температури в екструдері.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: \_\_\_\_\_

4.1 Вступ;

4.2 Теоретичні основи процесу екструзії полімерів у технології FFF/FDM;

4.3 Опис експериментального обладнання та засобів вимірювання;

4.4 Експериментальні дослідження та результати;

4.5 Охорона праці;

4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал у вигляді презентації формату PowerPoint (\*.ppt) 12– с. формату А4

---

---

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

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

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір матеріалів для проведення розробки	09.09.2025	виконано
2	Збір матеріалів для дослідження	21.09.2025	виконано
3	Розробка розділу «Аналіз предметної області»	01.10.2025	виконано
4	Розробка розділу «Розрахунок макету для проведення дослідження»	08.10.2025	виконано
5	Розробка розділу «Розрахунок макету для проведення дослідження»	13.10.2025	виконано
6	Оформлення кваліфікаційної роботи	17.11.2025	виконано
7	Подання роботи до нормоконтролю		
8	Подання роботи на перевірку академічної доброчесності		
9	Подання у ЕК		

Дата видачі завдання 27.08.2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Дмитро БОНДАРЕНКО  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

проф. Миколай ЗАМІРЕЦЬ  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 67 с., 5 табл., 28 рис., 2 дод., 29 джерел.

ЕКСТРУЗИЯ ПОЛІМЕРІВ, ТЕМПЕРАТУРНИЙ КОНТРОЛЬ, АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ, FFF/FDM-ДРУК, ТЕРМОРЕГУЛЯЦІЯ ЕКСТРУДЕРА.

Об'єкт дослідження – процеси тривимірного друку за технологією FFF/FDM.

Предмет дослідження – вплив температурних режимів екструзії полімерного матеріалу на якість та стабільність формування виробів.

Мета роботи – розробити модель та підхід до автоматизованого управління температурою під час екструзії філаменту, що забезпечує підвищення точності, міцності та повторюваності процесу друку за технологією FFF/FDM.

У роботі досліджено процеси нагрівання, плавлення та подачі полімеру в екструдері й встановлено, що коливання температури навіть на 3–5 °C можуть спричинити дефекти, деформації та зниження міцності виробів. Проаналізовано можливості та обмеження існуючих систем температурного контролю FFF/FDM-принтерів.

На основі запропонованої математичної моделі сформовано концепцію адаптивного регулювання температури, яке автоматично коригує нагрів залежно від режимів друку та властивостей матеріалу. Результати можуть бути використані для вдосконалення екструзійних систем і підвищення якості друкованих виробів.

## ABSTRACT

The explanatory note contains: 67 p., 5 tabl., 28 fig., 2 app., 29 sources.

POLYMER EXTRUSION, TEMPERATURE CONTROL, ADAPTIVE CONTROL, FFF/FDM PRINTING, EXTRUDER THERMOREGULATION.

The object of research is three-dimensional printing processes using FFF/FDM technology.

The subject of the study is the influence of polymer extrusion temperature regimes on the quality and stability of product formation.

The aim of the work is to develop a model and approach to automated temperature control during filament extrusion, which ensures increased accuracy, strength, and repeatability of the printing process using FFF/FDM technology.

The paper investigates the processes of heating, melting, and feeding polymer in an extruder and establishes that temperature fluctuations of even 3–5 °C can cause defects, deformations, and a reduction in the strength of products. The possibilities and limitations of existing temperature control systems for FFF/FDM printers are analyzed.

Based on the proposed mathematical model, a concept of adaptive temperature control has been developed, which automatically adjusts heating depending on the printing modes and material properties. The results can be used to improve extrusion systems and increase the quality of printed products.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	9
Вступ.....	10
1 Теоретичні основи процесу екструзії полімерів у технології FFF/FDM.....	12
1.1 Принцип роботи технології FFF/FDM .....	12
1.2 Фізико-теплові процеси під час екструзії полімерних матеріалів .....	14
1.3 Класифікація матеріалів для FFF/FDM-друку .....	15
1.4 Вплив температури на якість виробів .....	19
1.5 Методи вимірювання та регулювання температури .....	21
1.6 Алгоритми адаптивного температурного керування .....	22
1.7 Висновки до першого розділу.....	23
2 Опис експериментального обладнання та засобів вимірювання .....	25
2.1 Будова та характеристики принтера для проведення досліджень .....	25
2.2 Модуль адаптивного керування температурою .....	27
2.3 Методи контролю та валідації температурних режимів .....	31
2.4 Налаштування температурних параметрів у прошивці Klipper .....	33
2.5 Аналіз САУ для датчику температури екструдера.....	35
2.6 Висновки до другого розділу .....	38
3 Експериментальні дослідження та результати.....	40
3.1 Методика проведення експериментів .....	40
3.2 Проведення дослідження.....	43
3.3 Побудова регресійно-кореляційної моделі.....	46
3.4 Висновки до третього розділу .....	52
4 Охорона праці .....	54
4.1 Опис лабораторного переміщення .....	54
4.2 Небезпечні та шкідливі фактори FFF/FDM-технології.....	55
4.3 Вентиляція та контроль повітряного середовища .....	56
4.4 Висновки до четвертого розділу.....	57

Висновки .....	57
Перелік джерел посилання .....	60
Додаток А Результати дослідження .....	64
Додаток Б Демонстраційний матеріал .....	66

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene;

APID – Adaptive PID;

BVOH – Butenediol Vinyl Alcohol Copolymer;

FDM – Fused Filament Fabrication;

FFF – Fused Deposition Modeling;

HIPS – High Impact Polystyrene;

MPC – Model Predictive Control;

PA – Polyamide;

PC – Polycarbonate;

PETG – Polyethylene Terephthalate Glycol-modified;

PLA – Polylactic Acid;

PVA – Polyvinyl Alcohol;

PID – Proportional-Integral-Derivative;

TPE – Thermoplastic Elastomer;

TPU – Thermoplastic Polyurethane.

## ВСТУП

У наш час, коли адитивні технології активно розвиваються, а попит на швидке виготовлення прототипів та виробництва малосерійної продукції зростає. Все більш очевидним, є попит у забезпечені високої точності і стабільності процесів 3D-друку. Серед найпопулярніших технологій сьогодні є технологія FFF/FDM, яка працює за принципом поетапного створення моделі шляхом розплавлення та подачі полімерного філаменту. Цей метод став популярним завдяки тому, що він доступний, універсальний і недорогий. Саме тому його однаково зручно використовувати вдома, у процесі навчання та навіть у промисловості коли є необхідність у швидкому виготовленні надійних і функціональних виробів.

Одним із факторів, що впливають на якість друку за цією технологією, є стабільність підтримки температури під час екструзії шарів моделі. Навіть найменші коливання температури можуть суттєво вплинути на в'язкість полімеру, рівномірність подачі матеріалу, спікання шарів один до одного та загальну якість поверхні. Тому важливо точно контролювати температуру друку філаменту, щоб забезпечити надійність і повторюваність процесу.

Актуальність цієї роботи є в тому, що необхідно вдосконалювати підходи до стабілізації температурних коливань екструдера під час друку філаменту та впроваджувати нові адаптивні системи керування процесом.

Такі системи, зможуть не тільки автоматично регулювати параметри нагріву сопла, а й керувати процесом з урахуванням безлічі факторів. Створення ефективної моделі та сучасної автоматизованої системи контролю температури – це ключовий крок до покращення якості готових виробів, точності друку та стабільної роботи принтера, навіть у складних умовах.

Мета роботи – розробити модель та підхід до автоматизованого керування температурою під час екструзії, що забезпечать підвищення точності, міцності та повторюваності друку за технологією FFF/FDM.

Об'єкт дослідження – процеси 3D-друку за технологією FFF/FDM.

Предмет дослідження – вплив температурних режимів екструзії полімеру на стабільність формування виробів та їх якісні характеристики.

Для реалізації поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

– дослідити процес екструзії полімерних матеріалів у FFF/FDM-друці та визначити чинники, що впливають на стабільність температури;

– побудувати модель залежності між температурою екструзії та якістю формування шарів;

– провести експериментальну перевірку дієвості запропонованого способу автоматизованого керування температурою;

– виконати оформлення кваліфікаційної роботи відповідно до вимог ДСТУ 3008:2015 [1] та методичних рекомендацій для здобувачів другого (магістерського) рівня спеціальності 174 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва» [2].

Результати дослідження також узгоджуються з цілями сталого розвитку: ЦСР 4, ЦСР 9 та ЦСР 12.

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ ПОЛІМЕРІВ У ТЕХНОЛОГІЇ FFF/FDM

## 1.1 Принцип роботи технології FFF/FDM

Технологія FFF/FDM базується на принципі поетапного формування виробу шляхом екструзії розплавленого полімерного матеріалу. Під час друку термопластичний філамент подається в нагрівальний блок (екструдер), де його нагрівають до температури плавлення філаменту. Потім він переходить у в'язкого стану і видавлюється через сопло у вигляді тонкої нитки. Друкуюча головка переміщується в необхідні координати видавлюючи матеріал на платформу для друку [3]. Матеріал охолоджується та твердне, утворюючи суцільну структуру (рис. 1.1).

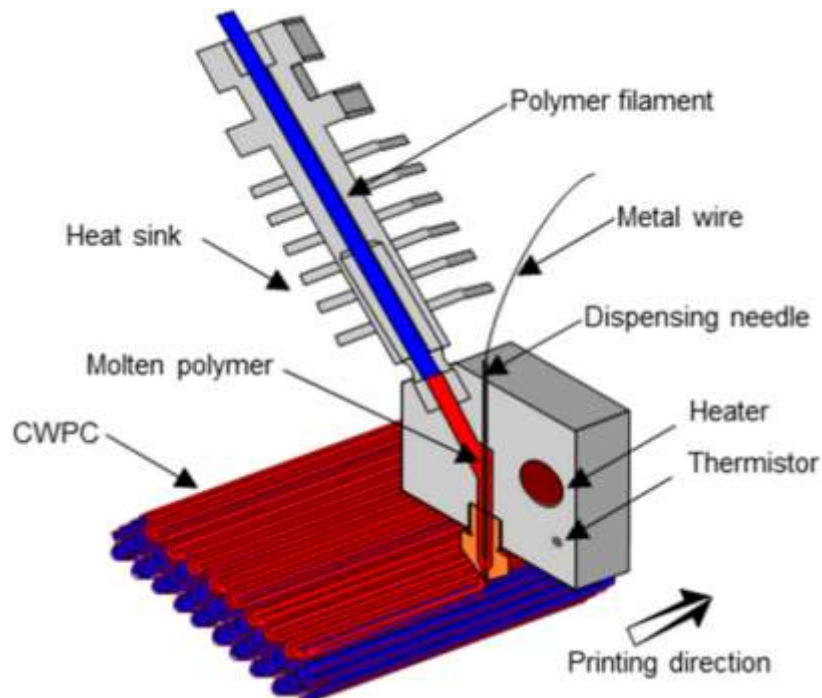


Рисунок 1.1 – Схема FFF/FDM 3D-друку

Основні етапи цього процесу включають:

– підготовку 3D-моделі, її розподіл на шари за допомогою слайсера;

– створення G-коду та виконання цих команд принтером.

Температура екструзії – є один з найважливіших параметрів у цій технології. Адже вона впливає на в'язкість матеріалу, стабільність подачі філаменту та адгезію між шарами. Зазвичай система нагріву складається з нагрівача і температурного датчика (термістора), які контролюються мікроконтролером. Щоб підтримувати стабільну температуру, зазвичай використовують PID-регулятор, який налаштовує потужність нагрівача екструдера відповідно до заданого режиму. Але під час друку теплове навантаження постійно змінюється, від: варіюється швидкість подачі матеріалу;

- прискорення руху друкуючої головки;
- переходу між шарами моделі;
- охолодження моделі.

Через це температура може коливатися, що в свою чергу, впливає на якість готових деталей. Це зумовлює необхідність удосконалення системи керування та впровадження адаптивних алгоритмів температурного регулювання (рис. 1.2).

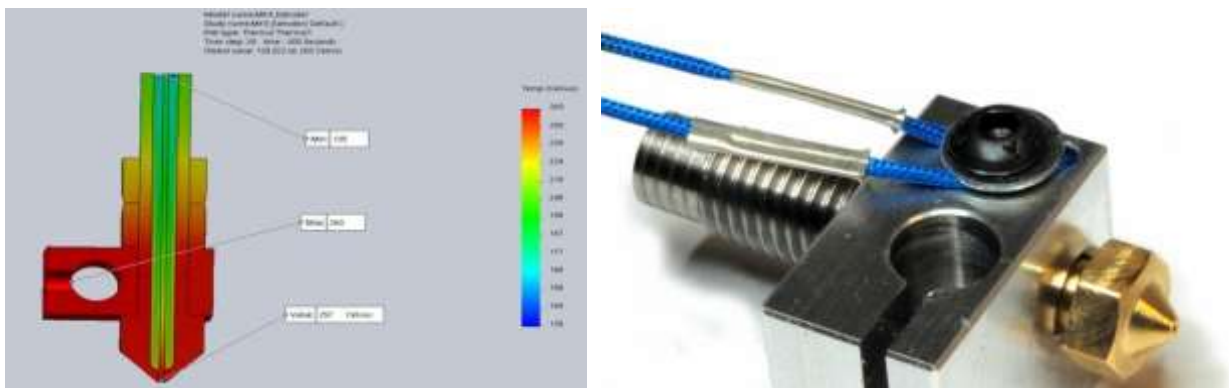


Рисунок 1.2 – Принцип нагріву екструдера

Таким чином, основний принцип роботи FFF/FDM ґрунтується на контрольованому процесі плавлення та нанесення полімерного матеріалу. Стабільність температури екструзії є одним із ключових факторів, що забезпечують необхідної точних і якісних друкованих виробів.

## 1.2 Фізико-теплові процеси під час екструзії полімерних матеріалів

Процес екструзії філаменту в технології FFF/FDM ґрунтується на поступовому нагріванні, плавленні та нанесенні матеріалу на робочу платформу або на вже створені шари. Філамент потрапляє в нагрівальний вузол екструдера, де проходить через кілька температурних зон, а саме [4]:

- зону прогріву;
- зону плавлення;
- зону стабільного розплаву.

У першій зоні матеріал пом'якшується, у другій інтенсивне поглинає тепло від нагрівального елемента екструдера та переходить у в'язкоплинний стан, після чого у третій зоні досягає стабільної в'язкості, придатної для рівномірної екструзії (рис. 1.3).

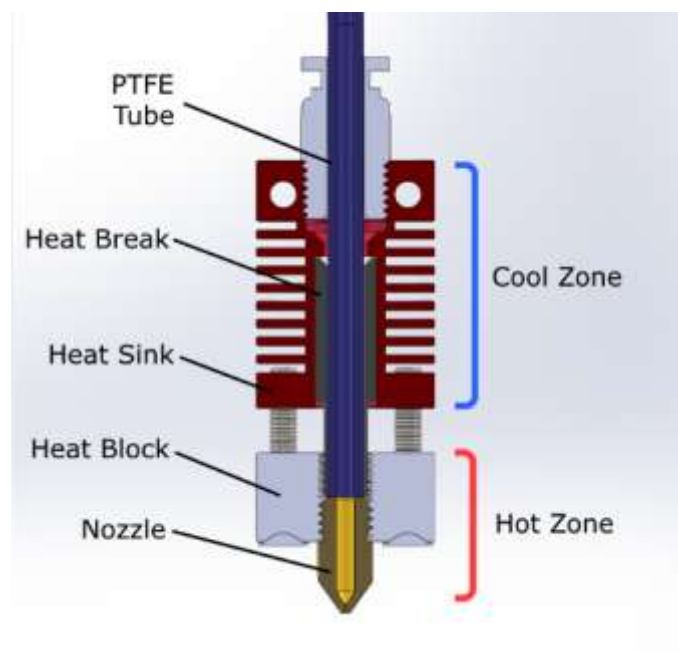


Рисунок 1.3 – Будова екструдера для друку

Температура має великий вплив на текучість філаменту скрізь сопло екструдера:

- якщо в'язкість матеріалу низька, це може призвести до загущення та пропусків у моделі, через відсутність подачі матеріалу через сопло;

– якщо в'язкість висока, то до розтікання шарів матеріалу.

В обох випадках ці сценарії можуть знизити геометричну точність та міцність друкованого виробу.

Тепловий бар'єр або «heat break» виконує важливу роль, ізолюючи верхню частину екструдера від надмірного нагріву. Це допомагає уникнути передчасного розм'якшення філаменту. Якщо температура розподіляється нерівномірно або бар'єр працює неефективно, може виникнути “тепловий підйом”, що призводить до закупорок і нестабільності подачі [5].

Після виходу з сопла філамент швидко охолоджується, формуючи нові шари моделі. Температурні перепади у момент екструзії визначають якість міжшарової адгезії 3D-моделі. Якщо охолодження філаменту відбувається занадто швидко, то це може знизити міцність зв'язку між шарами, а якщо занадто повільно, то призвести до деформації або провисання матеріалу. На процес охолодження впливають робота вентиляторів обдува моделі, температура навколишнього середовища та властивості філаменту.

Різні полімери мають різні теплофізичні параметри, такі як [6]:

- температура плавлення;
- теплопровідність;
- теплоємність;
- швидкість кристалізації.

Ці параметри визначають нагрівання та охолодження філаменту, його в'язкість, формування нитки та адгезію між шарами.

### 1.3 Класифікація матеріалів для FFF/FDM-друку

Термопласти для FFF/FDM-друку, мають різні фізико-механічні характеристики. Ці властивості визначають, як вони реагують на нагрівання та екструзію, а також впливають на якість і точність готових виробів. Правильний вибір матеріалу, є дуже важливим показником для стабільного процесу друку. Кожен полімер має свої унікальні характеристики, такі як температури

плавлення, в'язкість розплаву, теплопровідність, коефіцієнт усадки, які впливають на режими друку та вимоги до температурного контролю.



Рисунок 1.4 – Філаменти для 3D-друку

Одним з най частіше вживаним є PLA (Polylactic Acid), який має перевагу за рахунок простотою роботи під час друку, низькою усадкою та високою точністю формування моделей. Завдяки невисокій температурі плавлення (від 190 °C до 210 °C) та стабільності розплаву, PLA використовується для створення точних моделей [7]. Проте, він має низьку термостійкість і може бути досить крихким (рис. 1.5а).

PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol-modified), є більш конструктивним філаментом. Він має високу міжшарову адгезію та помірну температуру друку [8]. Однак підвищення температури екструзії може призвести до надмірного утворення ниток або крапель на зовнішніх стінках моделі, тому дуже важливо підтримувати точний контроль над налаштуваннями температури та охолодженням (рис. 1.5б).

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) – це міцний, дешевий та механічно стійкий матеріал, який часто використовується у технічних виробках. Для роботи з ним необхідна більш висока температура екструзії та стабільного теплового середовища (закрита нагрівальна камера 3D-принтера) [9]. З недоліків цього полімеру, можна виділити, що з цим матеріалом важка працювати, оскільки навіть незначні коливання температури можуть призвести до деформації,

розшарування або викривлення від столу моделі, що робить контроль температури абсолютно необхідним (див. рис. 1.5в).



а)



б)



в)

а – приклад PLA; б – приклад PETG; в – приклад ABS

Рисунок 1.5 – Будова екструдера для друку

До гучків філаментів можна віднести TPU та TPE (Thermoplastic Polyurethane та Thermoplastic Elastomer), які відрізняються високою еластичністю та зносостійкістю. З недоліків гнучких філаментів, є низька жорсткість ускладнює процес подачі та екструзії [10]. Для таких філаментів надзвичайно важливими є точний контроль температури та швидкості подачі матеріалу до екструдера, а також стабільність роботи екструдера, адже навіть незначні коливання можуть вплинути на рівномірність потоку (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Приклад друку з TPU/TPRE

Також одним з надійних конструктивних філаментів є Nylon. Він має найвищу міцність, гнучкість та стійкість до механічного зношування серед усіх інших пластиків. Проте цей матеріал має високу температуру плавлення та дуже схильний до випиткування вологою з навколишнього середовища, тому його потрібно попередньо висушити та ретельно контролювати температуру під час друку [11]. Навіть невелике відхилення температури може вплинути на рівномірність екструзії, відхилення розмірів моделі та адгезію між шарами, (рис. 1.7).

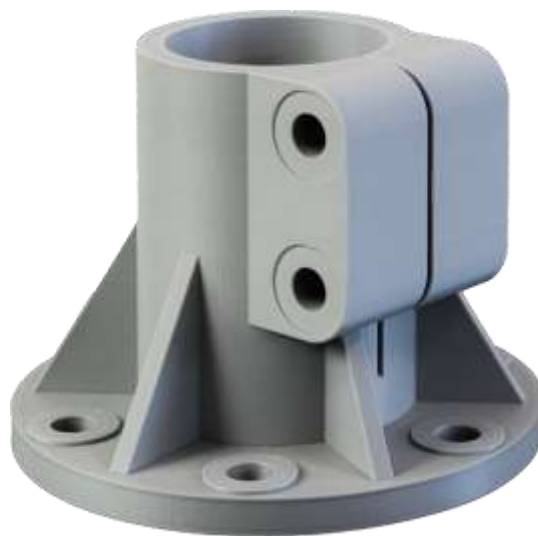


Рисунок 1.7 – Приклад друку з Nylon

Нижче наведено класифікацію найбільш поширених матеріалів для FFF/FDM-друку та їх основні властивості, табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Температурні властивості філаменту

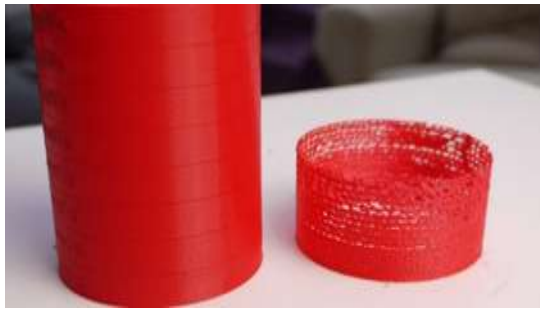
Матеріал	Температура друку, °C	Особливості під час екструзії
ABS	230–260	Потребує стабільної високої температури; ризик деформацій при нерівномірному відведенні тепла
BVOH (Butenediol Vinyl Alcohol Copolymer)	190–220	Перегрів швидко руйнує структуру; важливо точне регулювання температури
HIPS (High Impact Polystyrene)	220–250	Потребує рівномірного нагріву, чутливий до різкого охолодження
PA (Polyamide)	240–270	Висока в'язкість у зоні плавлення; швидко втрачає якість при перегріві
PC (Polycarbonate)	260–310	Чутливий до перепадів температур; потребує потужного нагрівального блока
PETG	220–250	Схильний до ниток (stringing) при перегріві; потрібна точна робота охолодження
PLA	180–220	Найменш вимогливий до контролю; перегрів спричиняє розтікання та втрату деталізації
PVA (Polyvinyl Alcohol)	190–210	Перегрів руйнує структуру; вимагає точного температурного керування
TPE	210–240	Змінює в'язкість при мінімальних коливаннях температури; складний для стабільної екструзії
TPU	210–250	Висока в'язкість; нестабільність подачі при недостатньому нагріві

#### 1.4 Вплив температури на якість виробів

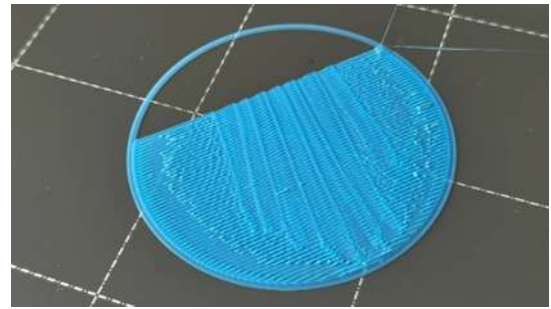
Температура екструзії друку – це один з найважливіших параметрів у технології FFF/FDM, який визначає якість поверхні та міцність виробів. Оскільки температура впливає на в'язкість філаменту, формування нитки та адгезію між шарами. Якщо температура відхиляється від оптимального діапазону, це може призвести до дефектів, зниження міцності та втрати геометричної точності [12].

Коли температура екструзії занадто низька, полімер стає густим і важко подається через механізм подачі, що призводить до утворення пропусків і поганої адгезії між шарами (рис. 1.8а). Це може викликати порожнини, зазори та навіть розшарування деталі під навантаженням.

Якщо ж температура друку занадто висока, матеріал стає надто рідким, розтікається, деформується і може частково зруйнуватися від перегріву, це також знижує точність виготовлення моделі (рис. 1.8б). А якщо охолодження відбувається занадто швидко, це погіршує друк та призводить до утворення ниток, під час переходу на різні ділянки моделі (рис. 1.8в).



а)



б)



в)

а – не до друк шарів моделі; б – переплав шарів; в – нитки філаменту

Рисунок 1.8 – Види дефектів друку пов'язаних з впливом температури

Кожен полімер має свій оптимальний температурний діапазон друку, і якщо порушити його, це може знизити якість виробу. Отже, стабільність температури екструзії є надзвичайно важливим параметром для точності, міцності виробу. Це підкреслює необхідність впровадження сучасних автоматизованих систем контролю температури, які здатні підтримувати оптимальні умови екструзії філаменту під час друку [13].

## 1.5 Методи вимірювання та регулювання температури

Температура має величезний вплив на процес FFF/FDM-друку. Цей параметр визначає, наскільки легко матеріал плавиться в екструдері, як рівно він подається і наскільки добре шари з'єднуються один до одного. Тому принтери оснащують спеціальними датчиками й системами контролю.

Найчастіше температуру вимірюють за допомогою термісторів. Вони недорогі, точні та можуть працювати в діапазоні температур правління філаменту та легко підключаються до електроніки. Для друку при високих температурах використовують термопари, які забезпечують кращу стабільність. Усі дані з термістора або з термопари надходять до мікроконтролера 3D принтера та надсилають сигнал до нагрівального елемента [14]. У більшості систем застосовується PID-регулятор алгоритм, який керує потужністю нагріву завдяки трьом складовим і підтримує температуру стабільною, без різких стрибків (рис. 1.9).

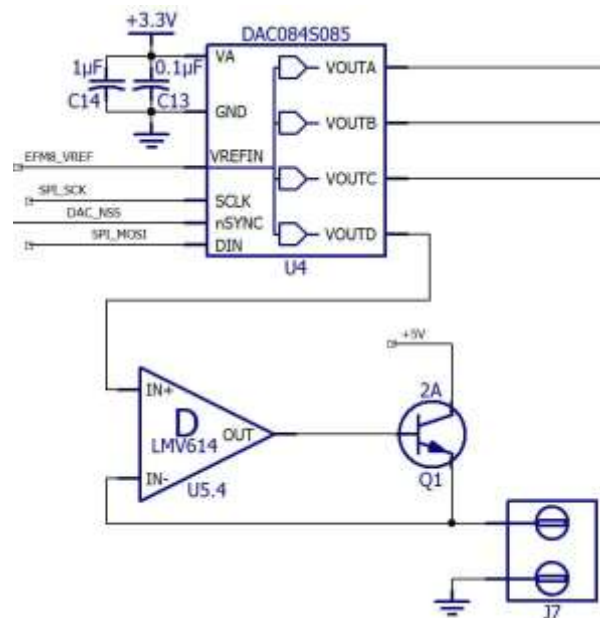


Рисунок 1.9 – Електро схема роботи датчика температури екструдера

Через інерцію нагрівального блока та змінні навколишньої середовища то відбуваються теплові коливання, які PID-регулятор не завжди встигає

компенсувати всі зміни температура. Коли змінюється подача матеріалу, принтер різко прискорюється або вмикається вентилятор. Адаптивні й прогнозуючі системи працюють по-іншому: вони аналізують, що відбувається з принтером у реальному часі, і самостійно коригують керування, забезпечуючи стабільне плавлення без перепадів [15].

Для точнішого моделювання теплових процесів, калібрують датчика, покращуються кріплення термістора та використовуються матеріали з підвищеною теплопровідністю. Усе це в комплексі значно зменшує температурні коливання під час екструзії шарів й підвищує якість друку виробу.

## 1.6 Алгоритми адаптивного температурного керування

Для якісного FFF/FDM-друку важливо підтримувати стабільну температуру екструдера. Проте, через зміни в подачі матеріалу, швидкість руху друкуючої головки та роботу вентилятора можуть виникати температурні коливання, які PID-регулятор не завжди компенсувати. Це підкреслює необхідність впровадження адаптивних або інтелектуальних алгоритмів управління.

Адаптивний регулятор «Adaptive PID» (APID) працює наступним чином. Він постійно аналізують, що відбувається з екструдером, і в процесі друку коригує налаштування. Якщо звичайний PID-регулятор просто тримається заданих коефіцієнтів і не звертає уваги на зміни, то адаптивний контролер бере до уваги все: як змінилися теплові властивості системи, з якою швидкістю подається пластик, якою траєкторією рухається сопло [16].

Одним із сучасних підходів до контролю температури друку – є самоналагоджувальний PID-регулятор. Він весь час спостерігає за температурою, чи не перегрівається система, наскільки швидко вона реагує на зміни, яка похибка залишається. І на основі цих даних підбирає найкращі налаштування так, щоб температура менше коливалася, а нагрів був плавним та передбачуваним.

Самоналагоджувальний PID-контролер аналізує температурну криву і на основі цього в реальному часі коригуючи коефіцієнти регуляції. Він оцінює перерегулювання, швидкість реакції та похибку стабілізації, що дозволяє йому зменшити коливання температури.

Іншим ефективним методом є прогнозує керування (Model Predictive Control, MPC). Цей підхід ґрунтується на математичній моделі теплових процесів в екструдері і має можливість прогнозувати майбутню температуру, враховуючи зміни навантажень. MPC розраховує оптимальний сигнал керування на кілька кроків уперед, що дозволяє компенсувати можливі відхилення ще до їх виникнення [17].

Алгоритми зворотного зв'язку відстежують не лише саму температуру також, як швидко змінюється похідна теплового потоку екструдера. Це дозволяє запобігти перегріву під час екструзії та покращити охолодження сопла, коли філамент не подається до екструдера.

Удосконалені адаптивні системи керування температурою можуть враховувати такі параметри, як:

- швидкість друку;
- роботу вентилятора;
- тип філаменту;
- поточні вимоги до точності переміщення друкуючої голови.

Цей підхід дозволяє більш точно регулювати температуру, що в свою чергу, підвищує якість виготовлення і зменшує ризик появи дефектів, пов'язаних із температурними коливаннями екструдера.

## 1.7 Висновки до першого розділу

У першому розділі мною було розглянуто основи технології FFF/FDM та ключові теплові процеси, які впливають на якість надрукованих виробів. Виявлено, що екструзія полімерного матеріалу залежить від температури друку виробу та стабільності температури грає важливу роль у визначенні

в'язкості розплавленого філаменту, рівномірності подачі та адгезії між шарами. Навіть незначні коливання температури можуть призвести до порушень у формуванні шарів, виникнення дефектів і зниження міцності виробів.

Показано, що різні полімери (PLA, ABS, PETG, TPU та ін.) мають власні теплофізичні характеристики, які впливають на процес нагрівання, плавлення та охолодження філаменту. Це потребує адекватного налаштування температурних режимів та підвищує вимоги до точності системи термоконтролю.

Було розглянуто методи та засоби контролю в 3D-принтерах температуру від термісторів та термопар до PID- та адаптивних алгоритмів. З'ясувалося, що у динамічних умовах друку традиційні підходи контролю, не завжди забезпечують стабільну температуру, тому виникає потреба у більш сучасних і гнучких системах керування температурою друку.

У підсумку проведений теоретичний огляд підтверджує, що ефективне керування температурою друку є надзвичайно важливим для підвищення точності, стабільності та якості виробів. Саме ця задача стане основою для подальших досліджень у наступних розділах.

## 2 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ

### 2.1 Будова та характеристики принтера для проведення досліджень

У цьому дослідженні для виготовлення тестових зразків буде використовуватися 3D-принтер Flying Bear Ghost 5, який був вдосконалений під програмне забезпечення Klipper. Це забезпечує високу швидкість роботи системи керування та дозволяє точно контролювати температурні процеси під час екструзії філаменту, (рис. 2.1). Конструкція принтера розроблена на кінематиці CoreXY, що забезпечує плавне переміщення друкуючої головки, зменшує вібрації та підтримує стабільність руху на високих швидкостях.



Рисунок 2.1 – Макет для проведення дослідження Flying Bear Ghost 5

Механізм подачі філаменту також вдосконалено на тип «direct drive», з розташуванням приводу над екструдером, що значно зменшує деформацію філаменту. Це підвищує стабільність екструзії та забезпечує швидшу подачу матеріалу, що покращує контроль температури (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Модифікація механізму подачі філаменту типу «Direct»

У цьому дослідженні екструдер обладнано нагрівачим блоком типу «Volcano», який має більшу площину плавлення, що підвищує теплову масу (рис. 3.3). Це дозволяє більш стабільне прогрівання полімеру, збільшити об'ємний потік і рівномірну подачу розплаву. Нагрівачий блок даного типу дозволяє детальніше контролювати вплив температури на в'язкість та формування шару під час зміни швидкості друку. Електронне начиння включає в себе: нагрівач і термістор, які забезпечують роботу в температурному діапазоні від 280 °C до 300 °C.

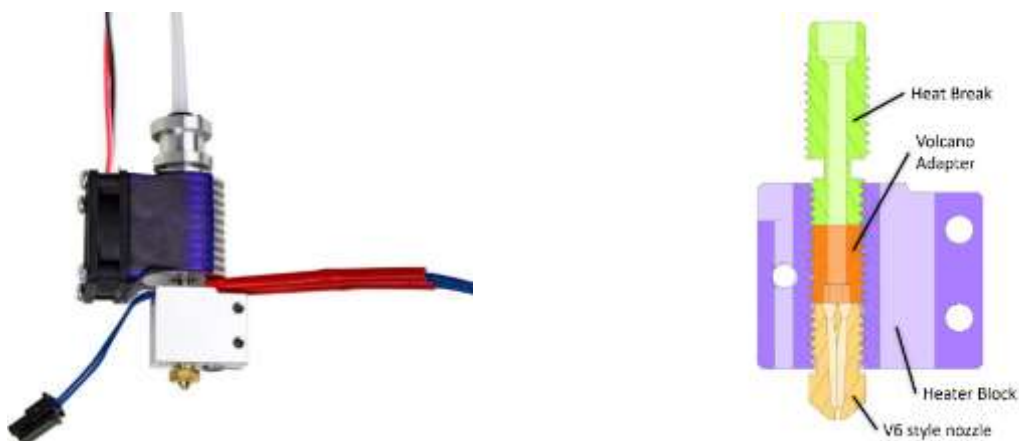


Рисунок 2.3 – Тип екструдера «Volcano»

Максимальний нагрів робочої платформи принтера до 110 °C, що забезпечує надійну адгезію перших шарів та знижує деформацію виробів. Конструкція столу та система переміщення за допомогою гвинтової передачі з

трапецоїдальним гвинтом T8 з кроком 2 мм, допомагають досягти стабільності результатів друку, що є важливим для експериментального порівняння температурних режимів на тестових зразках

Програмне забезпечення Klipper дає можливості для точного контролю параметрів друку, таких як:

- температура екструдера;
- швидкість руху;
- потоку у філаменту (pressure advance).

Дозволяє кодувати детальну логіку PID-регуляції та використовувати алгоритми компенсації вібрацій (input shaping). Це робить систему ідеальною для аналізу температурної стабільності під час екструзії. Таким чином 3D-принтер Flying Bear Ghost 5 з механізмом «direct drive» та нагрівачим блоком «Volcano», дозволяє отримувати стабільні, відтворювані дані та спостерігати вплив температури на формування шару та якість друку.

Загальні характеристики 3D-принтера Flying Bear Ghost 5, наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики 3D-принтера Flying Bear Ghost 5

№	Параметр	Значення
1	Кінематика	CoreXY
2	Механізм подачі	Direct drive
3	Хотенд	Volcano
4	Діапазон температур хотенду	від 280°C до 300 °C
5	Температура платформи	до 110 °C
6	Робоча область	255 мм×210 мм×210 мм
7	Діаметр філаменту	1,75 мм
8	Діаметр сопла	0,4 мм (можливі інші типорозміри)
9	Підтримувані матеріали	PLA, PETG, ABS, TPU, TPE, HIPS та ін.
10	Система керування	Klipper (Mainsail/Fluidd)

## 2.2 Модуль адаптивного керування температурою

Стабільність температури екструзії – є один із найважливіших факторів, що впливають на якість друку за технологією FFF/FDM. Коли змінюється

швидкість подачі філаменту, охолодження моделі або переходів до інших частин моделі, на нагрівальний блок зазнає різні теплових навантажень, що може призвести до коливань фактичної температури [18]. Звичайна PID-регуляція може підтримувати температуру лише в стабільних умовах, але їхня ефективність знижується, коли відбуваються динамічні зміни. Це підкреслює важливість використання адаптивних моделей керування, які можуть змінювати параметри регуляції в реальному часі під час друку.

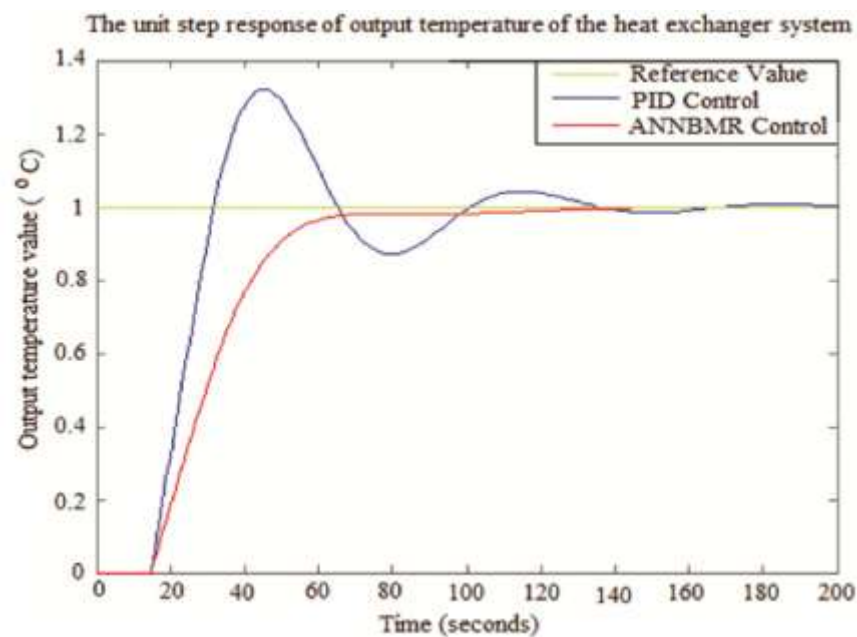


Рисунок 2.4 – Графік PID-регуляції температуру екструдера

Порівняльні різних графіків класичної PID регуляції свідчать про повільну реакцію перерегулювання та стабілізацію. APID регулятор показує кращий час перехідного процесу та меншу амплітуду коливань температури, що критично для екструзії філаменту, оскільки навіть відхилення в межах 3 °C впливають на в'язкість матеріалу та міжшарову адгезію.

APID керування постійно аналізує температурні похибки, швидкості її зміни та теплової інерції нагрівального блоку. В залежності від зовнішніх факторів, алгоритм коригує коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної складових, що забезпечує більш точний контроль температури в заданих межах. На відміну від звичайного PID-регулятора, APID-регулятор

може швидко реагувати на зміни навколишнього середовища:

- посилений обдув;
- збільшення подачі філаменту;
- друк товстими шарами.

Для складніших завдань керування температурою, можливо використовувати MPC (Model Predictive Control). Цей метод дозволяє формувати короткостроковий прогноз коливань температури, ґрунтуючись на математичній моделі теплового процесу в нагрівальному блоці [19]. Завдяки цьому регулятор може коригувати потужність нагрівача ще до того, як температура фактично почне відхилятися, що практично усуває інерційні коливання температури екструдера (рис. 2.5).

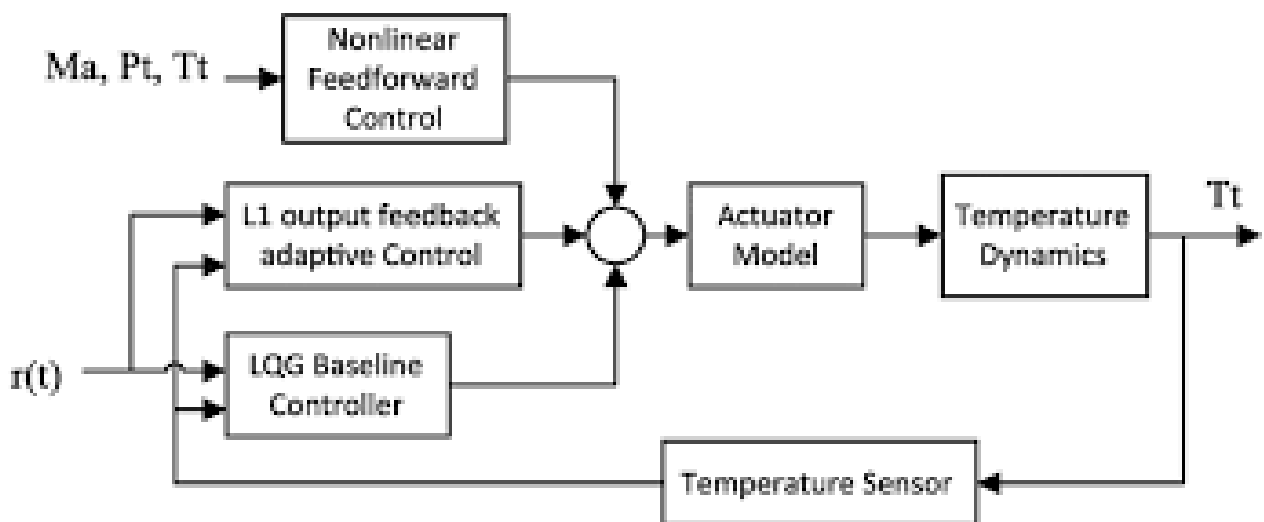


Рисунок 2.5 – Схема принципова Model Predictive Control

Блок-схема MPC системи керування включає такі основні елементи:

- датчик температури, який формує миттєвий зворотний зв'язок;
- модуль оцінки теплового стану, що аналізує швидкість та напрям зміни температури;
- алгоритм прогнозування (MPC);
- адаптивний регулятор, який формує сигнал керування;
- виконавчий елемент – нагрівач.

У сучасних регуляторах також відстежуються й інші важливі параметри:

- швидкість руху друкувальної головки;
- об’ємний потік матеріалу;
- інтенсивність охолодження;
- тип полімеру та «even cooling load». Теплове навантаження, яке виникає під час переходів між різними ділянками моделі [20].

Це дозволяє створити динамічну карту теплового процесу, що забезпечує точне підтримання необхідної температури (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Контроль температури у Klipper

Температурні графіки коливань температури екструдера та столу відображають зміни температури в залежності від подачі, швидкості та роботи вентилятора. APID допомагає згладити ці коливання, забезпечуючи стабільний тепловий профіль, що в свою чергу, покращує однорідність структури виробу. У результаті застосування адаптивного керування забезпечує [21]:

- зменшення температурних коливань у 4 рази;
- скорочення часу виходу на робочу температуру;
- стійку якість екструзії при змінних режимах друку;
- підвищення геометричної точності та міцності виробів.

Таким чином, модуль APID керування допомагає подолати недоліки традиційних систем і відкриває можливості для створення інтелектуальних та самонавчальних моделей контролю температури (наприклад MPC), які забезпечують стабільну якість друку навіть за умов реальних експлуатаційних змін під час друку моделі.

### 2.3 Методи контролю та валідації температурних режимів

Контроль температурних режимів друку відіграють велике значення для стабільності процесу друку та точності роботи системи керування в FFF/FDM-друці [22]. Оскільки температура нагрівального блоку безпосередньо впливає на властивості полімеру, важливо не лише її вимірювати, а й підтверджувати правильність отриманих даних різними методами (рис. 2.7).

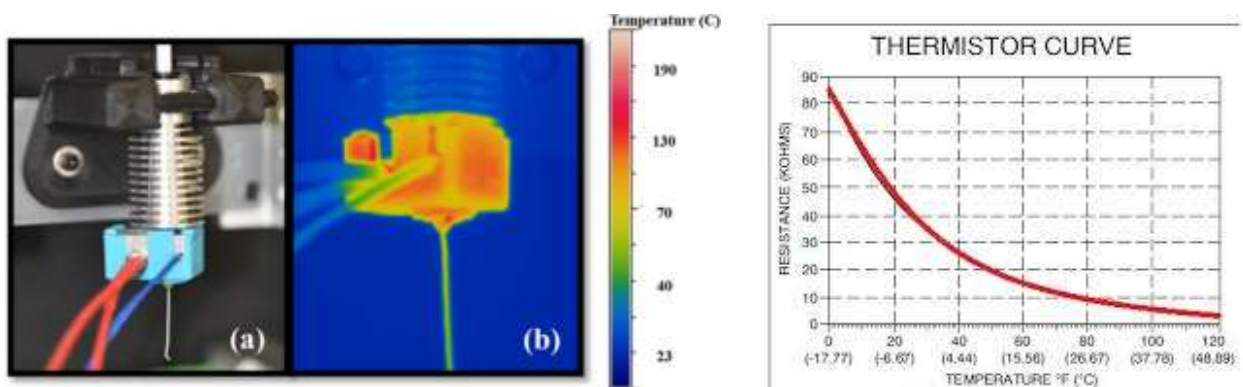


Рисунок 2.7 – Вимірювання температури з термо датчика

Одним способів контролю – є аналіз температурної кривої за часі. За допомогою програмного контролю можна спостерігати за точністю відтворення заданого значення, величину перегріву, швидкість стабілізації та амплітуду коливань температури. Якщо спостерігаються регулярні коливання або зсув значень, це може свідчити про неправильне налаштування PID-регулятора, виходу з ладу нагрівального елемента або погіршення теплового контакту з датчиком.

Для спостереження температури можуть застосовуватися зовнішні

датчики та пристрої (наприклад: високотемпературні капсульні термометри та телевізійні камери), які дають змогу оцінити реальний нагрів нагрівального блоку та зони друку. Тепловійний контроль дозволяє виявити локальні перегрів моделі та теплові втрати на екструдері, що є важливим під час налаштування терморегуляції принтера або порівняння ефективності різних конструкцій екструдера.

Ще один важливий метод – є налаштування PID-регулятора. Під час цього процесу система проходить через серію контрольованих нагрівань і охолоджень екструдера. Тим самим будуючи температурну криву, за допомогою якої, можемо визначити коефіцієнти « $P$ », « $I$ » та « $D$ », які допомагають зменшити похибку регулювання. Сучасні прошивки 3D-принтерів роблять цей процес автоматизованим, але для дослідницьких цілей результати калібрування зазвичай перевіряються, порівнюючи фактичну температурну поведінку з еталонними графіками коливань [23].

Валідація даних температури передбачає порівняльний аналіз температурної стабільності при різних режимах друку. Це досягається шляхом зміни подачі філаменту, режимів охолодження моделі, що дозволяє оцінити ефективність системи керування в реальних умовах.

Для перевірки температурного режиму друку важливо провести аналіз екструзії матеріалу:

- вимірюють ширину нитки;
- однорідність шару;
- параметри зчеплення та виявляють дефекти (переплавлення, недолив, нитко подібність).

Якщо всі ці показники відповідають потрібним значенням, це свідчить про стабільну роботу температурної системи та правильну взаємодію між модулем керування, нагрівальним вузлом і матеріалом.

Поєднання програмного контролю за допомогою Klipper, зовнішніх вимірювальних пристроїв та аналізу екструзії створює всебічну валідацію температурних режимів під час друку моделі, закладаючи основу для подальшої

оптимізації системи температурного керування.

## 2.4 Налаштування температурних параметрів у прошивці Klipper

Прошивка Klipper забезпечує точне керування температурою нагрівального блоку, розподіляючи обчислювальні задачі між одноплатним комп'ютером, (найчастіше використовується Raspberry Pi), та мікроконтролером принтера (в залежності від моделі принтера). Цей підхід дозволяє підвищити частоту опитування температурних датчиків та швидко реагувати на зміни температури від зовнішніх факторів та впроваджувати більш складні алгоритми регулювання, ніж це можливо з традиційними програмними пакетами [24].

У процесі друку, є можливість у реальному часі контролювати температуру екструдера та нагрівального столу за допомогою веб-інтерфейсів (наприклад: «Mainsail» або «Fluidd»), які візуалізують температурні графіки та дозволяють оцінити стабільність роботи регулятора (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Моніторинг температури екструдера в інтерфейсі Klipper

Основні параметри для контролю температури задаються у конфігураційному файлі «printer.cfg». В ньому можливо вказати тип термістора, потужність нагрівального елемента, а також коефіцієнти PID-регулятора. Щоб

правильно налаштувати Klipper, існує команда «PID\_CALIBRATE», яка допомагає автоматично підібрати значення  $K_p$ ,  $K_i$  та  $K_d$  відповідно до реальних теплових характеристик хотенду. Приклад конфігурації та результати PID-калібрування, (рис. 2.9).

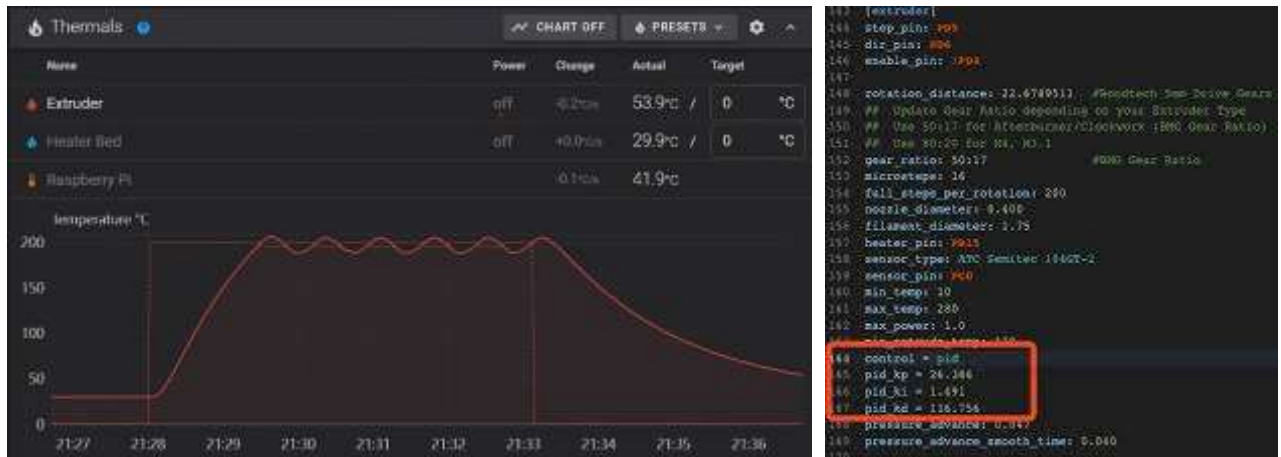


Рисунок 2.9 – Налаштування параметрів нагрівального вузла та PID-регулятора в Klipper

Для підвищення безпеки експлуатації 3D-принтера в Klipper впроваджено механізм захисту від перегріву (thermal runaway protection), який постійно стежить, чи відповідає фактична температура заданому значенню нагріву екструдера. Якщо температура не зростає або навпаки температура виходить за задані межі або втрачається сигнал з датчика, система автоматично вимикає нагрівач [25].

Додатково у Klipper передбачене встановлення граничних значень температур «min\_temp, max\_temp», а також параметра «smooth\_time», який дозволяє згладжувати шум сигналу температурного сенсора. Це зменшує амплітуду коливань та підвищує стабільність регулювання при змінних режимах друку, таких як зміна швидкості подачі або інтенсивності обдуву.

## 2.5 Аналіз САУ для датчика температури екструдера

З урахуванням температурно-резистивних характеристик термістора екструдера, що використовується в системі автоматизованого управління температурою під час екструзії полімерного матеріалу для 3D-принтерів за технологією FFF/FDM, вихідні дані внесено до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Вхідні данні для розрахунку

Найменування	Позначення	Значення
Коефіцієнт підсилення нагрівального елемента	$K_h$	500
Коефіцієнт підсилення	$K_p$	2,0
Стала часу нагріву	$T_h$	0,005 с
Коефіцієнт теплопровідності нагрівача	$K_\lambda$	$0,0111 \text{ Н} \cdot \frac{\text{М}}{\text{А}}$
Стала електромеханічної системи	$T_e = \frac{L}{R}$	0,000567 с
Інерційність нагрівачу елемента (оцінено)	$J_h$	$\approx 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Стала часу саморегулювання датчика	$T_s$	0,02 с
Крок нагрівання	$\Delta T_k$	1,8°C

Значення коефіцієнта  $K_h$  визначено на основі номінальної теплопровідності нагрівального елемента принтера за умови протікання номінального струму під час роботи (2.1):

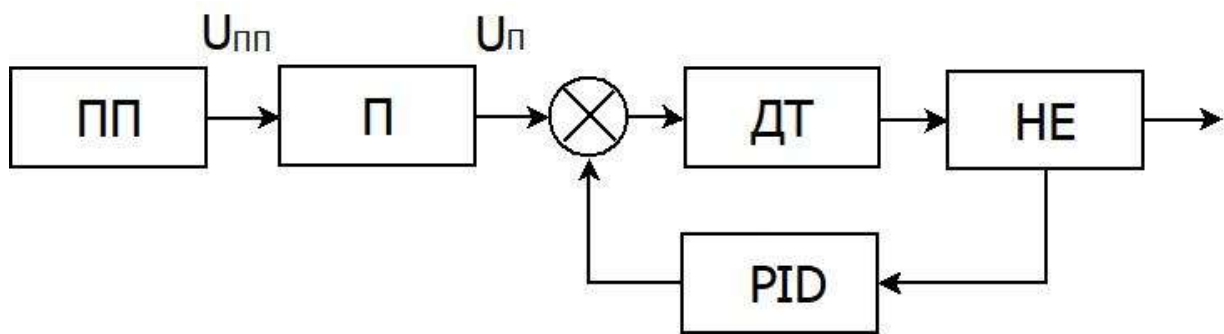
$$K_h = \frac{0,5 \cdot 10^{-2}}{0,45} \approx 0,111 \text{ Н} \cdot \frac{\text{М}}{\text{А}} \quad (2.1)$$

У табл. 2.3 наведено основні вимоги, які необхідні до вихідної системи керування температурою екструдера та визначають її функціональні та динамічні характеристики моделі.

Таблиця 2.3 – Вимоги до САУ

Найменування	Позначення	Значення
Максимальний час встановлення	$t_c$	0.5 с
Допустиме перерегулювання	$\sigma$	$\leq 10 \%$
Статична похибка	$\varepsilon_{ст}$	$\leq 1 \%$

На рис. 2.10 наведено функціональна схема САУ.



Лінійна неперервна САУ колювання температури гнучкого ТЕНа: нагрівального елемента містить: КД як об'єкт регулювання, плата керування, підсилювач, датчик температури і PID регулятор температури (PID)

Рисунок 2.8 – Функціональна схема САУ

Лінійна неперервна система автоматичного керування температурними коливаннями екструдера 3D-принтера складається з кількох ключових компонентів моделі:

- нагрівальний блок екструдера «Volcano», який має вбудований нагрівальний елементи який підключається до електромережі або блоку живлення принтера;
- NTC-термістор з номіналом 100 кОм, розташований у зоні нагрівального блоку екструдера. Він є частиною зворотнього зв'язку і забезпечує вимірювання поточної температури;

– плата керування 3D-принтера, яка виконує роль елемента порівняння та створює керуючий сигнал на основі різниці між заданою температурою та температурою, що вимірюється термістором.

Елемента порівняння порівняння розраховується за (2.2):

$$e(t) = \theta_{зад}(t) - \theta_{вих}(t). \quad (2.2)$$

де  $e(t)$  – сигнал помилки (різниця між бажаним і фактичним значенням температури екструдера);

$\theta_{зад}(t)$  – задане значення температури;

$\theta_{вих}(t)$  – фактичне значення температури.

Значення підсилення нагрівального елемента, знаходимо за (2.3):

$$U_{ПП}(s) = K_h \cdot E(s) \quad (2.3)$$

де  $U_{ПП}(s)$  – вихідна напруга плати керування;

$K_h$  – коефіцієнт підсилення нагрівального елемента;

$E(s)$  – сигнал помилки в образі Лапласа.

Значення передавальної функції термістора, знаходимо за (2.4):

$$W_p(s) = \frac{K_p}{T_{hs} + 1} \quad (2.4)$$

де  $W_p(s)$  – передавальна функція ТЕНа;

$K_p$  – коефіцієнт підсилення ТЕНа;

$T_{hs}$  – стала часу нагріву.

Значення передавальної функції, знаходимо за (2.5):

$$W_h(s) = \frac{K_\lambda}{Jh^2 + T_s s + K_\lambda} \quad (2.5)$$

де  $W_h(s)$  – передавальна функція нагрівального елемента;

$K_\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності нагрівача;

$J_h$  – інерційність нагрівачу елемента;

$T_s$  – стала часу саморегулювання датчика;

$s$  – комплексна змінна Лапласа.

Значення передавальної функції всієї замкненої системи, знаходимо за (2.6):

$$W_{\text{САУ}}(s) = \frac{K_h \cdot K_p \cdot K_\lambda}{(T_h s + 1)(J_h^2 + T_e s + K_\lambda)(T_s s + 1)} \quad (2.6)$$

Таким чином, функція всієї замкненої системи, бути мати наступним чином:

$$\begin{aligned} W_{\text{САУ}}(s) &= \frac{K_h \cdot K_p \cdot K_\lambda}{(T_h s + 1)(J_h^2 + T_e s + K_\lambda)(T_s s + 1)} \\ &= \frac{K_h \cdot K_p \cdot 0,0111}{1,0 \cdot 10^{-7} s^2 + 5,66 \cdot 10^{-4} s + 0,0111} \\ W_{\text{САУ}}(s) &= \frac{2,22}{1,0 \cdot 10^{-7} s^2 + 5,66 \cdot 10^{-4} s + 0,0111} \end{aligned}$$

## 2.6 Висновки до другого розділу

У другому розділі було розглянуто конструкцію 3D принтера Flying Bear Ghost 5 та його елементи, які впливають на стабільність температурного режиму під час друку моделі. Детально описано нагрівальний блок типу «Volcano» та механізм подачі філаменту на базі «direct drive». Ефективність нагрівального вузла залежить від рівномірності теплового розподілу, якості теплового контакту, а також стабільної роботи нагрівача і температурного датчика.

Точність вимірювання температури залежить від програмне забезпечення та калібрування датчиків є надзвичайно важливими для коректної роботи

алгоритмів PID-регулювання. На некоректну роботу системи керування температурою можуть впливати різні фактори, що в свою чергу, погіршує якість екструзії шарів моделі.

У межах розділу також було розглянуто методи контролю та валідації температурних режимів та відстеження температурних кривих з використанням зовнішніх засобів вимірювання та перевірку стабільності роботи PID-керування. Встановлено, що оцінка функціонування температурної системи дозволяє своєчасно виявляти теплові коливання, компенсувати інерційні ефекти для різних типів PID-регуляторів та налаштувати параметри контролю температури.

У межах розділу також було розглянуто методи контролю температурних режимів з використанням зовнішніх датчиків та перевірки стабільності роботи з різними алгоритмами PID-керування. Оцінка функціонування температурної системи дозволяє своєчасно виявляти теплові коливання, компенсувати інерційні ефекти для різних типів PID-регуляторів та налаштувати параметри контролю температури.

В результаті проведеного аналізу можна сказати, що надійність системи керування температурою є критично важливим фактором для забезпечення стабільності процесу екструзії шарів та якості виробів у FFF/FDM-друці.

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

Система управління температурою екструдера в FFF/FDM-друці має вирішальне значення для підтримки стабільності друку філаментом, рівномірності екструзії матеріалу та якості формування шарів. Оскільки нагрівальний вузол має значну теплову інерцію, змінні теплові навантаження та залежить від режимів друку моделі, доцільно провести експериментальне порівняння різних алгоритмів регулювання температури. У рамках цього дослідження будуть розглядаються такі алгоритми регуляції [26]:

- стандартний PID-регулятор;
- адаптивний APID;
- прогнозуючий регулятор на основі MPC.

Метою цього експерименту є визначення ефективності кожного алгоритму за реальних умов друку та встановлення його впливу на стабільність температури і кінцеву якість виробу.

#### 3.1 Методика проведення експериментів

Експериментальні дослідження проводилися з метою оцінки ефективності різних алгоритмів управління температурою під час екструзії філаменту. У рамках проведення експерименту було заздалегідь визначено набір керованих параметрів, їх діапазони зміни та критерії для фіксації результатів. Такий підхід дав змогу порівняти поведінку системи регулювання в однакових умовах і визначити, як вона працює при зміні теплового навантаження.

Перед тим, як розпочати експерименти, було визначили базові умови друку тестових зразків:

- матеріал друку PLA філамент;
- температура стола 60 °C;
- діаметр сопла 0,4 мм;

- швидкість друку 60 мм/с;
- товщина шару 0,2 мм.

Тестова модель була обрана складної форми з різними типами елементів які зустрічаються під час друку багатьох моделей. Розміри моделі складають 20 мм × 25 мм × 38 мм (рис. 3.1). Усі зразки були надруковані з однієї партії PLA філаменту, що дозволило уникнути впливу різниці у вологості філаменту.

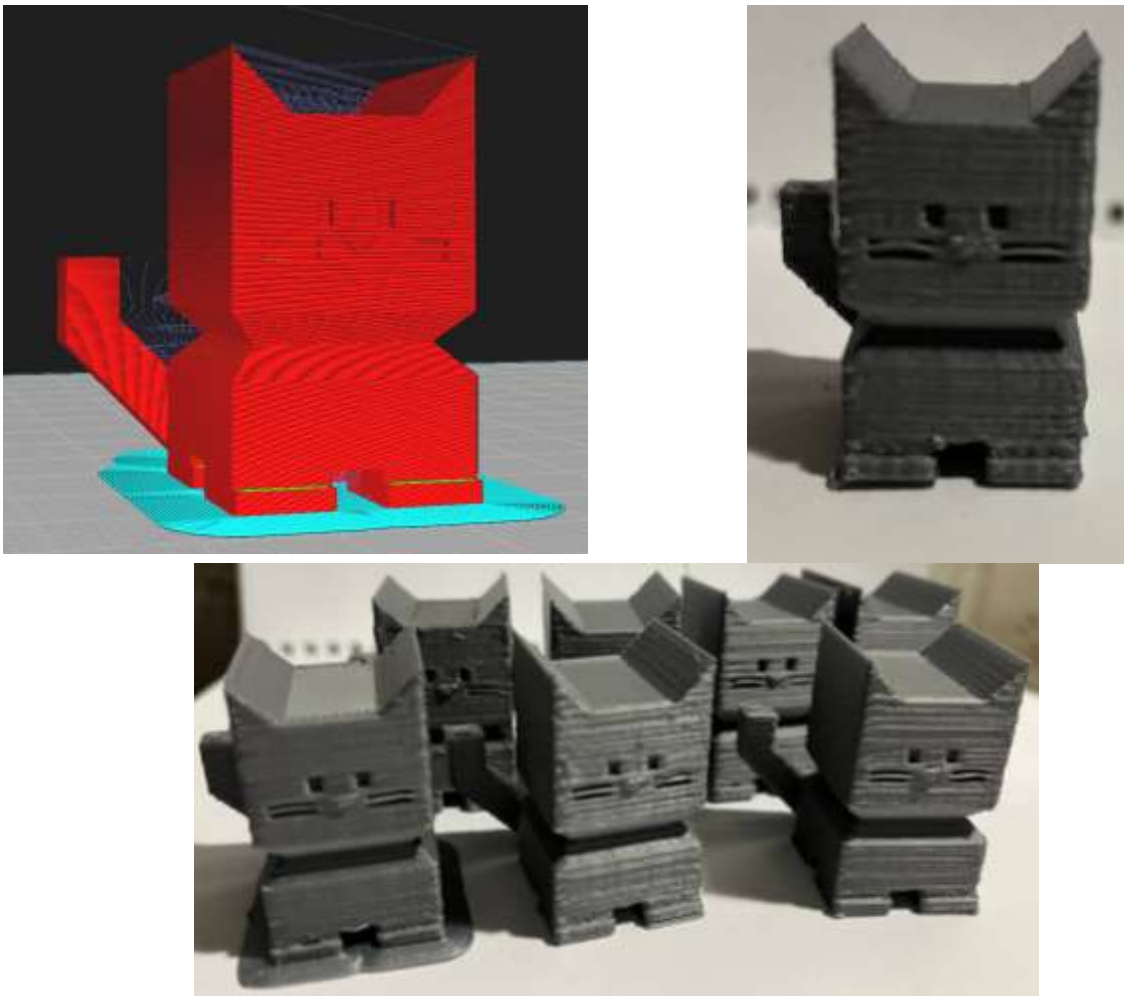


Рисунок 3.1 – Тестова модель для дослідження

У ході проведення експериментів будуть змінюватися такі параметри, як:

- температура екструзії;
- швидкість друку;
- швидкість подачі матеріалу «flow rate»;
- інтенсивність обдуву моделі вентилятором;
- зовнішні збурення рухом головки.

У рамках експерименту температура екструзії буде знаходитися в межах від 190 °С до 210 °С. Зміна температури дозволить спостерігати, як алгоритм регуляції працює на зміни в'язкості філаменту, а також аналізувати наскільки ефективно регулятор може підтримувати стабільну температуру.

Швидкість друку буде в межах від 40 мм/хв до 90 мм/хв і регулювалася поступово на трьох рівнях:

- низька швидкість друку 40 мм/хв;
- середня швидкість друку 60 мм/хв;
- висока швидкість друку 90 мм/хв.

Така градація дозволила дослідити, як система керування реагує на різні теплові навантаження, а також визначити, як зміна об'ємного потоку матеріалу впливає на стабільність температури сопла під час друку.

Швидкість подачі матеріалу «flow rate» змінюється в межах від 90% до 110%. Ця проміжок дозволила дослідити, як зміни в об'ємному потоці впливають на теплове навантаження та стабільність підтримання температури в зоні екструзії матеріалу

Інтенсивність обдуву моделі лежить в межах від 0% до 100% з кроком 50%. Такий підхід дозволяв оцінити, наскільки ефективно система керування може компенсувати різку зміну теплових втрати та підтримувати стабільну температуру під час різких змін охолодження.

Зовнішні впливи, які виникають через рух друкуючої головки, описуються шляхом введення різких значень прискорень та переходів «jerk», а також прискоренням руху голови в межах від 1500 мм/хв. до 3000 мм/хв. Такий підхід дозволив оцінити, як динаміка переміщень екструдера впливає на теплову стабільність нагрівального блоку, а також визначити, наскільки ефективно регулятор може компенсувати короточасні зміни теплового навантаження.

Усі експерименти проводилися для трьох типів алгоритмів регулювання:

- стандартний PID;
- APID;
- прогнозуючий MPC.

Для кожного параметра буде зроблено по три тестових зразка, щоб зменшити випадкові коливання. Під час друку буде здійснюватися неперервний запис температурної кривої з частотою від 10 Гц до 20 Гц, що дозволяло детально відстежувати поведінку системи керування. Оцінка буде проходити за наступними показниками:

- величина перерегулювання при зміні режимів;
- амплітуда та частота температурних коливань;
- наявність дефектів у надрукованому зразку (пропуски, перегрів, нитки, деформації);
- стабільність ширини нитки та рівномірність шароутворення.

Зразки, які були надруковані, аналізувалися візуально, під мікроскопом, а також шляхом вимірювання геометричних розмірів моделі. Зміни в структурі поверхні деталі давали можливість провести оцінити стабільність температури під час екструзії філаменту.

Таким чином, підхід передбачає підбір параметрів процесу друку та спостерігати за реакцією системи керування температури. Це дає змогу об'єктивно оцінити ефективність різних алгоритмів регулювання і створити основу для подальшої оптимізації температурного профілю екструзії в програмному середовищі Klipper.

### 3.2 Проведення дослідження

Для експериментального визначення ефективності алгоритмів керування температурою була проведена серія друків тестових зразків у різних режимах роботи принтера. Дослідження проходило в контрольованих умовах із застосуванням трьох алгоритмів регулювання: стандартного PID, APID та прогнозуючого контролера MPC.

В процесі проведення експерименту поступово змінювалася параметри друку моделі: температуру сопла, швидкість друку, подачу матеріалу «flow» та інтенсивність обдуву. Ці зміни дозволяли створити різні теплові навантаження

на нагрівальний блок та оцінити, як кожен алгоритм реагує на збурення і відхилення температури від заданого значення. В результаті було виготовлено 27 тестових зразків з різними параметрами друку та алгоритмами контролю температури екструдера.

Для кожного набору параметрів друку створювався окремий зразок. Під час друку фіксувалася температурна крива, що дозволило визначити амплітуду температурних коливань  $\Delta T$  та часу перерегелювання  $t_{over}$ . Крім температурних характеристик, також враховувалися якість друку моделі та поведінка матеріалу під час друку.

В Додатку А, наведено повний експериментальний план з урахуванням параметрів друку, використаного алгоритму та отриманої температурної стабільності. На основі отриманих значень коливань температури можливо спостерігати, рис. 3.2:

- PID має найбільшу нестабільність та розкид значень;
- APID значно покращує ситуацію;
- MPC забезпечує найменші коливання температури в усіх режимах.

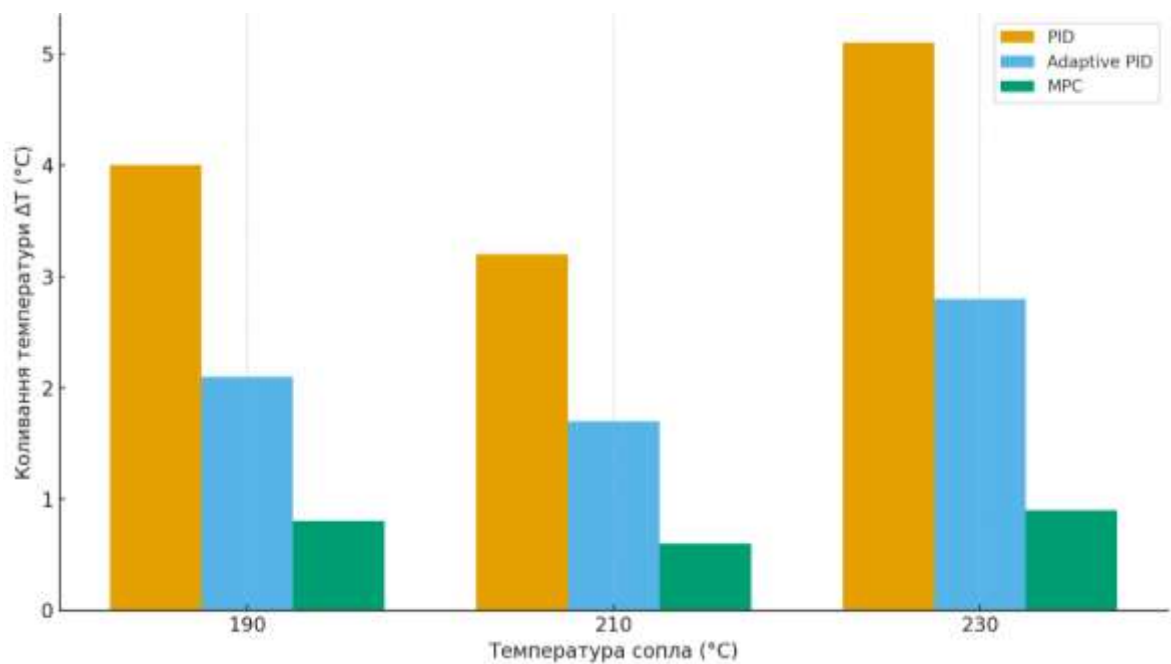


Рисунок 3.2 – Порівняння коливань температури для різних алгоритмів керування

Якщо судити по часу перерегулювання  $t_{over}$  для трьох алгоритмів керування при різних температурах екструзії в межах від 190 °C до 230 °C, можливо спостерігати що, рис. 3.3:

- PID регулятор має найдовший час перерегулювання  $t_{over}$ ;
- APID має значно швидшу реакцію;
- MPC, найменший час перерегулювання  $t_{over}$ , майже миттєве вирівнювання.

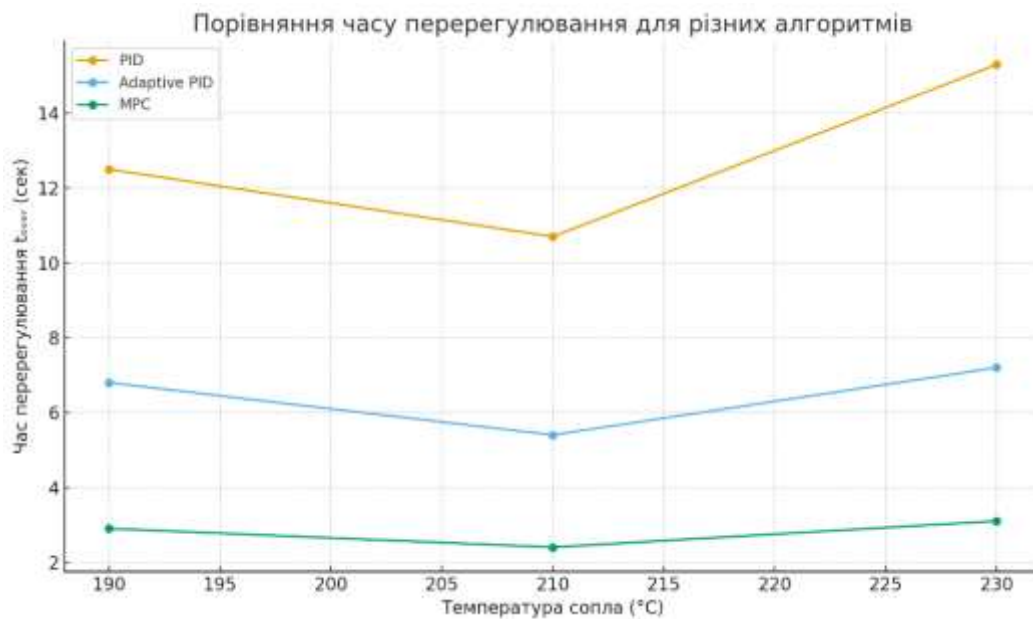


Рисунок 3.3 – Порівняння часу перерегулювання для різних алгоритмів

Якщо зробити оцінку роботи алгоритмів по основним показникам друку, можна зробити наступні висновки, табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Загальні висновки про роботу алгоритмів контролю температури екструдера

Критерій	PID	APID	MPC
Перерегулювання	високе	низьке	практично відсутнє
Час стабілізації	довгий	короткий	найкоротший
Стабільність при збуреннях	низька	висока	дуже висока
Амплітуда коливань	від 3 °C до 6 °C	від 1 °C до 2 °C	менше 1 °C
Якість екструзії	нестабільна	майже однорідна	найкраща

Продовження табл. 3.1

Критерій	PID	APID	MPC
Обчислювальна складність	низька	середня	висока

### 3.3 Побудова регресійно-кореляційної моделі

У процесі виконання роботи було проведено регресійно-кореляційний аналіз експериментальних даних, які були отримані під час дослідження температурної стабільності нагрівального блоку екструдера. Головною метою цього аналізу було визначити, як технологічні параметри друку впливають на амплітуду температурних коливань  $\Delta T$  та час перерегулювання  $t_{over}$  для трьох алгоритмів керування.

Оскільки повно факторний експеримент з чотирма змінними параметрами вимагав би більше 400 комбінацій режимів друку тестових зразків, було вирішено застосувати планований неповно факторний експеримент. Цей підхід охоплює репрезентативні точки по всьому діапазону параметрів, включаючи мінімальні, максимальні та номінальні значення параметрів. Обраний метод дозволяє значно зменшити кількість необхідних друків, при цьому зберігаючи можливість створення коректних статистичних моделей.

Для кожної досліджуваної температури сопла, швидкості друку, подачі матеріалу, інтенсивності обдуву, амплітуди температурних коливань  $\Delta T$  та часу перерегулювання  $t_{over}$ . Ці значення необхідні для обчислення коефіцієнтів кореляції Пірсона та створення регресійної моделі.

Для обробки даних їх вводять у програмне забезпечення IBM SPSS Statistics, де проводиться базовий лінійний регресійний аналіз параметрів друку моделі 3D-моделі [27]. В ході дослідження буде використовуватися дві регресійні моделі, а саме:

- модель впливу параметрів на амплітуду температурних коливань  $\Delta T$ ;
- модель впливу параметрів на час перерегулювання  $t_{over}$ .

Таким чином ми зможемо зробити оцінку впливу параметрів на кожен фактор, та знайти коефіцієнти кореляції.

Для роботи зі значеннями у програмному середовищі IBM SPSS Statistics, необхідно ввнести та закодувати кожен досліджуваний параметр та фактор у необхідний вигляд. Тоді вхідні чини будуть мати наступні найменування:

– алгоритм термострою (Algorithm). Оскільки в дослідженні буде використовуватися 3 різних методи контролю температури, то буде використовуватися кодування: 1 – PID регуляція, 2 – адаптивна PID регуляція, 3 – MPC регуляція;

– температура сопла (Extruder\_temperature\_C);

– швидкість друку (Print\_speed\_mm\_min);

– подача пластику (Flow);

– охолодження моделі (Cooling);

– температурні коливання (Temperature\_fluctuations\_C);

– час перерегулювання (Overtime\_s).

За результатами обчислень у модулі Model Summary визначається значення коефіцієнта детермінації  $R$  для кожного алгоритму PID термострою екструдера, рис. 3.4.

Model Summary									
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	Change Statistics			Sig. F Change
						F Change	df1	df2	
1	,924 <sup>a</sup>	,853	,818	,7593	,853	24,381	5	21	,000

a. Predictors: (Constant), Cooling, Flow, Algorithm, Extruder\_temperature\_C, Print\_speeds\_mm\_min

a)

Model Summary									
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	Change Statistics			Sig. F Change
						F Change	df1	df2	
1	,945 <sup>a</sup>	,893	,868	1,7495	,893	35,108	5	21	,000

a. Predictors: (Constant), Cooling, Flow, Algorithm, Extruder\_temperature\_C, Print\_speeds\_mm\_min

б)

а – амплітуда температурних коливань  $\Delta T$ ; б – час перерегулювання  $t_{over}$

Рисунок 3.4 – Зведення для моделі (Model Summary)

Показник  $R$  показує, наскільки добре корелюють фактичні значення

залежної змінної з прогнозами моделі, відображаючи, наскільки точно лінія регресії відповідає експериментальним даним. Коефіцієнт множинної детермінації  $R^2$  вказує на те, яку частку впливу мають параметри, що входять до моделі, на кінцевий результат.

Середнє скориговане значення коефіцієнта  $R^2$  для всіх досліджуваних алгоритмів дорівнює:

– для амплітудних температурних коливань  $\Delta T$ , коефіцієнт  $R^2$  дорівнює 85,3%;

– для час перерегулювання  $t_{over}$ , коефіцієнт  $R^2$  дорівнює 89,3%.

Середні стандартні похибки оцінки дорівнюють 0,5 для двох моделей, що перевищує порогове значення 0,5. Аналіз даних за всіма осями підтверджує, що  $R^2$  більше 0,5.

Крім того, за допомогою таблиці ANOVA перевіряється гіпотеза про те, що  $R^2$  дорівнює 0. Якщо рівень значущості Sig. менше 0,05 для двох моделей, то це свідчить про статистичну достовірність отриманих результатів, що ілюструється на рис. 3.5.

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	70,280	5	14,056	24,381	,000 <sup>b</sup>
	Residual	12,107	21	,577		
	Total	82,387	26			

a. Dependent Variable: Temperature\_fluctuations\_C

b. Predictors: (Constant), Cooling, Flow, Algorithm, Extruder\_temperature\_C, Print\_speeds\_mm\_min

a)

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	537,267	5	107,453	35,108	,000 <sup>b</sup>
	Residual	64,274	21	3,061		
	Total	601,541	26			

a. Dependent Variable: Overtime\_s

b. Predictors: (Constant), Cooling, Flow, Algorithm, Extruder\_temperature\_C, Print\_speeds\_mm\_min

б)

а – амплітуда температурних коливань  $\Delta T$ ; б – час перерегулювання  $t_{over}$

Рисунок 3.5 – Результати розрахунків значимості «ANOVA»

У всіх випадках рівень значущості Sig. виявився меншим за 0,05, що підтверджує статистичну достовірність отриманих результатів. Щоб визначити внесок кожної змінної, використовуються стандартизовані коефіцієнти «Beta», які показують, як змінюється значення параметра при збільшенні одного з факторів на одиницю, рис. 3.6.

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	,093	5,761		,016	,000			
	Algorithm	-1,839	,179	-,860	-10,275	,000	-,860	-,913	-,860
	Extruder_temperature_C	,007	,023	,025	,292	,000	,056	,064	,024
	Print_speeds_mm_min	,034	,012	,258	2,828	,000	,310	,525	,237
	Flow	,022	,031	,058	,699	,000	,058	,151	,058
	Cooling	,008	,006	,128	1,406	,000	,231	,293	,118

a. Dependent Variable: Temperature\_fluctuations\_C

**a)**  
**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	8,985	13,274		,677	,000			
	Algorithm	-5,289	,412	-,915	-12,826	,000	-,915	-,942	-,915
	Extruder_temperature_C	,001	,054	,002	,022	,000	,024	,005	,002
	Print_speeds_mm_min	,070	,028	,197	2,532	,000	,224	,484	,181
	Flow	,040	,071	,040	,560	,000	,040	,121	,040
	Cooling	,012	,013	,070	,904	,000	,147	,193	,064

a. Dependent Variable: Overtime\_s

**б)**

а – амплітуда температурних коливань  $\Delta T$ ; б – час перерегулювання  $t_{over}$

Рисунок 3.6 – Значення «Standardized Coefficients Beta»

Значення коефіцієнтів «Beta» можна інтерпретувати як кореляційні коефіцієнти. Оскільки, згідно з попередніми розрахунками, модель демонструє лінійну залежність, ці коефіцієнти можуть бути підставлені в рівняння лінійної регресії. Зальний опис рівня лінійної регресії (3.1):

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n, \quad (3.1)$$

де  $Y$  – фактор міцності виробу;

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$  – коефіцієнти лінійної регресії впливу параметрів на фактор;

$x_1, x_2, \dots, x_n$  – параметри впливу на фактор.

Для більшої зручності побудуємо два рівня регресії для кожного параметра. На рис. 3.7, наведені результати кореляції Пірсона.

**Correlations**

	Temperature fluctuations_C	Algorithm	Extruder_temperature_C	Print_speeds_mm_min	Flow	Cooling
Pearson Correlation	Temperature fluctuations_C	1,000	-,860	,056	,310	,058
	Algorithm	-,860	1,000	,000	,000	,000
	Extruder_temperature_C	,056	,000	1,000	,088	,000
	Print_speeds_mm_min	,310	,000	,088	1,000	,000
	Flow	,058	,000	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Temperature fluctuations_C		,000	,390	,058	,386
	Algorithm	,000		,500	,500	,500
	Extruder_temperature_C	,390	,500		,331	,500
	Print_speeds_mm_min	,058	,500	,331		,500
	Flow	,386	,500	,500	,500	
N	Temperature fluctuations_C	27	27	27	27	27
	Algorithm	27	27	27	27	27
	Extruder_temperature_C	27	27	27	27	27
	Print_speeds_mm_min	27	27	27	27	27
	Flow	27	27	27	27	27

а)

**Correlations**

	Overtime_s	Algorithm	Extruder_temperature_C	Print_speeds_mm_min	Flow	Cooling
Pearson Correlation	Overtime_s	1,000	-,915	,024	,224	,040
	Algorithm	-,915	1,000	,000	,000	,000
	Extruder_temperature_C	,024	,000	1,000	,088	,000
	Print_speeds_mm_min	,224	,000	,088	1,000	,000
	Flow	,040	,000	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Overtime_s		,000	,453	,130	,422
	Algorithm	,000		,500	,500	,500
	Extruder_temperature_C	,453	,500		,331	,500
	Print_speeds_mm_min	,130	,500	,331		,500
	Flow	,422	,500	,500	,500	
N	Overtime_s	27	27	27	27	27
	Algorithm	27	27	27	27	27
	Extruder_temperature_C	27	27	27	27	27
	Print_speeds_mm_min	27	27	27	27	27
	Flow	27	27	27	27	27

б)

а – амплітуда температурних коливань  $\Delta T$ ; б – час перерегулювання  $t_{over}$

Рисунок 3.7 – Кореляція Пірсона

Для оцінки кількісного впливу параметрів на стабільність амплітудних температурних коливань  $\Delta T$  була побудована багатофакторна регресія (3.2):

$$\Delta T = d_0 + d_1 T + d_2 v + d_3 F + d_4 C + d_5 A + \varepsilon, \quad (3.2)$$

де  $T$  – температура екструдера, °C;

$v$  – швидкість друку, мм/хвилину;

$F$  – подача філаменту, %;

$C$  – охолодження моделі, %;

$A$  – алгоритм для контролю температури;

$\varepsilon$  – випадкова похибка, для моделі температурних коливань  $\Delta T$ , це значення дорівнює 0,6.

Таким чином коефіцієнти лінійної регресії для амплітуди температурних коливань  $\Delta T$ , має наступний вигляд [28]:

$$\Delta T = 0,093 + 0,056T + 0,31v + 0,58F + 0,231C + (-0,86)A + 0,6.$$

Для часу перерегулювання побудовано модель (3.3):

$$t_{over} = d_0 + d_1 \Delta T + d_2 C + \varepsilon, \quad (3.3)$$

Тут,  $\Delta T$  є основним фактором, що визначає  $t_{over}$ , тоді як інтенсивність обдуву сильно впливає на PID, але майже не впливає на MPC.

Таким чином отримуємо, що рівняння регресії для алгоритмів контроль температури екструзії для двох показників амплітуди температурних коливань  $\Delta T$  та час перерегулювання  $t_{over}$ .

Якщо порівняти алгоритми між собою, то можливо зробити наступні висновки:

– алгоритм PID показав найвищу чутливість до всіх факторів процесу, зокрема: зміни швидкості друку, подачі матеріалу, інтенсивності обдуву та температури нагрівального блоку призводили до значних відхилень фактичної температури від заданої. Амплітуда коливань  $\Delta T$  у деяких режимах сягала  $\pm 7.1$  °C, а час перерегулювання  $t_{over}$  19 с, що свідчить про обмежену здатність

алгоритму стабілізувати систему після теплових збурень. Загалом стандартний PID-регулятор виявився найменш стабільним у температурному режимі серед інших алгоритмів;

– алгоритм APID показав суттєво кращі результати. Регресійна модель свідчить, що амплітуда коливань температури  $\Delta T$  у цьому випадку зменшується приблизно у від 1.7 до 2.2 рази в порівняно з стандартним PID-регулятором. Час перерегулювання  $t_{\text{over}}$  також скорочується майже вдвічі, що свідчить про швидшу реакцію системи на зміну умов друку моделі. Хоча APID залишається частково залежним від зовнішніх збурень, його поведінка є значно стабільнішою, а коливання є меншими та прогнозованими;

– найкращі результати продемонстрував алгоритм MPC, який показав найнижчі значення амплітуди температурних коливань  $\Delta T$  від  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , незалежно від швидкості або подачі чи інтенсивності обдуву. Час перерегулювання  $t_{\text{over}}$  у MPC складав всього від 2 с до 4 с, що є найкоротшим серед усіх досліджених алгоритмів (рис. 3.8).

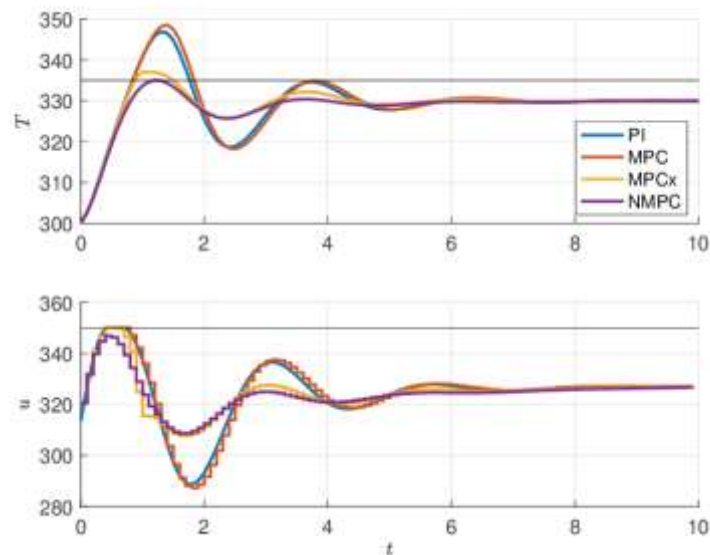


Рисунок 3.8 – MPC-регулювання

Регресійний аналіз виявив мінімальні кореляційні зв'язки між параметрами друку та відхиленнями температури, що свідчить про високу прогнозну здатність алгоритму та його стійкість до зовнішніх впливів. Отже,

MPC забезпечує найбільш стабільну роботу нагрівального вузла і є найефективнішим методом контролю температури під час екструзії полімерів.

### 3.4 Висновки до третього розділу

У третьому розділі були проведені експериментальні дослідження температурної стабільності екструзії філаменту, використовуючи алгоритми PID, APID та MPC. Запланований неповно факторний експеримент дав змогу охопити ключові параметри, такі як температура сопла, швидкість друку, подача матеріалу та інтенсивність обдуву, а також сформувати репрезентативну вибірку для подальшого статистичного аналізу.

Отримані результати показали, що стабільність температури значно залежить від режимів друку, зокрема від швидкості екструзії, об'ємного потоку матеріалу та теплових втрат під час охолодження. Отримані значення амплітудних температурних коливань  $\Delta T$  та часу перерегулювання  $t_{over}$  стали основою для побудови моделі регресійно-кореляційного аналізу.

Виявилося, що стандартний PID-регулятор найбільше реагує на зміни в умовах друку, тоді як APID значно зменшує температурні коливання і швидше повертає систему в стабільний режим керування. Найкращі результати показав алгоритм MPC, який відрізняється мінімальними коливаннями температури від 0,5 °C до 1,4 °C та найшвидшим часом регуляції від 2 с до 4 с, що свідчить про його високу стійкість до зовнішніх впливів.

Таким чином, результати експериментів показують, що алгоритм MPC є найбільш ефективним для автоматизованого контролю температури під час екструзії філаменту для технології FFF/FDM.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Опис лабораторного приміщення

Лабораторний простір оснащений вхідними дверима, вікнами та штучним освітленням, яке забезпечує комфортні умови для роботи. У приміщенні розташовано 9 розеток із напругою 220 В та 2 розетки із напругою 380 В. Дотримані вимоги пожежної безпеки – в приміщенні встановлені вогнегасник, пісок та пожежна ковдра [29].

Схема лабораторного приміщення 3D прототипування зображена на рис. 4.1.

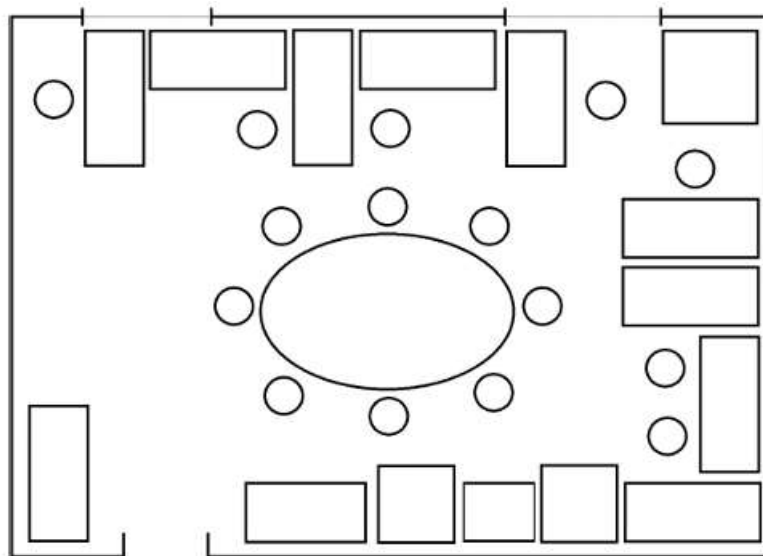


Рисунок 4.1 – Схема лабораторного приміщення 3D прототипування

Виконаємо розрахунок параметрів вентиляції, які є обов'язковими для вказаного приміщення. У механічній майстерні, де проводиться опалення, вентиляція та кондиціонування, необхідна швидкість повітрообміну становить 3-5 м<sup>3</sup>/ч. Скористаємося формулою для визначення мінімально необхідного повітрообміну для механічної майстерні, враховуючи коефіцієнт – 3, об'єм приміщення 130 м<sup>3</sup>.

$$L = n \cdot V, \quad (4.1)$$

де  $L$  – необхідний обіг повітря у приміщенні;

$V$  – об'єм приміщення;

$n$  – кратність обігу повітря у приміщенні.

У результаті отримуємо розрахунок:

$$L = 130 \cdot 3 = 390 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Для людини, яка постійно перебуває у приміщенні достатній норматив – 60 м<sup>3</sup>/ч. За отриманими результатами розрахунків можна зробити висновок, що у лабораторії на постійній основі можуть перебувати до 6 осіб.

#### 4.2 Небезпечні та шкідливі фактори FFF/FDM-технології

Під час роботи з принтерами оператор може зіткнутися з різними небезпечними та шкідливими факторами, пов'язаними з нагрівальними елементами, рухомими частинами та випарами філаменту. Найбільший шкідливий фактор полягає у високій температурі нагрівального блоку, яка під час експлуатації може досягати від 200 °С до 300 °С. Якщо доторкнутися до сопла або нагрівача, це може призвести до миттєвих опіків другого ступеня. Також існує ризик загоряння філаменту або проводки, якщо система теплового захисту вийде з ладу.

Також небезпекою під час роботи з полімерами, є викид летких органічних сполук і ультрадрібних частинок, які виникають під час плавлення полімерів. Найвищі рівні викидів спостерігаються у ABS, Nylon та PC. Ці речовини можуть викликати подразнення дихальних шляхів, головний біль та алергічні реакції, особливо в умовах поганої вентиляції приміщення.

Рухомі елементи принтера, такі як каретки осей X та Y, екструдер, ремені й вали, можуть бути також факторами небезпеки. Вони здатні спричинити затягування або механічні травми під час роботи чи обслуговування верстата, оскільки більшість приводів є відкритого типу. Щодо електричних ризиків, то до них відносяться блок живлення, нагрівачі та термістори, які підключені до мережі 220 В.

Зважаючи на всі ці фактори, робота з 3D-принтером вимагає дотримання електробезпеки, забезпечення належної вентиляції та суворого виконання інструкцій щодо обслуговування нагрівальних і механічних компонентів.

#### 4.3 Вентиляція та контроль повітряного середовища

У процесі екструзії термопластів виділяються леткі сполуки, мікрочастинки та продукти термічного розкладання полімерів. Інтенсивність цього процесу залежить від типу матеріалу та температури друку. Найбільше потенційно шкідливих речовин виділяють ABS, Nylon і PC, оскільки вони можуть частково розкладатися при високих температурах. Навіть PLA, який вважається екологічно безпечним, під час екструзії утворює дрібнодисперсний аерозоль.

Щоб забезпечити безпечний рівень вмісту шкідливих речовин у повітрі, важливо використовувати системи примусової вентиляції, витяжні шафи або локальні фільтрувальні модулі, які фільтрами активованого вугілля. Робоче місце слід облаштовувати в приміщенні з кратністю повітрообміну не менше двох, трьох циклів на годину. Тривала експлуатація принтера в приміщеннях без вентиляції або поруч з людьми, які довго перебувають у кімнаті, зокрема в освітніх закладах, заборонена.

#### 4.4 Висновки до четвертого розділу

Роботи за FFF/FDM 3D-принтерами пов'язана з рядом небезпечних та шкідливих факторів. Серед них особливої уваги заслуговують високі температури нагрівальних елементів, виділення летких органічних сполук і функціонування електромеханічних вузлів. Для забезпечення безпечних умов експлуатації необхідний комплексний підхід, що включає технічні, організаційні та санітарно-гігієнічні заходи.

Дотримання вимог електробезпеки, регулярний технічний огляд обладнання, використання систем вентиляції та фільтрації повітря, а також правильне облаштування робочого місця значно знижують ризики виникнення аварійних ситуацій і негативного впливу на здоров'я. Впровадження заходів охорони праці гарантує безпечне проведення експериментальних досліджень і сприяє підвищенню надійності обладнання, а також стабільності технологічного процесу FFF/FDM-друку.

## ВИСНОВКИ

У цій кваліфікаційній роботі були проведені дослідження фізико-теплових процесів, які відбуваються під час екструзії філаменту для технології FFF/FDM. Було проаналізовані підходи до автоматизованого керування температурою екструдера. Були розглянуті теоретичні основи процесу плавлення та формування полімерного розплаву, а також проведено аналіз впливу температурних режимів на якість виробів.

У першому розділі розглянуто технологію FFF/FDM, принципи роботи блоку екструдера, властивості полімерів та те, як температура впливає на процес формування шарів моделі. Було встановлено, що точність підтримання температури є критично важливим фактором для забезпечення рівномірної екструзії, міжшарової адгезії та геометричної точності виробів. Також наведено порівняльну характеристику полімерів, які використовуються у 3D-друці, та визначено їхні температурні особливості.

У другому розділі розглянуто конструкцію 3D-принтера Flying Bear Ghost 5, включаючи нагрівальний вузол типу «Volcano», програмне забезпечення Klipper, засоби вимірювання та системи терморегуляції. Тут також аналізується робота як класичних, так і сучасних систем управління температурою, серед яких PID-регулятори, адаптивні методи та алгоритми прогнозного керування MPC. Визначено вимоги до точності датчиків, інерційності нагрівача та швидкодії регулятора, а також досліджено можливість створення адаптивного модуля управління з корекцією параметрів у реальному часі.

У третьому розділі було проведено серію експериментів, щоб оцінити, як різні алгоритми терморегуляції (PID, APID та MPC) впливають на амплітуду температурних коливань  $\Delta T$  та час перерегулювання  $t_{over}$ . Був використаний планований неповнофакторний експеримент, що дозволив охопити ключові технологічні параметри, такі як:

- температура сопла;
- швидкість друку;
- подача матеріалу;
- інтенсивність охолодження.

На основі отриманих даних було побудовано регресійно-кореляційний аналіз, який дав змогу оцінити, як ці параметри впливають ці параметри.

Виявилось, що стандартний PID-регулятор найбільш чутливий до зовнішніх збурень, тоді як APID забезпечує кращу стабільність, але все ще залежить від динаміки процесу.

Найефективнішим виявився алгоритм MPC, який демонструє мінімальні коливання температури  $\Delta T$  (в межах від 0,5 °C до 1,4 °C) та найшвидший час стабілізації  $t_{over}$  (від 2 с до 4 с), що підтверджує його придатність для роботи в умовах змінних та високо динамічних режимів FFF/FDM-друку.

Таким чином, у роботі доведено, що точне та адаптивне керування температурою є ключовим фактором для забезпечення високої якості виробів, стабільності екструзії та повторюваності процесу.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008: 2015. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення [Текст]. – Введ. 2016-01-01. – К.: Держстандарт України, 2015. – 29 с.

2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.

4. Андрошук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (І частина) / Г. О. Андрошук // Наука, технології, інновації. - 2017. - № 1. - С. 68-77.

5. Тулашвілі Ю.Й., Лук'янчук Ю.А. Використання сучасних SLA засобів в адитивних ІТ-технологіях // The XXIII International Science Conference «Theory, practice and science», April 27 – 30, 2021, Tokyo, Japan. P 462 – 467. ISBN-978-1-63848-669-5. <https://doi.org/10.4699/ISG.2021.I.XXIII>.

6. Valentina G. Sysyuk, Vasil M. Granchak. Optical and polymerization characteristics of the materials for 3D-printing depending on the nature of their composite component // Publishing House “Akademperiodyka” National Academy of Sciences of Ukraine 2017. p 226 – 237. <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.444.226>

7. Alfred Jacobsen, Trond Jorgensen, Qyvind Tafjord, and Endre Kirkhorn "Concepts for 3D print productivity systems with advanced DLP photoheads", Proc. SPIE 9376, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VII, 937605.

8. 3D printing. A Practical Guide / Redwood Ben, Garrat Brian, Chauffeur Philemon. - M.: DMK-Press, 2020. - 220 p.
9. Rossi, S.; Puglisi, A.; Benaglia, M. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing in Organic Synthesis. *ChemCatChem* 2018, 10, 1512– 1525, <https://doi.org/10.1002/cctc.201701619>.
10. Manapat J, Chen Q, Ye P, Advincula R (2017) 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography. *Macromol Mater Eng* 302:1600553.
11. Yurii Kuznietsov, Oleksii Solntsev Structural morphological synthesis of parallel kinematics based hybrid 3D-printer and connection with the challenges of INDUSTRY 4.0 // *Journal of the Technical University of Gabrovo*, vol.65, 2022.-p.p.1-6.
12. Johnson, G. A., French, J. J. (2018). Evaluation of Infill Effect on Mechanical Properties of Consumer 3D Printing Materials. *Advances in Technology Innovation*, 3 (4), 179–184
13. Нікітін, Д. О., Невлюдов, І. Ш., Жарікова, І. В., Бронніков, А. І., & Стрілець, Р. Є. (2025). Розробка методу контролю виробів під час фотополімерного 3D-друку. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1 (136)), 42–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335706>
14. Поліщук, А. О. (2024). Development of a 3D printer screw extruder that uses granules or crushed polymer particles as raw materials. *Technologies and Engineering*, (5), 33–49. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.5.3>
15. Xiao-Su Yi, Shanyi Du, Litong Zhang, (eds.). *Composite Materials Engineering. Fundamentals of Composite Materials*. Springer, Singapore, 2018, Vol. 1, doi: 10.1007/978-981-10-5696-3.
16. Разумов-Фризюк Є.А., Гурін Д.В., Нікітін Д.О., та ін. (2022). Моделювання шнекового екструдера для FFF 3D друку. *Radiotekhnika*, 2(209), С. 206–214. <https://doi.org/10.30837/rt.2022.2.209.21>
17. Kolosov A. E., Sivetskii V. I., Kolosova E. P., Vanin V. V., Gondlyakh A. V., Sidorov D. E., Ivitskiy I. I. Creation of Structural Polymer Composite Materials for

Functional Application Using Physicochemical Modification. *Advances in Polymer Technology*, 2019, p. 12, doi: 10.1155/2019/3501456.

18. Borelli V. Kinematic and dynamic analysis of a machine for additive manufacturing. Torino, 2018, p. 113, doi: 10.3390/machines5040029.

19. Matvijchuk V., Shtuts A., Kolisnyk M., Kupchuk I., Derevenko I. Investigation of the tubular and cylindrical billets stamping by rolling process with the use of computer simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 66, № 1. P. 51–58.

20. Shtuts A., Kolisnyk M., Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P. Improvement of Stamping by Rolling Processes of Pipe and Cylindrical Blades on Experimental Research. *Actual Challenges in Energy & Mining*. 2020. Vol. 844. P.168–181.

21. Пупань Л.І. Лазерні технології у машинобудуванні: навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання / Л. І. Пупань. – Харків: НТУ «ХП», 2020. – 109 с

22. Petrakov Y., Korenkov V., Myhovich A. (2022). Technology for programming contour milling on a CNC machine. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (116)), 55–61. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255389>

23. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Підручник. /Опальчук А.С., Афтандіянц Є.Г., Клендій М.Б., Роговський Л.Л., Семеновський О.Є.// Ніжин.: ТОВ "Видавництво "Аспект-Поліграф"".2011. - 792с.

24. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.

25. Конспект лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного управління» для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології денної форми навчання [Електронний ресурс] / [Упорядник Я. В. Корпань]; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси: ЧДТУ, 2019. – 124 с.

26. Osadchy S. I., Zozulya, V. A., Kalich, V. M., & Timoshenko, A. S. (2024). The frequency method for optimal identification of close-loop system elements . Radio Electronics, Computer Science, Control, (4), 195. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-4-18>

27. IBM SPSS Statistics // Сайт IBM URL: <https://www.ibm.com/spss> (дата звернення 15.11.25).

28. Величко О.М., Гордієнко Т.Б. Основи системного аналізу і прийняття оптимальних рішень [текст]: навч.посіб. / Величко О.М., Гордієнко Т.Б.: «Олді+», 2021. – 672 с. ISBN 978-966-289-553-7.

29. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Безпека праці в індустрії ІТ- технологій" підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, І. І. Хондак. – Харків, 2024. – 171 с.