



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

20.01.2024



Леонов Ю.С.

## ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ \_\_\_\_\_  
 Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР \_\_\_\_\_  
 Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_  
 Спеціальність \_\_\_\_\_ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології \_\_\_\_\_  
 Тип програми \_\_\_\_\_ Освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
 Освітня програма \_\_\_\_\_ Комп'ютеризовані та робототехнічні системи \_\_\_\_\_  
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав.кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024р.

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Леонову Юрію Сергійовичу \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)1. Тема роботи: \_\_\_\_\_ Розроблення системи підігріву та підтримання  
температури повітря в 3D-принтері \_\_\_\_\_

Затверджена наказом університету від \_\_\_\_\_ №1288Ст від 03.11.2023 \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 24.01.2024р. \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Друк деталей PLA, ABS, PETG та Nylon \_\_\_\_\_  
пластиком; 3.2 Технологія друку FDM; 3.3 Порушення температурного \_\_\_\_\_  
режиму для експериментальних досліджень \_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 4.1 Вступ; 4.2 Аналіз \_\_\_\_\_  
технологій 3D-друку; 4.3 Аналіз ефективності підігріву системи; 4.4 Аналіз \_\_\_\_\_  
відповідності температурних параметрів матеріалів; 4.5 Аналіз систем \_\_\_\_\_  
регулювання та керування 3D-друком; 4.6 Розробка функціональної схеми \_\_\_\_\_  
4.7 Аналіз та вибір апаратних модулів; 4.8 Розробка схеми підключення; \_\_\_\_\_  
4.9 Моделювання стійкості системи управління; 4.10 Вибір середовища \_\_\_\_\_  
розробки; 4.11 Розробка загального алгоритму роботи; 4.12 Програмна \_\_\_\_\_  
реалізація ПІД-управління у системі контролю теплових режимів у \_\_\_\_\_  
3D-принтері; 4.13 Постановка задач експерименту; 4.14 Проведення \_\_\_\_\_  
експерименту; 4.15 Висновки \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний демонстраційний матеріал в форматі PowerPoint(\*.ppt) формату А4 –12 сторінок.

6. Консультанти розділів роботи

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

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасних систем контролю та підтримки теплових режимів в 3D-принтерах	2.09.2023-28.09.2023	виконано
2	Розробка функціональної схеми	29.09.2023-4.10.2023	виконано
3	Аналіз та вибір апаратних модулів	5.10.2023-11.10.2023	виконано
4	Розробка схеми підключення	12.10.2023-19.10.2023	виконано
5	Моделювання стійкості системи управління	20.10.2023-3.11.2023	виконано
6	Вибір середовища розробки	4.11.2023-6.11.2023	виконано
7	Розробка загального алгоритму роботи	7.11.2023-15.11.2023	виконано
8	Програмна реалізація ПД-управління у системі контролю теплових режимів у 3D-принтері	16.11.2023-2.12.2023	виконано
9	Постановка задач експерименту	3.12.2023-5.12.2023	виконано
10	Проведення експериментальних досліджень	6.12.2023-27.12.2023	виконано

Дата видачі завдання 1 вересня 2023р.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Леонов Ю.С.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

Олександров Ю.М.

(прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 85 с., 10 табл., 20 рис., 2 дод., 16 джерел.

СИСТЕМА ПІДГРІВУ, ТЕМПЕРАТУРА ПОВІТРЯ, 3D-ПРИНТЕР, КОНТРОЛЬ, ОПТИМІЗАЦІЯ, МАТЕРІАЛИ, УНІКАЛЬНІ ВИМОГИ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ.

Мета роботи – розробка системи підігріву та підтримки температури для зменшення кількості дефектів у процесі друку.

Об’єкт дослідження – процес друку на 3D принтері технології FDM.

Предмет дослідження – система підігріву та підтримання температури.

В даній кваліфікаційній роботі було проаналізовано технології 3D-друку, ефективність підігріву системи та відповідність температурних параметрів матеріалів, а саме методи визначення температурних параметрів матеріалів, вплив температури на властивості матеріалу та оптимальні температурні параметри для різних матеріалів. Було проведено аналіз систем регулювання та керування 3D-друком. Після проведеного аналізу було розроблено функціональну схему. Далі було проведено аналіз та вибір апаратних модулів. Після, було розроблено схему підключення та проведено моделювання стійкості системи управління. Наступним етапом було обрано середовище розробки, розроблено загальний алгоритм роботи та було програмно реалізовано ПІД-управління у системі контролю теплових режимів у 3D-принтері. Заключним етапом було проведено експериментальні дослідження та проаналізовано отримані результати.

## ABSTRACT

Explanatory note: 85 pages, 10 tables, 20 figures, 2 app, 16 sources.

HEATING SYSTEM, AIR TEMPERATURE, 3D PRINTER, CONTROL, OPTIMIZATION, MATERIALS, UNIQUE REQUIREMENTS, EXPERIMENTAL STUDIES, EFFICIENCY.

The purpose of the work is to develop a heating and temperature maintenance system to reduce the number of defects in the printing process.

The object of research is the process of printing on a 3D printer using FDM technology.

The subject of research is the heating and temperature maintenance system.

In this qualification work, 3D printing technologies, the efficiency of system heating and the compliance of temperature parameters of materials were analyzed, namely methods of determining temperature parameters of materials, the effect of temperature on material properties and optimal temperature parameters for different materials. An analysis of regulation and control systems of 3D printing was carried out. After the analysis, a functional scheme was developed. Next, the analysis and selection of hardware modules was carried out. After that, the connection scheme was developed and the stability simulation of the control system was carried out. The next stage was the selection of a development environment, the development of a general work algorithm, and the software implementation of PID control in the system for controlling thermal modes in a 3D printer. At the final stage, experimental studies were conducted and the obtained results were analyzed.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз сучасних систем контролю та підтримки теплових режимів в 3D-принтерах .....	12
1.1 Аналіз технологій 3D-друку .....	12
1.2 Аналіз ефективності підігріву системи.....	16
1.3 Аналіз відповідності температурних параметрів матеріалів.....	20
1.3.1 Методи визначення температурних параметрів матеріалів .....	20
1.3.2 Вплив температури на властивості матеріалу .....	21
1.3.3 Оптимальні температурні параметри для різних матеріалів.....	21
1.4 Аналіз систем регулювання та керування 3D-друком .....	22
1.5 Постановка задач дослідження .....	24
2 Розробка функціональної та структурної схеми системи управління підтримкою теплових режимів в 3D-принтері.....	26
2.1 Розробка функціональної схеми .....	26
2.2 Аналіз та вибір апаратних модулів .....	30
2.3 Розробка схеми підключення.....	37
2.4 Моделювання стійкості системи управління .....	39
2.5 Висновки до 2 розділу .....	50
3 Розробка програми управління системою контролю і підтримки теплових режимів в 3D принтері.....	51
3.1 Вибір середовища розробки.....	51
3.2 Розробка загального алгоритму роботи .....	52
3.3 Програмна реалізація ПД-управління у системі контролю теплових режимів у 3D-принтері .....	53
3.4 Висновки до 3 розділу .....	56
4 Експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів.....	57

4.1 Постановка задач експерименту.....	57
4.2 Проведення експерименту .....	58
4.3 Охорона праці.....	63
4.4 Висновки до 4 розділу .....	65
Висновки .....	67
Перелік джерел посилань .....	69
ДОДАТОК А Апробація результатів наукових досліджень.....	72
ДОДАТОК Б Демонстраційний матеріал .....	84

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

КЕ – кінцевий ефектор;

ПНДЛ – проблемна науково-дослідна лабораторія;

РМ – робот-маніпулятор;

АКЕ – аналіз кінцевих елементів;

DEA – приводи з діелектричного еластомеру;

FEA – приводи з рідкого еластомеру;

FPN – швидка пневматична мережа;

SMA – сплави з пам'яттю форми;

SMP – полімери з пам'яттю форми;

SPA – м'які пневматичні приводи;

SPN – повільна пневматична мережа.

## ВСТУП

У світі сучасних технологій 3D-друку нині стає все більш невід'ємною складовою індустріального та творчого середовища. За останні кілька років ми спостерігаємо стрімкий розвиток цієї галузі, що відкриває нові можливості для створення складних та унікальних об'єктів. Однак, разом із зростанням популярності 3D-друку, виникає і низка технічних викликів, які потребують уваги та інженерного втручання.

Одним із ключових аспектів у процесі 3D-друку є контроль та оптимізація температури повітря в робочому просторі принтера. Висока якість та стабільність температурних параметрів є важливою передумовою для досягнення високої якості друку, уникнення дефектів та забезпечення надійності функціонування обладнання.

Ця проблематика набуває особливого значення у зв'язку з розширенням матеріалів для 3D-друку, оскільки кожен матеріал має свої унікальні вимоги до температурних умов. Розробка системи підігріву та підтримання температури повітря в 3D-принтері є актуальною задачею, що вирішує ці технічні виклики та сприяє подальшому розвитку 3D-друку.

Необхідність універсальної та ефективної системи контролю температури в 3D-друкарнях обумовлена не лише підтримкою оптимальних умов для різних матеріалів, але й забезпеченням стабільності процесу друку у різних середовищах. Результати дослідження та розробки даної системи не тільки поліпшать якість та надійність друку, але також знайдуть практичне застосування у широкому спектрі індустріальних та творчих галузей.

Отже, розробка системи підігріву та підтримання температури повітря в 3D-принтері є важливим кроком у подоланні технічних викликів, пов'язаних з розширенням можливостей 3D-друку та підвищенням ефективності його застосування у різних галузях.

Мета роботи – розробка системи підігріву та підтримки температури для зменшення кількості дефектів у процесі друку.

Об’єкт дослідження – процес друку на 3D принтері технології FDM.

Предмет дослідження – система підігріву та підтримання температури.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати технології 3D-друку;
- проаналізувати ефективність підігріву системи;
- проаналізувати відповідність температурних параметрів матеріалів;
- проаналізувати системи регулювання та керування 3D-друком;
- розробити функціональну схему;
- проаналізувати та вибрати апаратні модулі;
- розробити схему підключення;
- провести моделювання стійкості системи управління;
- вибрати середовище розробки;
- розробити загальний алгоритм роботи;
- провести програмну реалізацію ПІД-управління у системі контролю теплових режимів у 3D-принтері;
- провести постановку задач експериментів;
- провести експериментальні дослідження;
- проаналізувати отримані результати.

Дана кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1], керуючись навчальним посібником з дипломного проекту [2] та методичними вказівками [3]. Дана робота отримала апробацію у збірнику наукових статей, представлених у гугл-академії [4].

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА ПІДТРИМКИ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ В 3D-ПРИНТЕРАХ

## 1.1 Аналіз технологій 3D-друку

3D-принтер – це сучасне обладнання, яке перетворює цифрові моделі на фізичні об'єкти, друкуючи їх шар за шаром [5-6]. Ця інноваційна технологія дозволяє створювати різні предмети, від прототипів і деталей для машин до мистецьких виробів і медичних імплантатів, використовуючи різні матеріали, такі як пластик, метал, кераміка та навіть їжа. 3D-друкарі стали популярними в різних галузях, включаючи інженерію, архітектуру, медицину, дизайн і навіть гастрономію.

Існує кілька різних технологій 3D-друку, кожна з яких має свої особливості і застосування. До ключових технологій 3D-друку відносять:

- моделювання плавленого осадження (FDM);
- стереолітографія (SLA);
- селективне лазерне спікання (SLS);
- polyJet;
- пряме лазерне спікання металу (DMLS).

Технологія FDM – одна з найпоширеніших технологій 3D-друку і відзначається відносно низькими витратами та доступністю. Ця технологія використовує пластиковий філатмент, який плавиться і наноситься на платформу шар за шаром. Це інновація 3D-друку, яка використовує цикл під назвою екструзія матеріалу. Гаджети для екструзії матеріалів доступні та розумні з усіх. Вони працюють за циклом, коли котушка волокна з міцного термопластичного матеріалу укладається в 3D-принтер. Потім двигун проштовхує його через розігрітий носик, де він розріджується. У цей момент головка принтера рухається в певних напрямках, утримуючи матеріал для

3D-друку на етапі форми, де волокно принтера охолоджується та цементується, формуючи міцний елемент. Після завершення шару принтер накладає інший шар, доки елемент не буде завершено. Основні програми для FDM включають електричне розміщення, випробування конструкції та підгонки, зажимні пристосування та пристосування, а також шаблони литва за виплавленими моделями [7]. Серед переваг цієї технології варто виділити доступну ціну принтерів FDM. Також важливою перевагою є широкий вибір сумісних матеріалів, які можна використовувати з цією технологією, включаючи різні види пластику і навіть металеві композити. Однак, важливо враховувати обмежену точність та видимі шари на друківаних об'єктах, а також вимоги до підготовки та тривалість друку, що можуть бути недоліками цієї технології.

Технологія SLA це одна з популярних методів 3D-друку, що використовує ультрафіолетове світло для затвердження рідкої смоли. Принтер SLA використовує дзеркала, відомі як гальванометри або гальво, одне з яких розташоване на осі X, а інше – на осі Y. Ці гальво швидко направляють лазерний промінь на ємність зі смолою, вибірково затверджуючи та зміцнюючи поперечний переріз об'єкта всередині цієї будівельної області, створюючи його шар за шаром. Оскільки кожен шар затвердів у потрібних місцях, він потім рухається вгору, щоб витягнути затверділий шар смоли та звільнити місце для іншого рідкого шару, який потім затвердіє лазер [8]. Stereolithography відзначається високою деталізацією, що дозволяє створювати об'єкти з високою точністю і якістю. Це робить технологію ідеальною для виробництва прототипів і деталей з високими вимогами до точності. Мінусом використання SLA є досить високі витрати на матеріал, а саме смолу. Крім того, друкарки SLA можуть вимагати ретельного обслуговування, і процес друку може бути деяким чином надзвичайно точним і вимагати досить довгої підготовки.

Технологія SLS використовується для створення об'єктів з пластикового порошку за допомогою лазера. Процес починається з нагрівання полімерного порошку у спеціальному бункері до температури трохи нижчої за точку плавлення полімеру. Потім тонкий шар порошку (зазвичай товщиною 0,1 мм) наноситься на будівельну платформу за допомогою леза або стиральної машини. Лазер (може бути CO<sub>2</sub> або волоконний) починає сканувати цей шар відповідно до цифрової моделі об'єкта. Під час сканування лазер вибірково нагріває порошок і затверджує поперечний переріз об'єкта. Після завершення сканування будівельна платформа зміщується вниз на висоту одного шару, і процес повторюється для наступного шару. Лезо наносить новий шар порошку поверх вже затвердженого, і лазер знову спікає поперечний переріз об'єкта. Ці кроки повторюються, поки не буде виготовлений весь об'єкт [9]. Технологія включає високу точність та можливість створення деталей зі складними геометричними формами. Великий вибір матеріалів, включаючи метали та нейлон, дозволяє виготовляти об'єкти з різними фізичними властивостями. До недоліків відносять високі витрати на обладнання та матеріали, що робить її менш доступною для багатьох користувачів. Також друковані вироби SLS можуть потребувати додаткової обробки для досягнення високої якості поверхні. Крім того, точність друку може бути обмеженою на великих виробках.

Технологія PolyJet працює на основі друку шар за шаром рідкою смолою або полімером за допомогою друкарських голівок, подібних до струменевих голівок струмувальних принтерів. Процес починається з підготовки цифрової 3D-моделі об'єкта, після чого вибирається матеріал і кольори для друку. Друкарські голівки наносять тонкі шари матеріалу на будівельну платформу, і ці шари швидко затвердіваються під впливом ультрафіолетового світла. Після нанесення кожного шару об'єкт проходить процес затвердіння, і затверділі шари об'єднуються, щоб сформувати

кінцевий об'єкт. Однією з ключових переваг PolyJet є здатність друкувати об'єкти багатьох кольорів і матеріалів в одному процесі, що робить її ідеальною для створення деталей зі складними геометричними формами та великою кількістю деталей. Також слід відзначити високу деталізацію та точність друку, що дозволяє створювати об'єкти з надзвичайно гладкими поверхнями. Але висока якість і можливості друку призводять до вищих витрат, які можуть бути більш високими, ніж у деяких інших методів 3D-друку. Крім того, обмежена масштабність та розмір друка можуть бути проблемними для створення великих об'єктів.

Технологія DMLS базується на принципі плавлення тонких шарів металевого порошку за допомогою високо потужного лазера. Процес починається зі створення цифрової 3D-моделі об'єкта, яка розділяється на тонкі горизонтальні шари. Потім цей проект передається до DMLS-принтера, де він розбивається на послідовні шари металевого порошку. На кожному етапі друку лазер наводить на шар металевого порошку та нагріває його до точки плавлення. Після цього лазер наносить новий шар порошку та знову нагріває його, об'єднуючи його з попереднім шаром. Цей процес повторюється для кожного шару, і об'єкт поступово створюється, шар за шаром. Одним із важливих аспектів DMLS є здатність контролювати температуру та потужність лазера, що дозволяє досягти високої якості друку та мінімізувати ризик виникнення дефектів. Наприкінці процесу друку об'єкт видаляється з надлишкового порошку, і його може знадобитися післяпроцесінг для досягнення більш гладкої поверхні. Перевагами техноогії є висока міцність та довговічність виготовлених металевих об'єктів, що робить її особливо корисною в галузях, де потрібні високі стандарти міцності, таких як авіація та медицина. Крім того, DMLS дозволяє створювати об'єкти зі складними геометричними формами, що було б складно або навіть неможливо виготовити іншими способами. З іншого боку, DMLS має свої недоліки, такі як високі витрати на обладнання та

матеріали, що робить його менш доступним для широкого кола користувачів. Також обмеженість розмірів друкованих об'єктів через робочий простір принтера та високий час друку можуть становити виклик для деяких проектів.

Різні технології 3D-друку мають свої унікальні застосування в різних галузях. FDM широко використовується в освіті, розробці прототипів та для виробництва невеликих об'єктів. SLA застосовується в прототипуванні та дизайні для створення деталей з високою деталізацією. SLS знайшов застосування в авіаційній промисловості, медицині та виробництві завдяки високій міцності та можливості створення складних геометричних форм. PolyJet ідеально підходить для кольорових прототипів та моделей з високою деталізацією, особливо в дизайні та архітектурі. DMLS використовується для виробництва металевих деталей з високою міцністю та точністю, і знайшовши застосування в авіації, медицині та автомобільній промисловості.

## 1.2 Аналіз ефективності підігріву системи

Головними компонентами 3D-принтера технології FDM є: нагрівальний елемент, сопло, платформа та котушка з філаментом, а тобто матеріал, який використовується для створення деталей. Як було сказано вище, пластик подається в корпус зріджувача, тобто в нагрівальний елемент, вздовж якого нитка поступово нагрівається, доки не буде перевищена температура склування матеріалу. Наконечник сопла має контрольований діаметр, величина якого впливає на якість задрукованої деталі та продуктивність процесу. На даний час сировина поставляється у вигляді волокон діаметром 1,75 мм і 3 мм, а діаметри сопел можуть варіюватися від 0,1 мм до 1 мм [4].

У процесі друку два компоненти друкуючого пристрою повинні підтримуватися при певній температурі. По-перше, гарячий шар, тобто

платформа, на яку укладається перший шар матеріалу, і яка, отже, є основою виготовленої частини. Температура шару зазвичай підтримується всередині вилки від 50 °C до 80 °C, щоб забезпечити стійке зчеплення першого шару для правильного складання решти частини. Розріджувач є другою частиною, що піддається контролю температури, оскільки він відповідає за гарячий процес екструзії нитки.

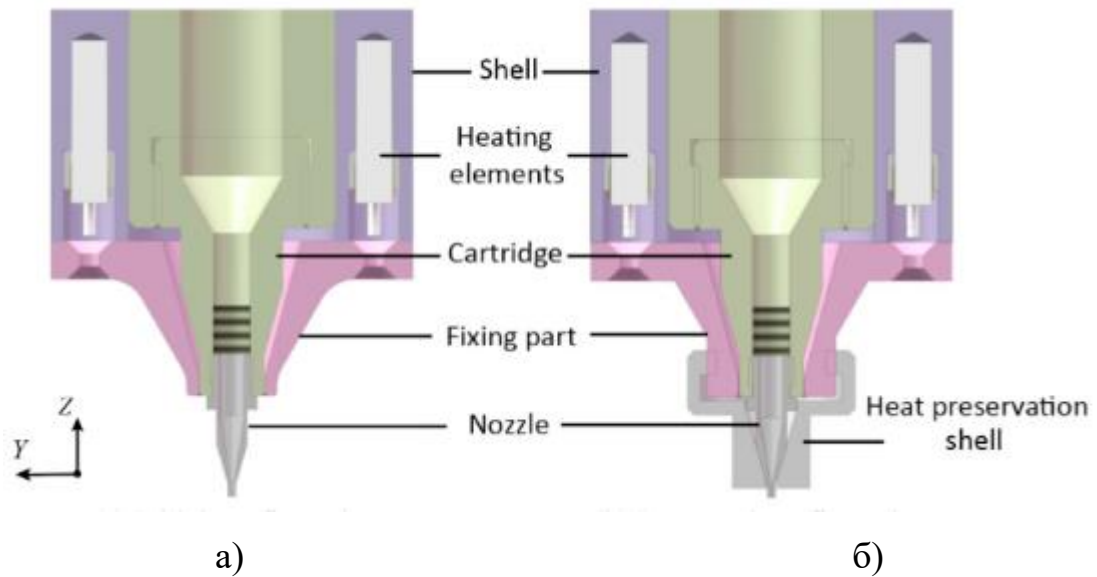
Ефективність підігріву в контексті 3D-друку вказує на те, наскільки швидко та стабільно система здатна нагрівати повітря або друкувальну платформу до бажаної температури. Ефективність підігріву важлива з кількох причин, по-перше це час друкування об'єкта. Швидкий підігрів платформи та друкувальної головки скорочує час очікування перед початком друку. Це особливо важливо для користувачів, які хочуть виготовити декілька деталей підряд або просто зекономити час. По-друге це стабільність температури. Ефективна система підігріву може легше підтримувати сталу температуру під час друку. Це важливо для досягнення високої якості друку, оскільки зміни температури можуть вплинути на адгезію матеріалу, деформацію та інші параметри. Також це дає можливість друку використовуючи різні матеріали, бо вони вимагають різних температурних умов.

Завдяки ефективному підігріву можна запобігти різних проблем, бо якщо система не ефективна, це може призвести до проблем, таких як недостатня адгезія до платформи, викривлення деталей або неякісний друк. Тому для забезпечення високої якості друку надзвичайно важливо проводити моніторинг та підтримку оптимального температурного режиму повітря в 3D-принтері.

Через процес конвективного теплового обміну між оточуючим повітрям та нагрітою друкуючою головкою може відбуватися втрата тепла через зовнішню поверхню друкуючої головки. Це може призвести до утворення температурного градієнта в області температурного режиму

друкуючої головки. Це явище особливо помітне у зоні сопла через його менший об'єм у порівнянні з корпусом та картриджем. Такий градієнт може призвести до значного відхилення між заданою температурою та реальною температурою на соплі, що може зменшити точність контролю температури під час процесу формування нитки. В статті [10] автор демонструє як можна вирішити дану проблему вдосконаливши конфігурацію сопла. На рисунку 1.1 представлено дану конфігурацію вдосконаленої головки екструдера. Дана модель оболонки обмежує втрати тепла з зовнішніх поверхонь сопла. Оболонку можна виготовити за двома способами. Перший спосіб передбачає створення захисної оболонки з матеріалу на основі поліетеретеркетону (PEEK) навколо сопла 3D-принтера. Зазвичай, тепло, яке розсіюється з сопла, розповсюджується в повітрі через конвекцію. У цій схемі, замість того, щоб тепло втрачалось в повітрі, оболонка PEEK здатна проводити тепло значно гірше, завдяки своїм теплоізоляційним властивостям. Це дозволяє зберегти тепло біля сопла, зменшуючи втрати тепла через конвекцію та, отже, допомагаючи зберегти більш стабільну температуру навколо сопла.

Другий спосіб включає виготовлення оболонки з алюмінієвого сплаву навколо сопла. На відміну від PEEK, алюмінієвий сплав має дуже хорошу теплопровідність. Тобто він добре проводить тепло від нагрівального елемента до сопла через металеву оболонку та фіксуючу частину. Це дозволяє додатково нагрівати сопло, оскільки тепло ефективно передається через металеву оболонку. Ця схема може забезпечити більше стабільне та контрольоване нагрівання сопла у порівнянні зі стандартною конфігурацією друкуючої головки. Враховуючи обидві схеми, вибір матеріалу та конструкції теплоізолюючої оболонки може суттєво вплинути на термін стабільності температури сопла, що є важливим для якісного та точного 3D-друку.



а) класична друкуюча головка екструдера;

б) вдосконалена друкуюча головка екструдера

Рисунок 1.1 – Покращена конфігурація на основі вихідної друкуючої головки [10]

В статті [11] автор провів аналіз впливу на термічну ефективність теплозахисних покриттів на основі діоксиду цирконію, стабілізованого оксидом ітрію та цирконату лантану, на алюмінієвому нагрівальному блоці для 3D-принтера. Теплозахисне покриття (ТВС) – це високоякісна система матеріалів, яка використовується для забезпечення теплоізоляції частин системи, що піддаються впливу високих температур, наприклад двигунів внутрішнього згоряння та газових турбін. В ТВС використовуються такі матеріали для покриття, як цирконат гадолінію, цирконат лантану типу пірохлору, а також комерційне покриття зі стабілізованого оксидом ітрію цирконію, яке є широко використовуваний. Аналіз показав, що робоча температура матеріалів ТВС, вища за робочу температуру алюмінієвого нагрівального блоку, таким чином температурне розширення та утворення тріщин, спричинене температурою, буде зменшено.

За результатами аналізу чисельних даних показано значну зміну середньої щільності теплового потоку через теплозахисний покрив. Також

було виявлено, що середня щільність теплового потоку зменшилася на 10,258%, і завдяки цьому покриттю теплова ефективність зросла. Це означає, що керування температурним режимом 3D-принтера стало більш ефективним і простим завдяки цій технології. Крім того, це покращення сприяє підвищенню якості друку та зменшенню кількості друкарських помилок, адже забезпечуємо оптимальне розплавлення ниток з високою тепловою ефективністю та стійкістю до змін температури.

### 1.3 Аналіз відповідності температурних параметрів матеріалів

У даному розділі проводиться аналіз температурних параметрів матеріалів, що використовуються при 3D-друці. Дослідження спрямоване на встановлення оптимальних температур для кожного матеріалу, що дозволяє досягти найкращих результатів друку. Додатково, розглядається вплив температури на міцність та інші фізичні властивості матеріалу.

#### 1.3.1 Методи визначення температурних параметрів матеріалів

Термічний аналіз є одним із ключових методів визначення температурних параметрів. Включає такі техніки, як диференційний скануючий калориметрія (DSC) та термогравіметрія (TGA). DSC використовується для вимірювання споживання або вироблення тепла під час зміни температури, що дозволяє визначити фазові переходи та кристалічні зміни у матеріалах. TGA вимірює зміни маси матеріалу під час підвищення температури, що може бути корисним для визначення розкладу та декомпозиції матеріалу. DSC використовується для вимірювання теплових ефектів, які супроводжують фазові та хімічні переходи у матеріалі. Визначаючи температури плавлення, кристалізації та інші теплові параметри, можна встановити оптимальні температури для друку. Наступним методом є рентгеноструктурний аналіз, який включає в себе використання

рентгеновської дифракції (XRD) для вивчення кристалічної структури матеріалу. Результати XRD можуть допомогти визначити оптимальні температури для забезпечення найкращої кристалічної орієнтації та мікроструктури під час друку. Методи аналізу термофізичних властивостей включають в себе методи, спрямовані на визначення теплоємності, теплопровідності та інших термофізичних властивостей матеріалів. Це дозволяє прогнозувати теплові потоки під час друку та оптимізувати температурні параметри [12].

### 1.3.2 Вплив температури на властивості матеріалу

Високо важливою галуззю аналізу є вивчення впливу температури на механічні властивості матеріалу. Включаючи міцність, жорсткість, витривалість та інші параметри. Наприклад, деякі матеріали можуть стати більш гнучкими або навпаки, менш міцними за високих температур. Температура, в свою чергу, може впливати на теплофізичні характеристики матеріалу, такі як теплопровідність та теплоємність. Це важливо при друку, оскільки може вплинути на розподіл та дифузію тепла під час процесу. Температура може спричиняти термічні переходи, такі як плавлення, кристалізацію або аморфізацію, що впливає на структуру матеріалу. Це може мати важливий вплив на його властивості та здатність до обробки. Також, температура може впливати на хімічну стійкість матеріалу та його взаємодію з іншими речовинами. Деякі матеріали можуть деградувати або піддаватися хімічним реакціям при підвищених температурах [13].

### 1.3.3 Оптимальні температурні параметри для різних матеріалів

В таблиці 1.1 показана інформація про температурні параметри, які рекомендується використовувати для кожного матеріалу при 3D-друку. Вона може бути корисною для друкарів для досягнення оптимальних результатів в залежності від використаного матеріалу. У стовпчику «Матеріали»

перераховані різні типи матеріалів, що можуть використовуватися у 3D-друкарках. Стовпчик «Температурний діапазон (°C)» вказує на рекомендований діапазон температур, в якому можна використовувати кожен матеріал для 3D-друку. Цей діапазон може варіюватися від нижньої до верхньої межі. У стовпчику «Оптимальна температура (°C)» подана рекомендована оптимальна температура, яка вважається найефективнішою для друку з кожним конкретним матеріалом. Це значення визначається на основі результатів досліджень та експериментів [14].

Таблиця 1.1 – Рекомендовані температурні параметри

Матеріали	Температурний діапазон (°C)	Оптимальна температура (°C)
PLA	190-220	205
ABS	230-260	250
PETG	220-250	235
Нейлон	250-280	265
PVA	190-210	200
TPU	210-230	220
PC	250-290	270
PBX	200-230	215

#### 1.4 Аналіз систем регулювання та керування 3D-друком

В сучасному технологічному світі 3D-друк відіграє ключову роль у створенні надзвичайних та інноваційних виробів. Проте, успішний процес 3D-друку вимагає дбайливого контролю температури, щоб забезпечити якість та точність виготовлення деталей. Аналіз існуючих систем керування у цій галузі розкриває важливі аспекти, які сприяють ефективності та надійності процесу друку.

Одним з ключових аспектів є контроль температури у сучасних 3D-принтерах. Вони використовують різні методи, щоб підтримувати потрібний тепловий режим. Зокрема, методи зворотного зв'язку дозволяють системі реагувати на зміни температури в реальному часі, щоб уникнути

надлишкового нагрівання або охолодження. Додатково, аналіз алгоритмів регулювання та реакції важливий для забезпечення стабільності температури під час друку. Алгоритми, такі як PID-регулятори, виявляються ефективними для досягнення точної та надійної регуляції.

Важливо врахувати, що різні типи матеріалів вимагають специфічного підходу до керування температурою. Деякі матеріали можуть бути чутливі до навколишньої температури та потребувати більш точного регулювання, тоді як інші можуть бути менш чутливі. Крім того, аналіз точності та надійності систем керування важливий для уникнення можливих дефектів у друку. Навіть невеликі коливання температури можуть призвести до недоліків у виробі. У великій мірі, аналіз існуючих систем керування 3D-друку є важливим кроком у напрямку поліпшення процесу виготовлення виробів. Вивчення та розуміння цих систем дозволяє розробникам та друкарям досягти найкращих результатів у своїй роботі, забезпечуючи високу якість та точність кінцевого виробу [15].

Розробка та аналіз власної системи керування є ключовим кроком у впровадженні нових технологій та вдосконаленні існуючих процесів. Цей процес вимагає великої уваги до деталей, аналізу потреб та ефективного використання ресурсів. Перш за все, важливо зрозуміти конкретні цілі та завдання, які передбачає система керування. Це може бути автоматизація виробничого процесу, оптимізація розподілу ресурсів або підвищення продуктивності. З чітко визначеними метою і завданнями, можна розпочати розробку системи.

Далі слід визначити потрібні компоненти та технології для реалізації системи керування. Це може включати сенсори, контролери, програмне забезпечення та інші технічні складові. Важливо вибрати найбільш підходящі та сумісні компоненти для досягнення максимальної ефективності системи. Розробка системи вимагає вивчення та впровадження відповідних програмних алгоритмів для обробки та аналізу даних. Ці алгоритми

відіграють важливу роль у прийнятті рішень та автоматизації процесів. У процесі розробки важливо не тільки створити ефективну систему, але і протестувати її на реальних даних та умовах. Це дозволяє виявити можливі недоліки та удосконалити систему перед впровадженням.

Аналіз власної системи керування включає оцінку її продуктивності, надійності та вартості. Важливо виявити можливі області покращення та визначити, чи відповідає система вихідним цілям та завданням. У цілому, розробка та аналіз власної системи керування є складним, але надзвичайно важливим етапом у впровадженні інновацій та вдосконаленні бізнес-процесів. Чітке визначення цілей, вибір відповідних компонентів та алгоритмів, тестування та аналіз гарантують успішну реалізацію та ефективну роботу системи керування [16].

### 1.5 Постановка задач дослідження

В ході проведеного аналізу було виявлено, що тема даного дослідження є актуальною. Метою роботи є розробка системи підігріву та підтримки температури для зменшення кількості дефектів у процесі друку. Об'єктом дослідження є процес друку на 3D принтері технології FDM. Предметом дослідження є система підігріву та підтримання температури. Методами дослідження є експериментальні вимірювання, аналітичні методи, тестування прототипів. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні задачі:

- розробити функціональну схему;
- проаналізувати та вибрати апаратні модулі;
- розробити схему підключення;
- провести моделювання стійкості системи управління;
- вибрати середовище розробки;
- розробити загальний алгоритм роботи;

- провести програмну реалізацію ПІД-управління у системі контролю теплових режимів у 3D-принтері;
- провести постановку задач експериментів;
- провести експериментальні дослідження;
- проаналізувати отримані результати.

## **2 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПІДТРИМКОЮ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ В 3D-ПРИНТЕРІ**

### **2.1 Розробка функціональної схеми**

Розробка функціональної схеми системи керування підтримкою теплових режимів усередині корпусу 3D принтера має кілька ключових цілей:

- керування температурними умовами, що забезпечує стабільну температуру всередині корпусу для оптимальної роботи 3D принтера. Це особливо важливо під час друку матеріалів, що потребують певних температурних умов;

- запобігання перегріву, що дозволяє підтримувати безпечний рівень температури всередині корпусу для запобігання перегріву компонентів 3D принтера, таких як двигуни, електроніка та інші вразливі вузли;

- управління охолодженням, дає можливість регулювання роботи вентиляторів для ефективного охолодження системи при необхідності. Це особливо важливо при тривалій роботі або під час використання високотемпературних матеріалів;

- підтримка оптимальних умов друку під час роботи, що забезпечує оптимальні умови для друку різних матеріалів. Деякі матеріали можуть вимагати конкретних температур для досягнення найкращих результатів;

- енергозбереження, розробка системи, здатної раціонально використовувати енергію в залежності від поточних умов та вимог. Це допомагає знизити енергоспоживання та підвищити ефективність роботи принтера;

– користувальницький комфорт, тобто створення інтерфейсу для управління тепловими режимами, що дозволяє користувачам легко моніторити і регулювати умови всередині корпусу;

– безпека, використання датчиків та алгоритмів безпеки для запобігання можливим небезпечним ситуаціям, таким як перегрів або коротке замикання.

Розробка функціональної схеми є важливим етапом, оскільки вона допомагає визначити всі необхідні компоненти та їхню взаємодію для досягнення ефективної та безпечної роботи 3D принтера. На базі проведених досліджень у першому розділі, та на ґрунтуючись на допустимих температурних рівнях 3D друку, пропонується наступна функціональна схема модуля управління та контролю теплових режимів у 3D принтері, яка представлена на рисунку 2.1.

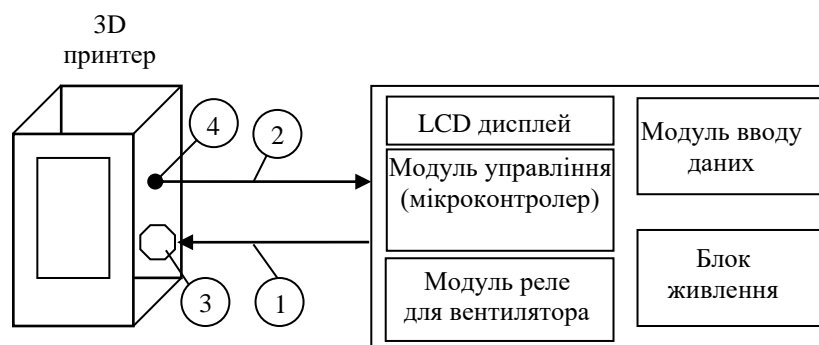


Рисунок 2.1 – Функціональна схема модуля управління та контролю теплових режимів у 3D принтері

Опишемо призначення основних елементів функціональної схеми модуля управління та контролю теплових режимів у 3D принтері, представленого вище:

– LCD дисплей у модулі керування тепловими режимами 3D принтера не тільки забезпечує зручний спосіб відображення поточних параметрів, таких як температура та статус друку, але також надає користувачеві

можливість взаємодії з пристроєм, налаштовуючи різні параметри без використання комп'ютера. Цей елемент керування робить процес друку доступнішим і незалежнішим, дозволяючи користувачам моніторити та регулювати умови друку безпосередньо на місці. У результаті, LCD дисплей покращує досвід користувача і забезпечує більш зручне управління тепловими режимами для досягнення оптимальних результатів;

– модуль управління, заснований на мікроконтролері, відіграє ключову роль системі контролю теплових режимів 3D принтера. Він відповідальний за збирання та обробку даних від датчиків температури, дозволяючи ефективно регулювати та підтримувати оптимальні умови всередині корпусу. Цей елемент забезпечує точне керування обігрівачами та вентиляторами, що у свою чергу оптимізує процес друку та забезпечує стабільні теплові параметри для досягнення високоякісних результатів. У результаті модуль управління мікроконтролера є ключовим компонентом, що забезпечує точне і надійне регулювання теплових умов у світі 3D друку;

– модуль реле для вентилятора в системі керування та контролю теплових режимів 3D принтера виконує важливу функцію регулювання теплових процесів. Цей модуль відповідає за керування швидкістю вентилятора залежно від виміряних температур, забезпечуючи ефективне охолодження за потреби. Шляхом активації та регулювання роботи вентиляторів він сприяє підтримці стабільних теплових умов усередині корпусу, що у свою чергу сприяє якісному та безпечному друку. Цей ключовий компонент забезпечує автоматизований контроль теплових режимів, підвищуючи ефективність роботи 3D принтера та забезпечує оптимальні умови для створення деталей високої якості;

– модуль введення даних у системі керування та контролю теплових режимів 3D принтера відіграє важливу роль у забезпеченні взаємодії користувача з пристроєм. Цей модуль надає зручний інтерфейс для налаштування параметрів, таких як температура та швидкість друку, роблячи

процес керування більш інтуїтивно зрозумілим. Користувач може легко моніторити та регулювати теплові умови, а також отримувати важливу інформацію про статус друку. Модуль введення даних підвищує зручність використання 3D принтера, надаючи користувачам контроль за ключовими параметрами для досягнення оптимальних результатів друку;

– блок живлення у модулі керування та контролю теплових режимів 3D принтера надає необхідну енергію для роботи всіх компонентів системи. Цей ключовий компонент забезпечує стабільне та надійне електроживлення, необхідне для роботи мікроконтролера, реле, вентиляторів та інших пристроїв. Завдяки блоку живлення, модуль може ефективно регулювати теплові процеси всередині принтера, підтримуючи оптимальні умови для якісного 3D-друку. Надійне електроживлення є фундаментом для успішної роботи системи управління, забезпечуючи стабільність та точність у кожному етапі друку.

Позначення 1 – шина підключення вентилятора з функцією нагрівання повітряного потоку до системи керування.

Позначення 2 – шина підключення цифрового датчика температури до системи керування.

Позначення 3 – вентилятор із підігрівом у модулі керування та контролю теплових режимів 3D принтера виконує важливу функцію у підтримці стабільних температур усередині корпусу. Цей елемент забезпечує як ефективне охолодження системи, а й можливість підтримки необхідних теплових умов холодних навколишніх середовищах. Вентилятор із підігрівом сприяє запобіганню конденсації вологи всередині принтера, забезпечуючи стабільні умови для точного та безперебійного 3D-друку. Такий інтегрований вентилятор є важливим елементом, що покращує надійність та якість роботи 3D принтера у різних кліматичних умовах.

Позначення 4 – цифровий датчик температури у модулі керування та контролю теплових режимів 3D принтера відіграє важливу роль у точному

моніторингу та регулюванні теплових параметрів. Цей датчик надає високоточні дані про температуру в різних зонах принтера, що дозволяє системі підтримувати оптимальні умови друку різних матеріалів. Інтеграція цифрового датчика забезпечує автоматизоване реагування на зміни температури, що суттєво підвищує стабільність та надійність роботи 3D принтера. В результаті ефективного використання цифрового датчика температури досягається високоякісний та точний 3D-друк. Для зручності розуміння внутрішніх зв'язків усередині модуля управління і контролю теплових режимів, що розробляється, в 3D принтер, представимо функціональну схему наведену на рисунку 2.1, більш детально на рисунку 2.2.

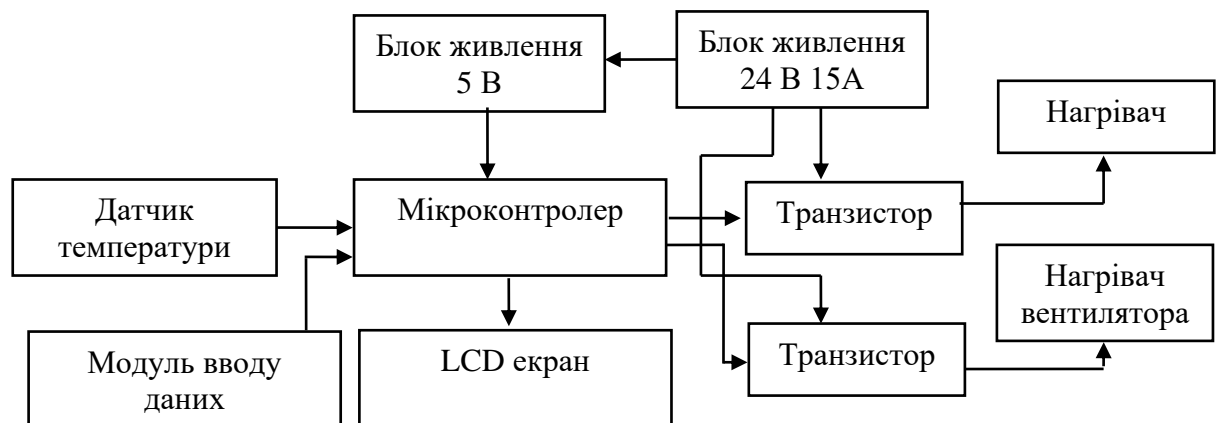


Рисунок 2.2 – Функціональна схема модуля управління та контролю теплових режимів у 3D принтері (деталізована)

## 2.2 Аналіз та вибір апаратних модулів

Вибір апаратних модулів для модуля управління та контролю теплових режимів у 3D принтері здійснювався з урахуванням строгих вимог до функціональності та надійності системи. Цифрові датчики температури були обрані на основі їх високої точності та стійкості до навколишніх умов, забезпечуючи точний моніторинг та регулювання теплових параметрів.

Мікроконтролери були підібрані з урахуванням їхньої сумісності з різними апаратними модулями та можливістю реалізації складних алгоритмів управління. Вентилятори з підігрівом були інтегровані для забезпечення не лише ефективного охолодження, а й підтримки стабільних теплових умов у холодних середовищах, що особливо важливо для надійного 3D-друку. Модулі реле для вентиляторів гарантують точне та надійне керування, оптимізуючи витрату енергії. Блок живлення був обраний з урахуванням його енергоефективності та здатності забезпечувати стабільне електроживлення для всіх компонентів системи. LCD дисплей та модуль введення даних надають користувачам зручний інтерфейс для контролю та налаштування параметрів, роблячи процес керування 3D принтером більш доступним та інтуїтивно зрозумілим.

Такий комплексний підхід до вибору апаратних модулів забезпечує високу ефективність та стабільність у роботі 3D принтера, гарантуючи точність та якість у кожному етапі друку. Виходячи з вище перерахованих вимог був проведений аналіз існуючих мікропроцесорних модулів, які підходять для вирішення поставленої задачі в рамках поточних слідувань, проаналізовані мікропроцесорні модулі представлені на рисунку 2.3., а в таблиці 2.1 представлено порівняння базових характеристик даних модулів.



а)



б)



в)

а) Arduino Uno R3;

б) Arduino Nano V3.0 AVR ATmega328P;

в) NodeMCU V3 ESP8266 (CH340)

Рисунок 2.3 – Мікропроцесорні модулі для реалізації системи керування

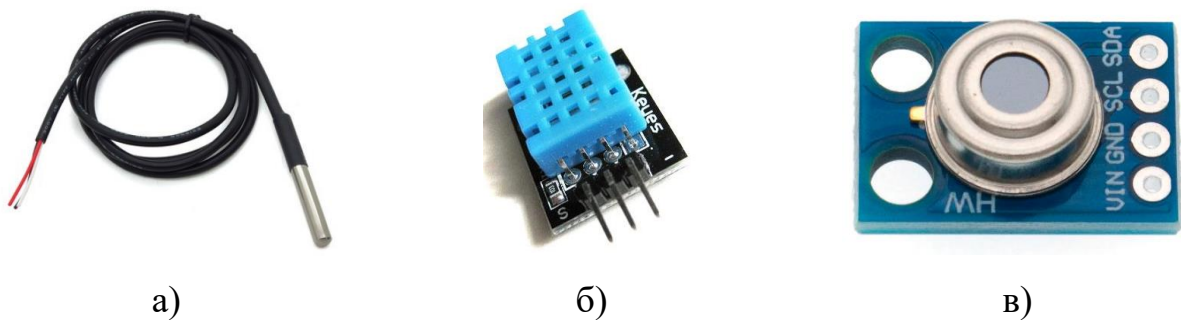
Таблиця 2.1 – Порівняння базових характеристик модулів Arduino Uno R3, Arduino Nano V3.0 AVR ATmega328P та NodeMCU V3 ESP8266 (CH340)

Характеристика	Arduino Uno R3	Arduino Nano V3.0 ATmega328P	NodeMCU V3 ESP8266
Мікроконтролер	ATmega328P	ATmega328P	ESP8266 (ESP-12E)
Архітектура	AVR	AVR	Xtensa
Частота процесора	16 МГц	16 МГц	80/160 МГц
Кількість цифрових входів	14	14	10 (GPIO)
Кількість аналогових входів	6	8	-
Вбудована пам'ять Flash	32 кБ (в т.ч. завантажувач)	32 кБ (в т.ч. завантажувач)	4 МБит (SPI Flash)
Оперативна пам'ять (RAM)	2 кБ	2 кБ	80 кБ
Вбудовані інтерфейси	USB, UART, I2C, SPI, GPIO	USB, UART, I2C, SPI, GPIO	USB, UART, I2C, SPI, GPIO
Бездротові інтерфейси	Нет	Нет	Wi-Fi (802.11 b/g/n)
Розмір	Довжина 68,6 мм, Ширина 53,4 мм	Довжина 45 мм, Ширина 18 мм	Довжина 57 мм, Ширина 25 мм
Операційна система	Прошивається через Arduino IDE	Прошивається через Arduino IDE	NodeMCU Firmware

Arduino Uno R3 виділяється серед альтернативних плат, таких як Arduino Nano V3.0 AVR ATmega328P та NodeMCU V3 ESP8266, для реалізації модуля управління та контролю теплових режимів у 3D принтері. Його мікроконтролер ATmega328P забезпечує стабільну та надійну роботу, маючи достатньо портів введення/виводу для підключення датчиків температури та інших пристроїв. Arduino Uno R3 має зручний USB-інтерфейс, що полегшує програмування та оновлення через Arduino IDE. Крім того, Arduino Uno R3 має широке співтовариство розробників, що робить його привабливим вибором для навчальних проектів і забезпечує

наявність безлічі бібліотек та ресурсів для підтримки студентів та інженерів-початківців.

Наступним кроком вибору апаратних модулів, відповідно рисунку 2.2, проведемо аналіз цифрових датчиків температури, які представлені на рисунку 2.4, а порівняння їх базових характеристик наведено в таблиці 2.2.



а) DS18B20;

б) DHT11;

в) GY-906 / MLX90614

Рисунок 2.4 – Цифрові датчики температури

Таблиця 2.2 – Порівняння базових характеристик датчиків температури DS18B20, DHT11 та GY-906/MLX90614

Характеристика	DS18B20	DHT11	GY-906/MLX90614
Тип датчика	Цифровий	Цифровий	Інфрачервоний
Діапазон вимірів	-55 °C до +125 °C	0 °C до +50 °C	-70 °C до +380 °C
Точність	±0.5 °C (від -10 °C до +85 °C)	±2 °C	±2 °C
Дозвіл	12 біт	-	0,02 °C
Оновлення даних	~750 мс	~2 с	~250 мс
Інтерфейс зв'язку	1-Wire	Цифровий	I2C
Напруга живлення	3 В – 5,5 В	3 В – 5,5 В	3 В – 5,5 В
Робочий струм	~1 мА	~2,5 мА	~26 мА
Робочий діапазон вологості	Не застосовується	20 % - 80 %	Не застосовується
Додаткові функції	-	Вимірювання вологості	Компенсація температури

DS18B20 був обраний для реалізації модуля управління та контролю теплових режимів у 3D принтері через декілька ключових переваг. По-перше, його цифровий інтерфейс (1-Wire) та протокол забезпечують зручну інтеграцію та адресацію безлічі датчиків у мережі. По-друге, DS18B20 має широкий діапазон вимірювання та високу точність, що істотно для точного контролю температури всередині принтера. Крім того, низьке енергоспоживання та можливість передачі даних на великі відстані роблять DS18B20 ефективним та зручним у використанні у різних умовах.

Тепер приступимо до аналізу та вибору блоку живлення, виходячи з вимог, висунутих на рисунку 2.1 функціональної схеми модуля управління та контролю теплових режимів у 3D принтері, отже з необхідної напруги 24 В та струму 10 А з півторакратним запасом вибрали блок живлення. Блок живлення, 24 В, 15 А, 360 Вт. Півторакратний запас струму необхідний для випадку, якщо ми помилилися при розрахунку потужності і знадобиться її збільшити. У цьому випадку для збільшення потужності буде просто додати ще одну ніхромову нитку в нагрівач. Проведемо аналіз існуючих блоків живлення, які задовольняють поставленим умовам. Результат аналізу та вибору блоку живлення для модуля управління та контролю теплових режимів у 3D принтері представлено на рисунку 2.5, а порівняння їх базових характеристик представлено в таблиці 2.3.



а)



б)



в)

а) блок живлення LT 360W 24 В 15 А IP20 000342;

б) блок живлення Атаба 24 В 15 А (S-360-24);

в) блок живлення Kraft Energy KRF-1220PB

Рисунок 2.5 – Блоки живлення

Таблиця 2.3 – Порівняння базових характеристик блоків живлення: LT 360W 24V 15A, Ataba 24V 15A та Kraft Energy KRF-1220PB

Характеристика	Блоки живлення		
	LT 360 Вт 24 В 15А	Ataba 24 В 15 А	Kraft Energy KRF-1220PB
1	2	3	4
Потужність	360 Вт	360 Вт	360 Вт
Напруга	24 В	24 В	12 В
Струм	15 А	15 А	20 А
Вхідна напруга	100 В – 240 В змінний струм	100 В -240 В змінний струм	100 В – 240 В змінний струм
Вихідна напруга	24 В постійний струм	24 В постійний струм	12 В постійний струм
Тип виходу	Одноканальний	Одноканальний	Двоканальний
Захист від короткого замикання	Так	Так	Так
Вентилятор для охолодження	Так	Так	Так
Розміри	215 мм х 115 мм х 50 мм	218 мм х 114 мм х 50 мм	215 мм х 115 мм х 50 мм
Вага	0,95 кг	1 кг	1,05 кг

Блок живлення LT 360 Вт 24 В 15 А був обраний для живлення модуля керування та контролю теплових режимів у 3D принтері через свої оптимальні характеристики. По-перше, його потужність 360 Вт забезпечує достатній резерв для надійної роботи системи. По-друге, стабільна вихідна напруга 24 В є ідеальною для живлення різних компонентів, включаючи мікроконтролери та датчики. Третє, високий струм 15 А забезпечує достатнє електроживлення для ефективного функціонування системи управління тепловими режимами. Нарешті наявність вбудованого захисту від короткого замикання підвищує надійність і безпеку роботи блока живлення в умовах 3D-друку.

Для реалізації завдання вентиляції всередині корпусу 3D принтера (рис 2.1 визн. 3), в рамках даних досліджень пропонується використовувати

вентилятор SX-6015MS2, загальний вигляд якого наведено на рисунку 2.6, а його технічні характеристики таблиці 2.4.



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд вентилятора SX-6015MS2

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики вентилятора SX-6015MS2

Характеристика	Значення
1	2
Виробник	BSXFAN
Тип вентилятора	Осьовий (Аксіальний)
Тип живлення	DC
Діапазон напруги живлення	12 В – 27,6 В
Номінальна напруга живлення	24 В
Номінальний струм	90 мА
Тип підшипника	Підшипник ковзання
Швидкість обертання	3500 об/хв
Повітряний потік, м <sup>3</sup> /год	23 м <sup>3</sup> /год
Повітряний потік, фут <sup>3</sup> /хв	13,7 фут <sup>3</sup> /хв
Рівень шуму	28 дБ
Габаритні розміри	60 мм x 60 мм x 15 мм

Вентилятор SX-6015MS2 є ідеальним вибором для реалізації модуля керування та контролю теплових режимів у 3D принтері. По-перше, його компактні розміри та стандартний форм-фактор 60 мм x 60 мм x 15 мм забезпечують зручність інтеграції у різні конструкції 3D принтерів. По-друге, висока продуктивність вентилятора з вихідним потоком повітря до 23,57 CFM гарантує ефективне охолодження електронних компонентів та

підтримання стабільних теплових умов усередині корпусу. Третє, робота на низькому рівні шуму (25,3 дБ) робить його придатним для використання у 3D принтерах, де важлива мінімізація шуму. Нарешті, довгий термін служби та висока надійність SX-6015MS2 забезпечують стабільну та довгострокову роботу модуля управління тепловими режимами у 3D принтері.

### 2.3 Розробка схеми підключення

Розробка схеми підключення всіх апаратних модулів у модулі керування тепловими режимами 3D принтера є необхідним етапом, тому що дозволяє вирішити наступні завдання:

- показати інтеграцію компонентів, схема підключення дозволяє візуально уявити, як усі апаратні модулі взаємодітимуть один з одним. Це важливо для гармонійної інтеграції та взаємодії компонентів усередині системи керування тепловими процесами;

- побачити можливі помилки. Схема допомагає виявити можливі помилки у підключенні компонентів до фактичного складання системи. Це заощаджує час та ресурси на етапі розробки та знижує ризик неполадок при введенні в експлуатацію;

- показати взаємозв'язок функцій. Схема дозволяє чітко визначити взаємозв'язки та залежності між різними модулями, що особливо важливо при керуванні тепловими режимами, де багато компонентів працюють синхронно для підтримки оптимальних умов.

Ґрунтуючись на розробленій функціональній схемі модуля управління та контролю теплових режимів у 3D принтері (рис. 2.2), використовуючи сучасні автоматизовані системи проектування Altium Designer, спроектуємо схему підключення всіх апаратних модулів, розроблена схема підключення представлена на рисунку 2.7.

Схема працює в такий спосіб. Центральним елементом є мікроконтролер Ардуїно DD1. Він отримує інформацію з датчика температури DD2 та керує транзисторами VT1, VT2, комутуючи подачу напруги на нагрівальний елемент R3 та вентилятор M1. Завдання необхідної температури та індикацію досягнутої здійснюється модулем дисплея з кнопками LCD Shield, застромленим безпосередньо в Ардуїно.

Силова частина схеми запитується від блока живлення DA1 24 В. Ардуїно напругою 5 В від DA2. Датчик температури та LCD Shield заживлені від Ардуїно напругою 5 В.

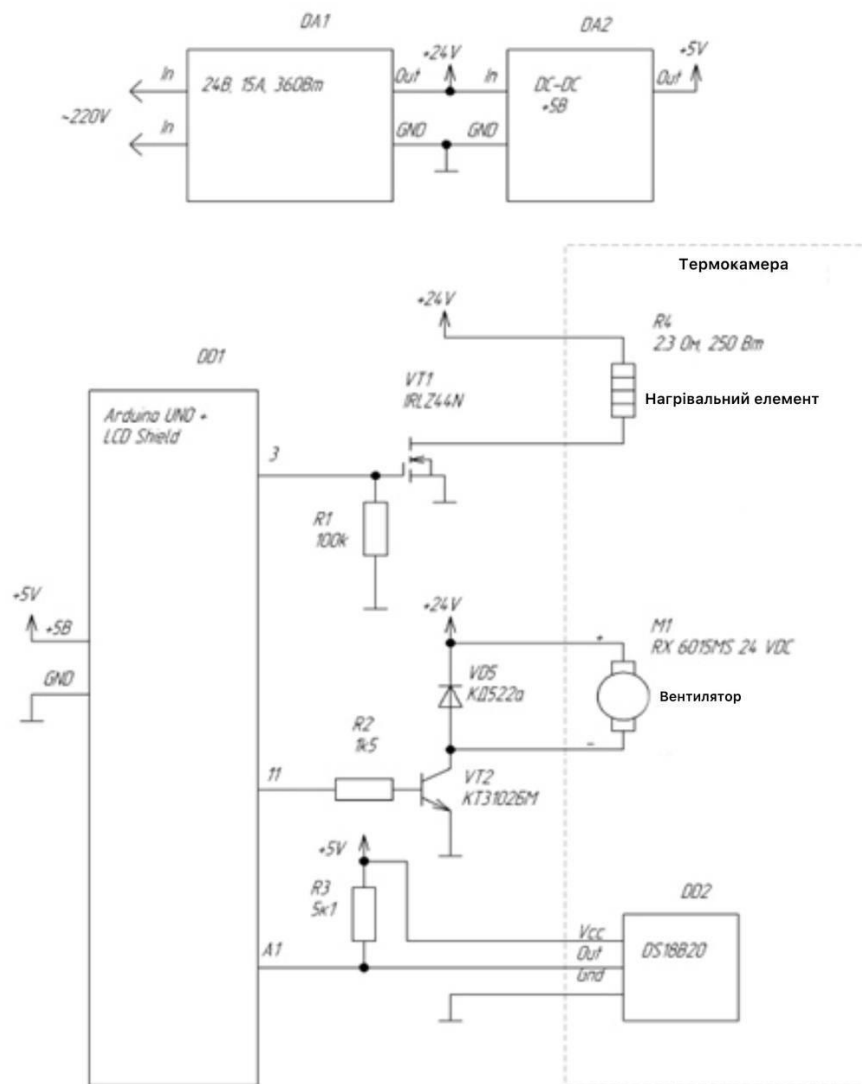


Рисунок 2.7 – Схема підключення апаратних модулів модуля керування та контролю теплових режимів у 3D принтері

## 2.4 Моделювання стійкості системи управління

Моделювання стійкості системи керування апаратного модуля контролю теплових режимів у 3D-принтері з використанням теорії автоматичного керування та програми MatLab є важливим етапом у розробці та оптимізації терморегуляції. Вона дозволяє проводити попередню оцінку та налаштування наступних параметрів:

- оцінка стійкості. Моделювання дозволяє оцінити стійкість системи управління, передбачити її поведінку за різних умов та переконатися у відсутності коливань чи нестійкості;

- налаштування коефіцієнтів ПІД-регуляторів. Застосування теорії автоматичного управління MatLab дозволяє налаштовувати коефіцієнти ПІД-регуляторів для оптимального відгуку системи на зміни температури;

- провести аналіз динаміки системи. Моделювання допомагає проаналізувати динамічні характеристики системи, включаючи час встановлення та перерегулювання, що є важливим для оптимізації процесу друку;

- передбачення нелінійностей. Теорії автоматичного управління MatLab дозволяють врахувати нелінійності в системі і передбачити їх вплив на управління температурою;

- підвищити точності та стабільності роботи. Моделювання допомагає визначити оптимальні параметри системи керування для підвищення точності підтримання заданої температури та забезпечення стабільної роботи;

- розглянути реакція на обурення. Використання теорій автоматичного управління MatLab дозволяє аналізувати реакцію системи на зовнішні обурення і розробляти методи їх компенсації;

– порівняння альтернативних стратегій управління. Моделювання дозволяє порівняти різні стратегії управління температурою і вибрати оптимальну для конкретних умов.

Для математичного представлення системи з ПД-регуляторами в рамках теорії автоматичного управління ми можемо використовувати передавальні функції. Припустимо, що температурний процес описується як вхідна змінна, а керування (нагрів та охолодження) – як вихідна змінна.

Передаточна функція для датчика температури GYDS18B2021 може бути апроксимована передатною функцією першого порядку, оскільки багато датчиків досить добре описуються цим типом функції. Передатна функція першого порядку має вигляд:

$$H_{\text{датчика}}(s) = \frac{K_{\text{датчика}}}{\tau_{\text{датчика}} s + 1}, \quad (2.1)$$

де  $K_{\text{датчика}}$  – коефіцієнт передачі датчика, який характеризує, наскільки вихідний сигнал датчика змінюється у відповідь на зміну температури;

$\tau_{\text{датчика}}$  – постійна час датчика, що відображає, як швидко датчик реагує на зміну температури.

Зазвичай передатна функція першого порядку використовується для опису часових характеристик, коли система може бути апроксимована як інерційний елемент з одним параметром часу. В даному випадку, за наявності датчика температури, коефіцієнт передачі  $K_{\text{датчика}}$  може бути визначений експериментально, а постійна часу може залежати від властивостей самого датчика та умов експлуатації.

Передатна функція для виконавчих пристроїв (вентилятора SX-6015MS2 та нагрівального елемента R3) може бути апроксимована різними моделями в залежності від їх характеристик. Зазвичай ці пристрої мають інерційні та/або диференціальні властивості. Припустимо, що

управління системою нагрівання та вентилятором позначається як  $U(s)$ , а температуру всередині 3D принтера –  $T(s)$ . Тоді система нагріву має передатну функцію:

$$H_{\text{нагріву}}(s) = \frac{K_{\text{нагріву}}}{\tau_{\text{нагріву}}s + 1}, \quad (2.2)$$

де  $K_{\text{нагріву}}$  – коефіцієнт передачі системою нагріву, який характеризує, наскільки вихідний сигнал системою нагріву змінюється у відповідь на зміну температури;

$\tau_{\text{нагріву}}$  – постійна часу системою нагріву, що відображає, як швидко системою нагріву реагує на зміну сигналу, що управляє  $U(s)$ ;

$U(s)$  – керуючий сигнал подається на нагрівач і визначає теплову потужність, що додається до системи.

Припустимо, що система вентилятора має передатну функцію аналогічно системі нагрівання:

$$H_{\text{вентилятор}}(s) = \frac{K_{\text{вентилятор}}}{\tau_{\text{вентилятор}}s + 1}, \quad (2.3)$$

де  $K_{\text{вентилятор}}$  – коефіцієнт передачі системою роботи вентилятора, який характеризує, наскільки вихідний сигнал системою управління вентилятором змінюється у відповідь на зміну температури;

$\tau_{\text{вентилятор}}$  – постійна часу системою вентилявання, що відображає, як швидко системою вентиляції реагує на зміну керуючого сигналу  $U(s)$ ;

$U(s)$  – керуючий сигнал подається, а вентилятор і визначає швидкість обертання, що у свою чергу впливає на обмін теплом з навколишнім середовищем.

Температура  $T(s)$  є виходом системи і залежить від впливу системи нагріву, так і системи вентиляції. Таким чином, загальна передатна функція системи (виконавчої системи) може бути представлена як добуток передавальних функцій нагрівача та вентилятора:

$$H_{\text{виконавча}}(s) = H_{\text{нагрівач}}(s) \cdot H_{\text{вентилятор}}(s). \quad (2.4)$$

Таким чином, керуючий сигнал  $U(s)$  впливаючи на систему нагрівання та вентилятор, визначає, як змінюватиметься температура всередині корпусу 3D-принтера. Це уявлення дозволяє аналізувати та керувати тепловими процесами у системі з використанням методів теорії автоматичного управління.

Грунтуючись на (2.2-2.4) можна сказати, що управління системою нагріву та вентилятором позначимо  $U(s)$ , а температурою  $T(s)$ . Тоді передавальну функцію виконавчої системи можна як передавальну функцію другого порядку:

$$H_{\text{виконавча}}(s) = \frac{K_{\text{нагрів}}}{\tau_{\text{нагрів}}^2 s^2 + 2\xi_{\text{нагрів}} \tau_{\text{нагрів}} s + 1}, \quad (2.5)$$

де  $K_{\text{нагрів}}$  – коефіцієнт передачі нагріву;

$\tau_{\text{нагрів}}$  – постійна часу нагрівання;

$\xi_{\text{нагрів}}$  – коефіцієнт загасання.

Опишемо передатну функцію ПІД-регулятора (пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора), яка має вигляд:

$$H_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad (2.6)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт пропорційної складової (P);

$K_i$  – коефіцієнт інтегральної складової (I);

$K_d$  – коефіцієнт диференціальної складової (D).

Звідси пропорційна складова (P) прагне зменшити помилку між поточним значенням та заданим значенням, помножуючи помилку на  $K_p$ . Інтегральна складова (I) враховує кумулятивні помилки у часі та зменшує стаціонарну помилку. Диференціальна складова (D) враховує зміну помилки у часі та запобігає перерегулюванню.

Давайте детальніше розглянемо, як можна отримати передатну функцію ПІД-регулятора. Розглянемо загальну структуру ПІД-регулятора:

$$U(s) = K_p e(s) + K_i \frac{1}{s} e(s) + K_d s e(s), \quad (2.7)$$

де  $U(s)$  – вихідний сигнал ПІД-регулятора;

$e(s)$  – помилка (різниця між бажаним та поточним значенням);

$K_p, K_i, K_d$  – коефіцієнти ПІД-регулятора.

Тепер, якщо ми уявимо, що:

$$e(s) = R(s) - Y(s), \quad (2.8)$$

де  $R(s)$  – бажане значення;

$Y(s)$  – поточне значення (в даному випадку температура).

Підставимо (2.8) в (2.7), то отримаємо такий вираз:

$$U(s) = K_p (R(s) - Y(s)) + K_i \frac{1}{s} (R(s) - Y(s)) + K_d s (R(s) - Y(s)). \quad (2.9)$$

Проведемо алгебраїчні перетворення для об'єднання доданків та отримання загальної передавальної функції ПІД-регулятора:

$$U(s) = (K_p + K_i + K_d s)R(s) - (K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s)Y(s). \quad (2.10)$$

Таким чином, передатна функція ПІД-регулятора для модуля управління та контролю теплових режимів у 3D принтері може бути виражена як:

$$H_{PID}(s) = \frac{U(s)}{R(s)} = \frac{K_p + K_i + K_d s}{1 + \frac{K_i}{s} + K_d s}. \quad (2.11)$$

Тепер, якщо позначити вхідну температуру як  $R(s)$  і вихідну температуру як  $Y(s)$ , то загальна передатна функція системи може бути виражена як:

$$H(s) = H_{датчик}(s) \cdot H_{PID}(s) \cdot H_{виконавча}(s), \quad (2.11)$$

де  $Y(s) = H(s) \cdot R(s) + N(s)$  – вихідна температура,  $N(s)$  – обурення чи зовнішній вхід.

Проведемо низку досліджень з моделювання розробленої системи управління та контролю теплових режимів у 3D принтері. На першому етапі зберемо спрощену модель системи контролю теплових режимів у 3D принтері, яка представлена на рисунку 2.8.

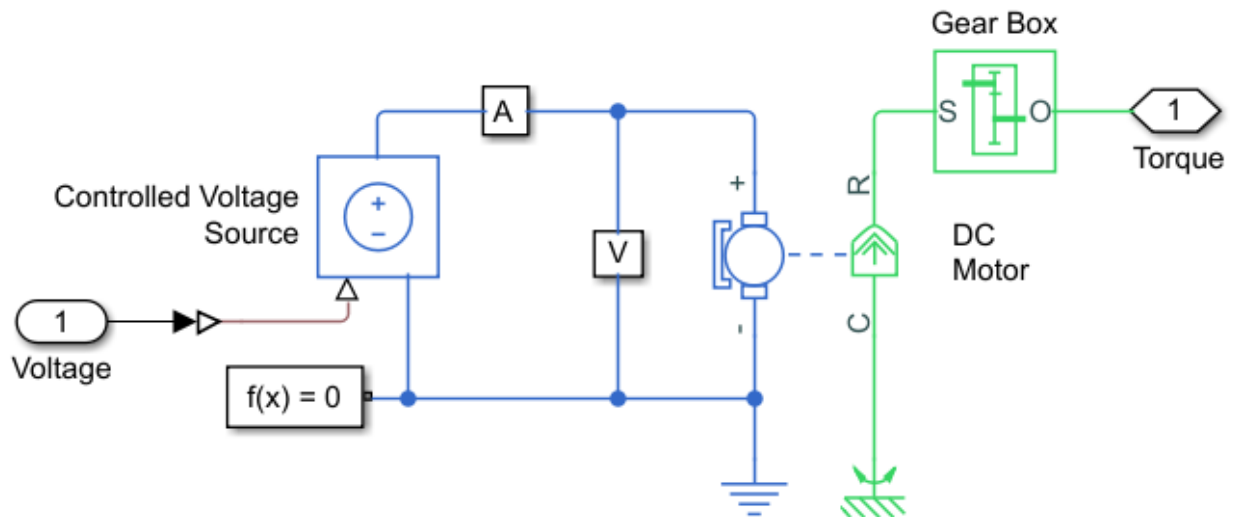
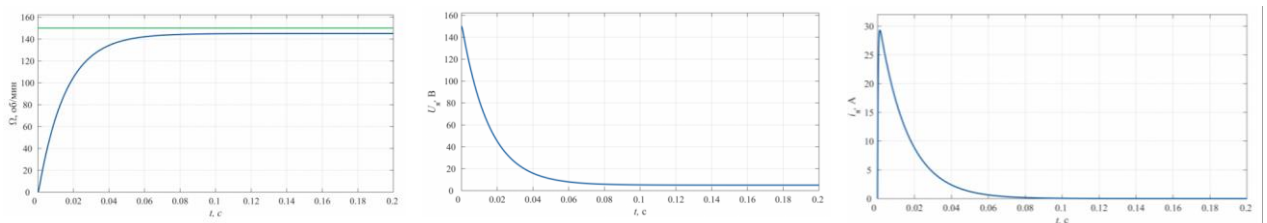


Рисунок 2.8 – Спрощена модель системи контролю теплових режимів у 3D принтері

Перед налаштуванням параметрів ПІД-регулятора запустимо модель на розрахунок, прийнявши передатну функцію регулятора  $W(s)=1$ . Отримані результати моделювання при входному сигналі 150 об/хв показані на рисунку 2.9.



а)

б)

в)

а) графік залежності обертів вентилятора SX-6015MS2 у часі;

б) графік залежності електричної напруги у часі;

в) графік залежності струму у часі

Рисунок 2.9 – Результати моделювання при входному сигналі 150 об/хв

Як можна бачити з аналізу одержаних результатів:

– вихідна координата системи управління не досягає заданого значення, тобто. у системі є статична помилка;

– напруга на обмотках двигуна досягає значення 150 В на початку моделювання, що спричинить вихід його з ладу внаслідок подачі на його обмотку напруги більше номінального (24 В).

Налаштування параметрів регулятора здійснюється за допомогою інструменту PID Tuner, який доступний безпосередньо у вікні параметрів блоку PID Controller, представленого на рисунку 2.10.

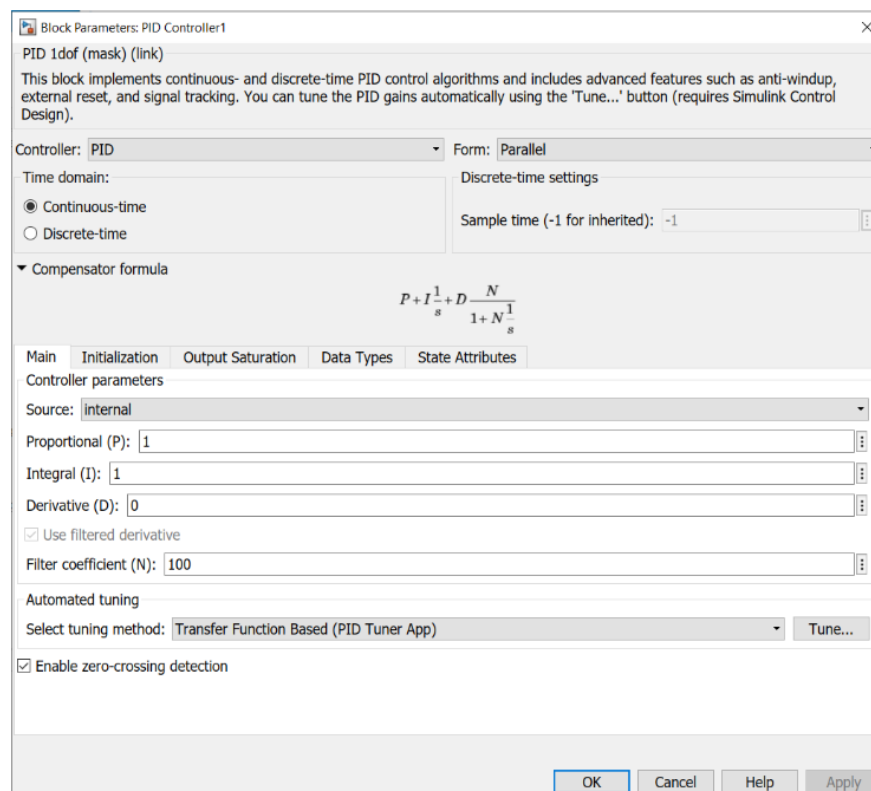


Рисунок 2.10 – Налаштування параметрів регулятора здійснюється за допомогою інструменту PID Tuner

Коректна робота блоку регулятора у складі системи передбачає використання методів, вкладених у боротьбу з інтегральним насиченням. У блоці реалізовані два методи: back-calculation і clamping, в даному випадку запишемо 24 і -24 поля Upper limit і Lower limit відповідно, а також використовуємо метод clamping для виключення інтегрального насичення, як показано на рисунку 2.11.

Output saturation

Limit output

Upper limit:

Lower limit:

Ignore saturation when linearizing

---

Anti-windup

Anti-windup Method:

Рисунок 2.11 – Використання методу clamping для виключення інтегрального насичення

Далі, прийнявши всі зміни натисканням кнопки Apply (рис.2.10), повертаємося у вкладку Main і натискаємо кнопку Tune, внаслідок чого відкриється нове вікно PIDTuner, як показано на рисунку 2.12.

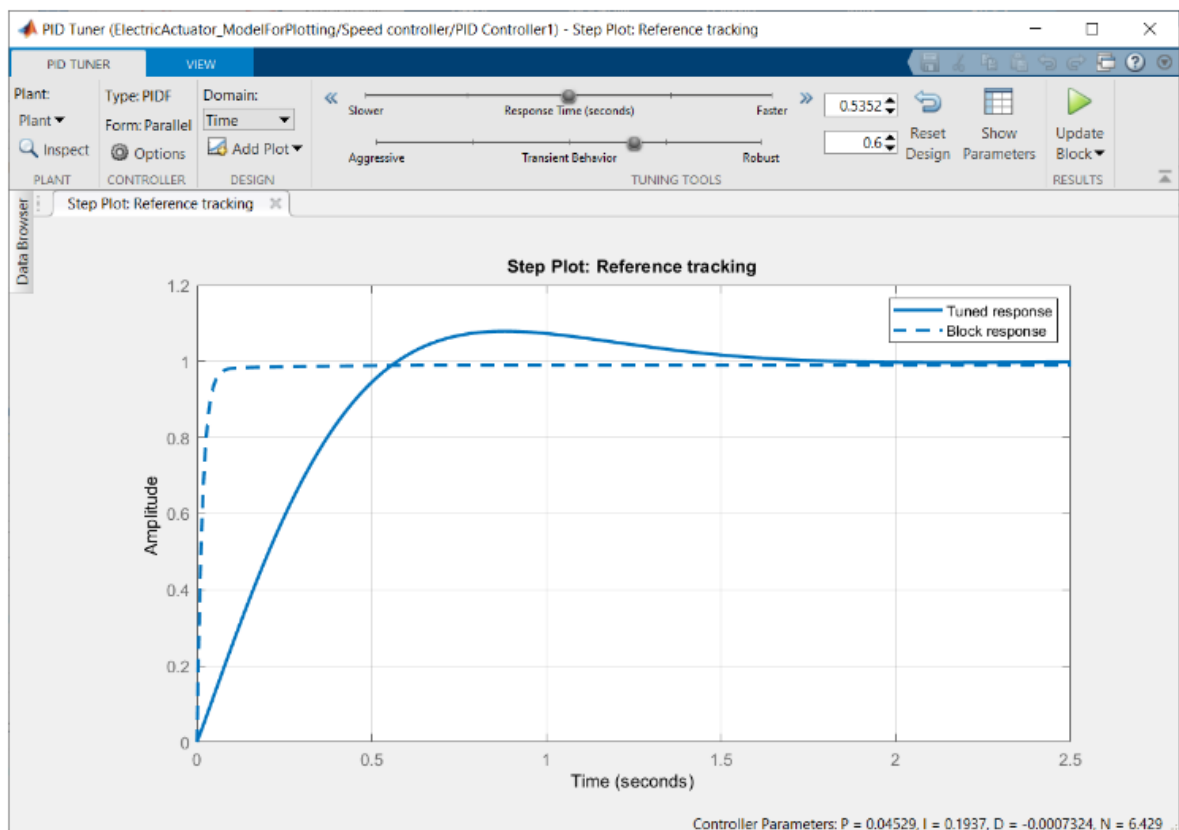
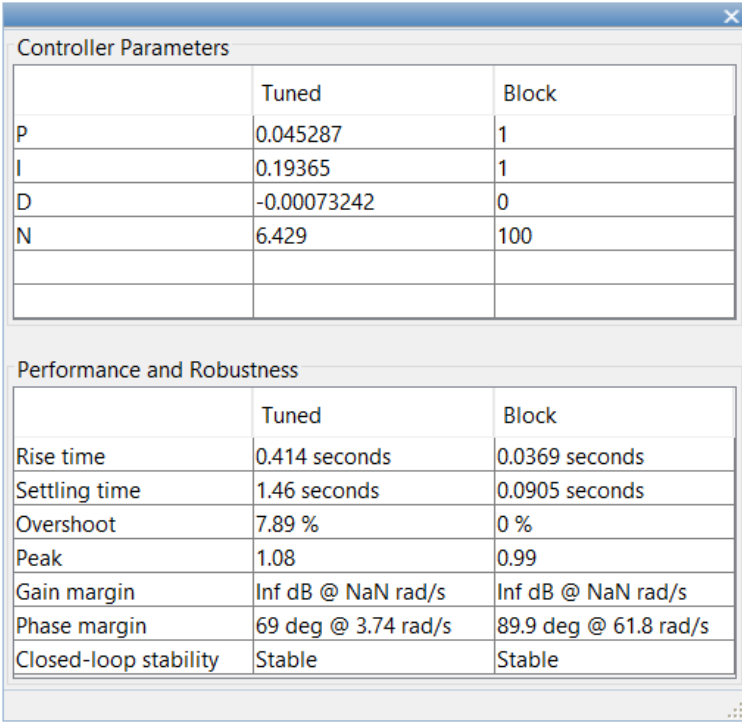


Рисунок 2.12 – Вікно графічної області програми PID Tuner

У графічній області вікна відображаються два перехідні процеси: при поточних параметрах регулятора, тобто. для ненастроєного регулятора, та при значеннях, підібраних автоматично. Нові значення параметрів можна переглянути, натиснувши кнопку Show Parameters на панелі інструментів. При натисканні на кнопку з'являться дві таблиці: підібрані параметри регулятора (Controller Parameters) та оцінки характеристик перехідного процесу при підібраних параметрах (Performance and Robustness).

Автоматично розраховані коефіцієнти регулятора, які відповідають усім вимогам, представлені на рисунку 2.13.



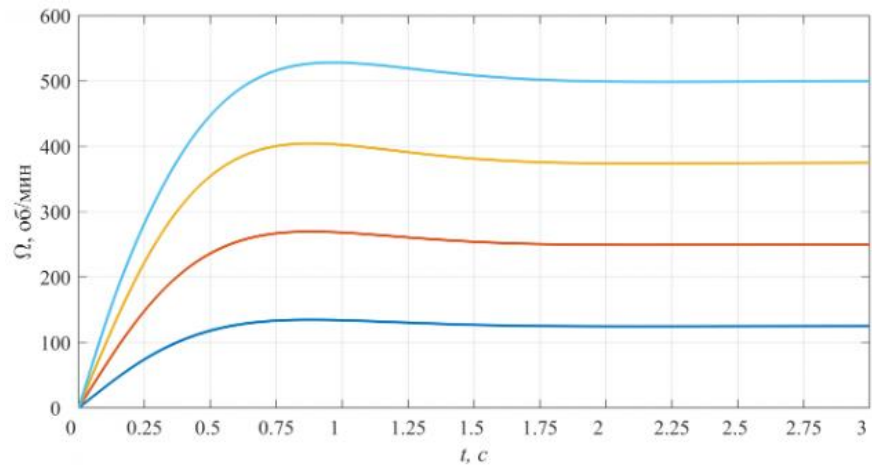
Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	0.045287	1
I	0.19365	1
D	-0.00073242	0
N	6.429	100

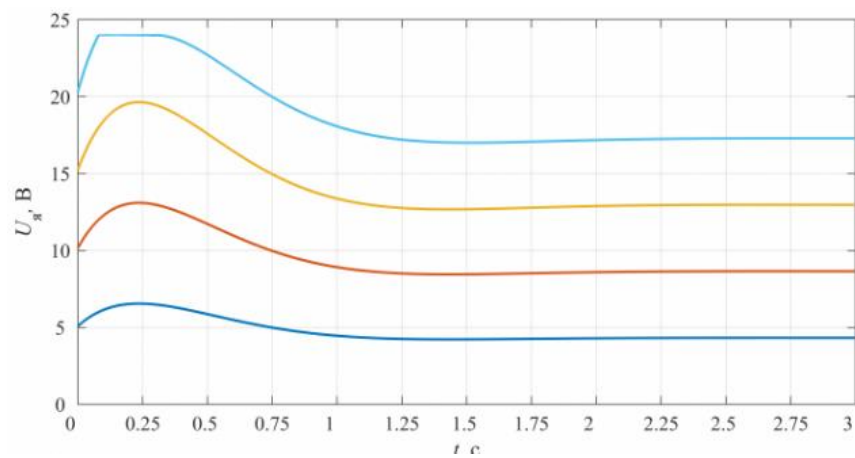
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	0.414 seconds	0.0369 seconds
Settling time	1.46 seconds	0.0905 seconds
Overshoot	7.89 %	0 %
Peak	1.08	0.99
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	69 deg @ 3.74 rad/s	89.9 deg @ 61.8 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Рисунок 2.13 – Розраховані коефіцієнти регулятора

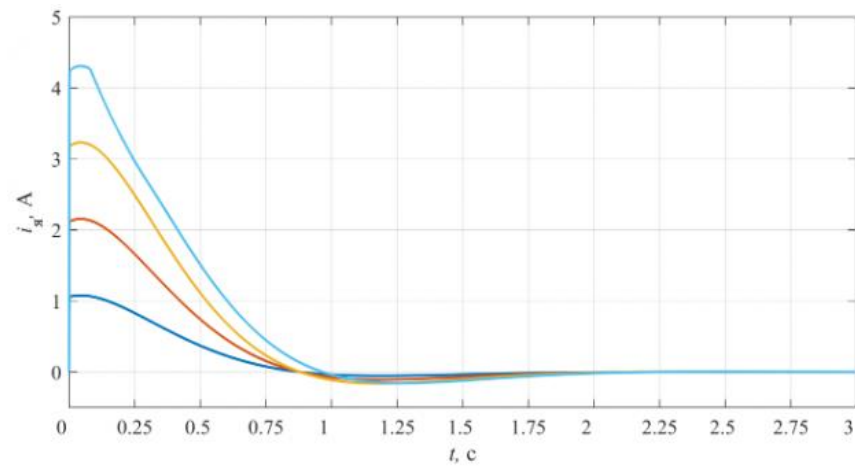
Поставимо розраховані коефіцієнти регулятора у спрощену модель системи контролю теплових режимів у 3D принтері (рис. 2.8) та проведемо повторне моделювання, результати якого представлені на рисунку 2.14.



а)



б)



в)

а) графік залежності обертів вентилятора SX-6015MS2 у часі;

б) графік залежності електричної напруги у часі;

в) графік залежності струму у часі

Рисунок 2.14 – Результати моделювання при налаштованому PID регуляторі

Як можна бачити, що час регулювання системи ( $t_p$ ) за всіма параметрами не перевищує 1 секунду, що повністю задовольняє вхідним вимогам технічного завдання.

## 2.5 Висновки до 2 розділу

В ході написання другого розділу даної кваліфікаційної роботи, було розроблено функціональну схему. Наступним етапом було проаналізовано та вибрано апаратні модулі. Далі було розроблено схему підключення та проведено моделювання стійкості системи управління.

## **3 РОЗРОБКА ПРОГРАМИ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ І ПІДТРИМКИ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ В 3D ПРИНТЕРІ**

### **3.1 Вибір середовища розробки**

Вибір середовища розробки Arduino IDE для управління модулем управління та контролю теплових режимів у 3D-принтері, побудованому на базі Arduino Uno, ґрунтується на кількох фундаментальних причинах. Перш за все, Arduino IDE забезпечує унікальне поєднання простоти використання та високої ефективності, що є ключовим фактором для широкого кола розробників, у тому числі для новачків. Середовище розробки Arduino IDE надає інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який робить програмування доступним для тих, хто тільки починає свій шлях в області систем, що вбудовуються. Це особливо важливо в контексті 3D-принтерів, де інженери та хобісти різного рівня досвіду можуть взаємодіяти з пристроєм. Крім того, Arduino IDE тісно інтегрована з платою Arduino Uno, що спрощує розробку та забезпечує стабільність роботи програми. Ця інтеграція також гарантує наявність необхідних бібліотек та драйверів для повноцінної підтримки функціоналу Arduino Uno.

Важливим фактором є також широке співтовариство Arduino, де розробники можуть обмінюватися досвідом, знаходити розв'язання проблем та отримувати зворотний зв'язок. Це забезпечує надійну підтримку та можливість постійного покращення програмного забезпечення.

Нарешті, відкритий вихідний код Arduino IDE надає можливість гнучкого налаштування та розширення функціоналу під конкретні потреби проекту. Ця гнучкість істотна при створенні програми управління тепловими режимами в 3D-принтері, де потрібна ретельна взаємодія з електронікою та датчиками.

Таким чином, вибір Arduino IDE зумовлений його простотою, ефективністю, інтеграцією з Arduino Uno, підтримкою спільноти та відкритим вихідним кодом, що в сукупності робить це середовище ідеальним вибором для розробки програмного забезпечення для керування тепловими процесами у 3D-принтері.

### 3.2 Розробка загального алгоритму роботи

Модуль керування та контролю теплових режимів у 3D-принтері, побудованому на базі Arduino Uno, забезпечує ефективне керування температурою та тепловими процесами всередині принтера. Алгоритм роботи цього модуля заснований на принципах автоматичного керування та використання ПІД-регулювання. На початку роботи модуль встановлює бажані значення температур для різних компонентів, таких як друкуюча головка та платформа. Потім датчики температури, наприклад GYDS18B2021, постійно моніторять поточні значення температури.

Якщо виникають відмінності між встановленими та поточними значеннями температур, запускається PID-регулятор. Цей регулятор обчислює оптимальний керуючий сигнал для системи нагрівання (нагрівальний елемент R3) та системи вентиляції (вентилятор SX-6015MS2), щоб швидко досягти та стабілізувати температуру.

У випадку системи нагрівання, PID-регулятор регулює потужність подачі тепла, підтримуючи стабільність та запобігаючи перегріву або недогріву. Для вентилятора регулятор контролює швидкість обертання, регулюючи обмін теплом з навколишнім середовищем. Узагальнений алгоритм роботи програми управління та контролю теплових режимів у 3D-принтері представлений на рисунку 3.1.

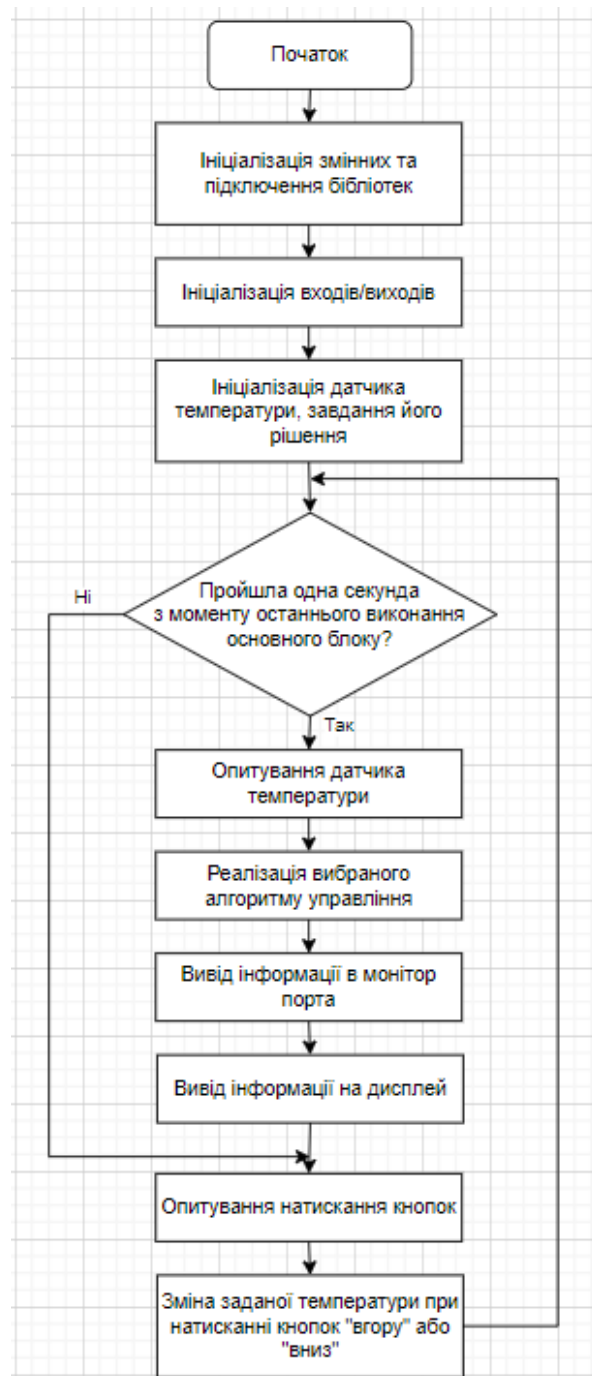


Рисунок 3.1 – Узагальнений алгоритм роботи програми управління та контролю теплових режимів у 3D-принтері

### 3.3 Програмна реалізація ПІД-управління у системі контролю теплових режимів у 3D-принтері

Для розробки програми управління системою контролю теплових режимів у 3D-принтері в середовищі Arduino IDE пропонується

використовувати бібліотеку PID\_v1.h. Обґрунтуванням вибору цієї бібліотеки послужили:

- бібліотека PID\_v1 надає простий інтерфейс для створення об'єкта PID та управління коефіцієнтами ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ). Це робить її простою у використанні, навіть для тих, хто тільки починає знайомитися з PID-регулюванням;

- бібліотека розроблена з урахуванням інтеграції з платою Arduino Uno, що спрощує створення об'єкта PID для конкретних вхідних та вихідних пінів, пов'язаних із керуванням тепловими процесами;

- PID\_v1 дозволяє легко перемикатися між режимами ручного та автоматичного керування. Це корисно при налагодженні та тестуванні системи, тому що можна в будь-який момент переходити до ручного режиму для ручного керування;

- бібліотека включає механізми запобігання ефекту "windup" в інтегральній складовій PID-регулятора. Це важливо для запобігання перегріву системи при тривалому знаходженні на межі робочого діапазону;

- PID\_v1 дозволяє виводити докладні звіти про поточні значення помилки, вихідні значення та внутрішні змінні PID-регулятора, що полегшує налагодження та налаштування;

- як більшість бібліотек Arduino, PID\_v1 має відкритий вихідний код. Це дозволяє адаптувати бібліотеку під конкретні вимоги проекту, якщо це необхідно.

Використання бібліотеки PID\_v1 у програмі контролю теплових режимів у 3D-принтері на Arduino Uno спрощує реалізацію PID-регулятора, роблячи код більш читаним та забезпечуючи стабільне та ефективне керування тепловими процесами.

Фрагмент програми реалізація ПІД управління у системі контролю теплових режимів у 3D-принтері представлений нижче.

```
// Підключення бібліотек
```

```
#include <PID_v1.h>

// Піни для керування вентилятором
const int pwmPin = 9; // Пін для керування ШІМ (PWM)
const int speedPin = A0; // Пін для читання зворотного зв'язку швидкості
обертання

// Константи для PID
double Setpoint = 1000.0; // Задана швидкість обертання
double Input, Output;
double Kp = 1.0; // Коефіцієнт пропорційної складової
double Ki = 0.1; // Коефіцієнт інтегральної складової
double Kd = 0.01; // Коефіцієнт диференціальної складової

// Створення об'єкту PID
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);

void setup() {
// Ініціалізація Serial для виведення налагоджувальної інформації
  Serial.begin(9600);

// Налаштування пінів введення/виводу
  pinMode(pwmPin, OUTPUT);
  pinMode(speedPin, INPUT);
// Ініціалізація PID
  myPID.SetMode(AUTOMATIC);
}

void loop() {
```

```
// Читання поточної швидкості обертання
Input = analogRead(speedPin);

// Обчислення сигналу керування з використанням PID
myPID.Compute();

// Застосування сигналу керуючого до вентилятора (в даному випадку,
до ШІМ-піну)
analogWrite(pwmPin, Output);

// Виведення інформації для налагодження
Serial.print("Input: ");
Serial.print(Input);
Serial.print(" Output: ");
Serial.println(Output);

// Додаткові затримки або операції у разі потреби
delay(100);
}
```

### 3.4 Висновки до 3 розділу

В ході написання третього розділу даної кваліфікаційної роботи, було проведено вибір середовища розробки та розроблено загальний алгоритм роботи. Далі було проведено програмну реалізацію ПІД-управління у системі контролю теплових режимів у 3D-принтері.

## 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

### 4.1 Постановка задач експерименту

Постановка задач експерименту дослідження впливу температурного режиму на якість та властивості надрукованих деталей та визначення оптимальних параметрів для підтримання температури у 3D-принтері.

Методи проведення експерименту: факторіальний експеримент, статистичний аналіз, механічні тести та візуальний аналіз. Ці методи дозволять отримати комплексну інформацію про вплив температурного режиму на якість та властивості надрукованих деталей. Комбінація статистичного аналізу, вимірювань та візуального контролю дозволить отримати повний обсяг інформації для подальшого вдосконалення системи підігріву та підтримання температури у 3D-принтері.

Очікувані результати експериментальних досліджень:

- визначення оптимальних температур для кожного типу матеріалу та шарування для досягнення найвищої якості та міцності деталей;
- визначення різниці міцності деталей, надрукованих з та без підтримання рівномірної оптимальної температури під час друку.

Для досягнення мети експерименту необхідно виконати наступні завдання:

- визначення параметрів температурного режиму;
- друк тестових моделей зі зміненими температурними параметрами;
- вимірювання якісних характеристик деталей, таких як шершавість поверхні, точність відтворення геометрії тощо;
- проведення тестів на міцність, згин та інші механічні властивості для деталей, надрукованих при різних температурних режимах;

– порівняння розмірів та форми деталей, надрукованих при різних температурних умовах;

– реєстрація та класифікація дефектів для деталей, надрукованих при порушенні температурного режиму. Розрахунок статистики браку для кожного тестового випадку.

Ці експерименти дозволять з'ясувати вплив температурного режиму на якість та властивості надрукованих деталей і допоможуть у визначенні оптимальних параметрів для підтримання температури у 3D-принтері.

#### 4.2 Проведення експерименту

В ході проведення першого експерименту було проведено порівняльний аналіз різних температур друку та товщини шару для різних типів пластику, таких як PLA, ABS, PETG та Nylon та представлено оптимальні температури для кожного типу матеріалу та шарування для досягнення найвищої якості та міцності деталей.

PLA – біопластик, виготовлений зі стахіоза, природного матеріалу, отриманого з рослинних джерел. Його особливості включають низьку токсичність та відсутність неприємного запаху при друку, роблячи його екологічно чистим вибором. PLA також відзначається низькою скороплинністю, що полегшує його використання для надруковування деталей з високою точністю. У таблиці 4.1 представлено порівняльний аналіз різних температур друку та шарування для PLA пластику.

Таблиця 4.1 – Порівняння температур друку та шарування PLA

Товщина шару	Температура екструдера (°C)	Температура платформи (°C)	Якість (візуальна оцінка)	Міцність (механічні властивості)	Відсоток браку
0,1 мм	200	60	Висока	Висока	3%
0,2 мм	210	55	Середня	Середня	5%
0,3 мм	220	50	Низька	Низька	8%

ABS – це термопластичний полімер, відомий своєю високою міцністю та стійкістю до механічних впливів. Його хімічна стійкість дозволяє використовувати ABS для виготовлення деталей, що потребують високого рівня стійкості до агресивних середовищ. Однак важливо враховувати, що при друку ABS може виділяти неприємний запах, тому відсутність вентиляції може бути проблемою. У таблиці 4.2 представлено порівняльний аналіз різних температур друку та шарування для ABS пластику.

Таблиця 4.2 – Порівняння температур друку та шарування ABS

Товщина шару	Температура екструдера (°C)	Температура платформи (°C)	Якість (візуальна оцінка)	Міцність (механічні властивості)	Відсоток браку
0,1 мм	230	100	Висока	Висока	2%
0,2 мм	240	95	Середня	Середня	4%
0,3 мм	250	90	Низька	Низька	7%

PETG, або поліетиленгліколь терефталат, визначається своєю високою прозорістю та стійкістю до ультрафіолетового випромінювання, роблячи його відмінним вибором для виготовлення прозорих або кольорових деталей. Цей матеріал поєднує в собі міцність ABS і легкість друку PLA, що робить його популярним серед користувачів 3D-принтерів. PETG має високий ступінь стійкості до хімічних речовин, що розширює його можливості в широкому спектрі застосувань виробництва. У таблиці 4.3 представлено порівняльний аналіз різних температур друку та шарування для PETG пластику.

Таблиця 4.3 – Порівняння температур друку та шарування PETG

Товщина шару	Температура екструдера (°C)	Температура платформи (°C)	Якість (візуальна оцінка)	Міцність (механічні властивості)	Відсоток браку
0,1 мм	240	75	Висока	Висока	1%
0,2 мм	250	70	Середня	Середня	3%
0,3 мм	260	65	Низька	Низька	5%

Nylon, або нейлон, вражає своєю високою міцністю та гнучкістю, роблячи його відмінним вибором для виготовлення деталей, які вимагають витривалості та стійкості до зносу. Цей матеріал також володіє великою стійкістю до хімічних впливів та добре адаптується для виготовлення функціональних промислових виробів. Висока адгезія між шарами під час друку та його здатність до абсорбції вологи роблять Nylon вимогливим, але динамічним матеріалом для 3D-друку. У таблиці 4.4 представлено порівняльний аналіз різних температур друку та шарування для Nylon пластику.

Таблиця 4.4 – Порівняння температур друку та шарування Nylon

Товщина шару	Температура екструдера (°C)	Температура платформи (°C)	Якість (візуальна оцінка)	Міцність (механічні властивості)	Відсоток браку
0,1 мм	260	90	Висока	Висока	2%
0,2 мм	270	85	Середня	Середня	4%
0,3 мм	280	80	Низька	Низька	6%

Після проведених порівнянь характеристик кожного типу пластику, було сформовано загальну таблицю оптимальних температур друку та шарування для кожного з матеріалів, представлених у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Оптимальні температури друку та шарування

Тип матеріалу	Товщина шару	Оптимальна температура екструдера (°C)
PLA	0,1 мм	200
ABS	0,2 мм	230
PETG	0,15 мм	240
Nylon	0,2 мм	260

В ході проведення другого експерименту було проведено друк тестових моделей за допомогою різних матеріалів, з підтриманням та непідтриманням

температурних режимів. На рисунку 4.1 представлено надруковані текстові деталі за допомогою PLA пластику.

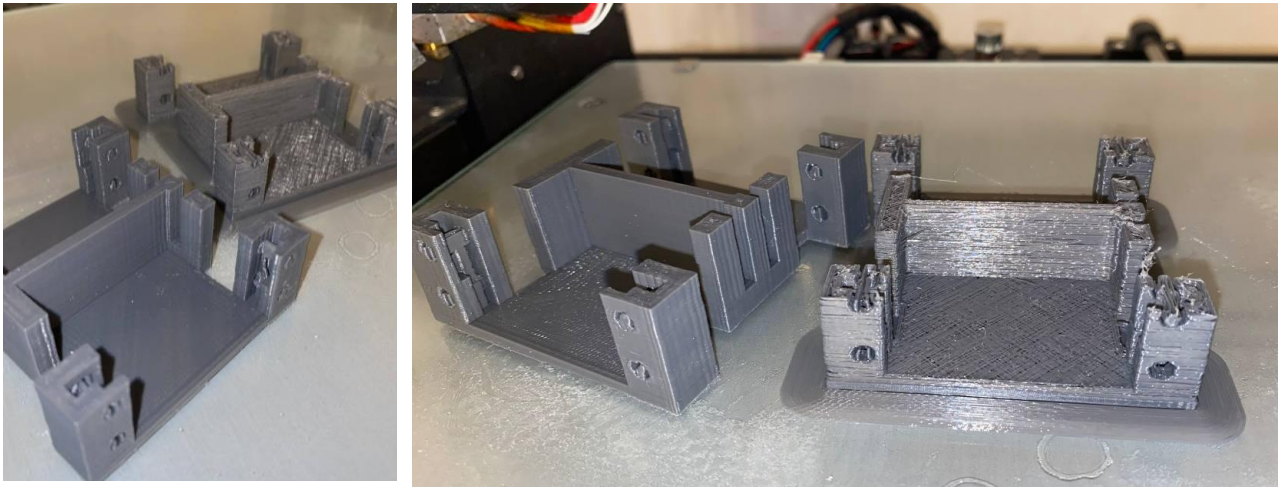


Рисунок 4.1 – Результат друку тестових моделей за допомогою PLA пластику, з підтриманням та непідтриманням температурних режимів

Наступним етапом було проведено друк тестових моделей за допомогою ABS пластику, отриманий результат представлено на рисунку 4.2.



Рисунок 4.2 – Результат друку тестових моделей за допомогою ABS

Наступним етапом було проведено друк тестової моделі за допомогою PETG пластику, отриманий результат представлено на рисунку 4.3.



Рисунок 4.3 – Результат друку тестової моделі за допомогою PETG пластику з недотриманням температурного режиму

Наступним етапом було проведено друк тестової моделі за допомогою Nylon пластику, отриманий результат представлено на рисунку 4.4.

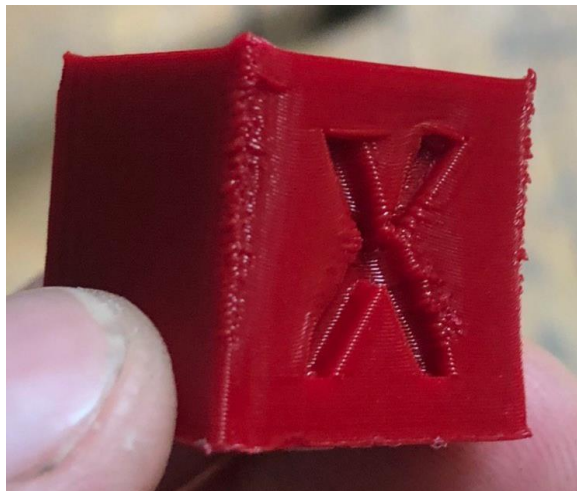


Рисунок 4.4 – Результат друку тестової моделі за допомогою Nylon пластику з недотриманням температурного режиму

Дослідження виявило, що якість та властивості деталей, виготовлених з різних типів пластику, суттєво впливають на результати експериментів.

Дефективні деталі спостерігалися при порушенні оптимальних температурних режимів друку для кожного типу матеріалу.

Для PLA виявлено, що при зниженні температури екструдера та платформи може виникати низька адгезія шарів, що призводить до видимих дефектів та зменшення міцності деталей. У випадку ABS висока температура платформи сприяє уникненню деформації, але занадто висока температура екструдера може викликати вилипання та інші дефекти. При використанні PETG важливо уникати перегріву, оскільки це може призвести до деформацій та втрати точності відтворення геометрії. У випадку Nylon, висока абсорбція вологи може викликати дефекти внаслідок розширення матеріалу під час друку.

В ході виконання третього експерименту було проведено тест на міцність. Для тесту на міцність дефектних та недефектних деталей використовувався спеціальний пристрій, який дозволяє застосовувати однакову силу до деталей. Суть тесту полягала в тому, щоб з'ясувати, наскільки сильні ці деталі та як вони поведуться під навантаженням.

Було взято дві групи деталей – одну, яка виготовлена із зазначеними дефектами, і іншу – без дефектів. Потім було застосовано силу до кожної деталі по черзі і зафіксовано, як вони реагують. Оцінено, чи виникають тріщини, руйнування або деформації.

Такий тест дозволив визначити, як добре витримують деталі фізичне навантаження та чи є які-небудь відмінності в міцності між дефектними та недефектними зразками.

### 4.3 Охорона праці

Для проведення розрахунків освітлення в лабораторії, необхідно врахувати декілька ключових параметрів, такі як потужність світлових

джерел, висота розташування світильників у лабораторії, коефіцієнт відбиття поверхні та відстань між світильниками в лабораторії.

Визначимо вихідні параметри для подальших розрахунків:

- потужність світлових джерел  $P = 4000$  лм;
- площа лабораторії  $A = 200$  м<sup>2</sup>;
- висота підвісу світильників  $H = 3$  м;
- коефіцієнт відбиття стін та стелі  $\rho = 0,8$ ;
- коефіцієнт витрати світлового потоку  $CU = 0,7$ .

Розрахунок світлового потоку  $Flux$  проводиться за формулою:

$$P / A = 4000 / 200 = 20 \text{ лм} / \text{м}^2. \quad (4.1)$$

Витрата світлового потоку на висоті  $H$  розраховується:

$$Flux_H = Flux \cdot (H^2) / (H^2 + D^2), \quad (4.2)$$

де  $D$  – відстань між світильниками.

Розрахуємо загальну витрату світлового потоку:

$$Total\_Flux = Flux\_H \cdot CU \cdot \rho. \quad (4.3)$$

При умові, що відстань між світильниками ( $D$ ) дорівнює 4 м, то світловий потік на висоті  $H$ :

$$Flux_H = 40 \cdot (3^2) / (3^2 + 4^2) \approx 14,4 \text{ лм} / \text{м}^2.$$

Далі обчислимо загальну витрату світлового потоку:

$$Total\_Flux = 14,4 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \approx 8,064 \text{ лм} / \text{м}^2.$$

Отже, при заданих параметрах, у даній лабораторії, площиною 200 м<sup>2</sup> буде приблизно 8,064 люменів світлового потоку на кожний квадратний метр.

#### 4.4 Висновки до 4 розділу

В ході написання четвертого розділу даної кваліфікаційної роботи було проведено постановку задач експериментів, після чого проведено три експерименти, а саме визначення оптимальних температур для кожного типу матеріалу та шарування для досягнення найвищої якості та міцності деталей, друк тестових моделей зі зміненими температурними параметрами та проведення тестів на міцність, згин та інші механічні властивості для деталей, надрукованих при різних температурних режимах. В результаті, можна зробити такі підсумки:

- оптимальні температури для різних типів пластику дозволяють досягти найкращих результатів. Збільшення або зменшення температури може викликати дефекти, такі як низька адгезія, вилипання чи деформація;

- дефекти, що виникають при порушенні температурного режиму, можуть впливати на якість друку та міцність деталей. Зміни у температурі можуть призводити до тріщин, неправильностей у геометрії та інших проблем;

- калібрування 3D-принтера та ретельний контроль параметрів друку є важливими для досягнення найвищої якості деталей. Неналежне налаштування може призвести до великої кількості дефектів та браку;

- кожен тип пластику має свої унікальні властивості та вимоги. PLA виявився менш чутливим до температурних коливань, у той час як матеріали, такі як ABS, PETG та Nylon, вимагають більш докладного контролю;

- для кожного типу пластику слід враховувати його конкретні властивості та рекомендації щодо температурного режиму. Оптимізація

параметрів друку для кожного матеріалу є ключовою для отримання оптимальних результатів.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання даної кваліфікаційної роботи було проаналізовано технології 3D-друку, ефективність підігріву системи та відповідність температурних параметрів матеріалів, а саме методи визначення температурних параметрів матеріалів, вплив температури на властивості матеріалу та оптимальні температурні параметри для різних матеріалів. Було проведено аналіз систем регулювання та керування 3D-друком. Після проведеного аналізу було розроблено функціональну схему. Далі було проведено аналіз та вибір апаратних модулів. Після, було розроблено схему підключення та проведено моделювання стійкості системи управління. Наступним етапом було обрано середовище розробки, розроблено загальний алгоритм роботи та було програмно реалізовано ПІД-управління у системі контролю теплових режимів у 3D-принтері. Заключним етапом було проведено експериментальні дослідження та проаналізовано отримані результати.

Розробка ефективної системи контролю та підтримки теплових режимів є важливою для забезпечення стабільності та якості друку на 3D-принтері. Різні типи пластику вимагають різних теплових умов для оптимального друку. Налаштування системи повинні бути індивідуалізованими для кожного матеріалу, та загальні рекомендації можна вивести такі.

PLA (полілактід):

- температура екструдера: 190-220 °С;
- температура платформи: 50-60 °С (необов'язково);
- швидкість друку: 40-80 мм/с;
- товщина шару: 0,1-0,3 мм;
- вентиляція: увімкнена для підтримки форми деталей.

ABS (акрилонітрил-бутадієн-стирол):

- температура екструдера: 220-250 °С;
- температура платформи: 80-110 °С;
- швидкість друку: 40-80 мм/с;
- товщина шару: 0,1-0,3 мм;
- вентиляція: вимкнена або слабка, оскільки ABS може бути схильним

до деформації при використанні вентилятора.

PETG (поліетиленгліколь терефталат):

- температура екструдера: 230-250 °С;
- температура платформи: 75-85 °С;
- швидкість друку: 40-100 мм/с;
- товщина шару: 0,1-0,3 мм;
- вентиляція: Може бути використана для поліпшення якості друку.

Nylon:

- температура екструдера: 240-260 °С;
- температура платформи: 70-80 °С (якщо використовується);
- швидкість друку: 40-80 мм/с;
- товщина шару: 0,1-0,3 мм;
- вентиляція: може бути використана, але з обережністю, оскільки

Nylon схильний до абсорбції вологи.

Точне налаштування та контроль параметрів температурного режиму, швидкості друку та інших факторів є вирішальними для уникнення дефектів та досягнення високої якості виготовлених деталей. Розвиток систем контролю та підтримки теплових режимів в 3D-принтерах може сприяти покращенню якості друку, розширенню асортименту матеріалів та забезпеченню більш широких можливостей у сфері аддитивного виробництва.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.

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

3. 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. Леонов Ю. С. Аналіз систем підігріву та підтримання температури повітря в 3D-принтер / Ю. С. Леонов // «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023: Collection of Students' Scientific Paper. – Kharkiv: Kind of Kharkiv National University of Radio Electronics [electronic edition], 2023. – Part 1. –336р. P. 241-244.

5. Viktoriia Bortnikova, Vladyslav Yevsieiev, Iryna Botsman, Igor Nevliudov, Kostiantyn Kolesnyk, Nazariy Jaworski. Queries classification using machine learning for implementation in intelligent manufacturing // Chapter 6 in Monograph «Methods and tools in CAD – selected issues». – Białystok (Poland): Publishing House of Białystok University of Technology. – 2021. – PP. 63-74.

6. 3D-друк: що вам потрібно знати // PC, 2023. URL: <https://www.pcmag.com/news/3d-printing-what-you-need-to-know> (дата звернення : 26.10.2023).

7. What Are the Different Types of 3D Printing? // Future Learn, 2023. URL: <https://www.futurelearn.com/info/courses/getting-started-with-digital-manufacturing/0/steps/184102> (дата звернення : 27.10.2023).

8. The 7 Main Types of 3D Printing Technology // AllBDP, 2023. URL: [https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/#google\\_vignette](https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/#google_vignette) (дата звернення : 28.10.2023).

9. Yehia Ibrahim, Roger Kempers, A. Amirfazli, 3D printed electro-thermal anti- or de-icing system for composite panels, Cold Regions Science and Technology, Volume 166, 2019, 102844, ISSN 0165-232X, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102844>.

10. Yehia Ibrahim, Roger Kempers, A. Amirfazli (2019). 3D printed electro-thermal anti- or de-icing system for composite panels. Cold Regions Science and Technology Volume 166. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102844>.

11. Gergely Takács; Martin Gulan; Juraj Bavlina; Richard Köplinger; Michal Kováč; Erik Mikuláš; Sohaibullah Zarghoon; Richard Salíni. (2019). HeatShield: a Low-Cost Didactic Device for Control Education Simulating 3D Printer Heater Blocks. In IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON). DOI: 10.1109/EDUCON.2019.8725201.

12. Yang Gao; Wei Wang; Yincheng Jin; Chi Zhou; Wenyao Xu; Zhanpeng Jin (2021). ThermoTag: A Hidden ID of 3D Printers for Fingerprinting and Watermarking. Transactions on Information Forensics and Security, Volume: 16, Page(s): 2805 – 2820. DOI: 10.1109/TIFS.2021.3065225.

13. Zhang P, Gao Q, Yu K, Yao Y, Lu L. Investigation on the Temperature Control Accuracy of a Print Head for Extrusion 3D Printing and Its Improved Design. Biomedicines. 2022; 10(6):1233. <https://doi.org/10.3390/biomedicines10061233>.

14. Development of a 3D Model of a Manipulator for Mobile Robotic Platforms Based on Unigraphics NX / V. Yevsieiev, I. Nevliudov, N. Demska, Y. Valkivskyi // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. – Серія : Технічні науки. – 2022. – Т. 33(72), № 1. – С. 157–164.

15. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. – Х. :, 2022. – 427 с.

16. Моделі та методи кіберфізичних виробничих систем в концепції Industry 4.0 : монографія / І. Ш. Невлюдов, В. В. Євсєєв, А. О. Андрусевич, С. С. Максимова ; – Oktan Print – Prague. 2023. – 321 с.