

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Сумський державний університет  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри КСУ

\_\_\_\_\_ Петро ЛЕОНТЬЄВ

\_\_\_\_\_ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
на здобуття освітнього ступеня магістр  
зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані  
технології  
освітньо-професійної програми  
« Оптимізація процесів екструзії полімерного матеріалу під час  
друку 3Д принтером»

Здобувача групи СУ.м-21

Циганенко Едуарда Валентиновича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ ЦИГАНЕНКО Едуард  
(підпис)

Керівник: доцент, кандидат фізико-математичних наук В'ячеслав ЖУРБА

\_\_\_\_\_ (посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Консультант \_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Сумський державний університет  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_ Леонтєв П.В.

\_\_\_\_\_ 2023 р.

### ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра студенту

Циганенко Едуарду Валентиновичу

1 Тема роботи «Оптимізація процесів екструзії полімерного матеріалу під час друку 3Д принтером»

Затверджено наказом ректора університету

№ 1097-VI від 09.10.2023.

2 Термін здачі студентом закінченого проекту "18" 12.2023 р.

3 Вихідні дані до проекту:

Завдання кафедри та конструкторська документація, бакалаврський диплом

Циганенко Е.В, 2022

4 Зміст пояснювальної записки (питання, що належать до розроблення): аналіз предметної області, автоматизація процесів екструзії полімерного матеріалу під час друку 3Д принтером

5 Перелік графічних матеріалів: 44 рисунки, 9 таблиць

6. Календарний план проектування

Номер етапу	Зміст етапу проектування (виконання роботи)	Строк виконання (початок - кінець)
1	Аналіз завдання кафедри. Складання ТЗ. Підбір та аналіз літератури. Відбір аналогів та прототипів	01.10.23-03.10.23
2	Провести опис об'єкту автоматизації	04.10.23-10.10.23
3	Обґрунтувати вибір обладнання для проекту	11.10.23-14.10.23
4	Створити пакет необхідної конструкторської документації	15.10.23-20.10.23
5	Аналіз джерел, присвячених темі моделювання досліджуваного процесу	26.10.23-03.11.23
6	Проведення математичного моделювання процесів екструзії полімерного матеріалу під час друку 3Д принтером	04.11.23-20.11.23
7	Проведення техніко-економічних розрахунків	21.11.23-25.11.23
8	Оформити пояснювальну записку до проекту. Здача проекту керівнику	26.11.23-18.12.23

8 Дата видачі завдання "01" жовтня 2023 р.

Керівник проекту:  
вчені ступінь та звання,  
посада \_\_\_\_\_

Журба В.О.  
к. ф.-м. н., доцент

До виконання прийняв:  
студент-дипломник  
групи СУМ-21 \_\_\_\_\_

Циганенко Е.В.

## АНОТАЦІЯ

Циганенко Едуард Валентинович. Оптимізація процесів екструзії полімерного матеріалу під час друку 3Д принтером. Кваліфікаційна робота магістра. Сумський державний університет. Суми, 2023 р.

Система автоматизації розроблена на базі мікропроцесорного ПЛК Arduino UNO.

Кваліфікаційна робота складається з розрахунково-пояснювальної записки й графічного матеріалу.

Дипломний проект містить 81 сторінку: вступ, технологічне призначення системи, опис розробленої АСУ ТП управління процесами екструзії полімерного матеріалу під час друку 3Д принтером, техніко-економічні розрахунки, висновки.

Графічний матеріал містить 3 креслення: схема електрична принципова (аркуш формату А3), функціональна схема автоматизації (аркуш формату А3), та схема матеріально-технологічних потоків (аркуш формату А4).

В роботі описаний технологічний об'єкт.

Розроблені контури регулювання.

Обране обладнання для побудови системи.

Розроблений алгоритм управління процесами екструзії полімерного матеріалу під час друку 3Д принтером.

Розроблено структурну схему та проведене математичне та імітаційне моделювання контуру управління процесами екструзії полімерного матеріалу під час друку 3Д принтером.

Проведені економічні розрахунки.

Розроблений пакет необхідних креслень.

## **ANNOTATION**

Eduard Valentinovich Tsyganenko. Optimization of processes of extrusion of polymeric material during printing by a 3D printer. Master's qualification thesis. Sumy State University. Sumy, 2023

The automation system is developed on the basis of an Arduino UNO microprocessor PLC.

The qualification work consists of a calculation and explanatory note and graphic material.

The calculation-explanatory note contains 81 pages: introduction, technological purpose of the system, description of the developed ACS TP management of processes of extrusion of polymer material during printing by a 3D printer, technical and economic calculations, conclusions.

The graphic material contains 3 drawings: an electrical principle diagram (A3 format sheet), a functional automation diagram (A3 format sheet), and a material and technological flow diagram (A4 format sheet).

The technological object is described in the project.

Developed regulation contours.

Selected equipment for building the system.

A developed algorithm for controlling processes of polymer material extrusion during printing by a 3D printer.

A structural diagram was developed and mathematical and simulation modeling of the control circuit of polymer material extrusion processes during printing by a 3D printer was carried out.

Economic calculations were carried out.

A package of necessary drawings has been developed.

## ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1. АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО АБО ТЕХНОЛОГІЯ 3Д ДРУКУ .....	12
1.1 Класифікація 3Д принтерів за типом кінематичної схеми .....	12
1.2 Якість друку 3Д принтера .....	17
1.3 Параметри та температурні аспекти процесу 3Д друку.....	20
1.4 Опис та технічні характеристики об'єкта управління .....	26
1.4 Цілі та завдання дипломної роботи.....	28
2. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ.....	29
2.1 Елементи адаптивної системи управління .....	29
2.2 Опис лабораторного стенду .....	37
2.3 Розташування елементів адаптивної системи.....	39
2.4 Автоматизована система керування технологічними процесами.....	41
2.5 Принципова електрична схема адаптивної системи управління .....	46
3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ОБЛАСТІ ДРУКУ .....	48
3.1 Адаптивні системи. Теоретичні відомості про адаптивні системи .....	48
3.2 Розрахунок математичної моделі адаптивної СК.....	57
3.3 Порівняння П-, ПІ- та ПІД-регуляторів .....	64
3.4 Структурна схема замкнутої системи регулювання температури .....	67
3.5 Розробка математичної моделі адаптивної системи керування .....	71
4. БЕЗПЕКА ТА ЕКОЛОГІЧНІСТЬ ПРОЕКТУ.....	76
ВИСНОВКИ.....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	85
ДОДАТКИ.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Додаток А. Схема інформаційно-матеріальних потоків[2] .	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Додаток Б. Функціональна схема автоматизації.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Додаток В. Схема електрична принципова	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>



## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСУ – автоматизована система управління;

АСУ ТП – автоматизована система управління технологічним процесом;

ЕОМ – електронно обчислювальна машина;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

МК – мікроконтролер;

ВМ – виконавчий механізм;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПК – промисловий комп'ютер;

ПУ – панель управління;

ОП – операторська панель;

ПЛК – програмований логічний контролер;

ПЗО – прилад зв'язку з об'єктом;

СУ – система управління;

HMI – human machine interface;

IoT – Internet of Things;

IT – information technology;

SCADA – system control and data acquisition;



## ВСТУП

Дипломна робота є кваліфікаційною роботою студента, виконання якої підтверджує професійну підготовку фахівця до самостійного вирішення завдань проектування, розробки та дослідження комп'ютеризованих систем будь-якого призначення, засобів автоматизації або програмних продуктів. У процесі створення кваліфікаційної роботи магістра повинні бути реалізовані отримані студентом знання, уміння та практичні навички вирішення конкретного, достатньо складного завдання розробки та/або дослідження системи управління.

Кваліфікаційні роботи магістра мають широкий спектр можливих завдань, конкретний перелік яких визначається з технічного завдання на проект, яке розробляє студент на основі завдання кафедри. [1]

Адитивне виробництво або 3Д друк – це процес об'єднання матеріалу з метою створення об'єкта з даних 3Д моделі, як правило, шар за шаром, на відміну від субтрактивних технологій. Під субтрактивними технологіями мається на увазі механообробка видалення зайвого матеріалу з масиву заготовлі. Технологія 3Д-друку не перестає розбурхувати уми своїх послідовників. Вони описують світ, де одяг не купуватимуть у магазинах, а завантажуватимуть в Інтернеті та роздруковуватимуть.[8] Світ, де кожен зможе створювати речі на власний розсуд.

Широке використання потенціалу тривимірного друку дозволить заощаджувати кошти та час, а також підвищити продуктивність. 3Д-друк – це інструмент розширення можливостей.

Таким чином, дослідження активно ведуться і можна припустити, що в недалекому майбутньому – років через десять – застосування 3Д принтерів дозволить створювати складні тривимірні проєкційні моделі будівель з точністю передачі в 100 мікрон, які особливо актуальні для наукових інститутів, адже тепер можна не тільки робити прототип, а й торкатися щодо нього у проведених дослідженнях.

Актуальність. На сьогоднішній день існує багато видів 3Д принтерів, які значно відрізняються один від одного як за своєю ціною, так і з побудови кінематичної схеми, а популярність такого роду техніки зростає з кожним роком.

Отже, актуальність обраної теми обумовлена необхідністю доробки недорогого 3Д принтера ргуса із інфітару, шляхом створення такої адаптивної системи управління для підтримки заданого значення температури в області друку та свого роду корпусу, довівши тим самим якість друку такого принтера до рівня професійних 3Д принтерів.

Об'єкт дослідження дипломної роботи: вивчення основ 3Д друку та моделювання, систем регулювання температури у приміщенні, основ адаптивних систем управління та теорії з використання та налаштування ПІД – регулятора.

Предмет дипломної роботи: створення адаптивної системи управління підтримки заданого значення температури у сфері друку.

Методологічною основою для дослідження послужили статті щодо використання та налаштування ПІД – регулятора та наукові роботи з підтримки заданого значення температури у приміщенні. В якості теоретичної бази дослідження були використані публікації та статті, присвячені технологіям 3Д друку, побудови та описи принципових електричних схем.

Практична значимість даної роботи полягає в тому, що продукт дослідження може бути застосований як для доопрацювання 3Д принтерів, які знаходяться в аматорському користуванні, так і як наочний матеріал при навчанні студентів і школярів.

Структура роботи. Дипломна робота складається з: вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, трьох додатків та специфікації.

У вступі представлені основні параметри дослідження.

У першому розділі відбувається ознайомлення з типами кінематичних схем 3Д принтерів, якістю 3Д друку, об'єктом управління та складання цілей та завдань на дипломну роботу.

У другому розділі представлені підбір технічних засобів для фізичної реалізації адаптивної системи управління, опис принципу роботи розробленого лабораторного стенду, складання та опис принципової електричної схеми та 3Д модель розташування елементів адаптивної системи управління на корпусі.

У третьому розділі представлені теоретичні відомості про адаптивні системи, розрахунок та побудову математичної моделі об'єкта управління, а також структурні схеми систем регулювання та графіки перехідних процесів.

Четвертий розділ дає присвячений питанням безпеки та екологічності проекту.

У висновку підбивається підсумок всього дослідження, після висновку наводиться 24 використаних джерела.

У відповідності до предмету дослідження і поставленої мети роботи мною були поставлені та вирішені наступні задачі:

Проведено передпроектне дослідження, зібрана та проаналізована інформація по створенню адаптивної системи управління підтримки заданого значення температури у сфері друку;

Розроблено концепцію адаптивної системи управління процесами екструзії полімерного матеріалу під час друку 3Д принтером;

У відповідності з функціональними вимогами підібрано необхідне апаратно – програмне забезпечення.

# 1. АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО АБО ТЕХНОЛОГІЯ 3Д ДРУКУ

## 1.1 Класифікація 3Д принтерів за типом кінематичної схеми

Будь-який 3Д принтер має платформу та екструдер, які рухаються відносно один одного. Вони виробляють механічний рух – тобто, змінюють своє становище у просторі та часі. Кінематика в 3Д принтері – це схема згідно з якою рухаються екструдер і платформа. У світі є чотири типи кінематичних схем 3Д принтерів.

Перша кінематична схема – це схема малопоширених на сьогоднішній день Дельта-принтерів.[7]



Рисунок 1.1– Дельта-принтер

Сутність роботи даного типу принтера полягає в тому, що робочий стіл завжди залишається нерухомим, а рухається лише екструдер. Дані принтери не досягли певних успіхів. Можливо тому, що вимагають спеціального встановлення та налаштування, а також специфічного програмного забезпечення.

Дельта-принтери мають високий каркас для вільного ходу довгих важелів. І водночас – не велику область друку.

Переваги:

- легко кастомізується. Для збільшення висоти достатньо прикупити 3 шматки профілю більшої довжини і збільшити максимальну висоту в налаштуваннях;
- займає мало місця. Він частіше високий, ніж громіздкий за довжиною та шириною, за рахунок цього компактність;
- якщо зробити легкий ефектор (каретка, де встановлено хотенд), можна досягти великих швидкостей без втрати якості друку;
- переміщення по висоті не відрізняється від переміщення ХУ. Таким чином, немає залипання лінійних підшипників на переїздах стола, як у Cartesian принтерів, зайвих двигунів, що катаються на балці;
- відсутність виступаючих частин дає можливість закрити корпус та надати рамі жорсткості.

Недоліки:

- складна математика переміщень, рекомендується ставити одразу 32-бітові плати;
- складне налаштування. Часта проблема в налаштуванні – прибрати так звану «лінзу», адже кожен стрижень обертається з радіусом, і при некоректному налаштуванні у вас площина, що друкується, буде або опуклою, або увігнутою лінзою.[16]

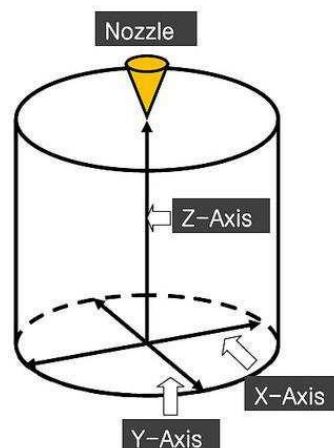


Рисунок 1.2– Кінематика Дельта-принтера

Друга кінематична схема - XZ Head Y Bed. На даний момент ця кінематика є дуже популярною при створенні бюджетних китайських 3Д принтерів.

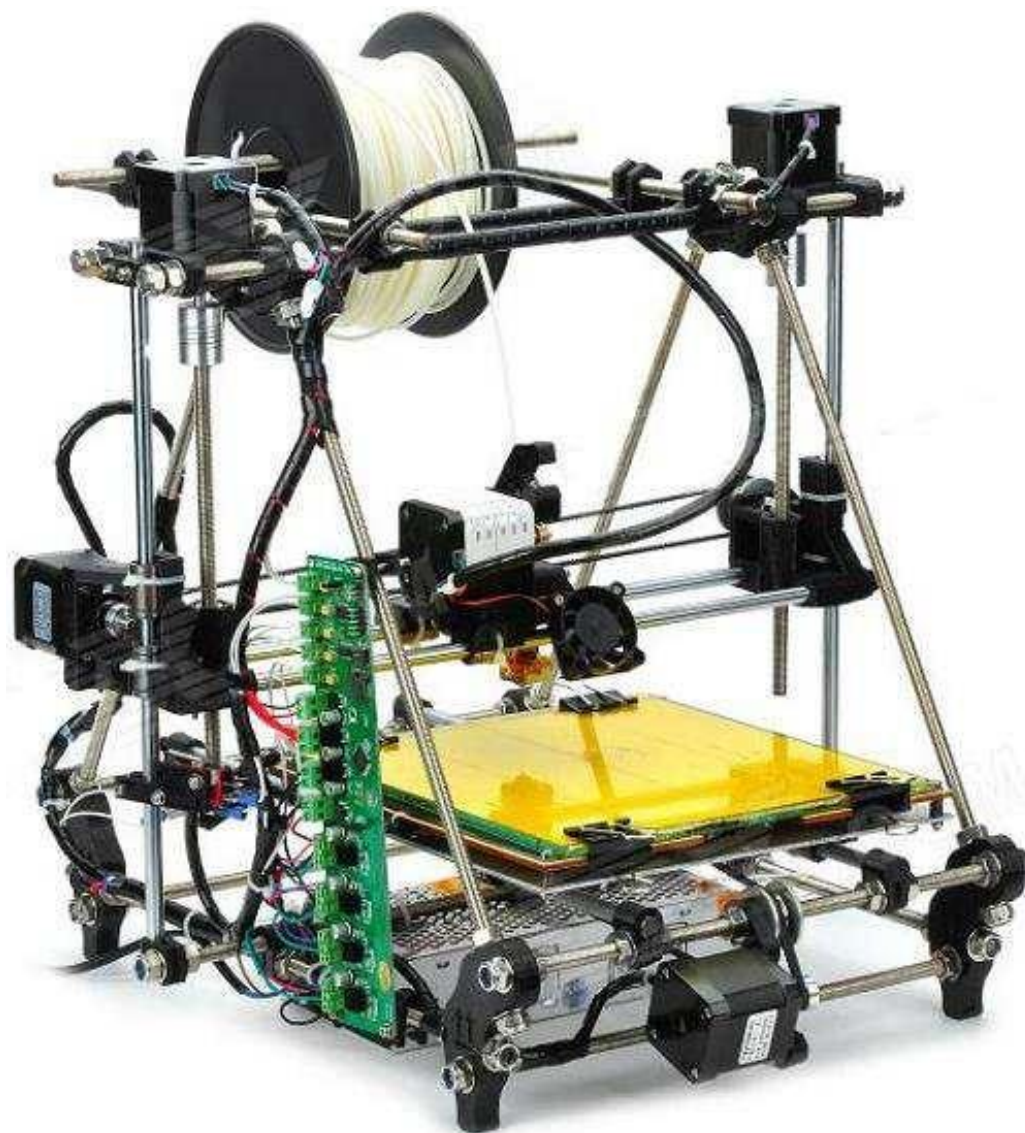


Рисунок 1.3 – 3Д принтер Prusa Mendel

У цю групу входять, в основному, принтери Rep-Rep, відмінною рисою яких є відкрита платформа та трикутний каркас бічних стінок. Полегшена конструкція таких принтерів спрощує процес складання, але породжує під час друкування вібрації, від яких знижується якість готових виробів.[14]

Досить популярним на пострадянському просторі став пристрій Mendel-90 з дерев'яними панелями, що розташовані під прямим кутом. Фанеру легко можна замінити на оргскло або інший матеріал. Така конструкція позитивно впливає на точність друку та знижує кількість вібрацій.

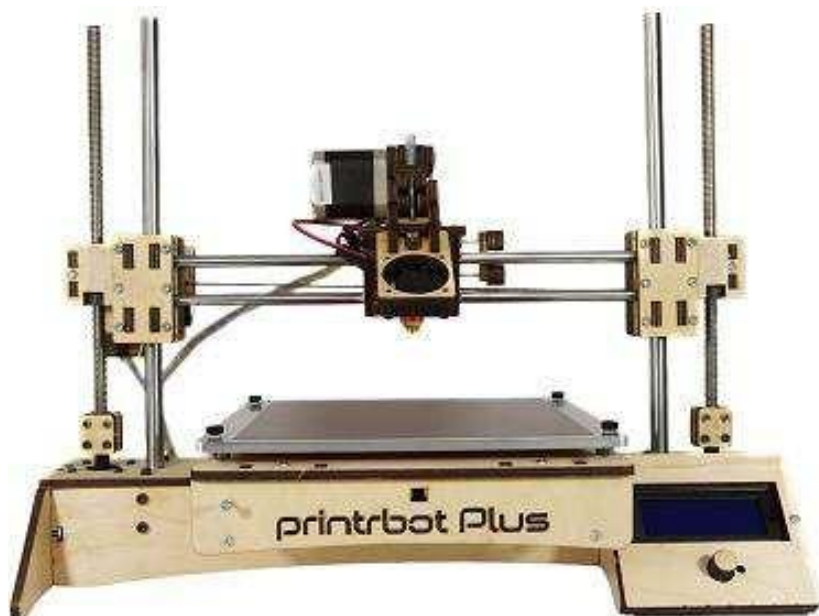


Рисунок 1.4 – 3Д-принтер PrintrBot Plus

Ще одним представником даного типу принтерів є 3Д-принтер PrintrBot з підвищеною жорсткістю несучої рами. При розробці даної моделі конструктори також відмовилися від трикутного каркаса бічних стінок і обтяжили основу, сховавши в ній електронну начинку. Це дозволило здешевити конструкцію пристрою та спростити процес його збирання. Точність у подібних 3Д принтерах залежить від різьбових шпильок та їх жорсткості. Якісні шпильки – це 70% якості цього 3Д принтера. Третя кінематика – XY Head Z Bed, коли екструдер рухається осями XY, а стіл - по Z.

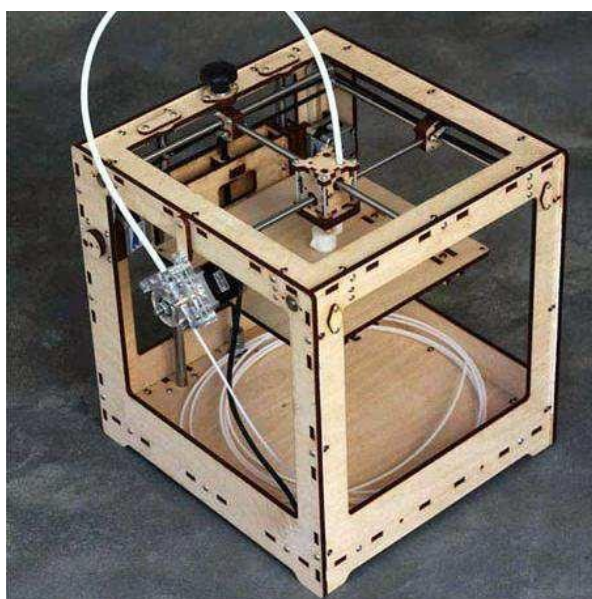


Рисунок 1.5 – 3Д принтер Ultimaker

За допомогою двох зубчастих ременів двигун осі У переміщає каретку осі Х, на якій закріплений двигун, який приводить в дію друкувальну головку. Усі три окремі ремені обов'язково мають бути натягнуті струною. Інакше принтер не друкуватиме якісно. За допомогою чотирьох великих і двох маленьких ременів і гладких загартованих валів починає рухатися друкуюча головка з гідною швидкістю. Як результат – якість друку у 3Д принтерів з таким чином побудованою кінематикою, один із найкращих.[18]

Четверта кінематика – H-Vot.

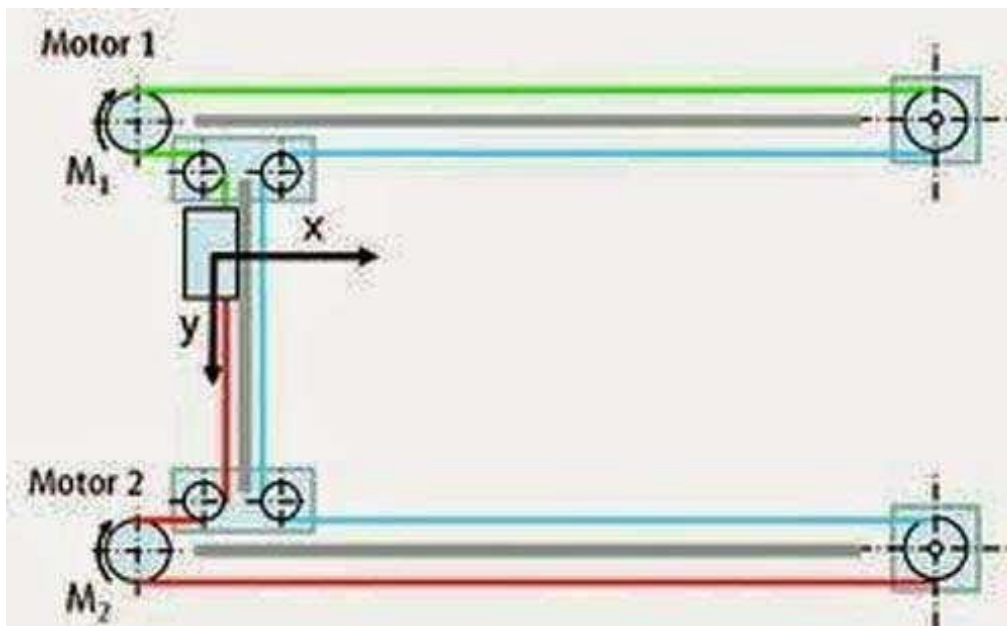


Рисунок 1.6 – Кінематика H-Vot

При обертанні обох двигунів в один і той же бік, виконується рух екструдера по осі Х. Під час обертання обох двигунів у протилежний бік – рухається каретка з екструдером по осі У. У разі, якщо буде обертатися лише один з двигунів – отримаємо одночасний рух по двом осям, тобто це буде рух по діагоналі.

Очевидні плюси цієї кінематики – двигуни статичні, їм не треба нікуди їздити, відповідно, вони можуть бути будь-якими (тобто потужними). Ремінь тут лише один – отже відсутня велика кількість натяжних механізмів.

Але є й мінуси – дана конструкція має бути абсолютно жорсткою. Інакше замість кіл виходитимуть овали.



## 1.2 Якість друку 3Д принтера

Абсолютна більшість усіх сучасних 3Д принтерів використовують крокові двигуни одного типу та сконструйовані за схожим принципом. Так само їх друкуючі голівки та приводи не сильно відрізняються один від одного. Програмне забезпечення у більшості 3Д принтерів схоже та розробляється на базі поширеної платформи Arduino.

Вже близько кількох років виробники FDM 3Д принтерів для своїх моделей не створюють ПЗ, вибирають програмне забезпечення, яке вільно поширюється, наприклад, CURA, Repetier Host і т.д.

Практично на будь-якій моделі можна досягти приблизно однакової якості друку з незначними відмінностями. І залежить це не від зазначеної виробником точності, а від матеріалу, яким друкує користувач 3Д принтера, досвіду оператора, який керує 3Д принтером та від швидкості друку.[5]

Трохи вищою якістю друку можуть похвалитися 3Д принтери, які виготовляються в металевому корпусі і побудовані на лінійних рейкових напрямних. За допомогою точніших безлюфтових рейок та гвинтів, похибка при друку буде знижена, відповідно можна буде використовувати пластик на вищій швидкості.

Виходячи з описаних вище даних, вже можна зробити деякі висновки і розібратися, чим саме відрізняється той чи інший принтер FDM від своїх конкурентів, крім його вартості.

Основні відмінності 3Д принтерів:

- вимоги принтера до якості матеріалів для використання;
- жорсткий корпус або рамна конструкція;
- наявність камери для друку закритого типу;
- тефлонова серцевина екструдера та притискний механізм;
- потужніший, але при цьому не важкий двигун екструдера;
- місце розташування котушки із пластиком;
- наявність столу, що підігрівається, і системи обдування.

Важливі відмінності:

- тип приводу (гвинтовий або ремінний);

- можливість автономного друку без ПК;
- максимальний розмір області друку.

Незначні відмінності:

- додаткові функції пристрою (wi-fi, камера тощо);
- термін експлуатації та термін технічної підтримки;
- впізнаваність та розкручуваність бренду.

Тепер, давайте розберемося з термінами – якість та точність. У нашому випадку ці ознаки якості повинні визначати переваги самого принтера та якості друку.

Сучасні FMD 3Д принтери мають такі властивості, які виділяють їх серед інших:

- висота кроку по осі Z;
- дискретність позиціонування;
- діаметр сопла (розмір краплі, яку отримуємо із сопла).

Ці ознаки можуть вплинути на якість майбутнього друку та визначити її точність, яку часто плутають із якістю. Але якщо у випадку з якістю потрібно враховувати вплив обдування, довкілля та тип камери 3Д принтера, то на його точність вони не впливають. У нашому випадку принтер повинен відповідати заданим розмірам та координатам. Давайте розберемося з кожною зазначеною ознакою докладніше:

а) висота кроку осі Z або висота шару є досить маленькою. На сучасних моделях встановлена платформа, яка зсувається на дуже невеликій відстані близько 2,5 мкм. При цьому висота шару дещо відрізнятиметься під час друку. Хоча теоретично, можна досягти і 2,5 мікрон, але це не вийде у зв'язку з фізичними обмеженнями матеріалів, які дозволять створити шар подібного розміру. Екструдер видавлює в'язку краплю і зробити її настільки дрібною неможливо. В результаті багатьох експериментів була розрахована оптимальна висота шару для 3Д друку на принтерах FMD, що дорівнює 150-200 мкм. У такому випадку крапля має достатній об'єм, щоб приклеїтись до попереднього шару і надійно зафіксуватися на ньому;

б) параметр, який здатен визначити вірність переміщення друкуючої головки 3Д принтера, щодо встановлених програмою координат, називається точністю позиціонування. При цьому більшість моделей дискретність позиціонування вказується в діапазоні 20-300 мкм;

в) розмір точки безпосередньо залежить від діаметра отвору сопла, що є у екструдера. Інженери та розробники технології 3Д друку у ході своїх експериментів зробили висновки про те, що оптимальний діаметр сопла має бути в межах 400-500 мкм.[22] Хоча в рекламних оголошеннях і роликах часто можна почути, що у певної фірми розроблено інноваційний принтер, який дозволяє друкувати в кілька разів якісніше за рахунок діаметра сопла, яке зменшено в два або кілька разів. Насправді якість буде дещо збільшена, але у тонких сопел є ряд своїх недоліків:

- надруковані шари будуть більш крихкими;
- друк буде перериватися, а саме сопло більш схильне до засмічення.

Адекватні виробники намагаються комплектувати свою продукцію нормальними розмірами сопла, які відповідають потрібним параметрам (400-500 мкм). За бажанням, покупець завжди може придбати сопло з меншим діаметром, і за його допомогою буде отримано мініатюрну краплю. Сучасні програми для 3Д принтерів дозволяють самостійно задавати діаметр сопла.[20]

Підбиваючи підсумки можна виділити кілька основних моментів, які необхідно оцінювати у 3Д принтера:

- принтери, що працюють за технологією FDM, не можуть створити деталізацію вище 100 мкм, незважаючи на заяву в технічній документації;
- при виборі FDM принтерів варто зупинитися на моделях з рамним корпусом із металу, вони здатні демонструвати кращу якість друку за більшої швидкості;
- на низькій швидкості та високих налаштуваннях якість друку всіх 3Д принтерів FDM практично не відрізняється.

### 1.3 Параметри та температурні аспекти процесу 3Д друку

На основі всієї наведеної вище інформації можна узагальнити та систематизувати параметри, що впливають на якість друку.

1. Температура плавлення використовуваного пластику. Робоча температура плавлення пластика у кожного типу пластика певна і при неправильній установці цієї температури в слайсері це негативно позначиться на моделі.

2. Температура в області друку, ще один важливий параметр, що впливає на якість друку. У 3Д принтерах відкритого типу він має найбільший вплив на друк моделі, так як область друку схильна до впливу неконтрольованих збурень таких як порив вітру, встановлений поруч кондиціонер, що охолоджує приміщення в спеку року та інших збурень, що впливають на однорідність температури у всій області друку.

3. Натяг ременів горизонтування напрямних осі Z. Якщо натяг ременів по осях x або y не задовольняє рекомендованому, то це сильно позначиться на якості друку, так як почне з'являтися перескакування ременя при недостатньому натягу, або при перетягнутому ремені зайва напруга, що впливає на крокового двигуна. При неправильному горизонтуванні напрямних починаються проблеми під час друку першого шару.

4. Адгезія філаменту із платформою. Ця проблема виникає дуже часто і безпосередньо залежить від складу та характеристик використовуваного пластику. Рекомендацій щодо вирішення цієї проблеми безліч, від змащування платформи клеєм ПВА до використання боросилікатної підкладки.

5. Налаштування слайсера. Це один з основних параметрів, що впливають на якість друку принтера, для кожного принтера потрібен індивідуальний підбір налаштувань. Звичайно в інтернеті багато статей і рекомендацій на цю тему, але в більшості випадків підбір оптимальних налаштувань проходить методом спроб і помилок. При проведенні налаштування потрібно взяти до уваги безліч факторів та характеристик 3Д принтера.

Параметри, що впливають на якість друку, наведені в графічній частині на аркуші 1. Нас цікавлять параметри, які безпосередньо або опосередковано пов'язані з температурними проблемами друку. Конкретні матеріали, зазвичай, розробляються під певні платформи, виконують спеціалізовані функції. На сьогоднішній день існує безліч видів та типів 3Д пластику. У кожного з них різні властивості, і характеристики та підхід до роботи з ними, звичайно ж, різний. Так звана «температурна» проблема одна з тих, з якими обов'язково стикаються усі, хто займається 3Д печаткою.

Наприклад, пластик ABS за своїми параметрами більш «гарячий», ніж PLA. Робоча температура плавлення ABS пластику становить  $\sim 210^{\circ}\text{C} - 260^{\circ}\text{C}$ , у PLA робочі температури дещо нижче  $\sim 190^{\circ}\text{C} - 220^{\circ}\text{C}$ . Але є важлива відмінність, ABS пластик більш вимогливий до сталості температури повітря робочої камери і температури поверхні, на якій буде знаходитися деталь в процесі друку. Тому для деталей з ABS пластику потрібен підігрів робочого столу до  $110^{\circ}\text{C}$ , інакше краї деталі, що друкується, швидше за все відірвуться від столу і згодом вся деталь може бути зірвана з місця.[15]

PLA пластик у свою чергу не вимогливий до підігріву робочого столу та до незначних змін температури повітря робочої камери. Але багато користувачів 3Д принтерів і для цього типу пластику теж використовують підігрів платформи для кращої адгезії моделі до столу.

Типові «температурні» проблеми, з якими може зіткнутися, кожен користувач 3Д принтера описано нижче.

#### *Відклеювання першого шару.*

В основі 3Д модель піднімається та не прилипає до платформи. Ця проблема також може спровокувати горизонтальні тріщини у верхніх шарах моделі 3Д. Деформація нижніх шарів відбувається через особливості пластику. ABS та PLA пластик охолоджується дуже швидко і саме це може призвести до відлипання першого шару.

Можливі рішення:

- підігрів платформи. Найпростіше рішення для цієї проблеми

- використання платформи з підігрівом та встановлення температури, трохи нижче за температуру плавлення пластику;
- калібрування платформи. Неправильне калібрування платформи може також впливати на якість друку першого шару;
- збільшення контакту між 3Д моделлю та платформою. Часто ця проблема також виникає через недостатньо щільний контакт моделі та підкладки;
- налаштування вентилятора. Як правило, вентилятори повинні перемикатися на повну потужність, як тільки роздруківка досягає висоти 0.5 мм, але ви можете збільшити висоту до 0.75 мм, щоб дати шарам охолонути природним шляхом.

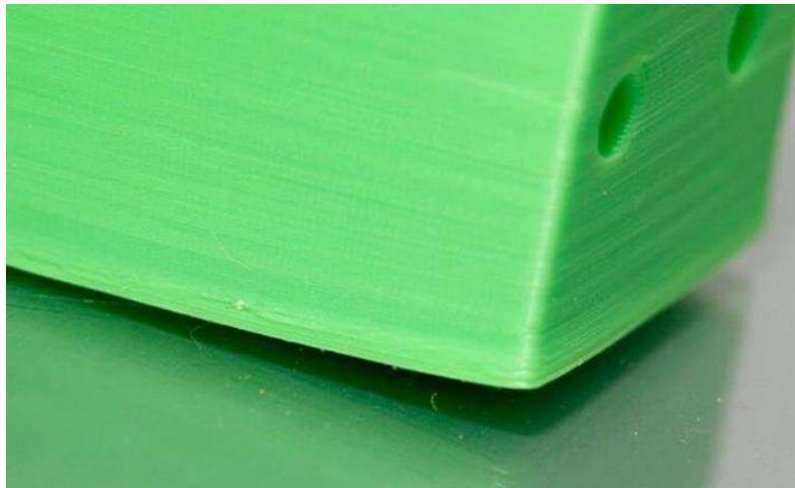


Рисунок 1.7 – Відклеювання першого шару. Зміщення першого шару

Основа моделі трохи зміщена. Як правило, основа моделі зміщується через вагу роздруківки, яка тисне на перший шар, коли нижні шари ще не встигли охолонути. Часто трапляється з принтерами з платформою, що підігрівається.

Можливі варіанти рішення:

*надмірне переохолодження.* Щоб позбавитися проблеми зміщення першого шару, друкувані моделі повинні бути достатньо охолоджені, щоб витримувати вагу всієї моделі. Надмірне переохолодження може призвести до деформації першого шару. Знайти баланс досить складно. Домогтися

оптимальної температури можна її послідовним зниженням для платформи на 5 градусів (але не більше ніж на 20 градусів від рекомендованої температури).



Рисунок 1.8 – Зміщення першого шару

*Тріщини у високих об'єктах.*

Тріщини з боків моделі, найчастіше у високих моделях. Проблема може виникнути зненацька, і найчастіше виникає у великих принтерах, особливо якщо ви не стежите за їх роботою. На верхніх шарах матеріал охолоджується швидше, тому що тепло від платформи не досягає необхідної висоти. Через це адгезія верхніх шарів нижче.



Рисунок 1.9 – Тріщини у високих об'єктах

Можливі рішення:

- температура екструдера. Збільшенням температури екструдера може виправити цю проблему, краще підняти її на 5-10 °С;
- напрямок та швидкість вентилятора. Потрібно перевірити вентилятори та переконатися, що вони спрямовані на модель. Якщо напрямок правильний, зменшіть швидкість обертання.

*Дірки на верхньому шарі.*

Дірки та щілини на верхній поверхні роздруківки. Дві найбільш поширені причини цієї проблеми – неправильне охолодження верхнього шару та недостатньо товстий верхній шар.

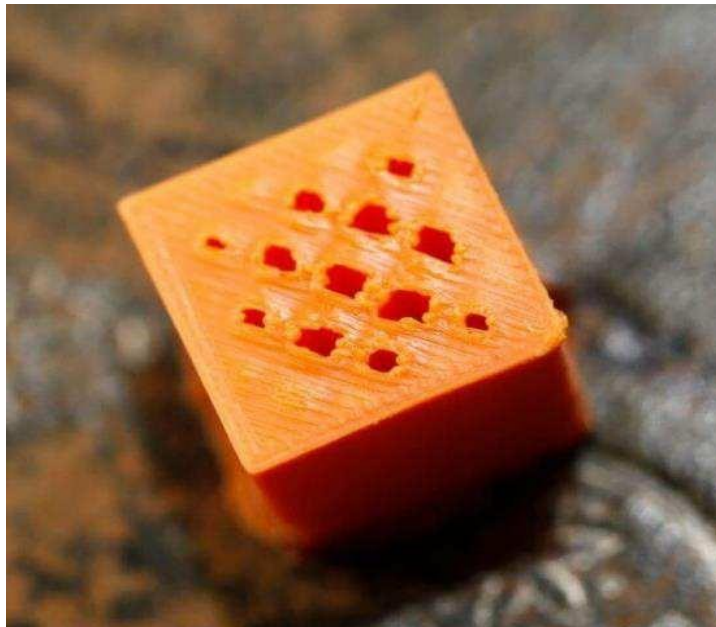


Рисунок 1.10 – Дірки на верхньому шарі

Можливі рішення:

- перевірка розташування вентилятора. Охолодження може спровокувати цю проблему, так що перш за все слід перевірити вентилятор. Коли принтер починає друк, вентилятори встановлені на мінімальну швидкість або взагалі вимкнені. Після друку першого шару вентилятори починають працювати. Насамперед слід перевірити, чи починають вони працювати, а також продовжують роботу, коли друк закінчено. Якщо все добре, слід переконатися, чи правильно встановлено напрям вентилятора - вони повинні обдувати модель;



- встановлення швидкості вентилятора в G-Code. Ще одна проблема охолодження пов'язана з надмірною кількістю пластику під час друку верхнього шару. Він повинен остигати швидко, щоб не провалюватися між вже роздрукованими елементами, що підтримують. Швидкість обдування може бути відрегульована за допомогою G-Code (як правило, G-Code для Fan On це M106 і M107 Fan Off). Також встановлення швидкості вентилятора на максимум для верхніх шарів.

#### *Деформація 3Д моделі.*

Наслідки перегріву тонких стінок на кутах деталі пов'язано з тим, що для друку кута соплу принтера доводиться трохи довше бути над одним і тим самим місцем деталі, ніж при простій прямій лінії. Через це щоразу сопло 3Д принтера все сильніше нагріває одну ділянку деталі і в результаті ми отримуємо температурну деформацію.

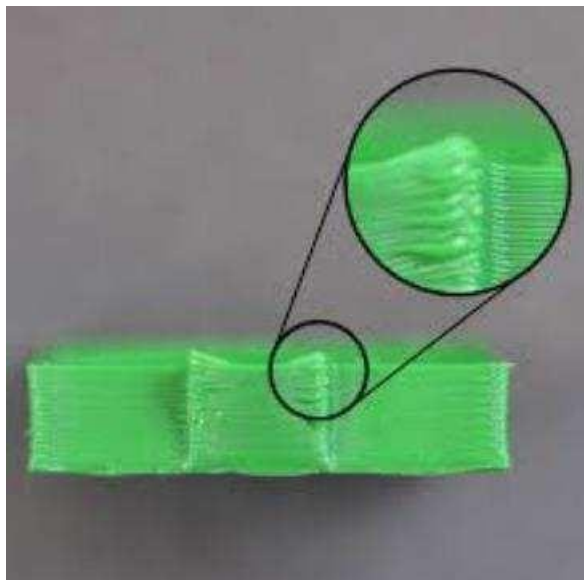


Рисунок 1.11 – Деформація 3Д моделі через перегрівання

#### Можливі рішення:

- підвищити швидкість друку. Але є можливість появи шлюбу, пов'язаного саме з більшою швидкістю друку;
- знизити температуру екструдера, але тоді філамент буде густішим і може з'явитися недоекструзія;
- використовувати додаткове обдування 3Д моделі.

#### 1.4 Опис та технічні характеристики об'єкта управління

INFITARY HB I3 – новий 3Д принтер, що вже непогано зарекомендував себе компанією «Infitary 3D Printers». Принтер виконаний за схемою RepRap Prusa i3 і має дуже серйозний набір можливостей. Слід зазначити, що стіл є суцільнометалевим і виконаний у вигляді алюмінієвої пластини, при цьому висока якість виготовлення дозволяє не використовувати в процесі друку накладку з скла, що нерідко доводиться встановлювати на велику кількість моделей 3Д принтерів для вирівнювання площини.[6]

Використання висококласних крокових двигунів дозволило досягти максимальної точності позиціонування, яка становить 0.012 мм для осей X-Y, і досягає 0.004 мм для осі Z. Товщина шару змінюється в межах від 0.1 до 0.4 мм, дозволяє гнучко налаштувати принтер під конкретні завдання. Швидкість, з якою подається 3Д нитка, може регулюватися в межах від 40 до 120 мм/с.

Великим плюсом INFITARY HB I3 є висока уніфікація вузлів зі старшими моделями. Ця особливість відкриває широкі можливості по апгрейду та модернізації з метою максимально повного підстроювання принтера під завдання користувача.

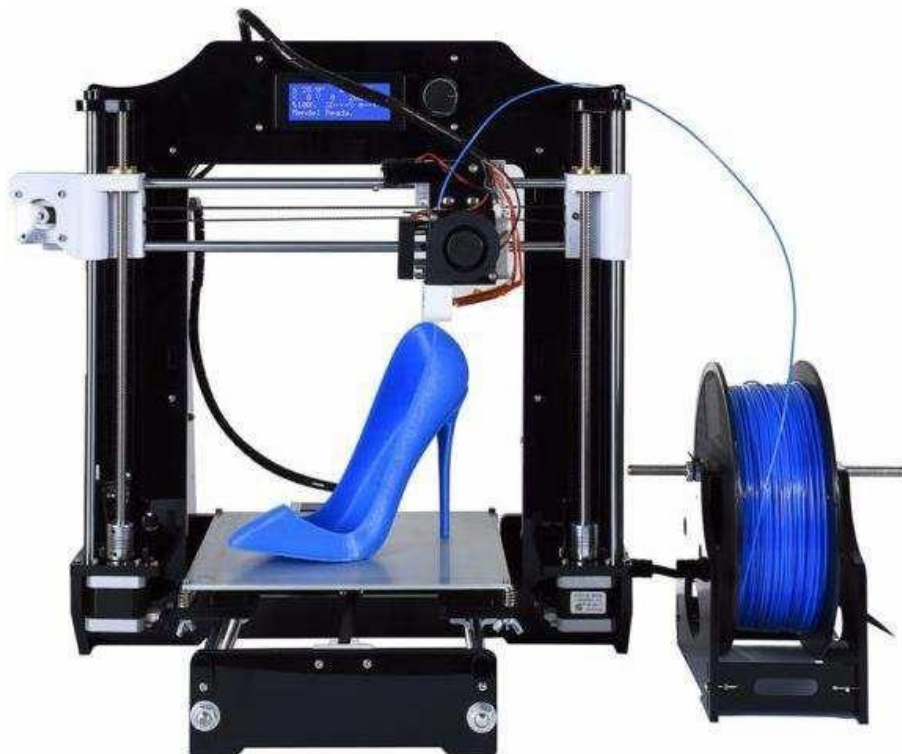


Рисунок 1.12 – Зовнішній вигляд 3Д принтера INFITARY HB I3

Для максимальної зручності користувачів INFITARY НВ ІЗ оснащений картридером формату SD, і може друкувати безпосередньо з флеш-карти. Так само можливе пряме сполучення з комп'ютером під управлінням OS Windows XP, Windows 7, Windows 8.1, Windows 10, а також Mac і Linux.

У цій моделі 3Д принтера було проведено інженерну раціоналізацію конструкції. Одне з подібних рішень - використання товстої, акрилової рами, посиленої сталевими шпильками m8. Дана рама відповідно не порівнянна з металевою, але і вона відрізняється високою міцністю, по жорсткості лише трохи поступаючись суцільнометалевим варіантам.[19]

Технічні характеристики об'єкта управління наведені в табл. 1.1. Описані основні характеристики, параметри та значення параметрів.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики об'єкта управління

Параметр	Значення параметра
Розмір, мм	510x400x415
Вага, кг	8,5
Розмір упаковки, мм	500x350x200
Вага упаковки, кг	9,5
Живлення/максимальна споживана потужність, В, В, Вт	220/110/180
Підтримка операційних систем	XP, Win7, MacOS
Дискретність позиціонування осей X, Y, мм	0,012
Дискретність позиціонування вісі Z, мм	0,004
Матеріал	ABS, PLA
Рекомендований матеріал	PLA
Управління програмним забезпеченням (мова)	13 мов (у тому числі англійська, французька, іспанська тощо)
Формати даних, що імпортуються	STL, OBJ, G-Code тощо
Швидкість по осях XY (максимум), мм/хв	3000
Швидкість по осі Z (максимум), мм/хв	200
Швидкість друку, мм/с	40-120
Стандартний діаметр екструдера, мм	0,2/0,3/0,4
Кількість екструдерів у комплекті, шт	1
Максимальний розмір друку, мм	200*200*210

## 1.4 Цілі та завдання дипломної роботи

Ціль:

- проектування системи адаптивного керування для підтримки постійної температури в області друку 3Д принтера на рівні 40°C. Як об'єкт управління використовується 3Д принтер Prusa i3 inFitary.

Завдання:

- вивчити існуючі температурні аспекти, що виникають у процесі друку 3Д моделі;
- розробити математичну модель системи підтримки температури в галузі друку;
- підібрати комплектуючі для збирання розробленої системи управління;
- з урахуванням розмірів об'єкта управління розробити та подати 3Д модель корпусу, всередині якого планується підтримувати заданий рівень температури.

## 2. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ

### 2.1 Елементи адаптивної системи управління

Arduino Mega 2560 – це розширена версія Arduino Uno.[17] Платформа виконана на базі більш просунутого чіпа ATmega2560, має більше контактів і більшу кількість апаратних серіал-портів для взаємодії з комп'ютером та іншими пристроями. Це найостанніша модель: Arduino Mega 2560 Rev3, що прийшла на зміну попереднім Mega 2560 і Mega 1280.

Розмір плати становить  $10,16 \times 5,3$  см. Гнізда для зовнішнього живлення та USB виступають на пару міліметрів за зазначені межі. На платі передбачені місця для кріплення на гвинти або шурупи. Відстань між контактами становить 0,1” (2,54 мм), але у разі 7-го та 8-го контакту – відстань: 0,16”.

Технічні характеристики контролера Arduino Uno наведені в табл. 2.1. Описані основні характеристики, параметри та значення параметрів.

Таблиця 2.1. – Характеристики контролера Arduino Uno

Параметр	Значення параметра
Мікроконтролер	ATmega2560
Кількість цифрових входів/виходів, шт	54
PWM підтримують, шт	15
Кількість аналогових входів, шт	16
Контакти для апаратного переривання, шт	6
Об'єм Flash-пам'яті, кБ	256
Об'єм SRAM-пам'яті, кБ	8
Об'єм EEPROM-пам'яті, кБ	4
Тактова частота, МГц	16
Кількість апаратних serial-портів, шт	4
Робоча напруга, В	5
Постійний струм через вхід/вихід, мА	40

В Arduino Mega (рис. 2.1) вбудований запобіжник (автомат).

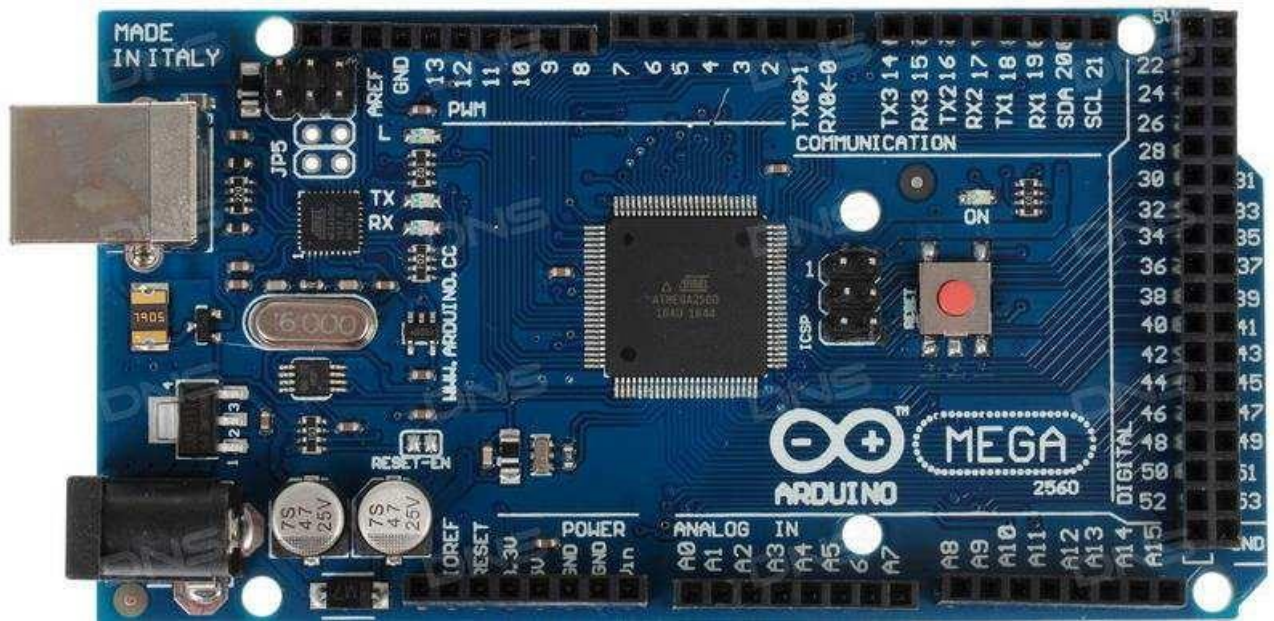


Рисунок 2.1 – Контролер Arduino mega

Технічні характеристики транзистора IRF3205 представлені в табл. 2.2. Наведені основні характеристики, параметри та значення параметрів.

Таблиця 2.2. – Характеристики транзистора IRF3205

Параметр	Значення параметра
Тип	ATmega2560
Тип корпусу	TO-220AB (SOT78)
Діапазон робочих температур, °C	Від -55 – до +175
Час ввімкнення, нс	14
Час вимкнення, нс	50
Максимальна напруга затвор витік ( $U_{z1\ max}$ ), В	$\pm 20$
Максимальна розсіювана потужність ( $P_{cl\ max}$ ), Вт	200
Крутість характеристики, S	44
Порогова напруга на затворі, В	2...4
Струм витоку затвора, $\mu A$	$< 0,1$
Струм витоку стоку, $\mu A$	(закр.) $< 25$

Цей запобіжник (автомат) самовідновлюється, захищає порт USB комп'ютера від струмів короткого замикання і надструмів.

Запобіжник спрацьовує при проходженні струму більше 500 мА через USB порт і розмикає ланцюг до тих пір, поки нормальні значення струмів не будуть відновлені.

Транзистор IRF3205. Завдяки великій струмовій здатності та низькому опору каналу транзистор IRF3205 часто використовується як силові ключі в автомобільних електронних пристроях і там, де потрібно комутувати відносно великі струми при невеликих напругах.

IRF3205 застосовується для перемикачів потужності, регуляторів, перетворювачів, вихідних каскадів, що вимагають високої швидкості комутації. Управління IRF3205 може здійснюватися безпосередньо з виходячи інтегральної мікросхеми або із застосуванням драйвера польових транзисторів.

Керамічний нагрівник. Високопродуктивний нагрівальний елемент, призначений для нагрівання головки друку 3Д принтера. Має більшу потужність і, відповідно, за рахунок цього високу швидкість нагрівання. Це позитивно позначається якості друку, т.я. під час друку головка швидше гріється, а отже, амплітуда температурних коливань зменшується.[21]

Таблиця 2.3. – Характеристики керамічного нагрівача

Параметр	Значення параметра
Напруга, В	12-24
Опір при 12 В, Ом	3,5
Опір при 24 В, Ом	13
Потужність, Вт	40
Довжина дроту, м	1

Нагрівальний елемент вже з'єднаний з проводом за допомогою клеми, біля основи кожен контакт має фторопластову ізоляцію, а саме з'єднання захищене термостійким кембриком червоного кольору (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Керамічний нагрівач

Термістор виконаний у герметичному корпусі, що дозволяє використовувати його у вологому середовищі та для вимірювання температури рідини. Є дешевою альтернативою герметичному датчику DS18B20, проте відрізняється від нього меншою точністю вимірів.

Таблиця 2.4. – Характеристики термістора

Параметр	Значення параметра
Опір (при 25 градусах), кОм	10
Діапазон температур, °С	-50...+350
Термоміцність дроту, °С	+400
Довжина дроту, м	1

Підключення термістора до Arduino уно не складає особливих труднощів і для перевірки роботи достатньо використовувати монтажну плату. Оскільки опір термістора досить високий близько 10 кОм, опір провідників мало впливає результати вимірів.

Для визначення температури, ми повинні виміряти опір, і щоб це реалізувати, необхідно послідовно додати в схему підключення ще один



резистор. Коли вимірюємо напругу по центру, зі зміною опору, змінюватиметься і напруга. Для розрахунку опору термістора скористаємося простою формулою, яка називається рівнянням з параметром В:

$$R_T = \frac{V_{RT}}{V_R / R}, \quad (2.1)$$

де  $e$  – основа натурального логарифму;

$R_0$  – опір терморезистора, виміряний при температурі  $T_0$ ;

$B$  – постійний коефіцієнт, який залежить від характеристик матеріалу, ця константа виражається в Кельвінах, і її значення вказано виробниками технічної документації на конкретну модель термістора.

Для розрахунку температури потрібно знати опір  $R_T$ :

$$R_T = \frac{V_{RT}}{V_R / R}, \quad (2.2)$$

Проводимо розрахунок температури за отриманими даними:

$$T = \frac{1}{\frac{\ln(R_T/R_0)}{B} + \frac{1}{T_0}}, \quad (2.3)$$

Схема підключення термістора до Arduino показана на малюнку – 2.3. Підключимо вузол з'єднання резистора і терморезистора до аналогового входу плати А0 Arduino Uno, щоб вимірювати напругу в цій точці.

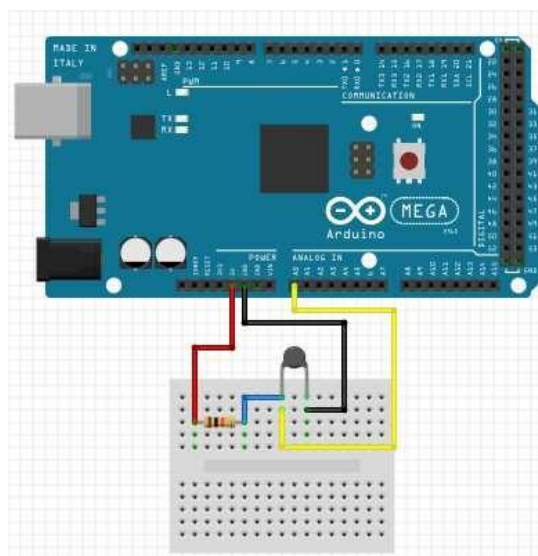


Рисунок 2.3 – Схема підключення термістора

Зовнішній вигляд термістора показано на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд термістора

LCD дисплей розмірності 1602, на базі контролера HD44780, є одними з найпростіших, доступних та затребуваних дисплеїв для розробки різних електронних пристроїв. Зустрічається, як і пристроях, зібраних на аматорському рівні, і у промислових пристроях, як-от автомати для приготування кави. На базі даного дисплея зібрані найпопулярніші модулі та шилди в тематиці Arduino такі як LCD I2C модуль та LCD Keypad Shield.



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд LCD дисплея

Розмірність дисплеїв на контролері HD44780 може бути різною, вони будуть керуватися однаково. Найпоширеніші розмірності 16x02 (тобто, по 16 знаків у двох рядках) чи 20x04. Дозвіл самих символів – 5x8 крапок.

Більшість дисплеїв немає підтримки кирилиці, мають її лише дисплеї з маркуванням СТК.

Для налаштування контрастності слід використовувати потенціометр на 10 кОм. На крайні ноги подається +5V та GND, центральна ніжка з'єднується з виводом  $V_0$ . Зовнішній вигляд дисплея показаний на рисунку 2.5, схема підключення дисплея приведена на рисунку 2.6.

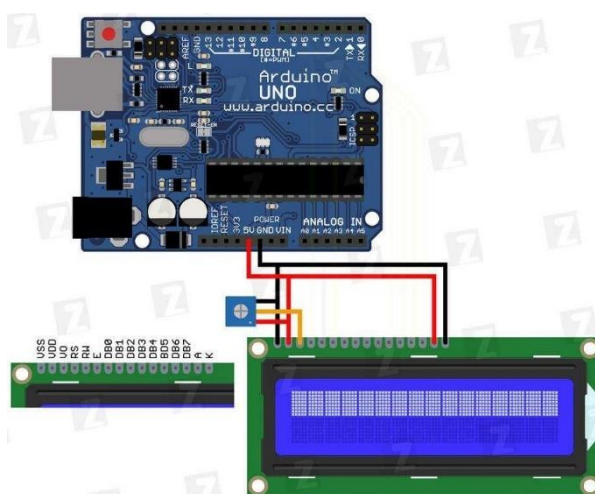


Рисунок 2.6 – Схема підключення LCD дисплея

Кінцевий вимикач. Для індикації положення дверцят корпусу 3Д принтера будемо використовувати кінцевий вимикач, показаний на рис. 2.7.



Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд кінцевого вимикача

Призначення виводів LCD-дисплея представлено в табл. 2.5. Наведені номери виводів та їх основні призначення.

Таблиця 2.5. – Призначення виводів LCD дисплея

Номер виводу	Призначення
1 (VSS)	Живлення контролера (-)
2 (VDD)	Живлення контролера (+)
3 (VO)	Вивід управління контрастом
4 (RS)	Вибір регістру
5 (R/W)	Читання/запис (режим запису при з'єднанні із землею)
6 (E)	Enable (строб зі спаду)
7-10 (DB0-DB3)	Молодші біти 8-бітного інтерфейсу
11-14 (DB4-DB7)	Старші біти 8-бітного інтерфейсу
15 (A)	Анод (+) живлення підсвічування
16 (K)	Катод (-) живлення підсвічування

Для індикації роботи системи, відкриття джерел живлення використовуються світлодіоди. Для захисту світлодіода від пошкодження використовуємо резистор на 220 Ом. Резистор допомагає вирішити дві задачі. По-перше, при підключенні до джерела живлення світлодіод безконтрольно пропускає через себе якомога більше струму. Це може призвести до самоспалення самого світлодіода та пошкодження контролера. Звичайному світлодіоду потрібно всього 20 мА струму. Другу функцію, яку виконує резистор – зниження напруги з 5 до 2 В, що для багатьох стандартних світлодіодів є робочою напругою.

## 2.2 Опис лабораторного стенду

Цей стенд розроблений на основі принципу роботи ПД – регулятора. Для виведення на екран інформації про вибраний режим регулювання, а також заданої та реальної температури з деякою дискретністю використовується LCD дисплей 1602 (ND44780). Всього у стенду 3 робочих режими роботи, це режими П-, ПІ- та ПІД-регулювання. Також є можливість підключити 4 режим, режим двопозиційного управління, всі висновки для цього є. Щоб вибрати режим роботи регулятора використовується один із чотирьох тумблерів справа наліво це П-, ПІ-, ПІД-регулятори, четвертий тумблер відповідає за двопозиційне керування (on, off).

Принцип роботи двопозиційного управління ґрунтується на відстеженні появи різниці між заданою та реальною температурою. Мінусом такого режиму є те, що нагрівальний елемент працює з повною потужністю поки термістор не нагріється до заданої температури і реле не спрацює, такий принцип роботи призведе до значного перерегулювання, що може негативно позначитися на якості друку. Для індикації вибраного режиму використовуються світлодіоди.



Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд лабораторного стенду

Зовнішній вигляд лабораторного стенду наведено на рис. 2.8, а схема підключення елементів на аркуші 2 графічного матеріалу.

Управління нагрівальним елементом здійснюється за допомогою подачі на транзистор ШІМ певної шпаруватості (залежить від нев'язки та вибраного режиму роботи п-, пі- або під-регулювання). Сам транзистор підібраний таким чином, щоб при подачі живлення 5В на контакт, що управляє, транзистор повністю відкрився.[23]

Основною перевагою даного стенду, це те, що він дозволяє наочно простежити як працює той чи інший тип регулятора так як як нагрівач використовується галогенна лампа потужністю 35W. Тобто при включенні стенду та виборі потрібного режиму роботи галогенна лампа працюватиме на максимальній яскравості і в міру наближення до оптимуму (заданої температури) її яскравість поступово зменшуватиметься, поки галогенна лампа зовсім не згасне. Також відстежуючи реальну температуру теплокамери можна оцінити показники якості кожного типу регулятора, такі як перерегулювання, час перехідного процесу. За відхиленням реальної температури від заданої в ході роботи даного лабораторного стенду для кожного з реалізованих типів регулятора можна вибрати оптимальний для роботи з температурою.

### 2.3 Розташування елементів адаптивної системи

Зовнішній вигляд розробленого корпусу для 3Д принтера показано на рис. 2.9. Корпус виконаний із фанерного листа товщиною 6.5 мм. У відкидній кришці корпусу є отвір, в який вставляється шматок оргскла, за допомогою цього вікна можна спостерігати, як проходить процес друку.

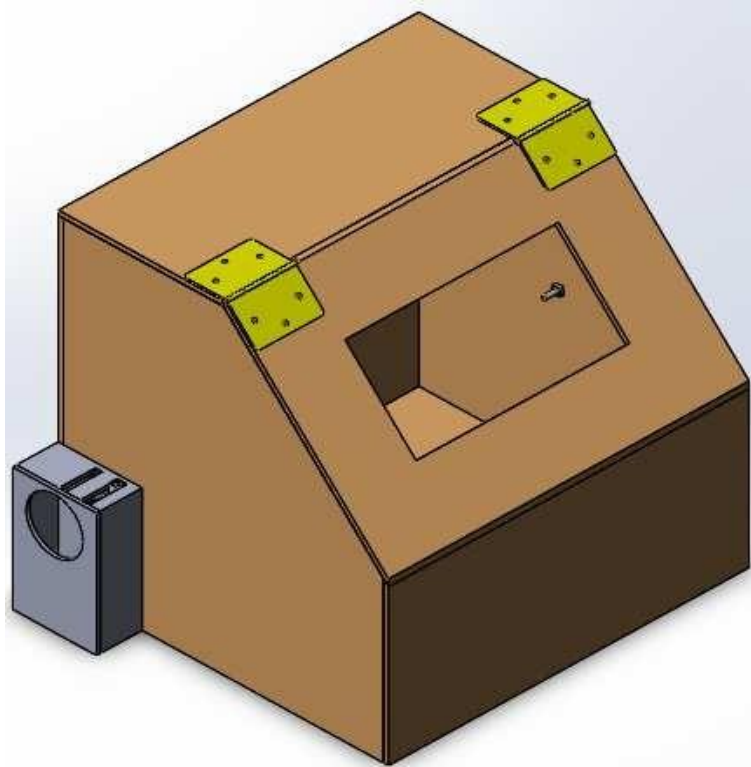


Рисунок 2.9 – Корпус для 3Д принтера (1)

На правій стороні корпусу розташовується окремий корпус меншого розміру, який містить у собі контролер Arduino мега і транзистори для керування керамічними нагрівачами. У кришці цього корпусу є отвір для установки кулера на охолодження транзисторів, а також контролера. У верхній частині корпусу є ще два отвори, один з яких призначений для підключення контролера до ПК, а інший для підключення живлення контролера.[24]

Для визначення положення кришки корпусу з внутрішньої сторони на передній частині встановлено кінцевий вимикач, замкнутий у нормальному положенні.

На 2 аркуші графічної частини показано розташування елементів адаптивної системи підтримки температури, цифрою 1 позначені термістори.

Два термістори розміщені на передній частині корпусу призначені для спрацьовування у разі виникнення зовнішніх неконтрольованих збурень. Третій термістор призначений для вимірювання температури в області друку та кріпиться на верхню частину 3Д принтера.

Цифрою 2 позначені керамічні нагрівачі чотири нижні призначені для підігріву холодного повітря, який тим чи іншим шляхом потрапив у внутрішню частину корпусу. Верхні керамічні нагрівачі призначені для підтримки постійної температури друку.

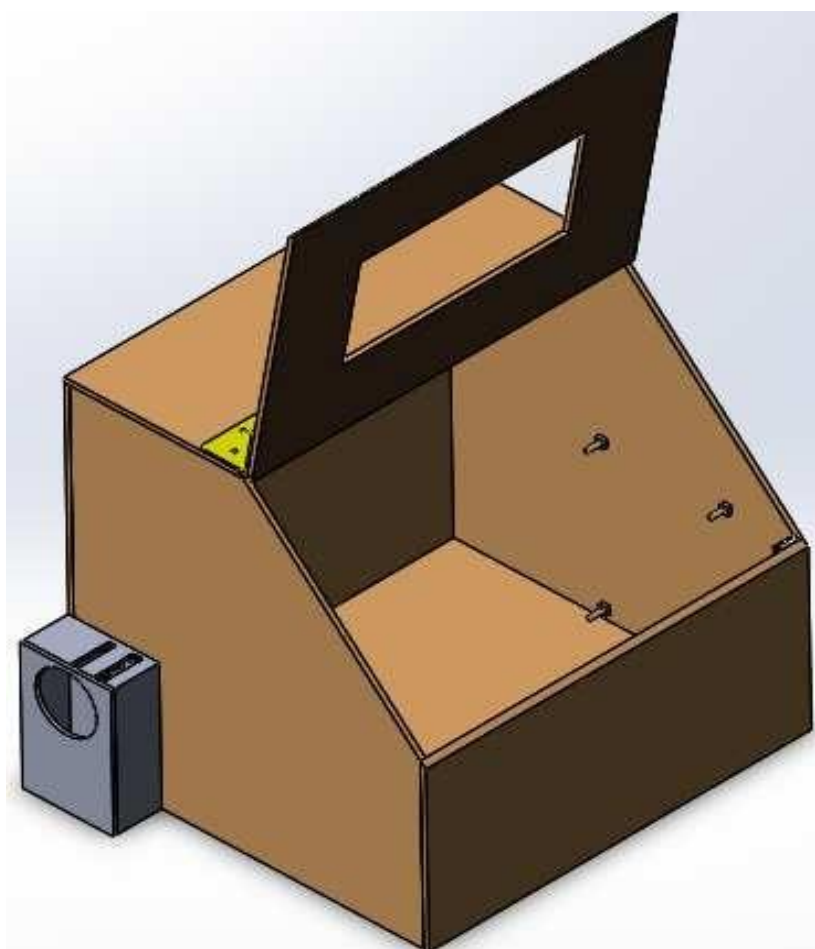


Рисунок 2.10 – Корпус для 3Д принтера (2)



## **2.4 Автоматизована система керування технологічними процесами**

Інформаційні технології проникають у всі сфери нашого життя, включаючи обчислювальну техніку, техніку зв'язку, промислову електроніку та навіть побутову техніку, таку як телевізори та радіоприймачі. Вони виявляють свою важливість у промисловості, торгівлі, управлінні, освіті, медицині та науці.

Завдяки поступу в багатопроцесорній техніці відбуваються значущі трансформації не лише у сфері настільних комп'ютерів та мережевих технологій, але й у сфері комп'ютеризації управління технологічними структурами, процесами та виробництвами. Технологічні організаційні структури та промислові вироби активно використовують численні локальні та розподілені мікропроцесорні системи для збору, реєстрації, обробки та відображення інформації, а також управління складними динамічними об'єктами та процесами.[10] Ці системи зазвичай базуються на вбудованих мікропроцесорах, мікрокомп'ютерах та мікроконтролерах, які виробляються як в українських, так і закордонних компаніях.

Автоматизована система управління технологічним процесом (АСУТП) представляє собою інтегрований набір програмних та технічних засобів, спрямованих на ефективне автоматизоване управління технологічним обладнанням у підприємствах.

АСУТП охоплює широкий спектр функцій, спрямованих на автоматизацію ключових технологічних операцій виробничого процесу в цілому або на конкретній його ділянці. Це інтегроване рішення сприяє оптимізації управлінських процесів та підвищенню ефективності виробництва. [11]

Зазвичай, АСУТП представляє собою високотехнологічну розподілену систему, розділену на низку підсистем, кожна з яких відповідає за конкретні автономні функції та взаємодіє з центральним вузлом. Кожен вузол управління може функціонувати автономно, взаємодіючи з іншими вузлами управління.

Інформація з усіх підсистем накопичується в центральній (диспетчерській) системі (SCADA), яка координує взаємодію всіх вузлів управління, забезпечує операторський моніторинг системи та можливість ручного втручання. Розподілена структура АСУТП значно підвищує надійність системи в цілому,

оскільки відмова одного вузла не впливає на ефективність інших, і дозволяє ефективно реагувати на аварійні ситуації. Час відновлення часткових відмов виявляється набагато меншим, ніж відновлення всієї системи.

Здебільшого, АСУТП об'єднує систему операторського управління технологічним процесом, використовуючи один або кілька терміналів управління (SCADA) та засоби архівування інформації про роботу системи. Для обміну інформацією між підсистемами використовуються промислові мережі.

З метою виконання завдання з автоматизації процесів екструзії полімерного матеріалу під час друку 3Д принтером запропоновано розробити АСУ ТП 3Д друку, яка б виконувала наступні задачі: моніторинг та контроль роботи принтера, управління процесом підігріву сопла, управління процесом підігріву столу, автоматизований контроль дотримання температурного режиму головного електродвигуна. У відповідності до поставлених завдань розроблені такі контури автоматизованого управління процесами екструзії: контур системи моніторингу стану 3Д принтера, контур управління процесом підігріву сопла, контур управління процесом підігріву столу та контур автоматизованого управління головним електродвигуном.

#### *Контур системи моніторингу стану 3Д принтера*

На схемі функціональності контуру моніторингу стану 3D-принтера, представлений на рис. 2.11, видно, як програмований логічний контролер (ПЛК) здійснює контроль за температурою виконуючих механізмів принтера. Використовуючи дані з датчика температури, ПЛК регулює роботу вентилятора повітряного охолодження за допомогою ШІМ-регулятора у випадках, коли системі необхідне охолодження.

Такий контроль дозволяє гнучко налаштовувати режим нагріву виконавчих механізмів системи. Для виявлення можливих проблем у системі охолодження та регулювання швидкості обертання кулера, встановлений датчик обертів.

Інформація про ввімкнення насоса охолодження, а також, температуру агрегатів виводиться на панель оператора, дозволяючи оперативно реагувати на

потенційні проблеми. У випадку досягнення якимось з агрегатів температури перегріву - ПЛК зупиняє процес, сигналізуючи про статус оператору.

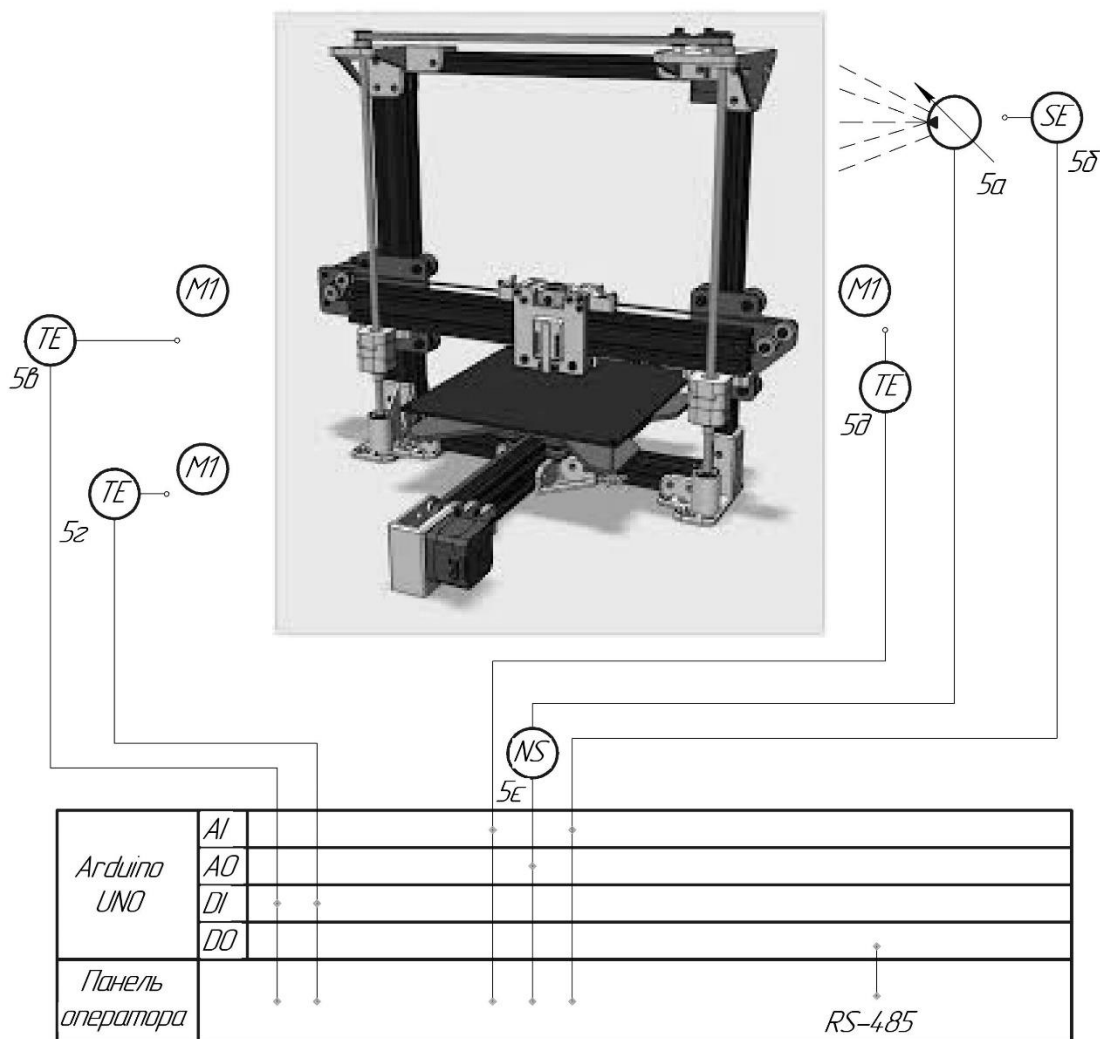


Рисунок 2.11 – Функціональна схема контуру моніторингу стану 3D принтера

У той самий момент програмований логічний контролер (ПЛК) не лише здійснює контроль за температурою головного електродвигуна, а й отримує відомості від датчиків температури, виконуючи всебічний моніторинг функціонування 3D-принтера.

#### *Контур управління процесом 3D-друку*

Функціональна схема контуру управління процесом 3D-друку представлена на рис. 2.12. Головний процес у тривимірному друці - це процес екструзії філаменту через сопло принтера. Процес підігріву сопла організований за допомогою ШІМ-регуляторів та виконуючих механізмів. На ПЛК надходить інформація з датчика температури сопла. У відповідності до отриманих

показників, ПЛК посилає електроімпульсні сигнали на ШІМ-регулятор нагрівача, який змінює чинники відстежуваного параметра – температури сопла.

Додатково до плавлення філаменту, для підтримки температури друкованої деталі для запобігання зміні форми, і, відповідно, бракування деталі, здійснюється підігрів столу (робочої поверхні друку. Для отримання оптимальної температури столу використовується датчик температури, інформація з якого надходить до ПЛК, який через магнітний пускач виконує керування процесом підтримання необхідної температури столу.

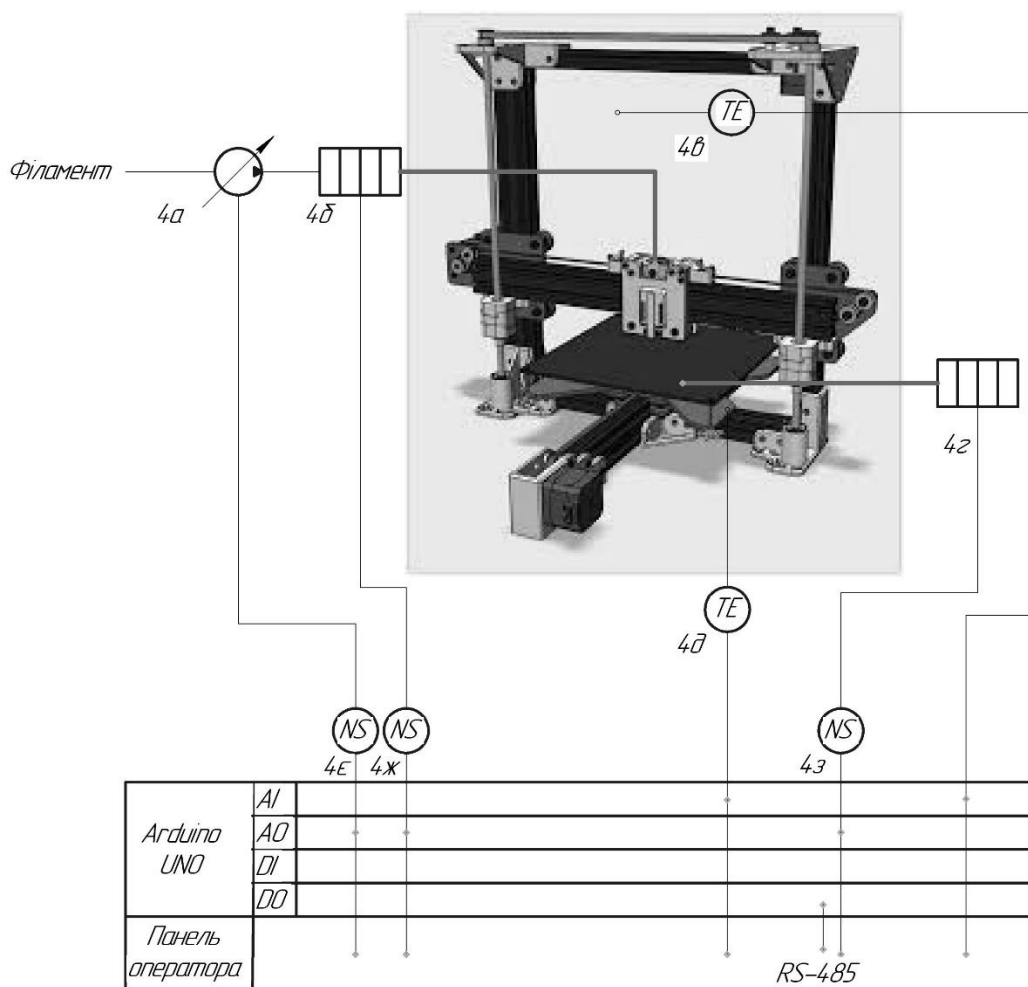


Рисунок 2.12 – Функціональна схема контуру управління процесом екструзії філаменту

*Контур автоматизованого управління рухом сопла принтера по осям.*

Функціональна схема контурів автоматизованого управління головним рухом принтера показана на рис. 2.13.

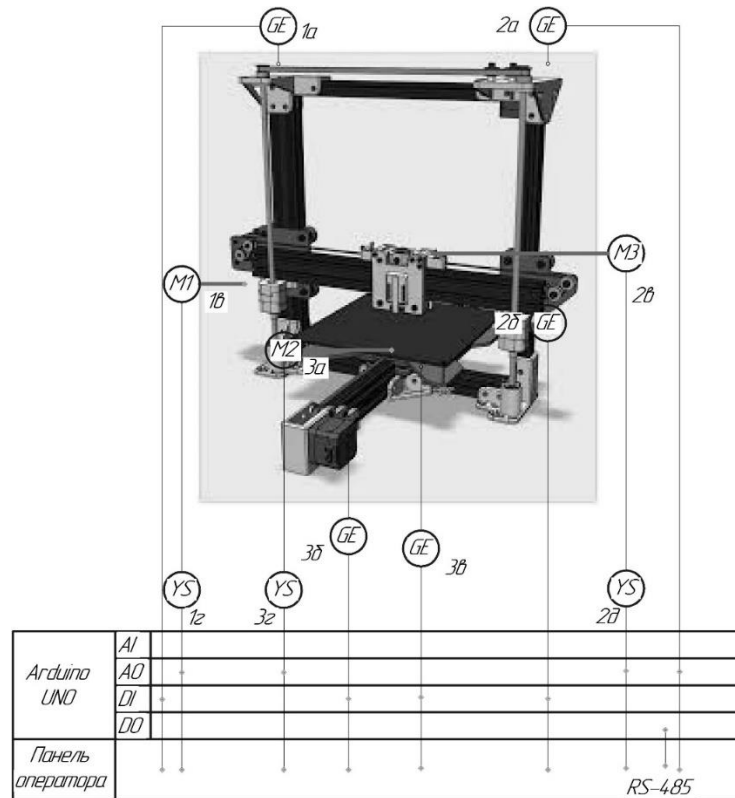


Рисунок 2.13 – Функціональна схема контурів автоматизованого управління головним рухом

Так як розроблюваною системою є 3Д-принтер, осей руху сопла буде три. Дві з них – приймають участь у русі платформи з екструдером пластику і одна - рухає платформу з деталлю. Таким чином, розроблено три однотипних контури управління, що працюють за наступним принципом. Програмований логічний контролер отримує інформацію від двох кінцевих вимикачів на ось. Після калібрування ПЛК запам'ятовує параметри руху принтера і здатен позиціонувати сопло точно у відповідності з параметром завдання. У випадку сягання кінцевого вимикача з однієї сторони, подальший рух у тому ж напрямку забороняється доти, доки датчик кінцевого вимикача залишається активізованим (натиснуто кнопку).

ПЛК управляє положенням сопла по осі через драйвер крокового двигуна, який перекладає необхідний імпульс до власне крокового двигуна. Кроковик переміщує сопло на певну відстань завдяки шківу (або шестерні) у відповідності до кількості отриманих від драйвера (а тим - від ПЛК) імпульсів. Температура драйверів крокових двигунів відслідковується у першому з описаних контурів.

## 2.5 Принципова електрична схема адаптивної системи управління

Для підтримки температури області друку на заданому рівні може бути реалізована схема, представлена в графічній частині на 3 аркуші.

У схемі використовуються:

- керамічний нагрівач на 24 В. Застосовується для підігріву області друку до заданої температури.
- транзистор IRF 3205. Застосовується для керування парою керамічних нагрівачів. На транзистор подається ШІМ сигнал певної шпаруватості (що менше нев'язка між заданою температурою і реальною, тим менше значення шпаруватості ШІМ - сигналу).
- тиристор. Застосовується для вимірювання температури як в області друку, так і при виникненні неконтрольованих збурень.
- світлодіод. Застосовується для індикації увімкнення системи управління.
- Ісd дисплей. Застосовується для виведення інформації про стан системи, а саме про значення температури заданому та реальному.
- вимикач. Застосовується для увімкнення системи керування.
- нормально замкнутий кінцевий вимикач. Застосовується для відстеження положення дверей огорожувальної конструкції.
- контролер Arduino мега. Застосовується для керування всіма елементами адаптивної системи керування.

*Опис етапів роботи схеми.*

Етап 0.

Подаються напруги живлення: напруга 12 подається на витоки транзисторів VT 1-4, так само напруга 5 подається на контролер Arduino мега. Концевий вимикач SB 1 знаходиться в замкнутому положенні, що означає, що дверцята корпусу закриті і можна розпочинати роботу з увімкнення системи. Тумблер SA 1 знаходиться в розімкнутому положенні, світлодіод VD 1 вимкнений.

Етап 1.

Після перемикання тумблера SA 1 адаптивна система починає працювати, спалахує світлодіод VD 1. Термістори ВТ 1-3 вимірюють температуру всередині корпусу для 3Д принтера, причому термістори ВТ 1, ВТ 2 вимірюють не тільки температуру всередині корпусу, але і реагують на впливи, що обурюють. Керамічні нагрівачі ЕК 1-8 підігрівають область друку до потрібної температури, їх потужність залежить від шпаруватості ШІМ-сигналу, що прийшов з контролера на транзистор, тим самим компенсуючи обурення підігрівом. На LCD дисплей виводиться інформація про стан системи, а саме реальна та задана температура в області друку. Змінним резистором R 1 регулюється яскравість дисплея до оптимальної.

#### Етап 2.

Спрацював кінцевий вимикач SB 1, змінилися параметри об'єкта управління, а саме зменшилася площа конструкції, що захищає. Йде перебудова коефіцієнтів ПД – регулятора. За його повторному спрацьовуванні тобто. коли дверцята корпусу знову будуть закриті, коефіцієнти ПД – регулятора повернуться до вихідних значень.

#### Етап 3.

Після вимкнення тумблера SA 1 адаптивна система вимикається, перестає горіти світлодіод VD 1. Керуючі сигнали з контролера для керування термісторами ВТ 1-3 перестають надходити на елементи. Керамічні нагрівачі ЕК 1-8 підігрівають область друку до потрібної температури починають остигати. LCD дисплей гасне.

### 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ОБЛАСТІ ДРУКУ

#### 3.1 Адаптивні системи. Теоретичні відомості про адаптивні системи

Розглянемо структурну схему комбінованої системи управління, як найбільш підходящої на вирішення завдань управління складними процесами (рис. 3.1).

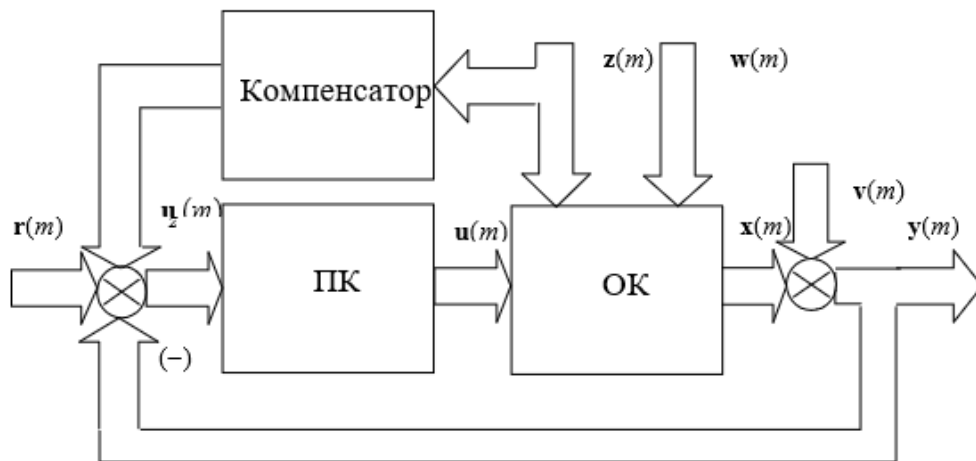


Рисунок 3.1 – Структурна схема комбінованої системи керування

Система автоматичного керування (САК) включає об'єкт керування (ОК), пристрій керування (ПК) або регулятор, компенсатор, що компенсує вплив контрольованих збурень  $z(t)$ . Тут  $r(t)$  – вплив, що визначає поведінка ОК ( $x(t)$ ). Вплив вектора неконтрольованих збурень  $w(t)$  та  $v(t)$  зумовлює невизначеність поведінки САК.

Для детермінованої САК, коли  $w(t) = 0$ ,  $v(t) = 0$ , синтезуються в відповідність з критерієм ефективності (оптимізації) управління законом управління та параметрами ПК та компенсатора. Щодо просто це вирішується для лінійних САК та складніше для нелінійних САК.

Вплив неконтрольованих збурень  $w(t)$  та/або  $v(t)$  призводить до зміни характеристик ОК, і синтезована САК стає неефективною, а можливо і нестійкою. Необхідні процедури, які враховують вплив зазначених збурень. До таких процедур належить адаптація – процес накопичення та використання інформації в системі, спрямованої на досягнення оптимального, у сенсі обраного



критерію ефективності управління, стану або поведінки ОК за змінних внутрішніх та зовнішніх умов. Процес адаптації (приспосовування) САК передбачає зміну параметрів та структури системи керування (ПК, компенсатор).

Адаптивні системи можна розділити на два великі класи: самоорганізуються та самоналаштовуються.[12]

У системах, що самоорганізуються, в процесі функціонування відбувається формування алгоритму управління (його структури і параметрів), що дозволяє оптимізувати систему відповідно до критерію оптимізації управління. Такі завдання виникає, наприклад, за умов зміни структури та параметрів об'єкта управління залежно від режиму функціонування, коли апріорної інформації недостатньо визначення поточного режиму. При широкому класі можливих структур об'єкта важко сподіватися вибір єдиної структури алгоритму управління, здатної забезпечити замкнутої системі досягнення мети управління переважають у всіх режимах функціонування. Очевидна складність постановки завдання не дозволяє сподіватися на прості алгоритми її вирішення, а отже, і на широке впровадження таких систем у практику.

Завдання значно спрощується, якщо структура об'єкта управління відома і незмінна, а поведінка залежить від параметрів, що змінюються. Це завдання вирішується в класі систем самонастроювання (ССН), в яких структура регулятора задана (заздалегідь обрана) і потрібно визначити лише алгоритм налаштування його коефіцієнтів (алгоритм адаптації).

ССН діляться на два підкласи: пошукові та безпошукові. У пошукових ССН мінімум (або максимум) цільової функції (продуктивність установки, витрата палива тощо) здійснюється пошуковими системами. Найпростішими пошуковими системами є більшість екстремальних систем, у яких недолік апріорної інформації поповнюється за рахунок поточної інформації, що отримується у вигляді реакції об'єкта на пошукові (пробні, робочі) дії.

Структурна схема дискретної пошукової ССН представлена на рис. 3.2. Істотною особливістю пошукових ССН є відсутність математичного опису ОК. Система повинна забезпечити екстремум цільової функції  $Q(k)$  на кожному  $k$ -му кроці управління.

Вектор параметрів пошуку  $\mathbf{q}(k)$  визначає мету пошуку (максимум, мінімум), параметри алгоритму пошуку (параметри робочого та пробного кроку), стратегію пошуку. У процесі екстремального управління знаходиться екстремум статичної характеристики нелінійного нестационарного динамічного об'єкта, схильного до дії контрольованих  $\mathbf{z}(k)$  та неконтрольованих  $\mathbf{w}(k)$  та  $\mathbf{v}(k)$  обурень, що змінюють положення екстремуму у просторі управлінь  $\mathbf{u}(k)$ .

Пошукові ССН поділяються на безперервні та дискретні. Алгоритм оптимізації реалізує прямі методи пошуку (послідовний симплексний пошук, градієнтний метод та їх модифікації).

У безпошукових ССН у явному чи неявному вигляді є модель з бажаними динамічними характеристиками. Завдання алгоритму адаптації полягає в налаштуванні коефіцієнтів регулятора таким чином, щоб звести неузгодженість між об'єктом управління та моделлю до нуля. Таке управління називають прямим адаптивним керуванням (direct adaptive control), а системи – адаптивними системами з еталонною моделлю (model referenc adaptive systems). У разі непрямого адаптивного управління (indirect adaptive control); спочатку проводять ідентифікацію об'єкта, а потім визначають відповідні коефіцієнти регулятора. Такі регулятори називаються самоналаштовуються (self-tuning regulators).

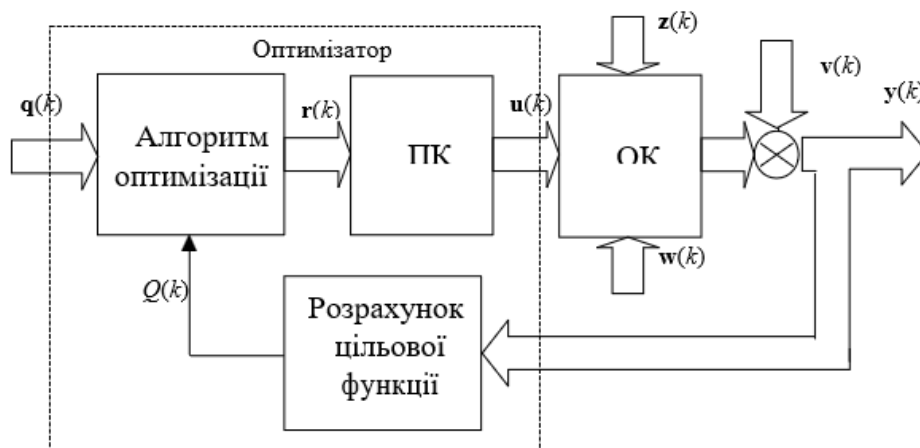


Рисунок 3.2 – Структурна схема дискретної екстремальної системи управління

При прямому адаптивному управлінні контури адаптації працюють за замкненим циклом. Це дозволяє компенсувати зміни параметрів об'єкта та регулятора. Однак кожен контур самоналаштування підвищує порядок системи як мінімум на одиницю і при цьому суттєво впливає на загальну динаміку замкнутої системи.

У безпошукових системах, що самоналаштовуються, еталонна модель може бути реалізована у вигляді реальної динамічної ланки (явна модель) або бути присутньою у вигляді деякого еталонного управління, що зв'язує регульовані змінні та їх похідні (неявна модель). У неявній моделі коефіцієнти еталонного рівняння є параметрами алгоритму адаптації.

Якщо на стадії проектування САК розрахований алгоритм налаштування ПК (регулятора) у функції контрольованих збурень  $z(t)$ , то можна застосувати прямий метод налаштування регулятора в реальних умовах експлуатації системи або адаптацію за розімкненим циклом (рис. 3.3 а). У цій схемі адаптації зворотний зв'язок не бере участь у налаштуванні ПК. При адаптації по замкнутому циклу (рис. 3.3 б), контур основного зворотного зв'язку задіяний у роботі алгоритму налаштування (адаптера).

При цьому необхідну інформацію про порядок і параметри ОК отримують шляхом обробки вимірювань вхідних  $u(t)$ ,  $e(t)$  і вихідних  $y(t)$  сигналів.

Для оцінки характеристик ОК застосовують методи ідентифікації (за вимірними значеннями  $u(t)$  та  $y(t)$ ). Виходячи з отриманих результатів проводиться розрахунок та налаштування ПК. Структурно це відповідає запровадження другого замкнутого контуру зворотний зв'язок. У цьому зміна параметрів ПК призводить до зміни  $u(t)$  і  $y(t)$ .

Процес адаптації в системах з регуляторами, що самоналаштовуються (самооптимізуються) (рис. 3.4 а) реалізується в три етапи:

- ідентифікація ОК чи системи управління загалом;
- розрахунок регулятора;
- налаштування регулятора (або зміна його структури).

Процес адаптації в системах із еталонною моделлю (рис. 3.4 б) включає:

- обчислення нев'язки  $e_y(t) = y(t) - y_m(t)$ ;

- розрахунок регулятора відповідно до критерію якості управління;
- налаштування регулятора.

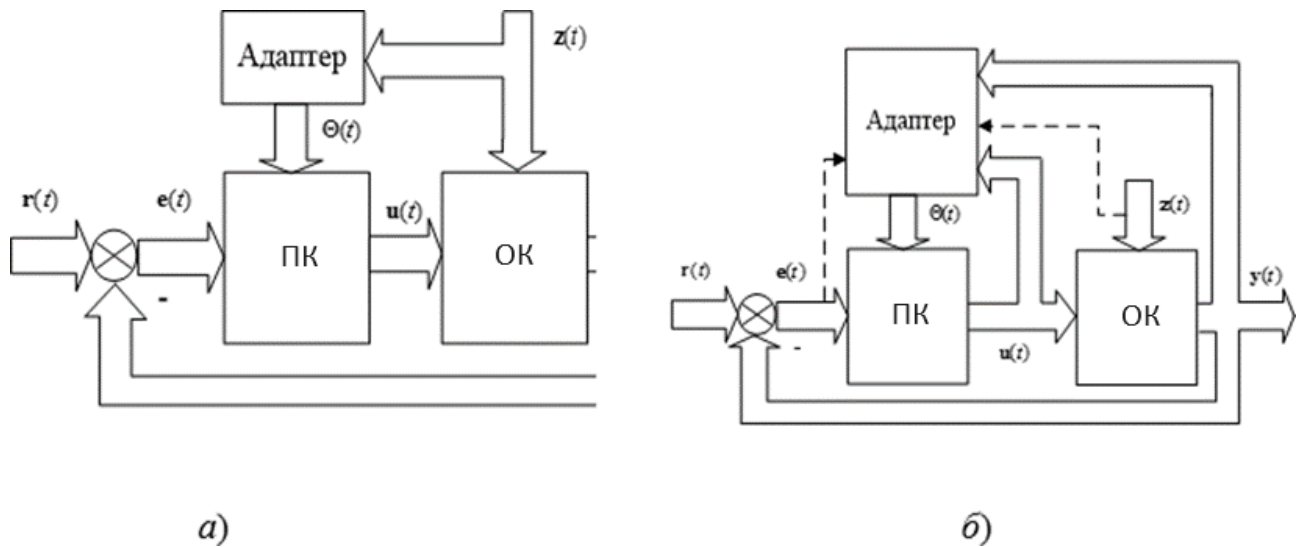


Рисунок 3.3 – Узагальнені структурні схеми безпошукових систем  
 а) налаштування з прямим зв'язком (адаптація по розімкнутому циклу;  
 б) налаштування зі зворотним зв'язком (адаптація по замкнутому циклу)

Розглянемо основні структурні схеми безпошукових СНР. При цьому будемо розрізняти системи, що самонастроюються за зовнішніми впливами, за динамічними властивостями об'єкта управління, а також системи, що самоналаштовуються одночасно за зовнішніми впливами та динамічними властивостями об'єкта.

В основі такої класифікації лежать дві основні причини, що викликають необхідність самоналаштування – зміна внутрішніх та зовнішніх умов роботи системи керування.

Системи, що самоналаштовуються за зовнішніми впливами. Мета самоналаштування полягає у забезпеченні оптимальних динамічних властивостей системи за зміни характеристик зовнішніх впливів. Серед них виділяють:

Розімкнуті системи. Структурна схема системи, що самоналаштовується за розімкненим циклом, зображена на рис. 3.5 а. На систему впливає корисний сигнал  $q(t)$  та перешкоди  $z(t)$  та  $w(t)$ . Корисний сигнал і перешкоди можуть бути детермінованими, так і випадковими функціями часу. Необхідність у

самоналаштуванні виникає, якщо статистичні характеристики випадкових впливів або параметри детермінованих впливів невідомі і можуть змінюватися в широких межах.

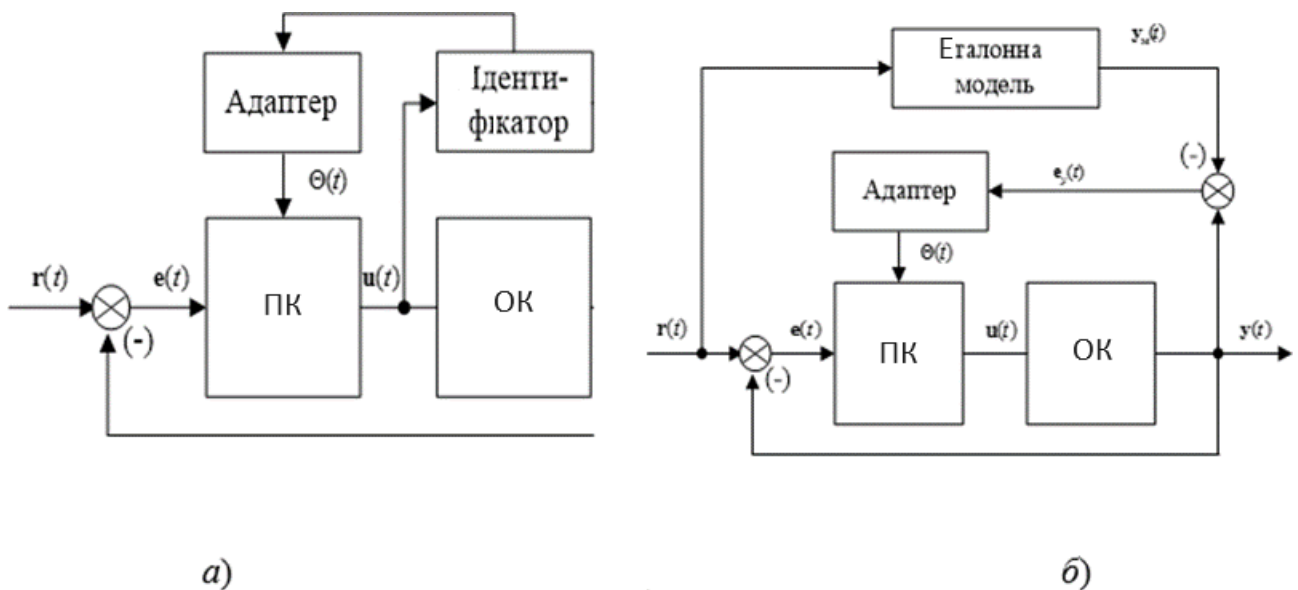


Рисунок 3.4 – Структурні схеми безпошукових ССН з налаштуванням регуляторів по замкнутому циклу

Можливість організації самоналаштування значною мірою залежить від обсягу апріорної інформації про зовнішні впливи. Так, наприклад, якщо немає жодної апріорної інформації про корисний сигнал і перешкоди, то самоналаштування за зовнішніми впливами організувати не можна. Самоналаштування можна організувати, наприклад, у таких випадках:

- а) відомий аналітичний вираз корисного сигналу, але невідомі його параметри, а статистичні характеристики перешкод  $\mathbf{z}(t)$  та  $\mathbf{w}(t)$  – відомі;
- б) перешкода  $w = 0$ , корисний сигнал  $\mathbf{q}(t)$  заздалегідь невідомий, але може бути безпосередньо вимірюваний, характеристики перешкоди  $\mathbf{z}$  відомі.

Недолік апріорної інформації може компенсуватися застосуванням кількох вимірювальних пристроїв, що працюють на різних фізичних засадах. Основний контур управління такої системи виявляється багатоканальним.

Розімкнений контур самоналаштування працює за наступною схемою (рис. 3.5 а). За входнім сигналом  $\mathbf{r}(t)$  та можливо іншим сигналам в адаптері визначаються невідомі параметри зовнішніх впливів або їх характеристики, які

далі використовуються для визначення параметрів оптимальної моделі системи, а потім параметрів ПК, що налаштовуються.

Замкнуті системи. Структурна схема системи, що самоналаштовується по замкнутому циклу, зображена на рис. 3.5 б. Параметри ПК змінюються контуром самоналаштування за замкненим циклом. Для обчислення помилок контуру самоналаштування повинні використовуватися сигнали  $(e, y)$ , так як на них впливають всі зміни параметрів, що настраюються, і характеристик зовнішніх впливів.

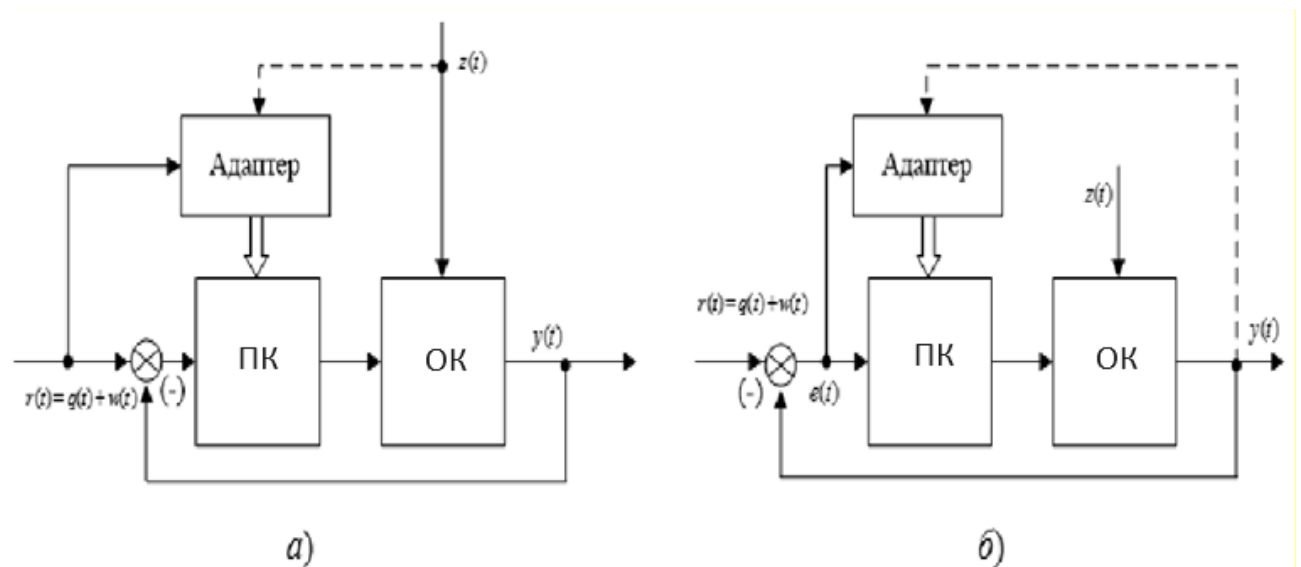


Рисунок 3.5 – Структурні схеми безпошукових ССН з налаштуванням регуляторів по замкнутому циклу

У процесі роботи на об'єкт надходять обурювальні дії  $f_1, f_2, \dots, f_i$ , що викликають відхилення параметрів  $x_1, x_2, \dots, x_n$  від необхідних значень. Інформація про поточні значення параметрів  $x_1, x_2, \dots, x_n$  та  $y_1, y_2, \dots, y_j$  надходить у систему управління і порівнюється з запропонованими ним значеннями  $g_1, g_2, \dots, g_k$ . За певним алгоритмом визначаються та формуються керуючі впливи  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m$  для компенсації відхилень вихідних параметрів від визначених значень.

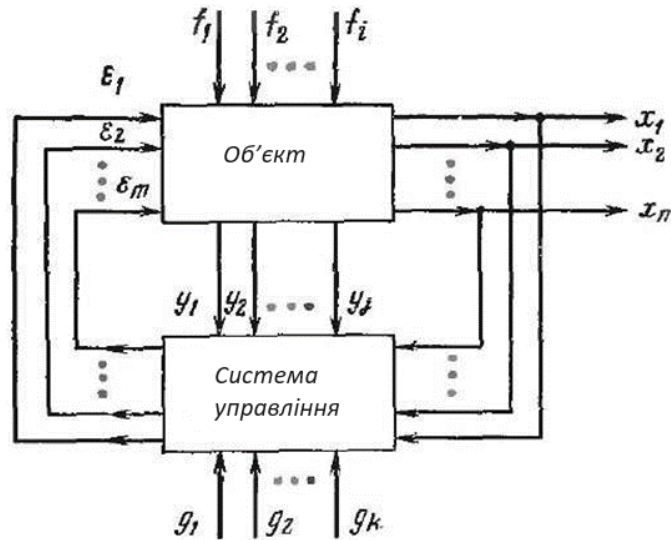


Рисунок 3.6 – Структурна схема системи автоматизації

Щодо випадку з адаптивною системою управління, що розробляється, дана схема набуде вигляду:

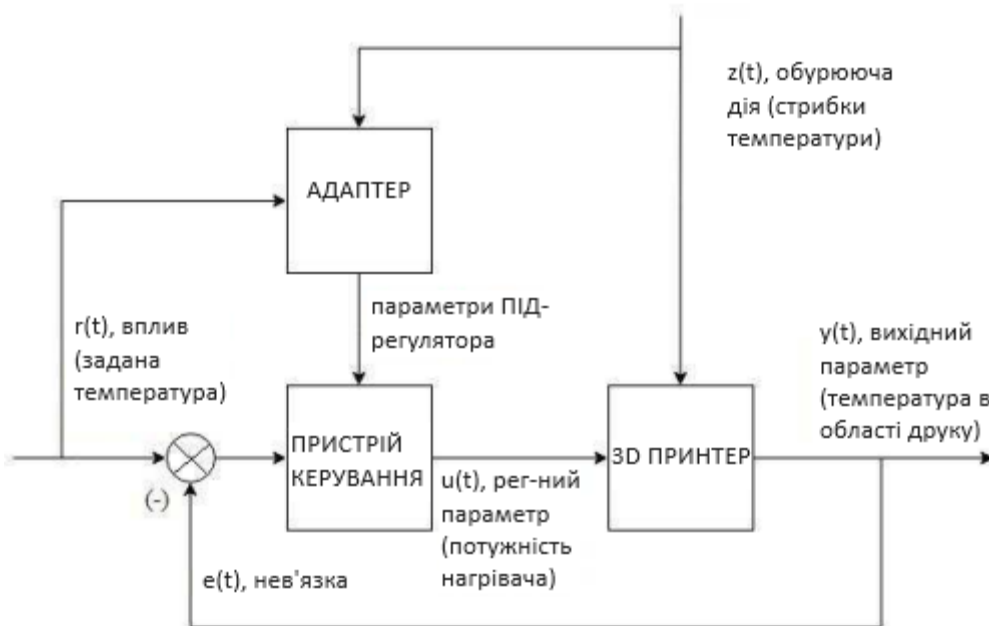


Рисунок 3.7 – Структурна схема адаптивної СК

Асоціативна пам'ять у адаптивних системах управління.

У системах управління може бути організована та використана асоціативна пам'ять. Асоціативна пам'ять – це засіб зберігання інформації з урахуванням асоціації, тобто. її вилучення по поєднанню певних ознак.

Розрізняють пірамідальну (ієрархічну), матричну пам'ять, що самоорганізується.

Пірамідальна пам'ять здійснює класифікацію вхідного інформаційного вектора за однією ознакою, потім по-іншому і так доти, доки всі ознаки не збігатимуться з будь-якою класифікаційною групою.

Матрична пам'ять – це один рівень пірамідальної асоціативної пам'яті. Вона реалізується на логічних елементах та нейромережах.

Пам'ять, що самоорганізується, зберігає інформацію у вигляді атракторів, на один з яких виходить система.

Інтелектуальні системи з асоціативною пам'яттю можуть працювати в умовах передбачуваної та непередбачуваної невизначеності. У першому випадку навчання системи відбувається автоматично, оскільки відома заздалегідь інформація про поле, де змінюються координати об'єкта управління. У другий випадок у процесі первинного навчання бере участь оператор. Після того, як проведено первинне навчання, асоціативна пам'ять замінює людину і далі здійснюється автоматичне підстроювання структури та параметрів об'єкта управління. З використанням асоціативної пам'яті зменшується її обсяг і підвищується швидкодія системи загалом.



### 3.2 Розрахунок математичної моделі адаптивної СК

Область, що обігривається, має розміри 0.42x0.46x0.44 м. Огороджувальна конструкція є стінкою з фанерного листа товщиною 6.5 мм. Площі стінок рівні  $S_z = 0.2$  м,  $S_b = 0.16$  м,  $S_n = 0.1$  м,  $S_{кр} = 0.15$  м. Коефіцієнти теплопровідності: для березового фанерного листа  $\lambda = 0.12$  м<sup>2</sup> · годину · °С/ккал; Опір теплопереходу  $R_B$  для внутрішніх поверхонь, що мають гладку поверхню, становить 0,133 м<sup>2</sup> · год · °С/ккал. Опір теплопереходу для поверхонь, що стикаються безпосередньо із зовнішнім повітрям, становить 0,05 м<sup>2</sup> · годину · °С/ккал. Питома теплоємність повітря  $c = 1.005$  кДж/кг · К. Нехай в області друку встановлено 4 керамічні нагрівачі. Поверхня нагріву для цього типу нагрівача становить 0.000339 м<sup>2</sup>. Температура в галузі друку повинна підтримуватись на рівні 40°С. Моделювання проводилося з використанням програми MatLab.

Визначення втрат тепла.

Коли зовнішня температура нижче внутрішньої температури в області друку, у зовнішніх огороженнях виникає тепловий потік, спрямований назовні. Для підтримки в області друку більш менш стабільної температури необхідно безперервно компенсувати підігрівом кількість тепла, що втрачається. Основні

$$Q = F_{ок} \cdot \frac{1}{R_{ок}} \cdot (t_n - t_3) \quad (3.1)$$

тепловтрати складаються з тепловтрат через окремі огороження, що визначаються за формулою:

де  $Q$  – тепловтрати через огорожу в ккал/годину;

$F_{ок}$  – площа огороджувальної конструкції в м<sup>2</sup>;

$R_{ок}$  – опір теплопередачі конструкції огорожі в м<sup>2</sup> · годину · °С/ккал;

$t_n$  – температура повітря в області друку, °С;

$t_3$  – температура зовнішнього повітря, °С.

Величину опору теплопередачі багат шарової огорожі  $R_{ок}$  визначають за

$$R_{ок} = R_B + R_1 + R_2 + \dots + R_3 \quad (3.2)$$

формулою, м<sup>2</sup> · годину · °С/ккал:

де  $R_B$  – опір теплопереходу у внутрішній поверхні огорожі;

$R_1, R_2$  – термічні опори окремих верств огорожі;

$R_3$  – опір теплопереходу біля зовнішньої поверхні огорожі.

Термічний опір однорідної огороження або шару, що входить до складу багатошарового огороження, повинен обчислюватися за формулою:

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \quad (3.3)$$

де  $\delta$  – товщина шару в м;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу в ккал/м · годину · °С.

Розрахунок нагрівальних приладів.

Тепловіддача нагрівального приладу  $Q$  може бути визначена з виразу:

$$Q = F_{кр} \cdot k_{кр} \cdot (t_{кр} - t_3) \quad (3.4)$$

де  $k_{кр}$  – коефіцієнт теплопередачі нагрівального приладу в ккал/м<sup>2</sup> · годину · °С;

$F_{кр}$  – площа поверхні нагрівального приладу м<sup>2</sup>;

$t_{кр}$  – середня температура теплоносія в приладі в °С;

$t_{п}$  – температура повітря в області друку в °С.

Регулювання температури повітря в області, що підігрівається.

Аналіз регулювання температури повітря в області, що підігрівається, можна описати диференціальним рівнянням. Щоб спростити аналіз процесу, уявимо собі такий ідеальний процес, коли область, що підігрівається – однорідне тіло, температура якого у всіх точках однакова.

Теплова енергія, що підводиться в область друку  $Q$ , витрачається на нагрівання самої області  $Q_{пом}$  і на покриття витрати теплової енергії через огорожувальні конструкції  $Q_{ок}$ , тобто:

$$Q = Q_{пом} + Q_{ок} \quad (3.5)$$

За нескінченно малий відрізок часу енергія, підведена в область друку  $Qdt$ , витрачається на нагрівання області друку на  $dt$  градусів:

$$G_{пм} \cdot c_{пм} dt \quad (3.6)$$

і на покриття витрати енергії через огороджувальні конструкції:

$$F_{\text{OK}} \cdot k_{\text{OK}} \cdot \Delta t_{\text{B}} dt \quad (3.7)$$

Отримаємо диференціальне рівняння теплового балансу області, що підігрівається:

$$Q dt = G_{\text{ПМ}} \cdot c_{\text{ПМ}} dt + F_{\text{OK}} \cdot k_{\text{OK}} \cdot \Delta t_{\text{B}} dt \quad (3.8)$$

де  $F_{\text{OK}}$  – площа поверхні конструкцій, що захищають;

$t$  – час;

$G_{\text{ПМ}}$  – маса області обігріву;

$c_{\text{ПМ}}$  – питома теплоємність,  $c_{\text{ПМ}} = 1.005$  (кДж/кг) • К;

$k_{\text{OK}}$  – коефіцієнт теплопередачі огороджувальних конструкцій;

$\Delta t_{\text{H}}$  – температурний натиск,  $\Delta t_{\text{H}} = t_{\text{П}} - t_{\text{д}}$ ;

$t_{\text{П}}$  – температура повітря в області друку;

$t_{\text{д}}$  – температура довкілля.

Перетворимо отримане рівняння:

$$Q dt = G_{\text{ПМ}} \cdot c_{\text{ПМ}} \frac{dt}{d\tau} + F_{\text{OK}} \cdot k_{\text{OK}} \cdot \Delta t_{\text{B}} \frac{d\tau}{d\tau} \quad (3.9)$$

$$\frac{Q dt}{F_{\text{OK}} \cdot k_{\text{OK}}} \cdot \frac{d\tau}{dt} = \frac{G_{\text{ПМ}} \cdot c_{\text{ПМ}}}{F_{\text{OK}} \cdot k_{\text{OK}}} \cdot \frac{dt}{d\tau} + \Delta t_{\text{B}} \quad (3.10)$$

$$\frac{Q}{F_{\text{OK}} \cdot k_{\text{OK}}} = T_{\text{ПМ}} \cdot \frac{dt}{d\tau} + t_{\text{B}} - t_{\text{H}} \quad (3.11)$$

$$\frac{Q}{F_{\text{OK}} \cdot k_{\text{OK}}} + t_{\text{H}} = T_{\text{ПМ}} \cdot \frac{dt}{d\tau} + t_{\text{B}} \quad (3.12)$$

де  $Q$  – теплова енергія, що підводиться в область друку;

$T_{\text{ПМ}}$  – постійна часу області, що обігрівається:

$$T_{\text{ПМ}} = \frac{G_{\text{ПМ}} \cdot c_{\text{ПМ}}}{F_{\text{OK}} \cdot k_{\text{OK}}} \quad (3.13)$$

З даного рівняння отримаємо передатну функцію області, що обігрівається:

$$W(p)_{\text{ПМ}} = \frac{\frac{Q}{F_{\text{OK}} \cdot k_{\text{OK}}} + t_{\text{H}}}{T_{\text{ПМ}} \cdot p + 1} \quad (3.14)$$

З викладеного можна зробити такі висновки:

а) нагрівання і охолодження області друку залежить не тільки від кількості тепла, що підводиться в неї. Ці процеси залежать також від маси області друку. Постійна часу  $T_{\text{пм}}$  в області друку тим більше, чим більша маса, теплоємність і чим менше теплопровідність їх внутрішніх та зовнішніх конструкцій, що захищають;

б) зниження температури повітря області друку після вимкнення нагрівального елемента відбувається тим повільніше, що стоїть температура зовнішнього повітря.

Структурна схема розімкнутої системи регулювання температури. З усього описаного вище можна виділити основні рівняння, необхідні для побудови

$$\begin{cases} \frac{Q}{F_{\text{ок}} \cdot k_{\text{ок}}} + t_{\text{н}} = T_{\text{пм}} \cdot \frac{dt}{d\tau} + t_{\text{в}} \\ T_{\text{пм}} = \frac{G_{\text{пм}} \cdot c_{\text{пм}}}{F_{\text{ок}} \cdot k_{\text{ок}}} \end{cases} \quad (3.15)$$

структурної схеми, а саме це рівняння (3.12) та (3.13):

Передатна функція області, що підігривається, з рівняння (3.14):

$$W(p)_{\text{пм}} = \frac{\frac{Q}{F_{\text{ок}} \cdot k_{\text{ок}}} + t_{\text{н}}}{T_{\text{пм}} \cdot p + 1} \quad (3.16)$$

Розрахуємо параметри області, що обігривається. Температура зовнішнього повітря:

$$t_3 = 22 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Обсяг області, що обігривається становить:

$$V_{\text{км}} = V_1 + V_2 + V_3 \quad (3.17)$$

$$V_1 = 0.21 \cdot 0.44 \cdot 0.47 = 0.04 \text{ м}^3.$$

$$V_2 = 0.22 \cdot 0.223 \cdot 0.47 = 0.02 \text{ м}^3.$$

$$V_3 = 0.22 \cdot 0.47 \cdot 0.22 = 0.02 \text{ м}^3.$$

$$V_{\text{км}} = 0.04 + 0.02 + 0.02 = 0.08.$$

де  $V_1$ - обсяг першої з простих фігур, що становлять область друку;

$V_2$ - обсяг другої з простих фігур, що становлять область друку;

$V_3$ - обсяг третьої з простих фігур, що становлять область друку.

Маса області, що підігрівається:

$$G_{\text{ПМ}} = V_{\text{ПМ}} \cdot \rho_{\text{П}} = 0.08 \cdot 1.29 = 0.1 \text{ кг} \quad (3.18)$$

де  $\rho_{\text{П}}$  - щільність повітря за нормальних умов.

Площа огорожувальної конструкції:

$$F_{\text{ОК}} = S_3 \cdot S_6 \cdot S_{\text{В}} \cdot S_k \cdot S_{\text{кр}} \quad (3.19)$$

$$F_{\text{ОК}} = 0.2 \cdot (0.16 \cdot 2) \cdot 0.1 \cdot 0.1 \cdot 0.15 = 0.87 \text{ м}^2.$$

де  $S_3$  - площа поверхні задньої стінки огорожувальної конструкції;

$S_6$  - площа бічної стінки огорожувальної конструкції;

$S_{\text{В}}$  - площа поверхні верхньої стінки огорожувальної конструкції;

$S_{\text{П}}$  - площа поверхні передньої стінки огорожувальної конструкції;

$S_{\text{кр}}$  - площа поверхні кришки огорожувальної конструкції.

Величина опору теплопередачі для багат шарового огороження:

$$R_{\text{ОК}} = R_{\text{В}} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{Н}} \quad (3.20)$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{0.0013}{0.011} = 0.011.$$

$$R_{\text{ОК}} = 0.133 + 0.011 + 0.011 + 0.011 + 0.05 = 0.216 \text{ м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C/ккал}.$$

де  $\delta$  - товщина одного шару 6.5 мм фанери, що складається з 5 шарів в м;

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності сталі (оболонка) для керамічного нагрівача в ккал/м · год · °С.

Коефіцієнт теплопередачі огорожі:

$$k_{\text{ОК}} = \frac{1}{R_{\text{ОК}}} = \frac{1}{0.216} = 4.63 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C}.$$

Переводимо в кДж/м<sup>2</sup> · год · °С. Якщо 1 кал = 4.19 Дж, то:

$$k_{\text{ОК}} = k_{\text{ОК}} \cdot 4.19 = 19.398 \text{ кДж/м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C}.$$

Постійна часу області, що обігрівається:

$$T_{\text{ПМ}} = \frac{G_{\text{ПМ}} \cdot c_{\text{ПМ}}}{F_{\text{ОК}} \cdot k_{\text{ОК}}} = \frac{0.1 \cdot 1.005}{0.87 \cdot 19.398} = 0.006 \text{ год}$$

Тепер необхідно визначити теплову енергію, що надходить до області друку від нагрівального приладу. Середня температура нагрівача:

$$t_{\text{Пр}} = 50 \text{ °C}.$$

Коефіцієнт теплопередачі нагрівача приймаємо:

$$k_{кр} = 47 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C}.$$

Переводимо в кДж/м<sup>2</sup> · год · °C. Якщо 1 кал = 4.19 Дж, то:

$$k_{кр} = k_{ок} \cdot 4.19 = 196.93 \text{ кДж/м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C}.$$

Площа поверхні нагрівального приладу (циліндричної форми):

$$F_{пр} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot (R + h) \quad (3.21)$$

Якщо  $R = 0.003$  м,  $h = 0.015$  м та восьми керамічних нагрівачів, то маємо:

$$F_{пр} = 2 \cdot \pi \cdot 0.003 \cdot (0.003 + 0.015) = 0.000339 \cdot 8 = 0.0027 \text{ м}^2.$$

Тепловіддача нагрівального приладу:

$$Q = F_{пр} \cdot k_{кр} \cdot (t_{пр} - t_{п}) = 0.002 \cdot 196.9 \cdot (50 - 22) = 119.7 \text{ кДж/год}.$$

Побудуємо структурну схему у середовищі MatLab (рис. 3.8). Результати моделювання для температури повітря  $t_{п}$  показано на рис. 3.9.

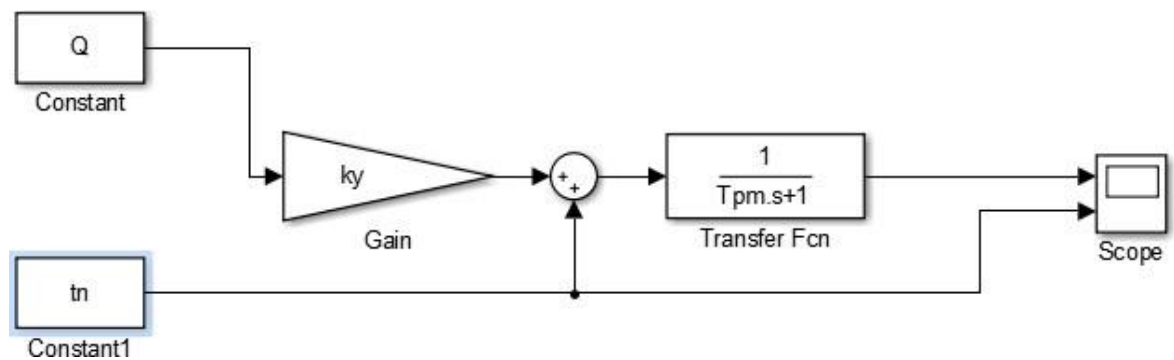


Рисунок 3.8 – Структурна схема розімкнутої СР температури

На графіку (рис. 3.9) синім кольором зображено температуру повітря в області друку ( $t_{п}$ ), а червоним зовнішню температуру повітря ( $t_{з}$ ).

Визначимо показники якості перехідного процесу для  $t_{п}$ .

Перерегулювання

$$\sigma = \frac{t_{пmax} - t_{пуст}}{t_{пуст}} \cdot 100\% = \frac{43 - 43}{43} \cdot 100\% = 0\%.$$

Час перехідного процесу:

$$t_{п.п} = 0.025 \text{ год} = 1.5 \text{ хв}.$$

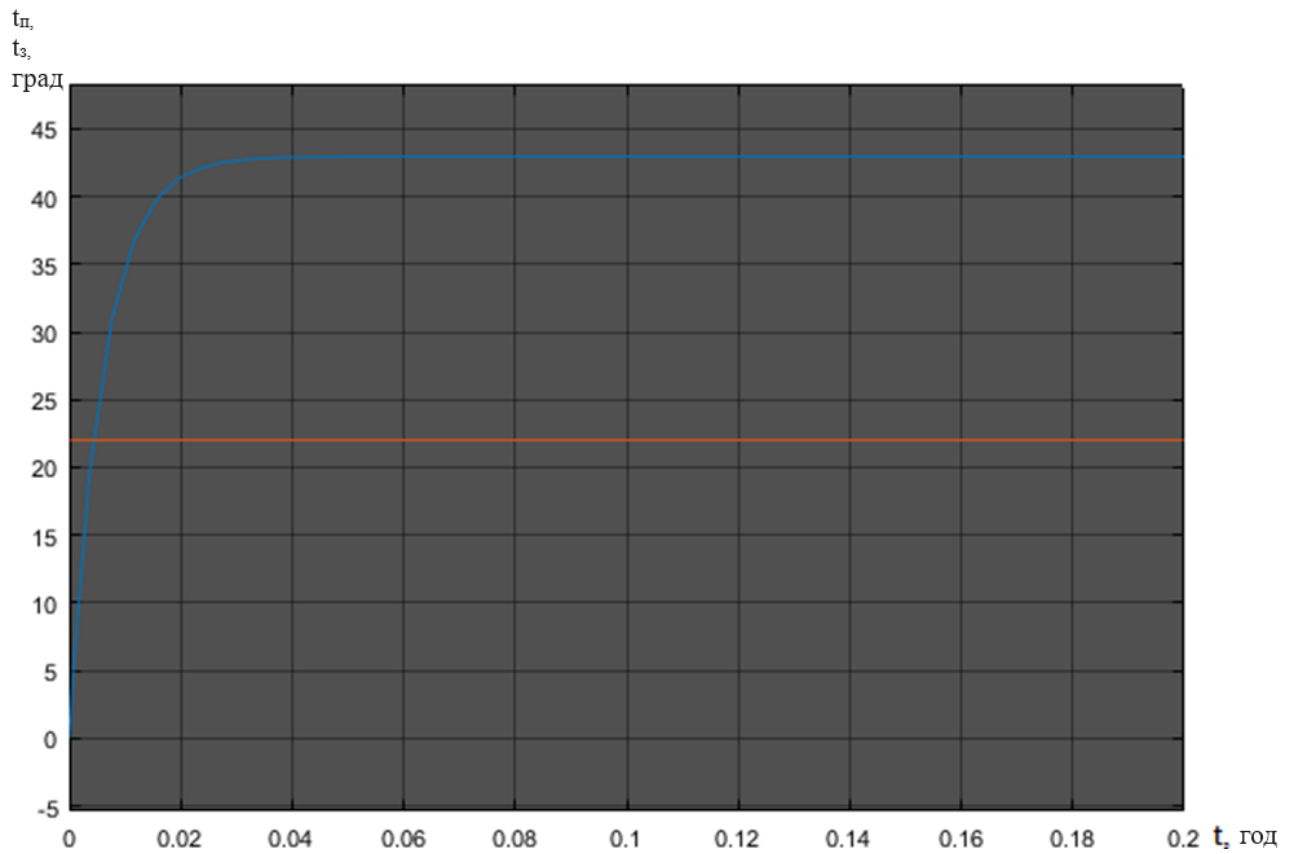


Рисунок 3.9 – Графік перехідного процесу

З рис. 3.9 видно, що значення температури повітря в області друку становить 43 °С, що перевищує необхідну температуру 40 °С. Отже, необхідно ввести контур регулювання температури повітря в області друку.

### 3.3 Порівняння П-, ІІ- та ІІД-регуляторів

Усього існує не так багато типів регуляторів, які застосовують для керування різними процесами. Розглянемо три основні, а саме П, ІІ, ІІД. Всі регулятори відрізняються за своїми характеристиками та складністю реалізації. Коротко про плюси, мінуси та застосування кожного з них:

П – пропорційний регулятор.

Принцип дії полягає в тому, що регулятор виробляє вплив на об'єкт управління, що управляє, пропорційно величині помилки. Для налаштування пропорційного регулятора слід спочатку встановити максимальний коефіцієнт пропорційності, при цьому вихідна потужність регулятора зменшиться до нуля. Після стабілізації виміряного значення слід встановити задане значення і поступово зменшувати коефіцієнт пропорційності, при цьому помилка регулювання буде зменшуватися. Коли в системі виникнуть періодичні коливання, коефіцієнт пропорційності слід збільшити так, щоб помилка регулювання була мінімальною, а періодичні коливання максимально зменшилися.

Плюси:

- простий у реалізації та налаштуванні.

Мінуси:

- не може забезпечити стабільне утримання параметра.

П – регулятор застосовується в пристроях, де необхідна простота, але немає потреби у великій точності. У промисловості застосовується нечасто через те, що у складніших пристроях реалізувати інший, точніший регулятор легко. Фактично застосовується в простих пристроях з мінімумом функцій, де немає програмного управління.[3]

ІІ – пропорційно-інтегральний регулятор.

Даний тип регулятора є одним із найбільш універсальних регуляторів. Фактично ІІ-регулятор – це П-регулятор із додатковою інтегральною складовою. І-складова, що доповнює алгоритм, в першу чергу потрібна для усунення статичної помилки, що характерна для пропорційного регулятора. По суті, інтегральна частина є накопичувальною, і таким чином дозволяє здійснити



те, що ПІ-регулювальник враховує в даний момент часу попередню історію зміни вхідної величини. Для налаштування ПІ-регулятора слід спочатку встановити постійну час інтегрування рівний нулю, а коефіцієнт пропорційності - максимальним. Після того як при налаштуванні пропорційного регулятора, зменшенням коефіцієнта пропорційності потрібно досягти появи в системі незагасаючих коливань. Близьке до оптимального значення коефіцієнта пропорційності буде вдвічі більше того, при якому виникли коливання, а близьке до оптимального значення постійного часу інтегрування - на 20% менше від періоду коливань.

Плюси:

- нескладний у реалізації та налаштуванні.

Мінуси:

- вихід на заданий параметр затягнутий.

Застосовується в багатьох промислових пристроях, де треба точно утримувати параметр, який не змінює значення миттєво навіть з миттєвою зміною зовнішнього середовища. Наприклад, температура не може змінитись миттєво, оскільки існує теплоємність, до того ж сам датчик також не може моментально змінити свою температуру. Тиск рідин теж може миттєво змінитись, тому застосування ПІ – регуляторів для утримання тиску цілком виправдано.

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор. ПІД-регулятор - найбільш збалансований з усіх регуляторів, побудованих на основі типових ланок, тому широко застосовується у різних сферах. Пропорційна складова виробляє сигнал, який протидіє відхилення регульованої величини в даний час. Інтегральна складова накопичує результуюче значення, нівелюючи таким чином недолік ПІ-регулятора - наявність статичної помилки. ПІД-регулятор має Д-складову, яка як би прогнозує відхилення від завдання і стежить за швидкістю відхилення, тому є найшвидшою в даному алгоритмі. Все це варто враховувати при виборі закону регулювання. Ручне налаштування ПІД дуже складне, тому рекомендується використовувати функцію автоналаштування.[13]

Плюси:

- найкраща перехідна характеристика. Відмінна швидкість та точність регулювання.

Мінуси:

- складний у реалізації та налаштуванні. Сучасні ПД регулятори реалізуються із застосуванням обчислювальних процесорів;
- вихід на заданий параметр затягнутий.

### 3.4 Структурна схема замкнутої системи регулювання температури

Зберемо математичну модель системи підтримки температури за допомогою програми Simulink, використовуючи різні типи регуляторів та за показниками якості виберемо оптимальний для цього завдання регулятор.

ПІД-регулятор.

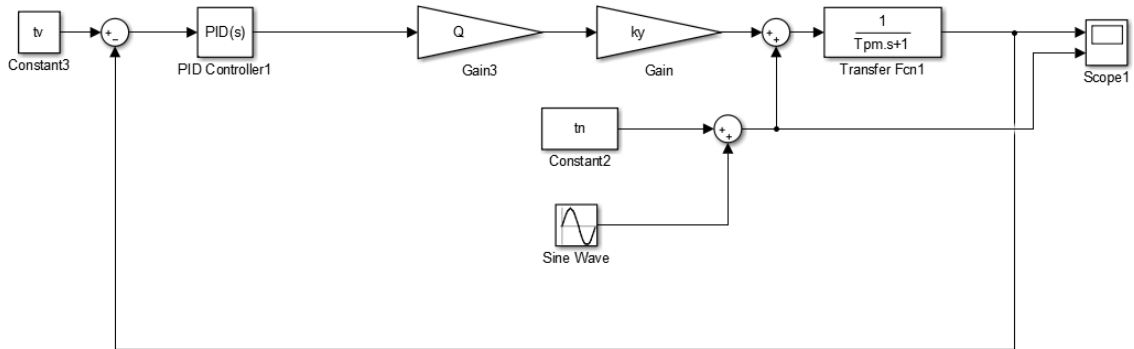


Рисунок 3.10 – Структурна схема розімкнутої системи регулювання температури

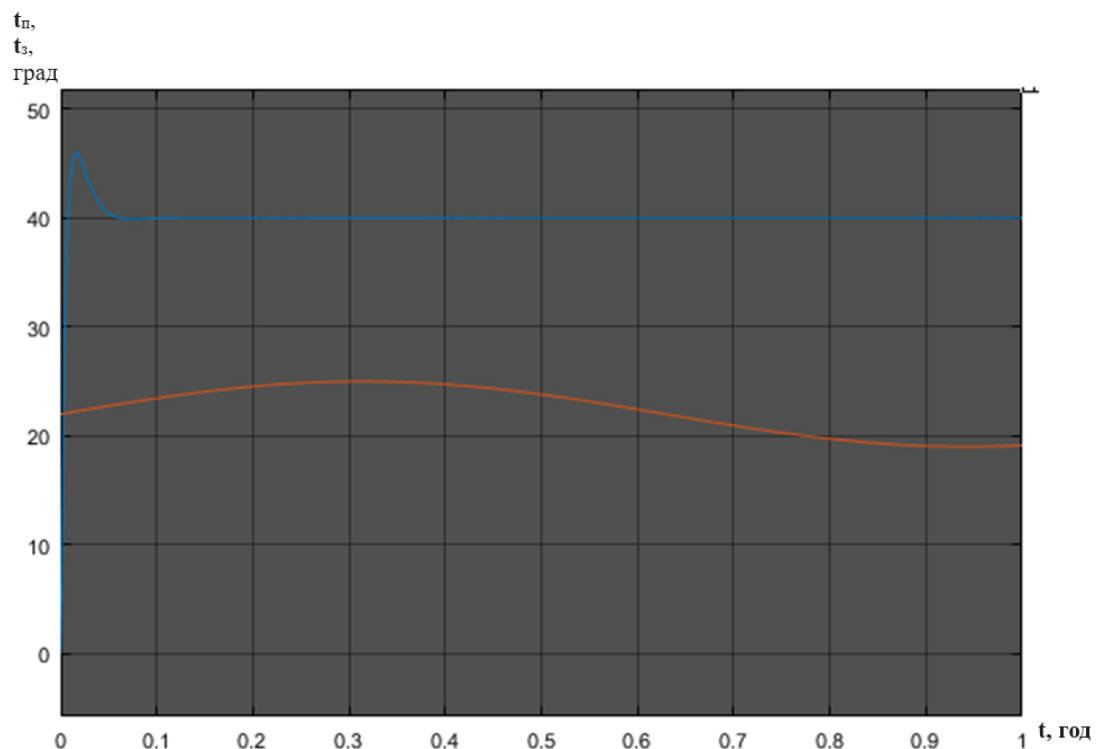


Рисунок 3.11 – Графік перехідного процесу

На графіку синім кольором зображено температуру повітря в області друку ( $t_{п}$ ), а червоним зовнішню температуру повітря ( $t_{з}$ ).

Визначимо показники якості перехідного процесу для  $t_{п}$ .

## Перерегулювання

$$\sigma = \frac{t_{п.мах} - t_{п.уст}}{t_{п.уст}} \cdot 100\% = \frac{46 - 40}{40} \cdot 100\% = 15\%.$$

Час перехідного процесу:

$$t_{п.п} = 0.05 \text{ год} = 3 \text{ хв.}$$

З рис. 3.11 видно, що значення температури повітря в області друку становить 40 °С, що є оптимальним значенням.

## ПІ-регулятор.

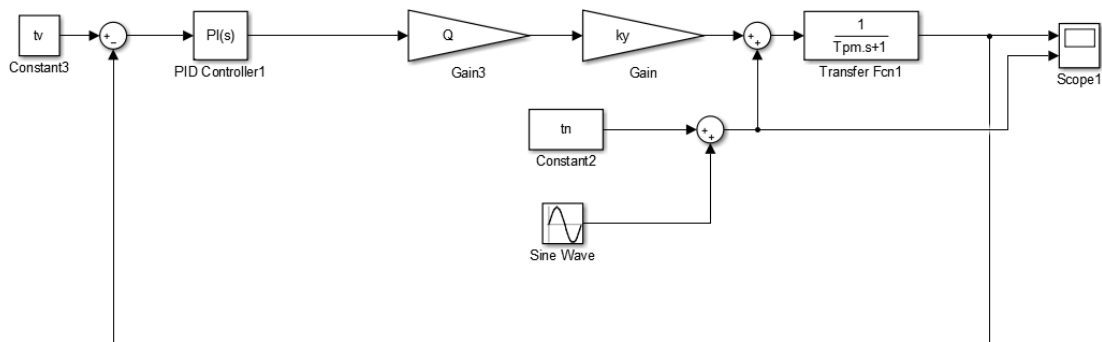


Рисунок 3.12 – Структурна схема замкнутої системи регулювання температури

На графіку синім кольором зображено температуру повітря в області друку ( $t_{п}$ ), а червоним зовнішню температуру повітря ( $t_3$ ).

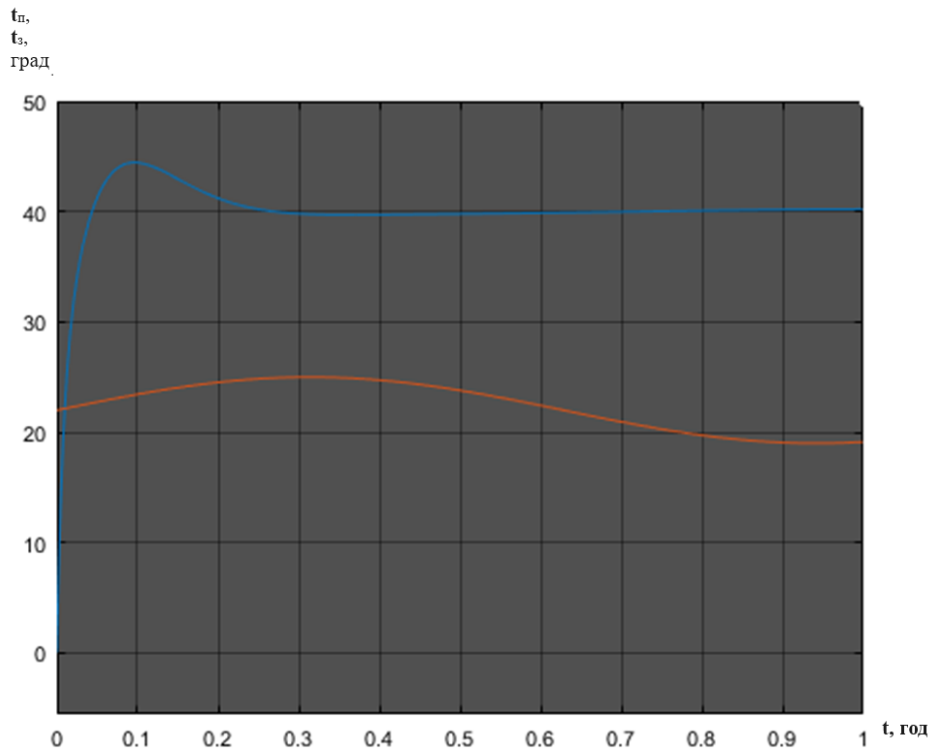


Рисунок 3.13 – Графік перехідного процесу

Визначимо показники якості перехідного процесу для  $t_{п.}$

Перерегулювання

$$\sigma = \frac{t_{п.мах} - t_{п.уст}}{t_{п.уст}} \cdot 100\% = \frac{44.5 - 40}{40} \cdot 100\% = 11.25\%.$$

$$t_{п.п} = 0.25 \text{ год} = 15 \text{ хв.}$$

З рис. 3.13 видно, що значення температури повітря в області друку становить  $40^{\circ}\text{C}$ , при цьому так само присутні незначні коливання системи, але при цьому час перехідного процесу збільшилося з 3 хв до 15 хв.

П-регулятор.

Структурну схему замкнутої системи регулювання температури показано на рис. 3.14.

На графіку (рис. 3.15) синім кольором зображено температуру повітря в області друку ( $t_{п.}$ ), а червоним зовнішню температуру повітря ( $t_{з.}$ ).

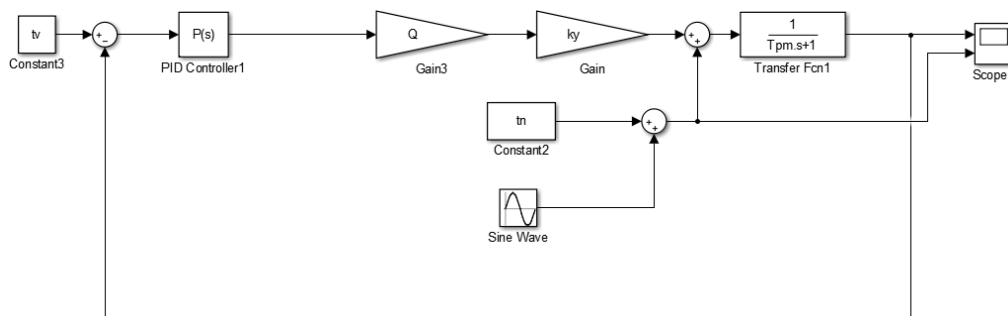


Рисунок 3.14 – Структурна схема замкнутої системи регулювання температури

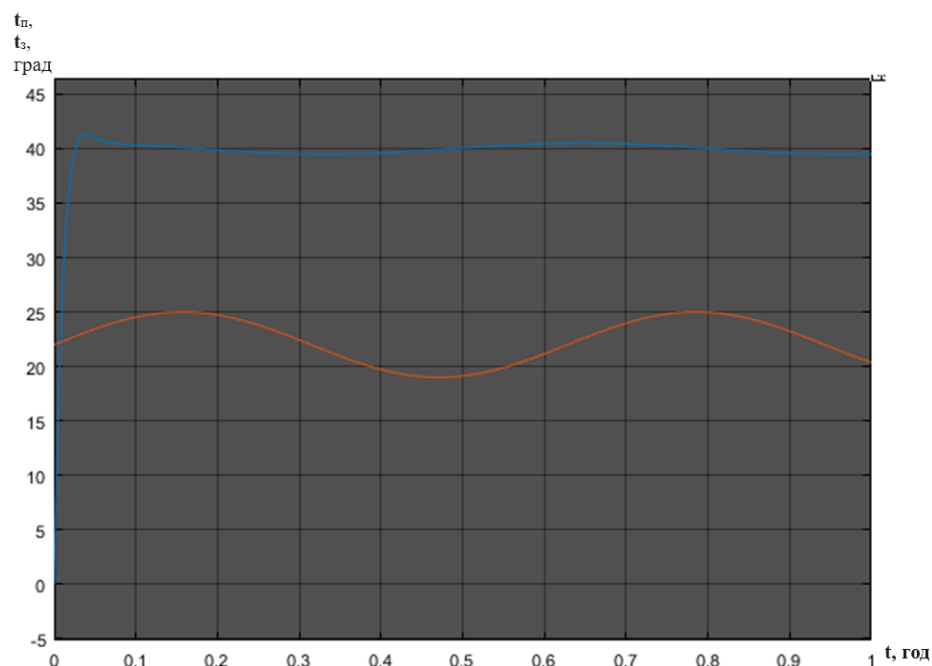


Рисунок 3.15 – Графік перехідного процесу

Визначимо показники якості перехідного процесу для  $t_{п.}$

Перерегулювання

$$\sigma = \frac{t_{п.маx} - t_{п.уст}}{t_{п.уст}} \cdot 100\% = \frac{41.3 - 40}{40} \cdot 100\% = 3.25\%.$$

$$t_{п.п} = 0.01 \text{ год} = 0.6 \text{ хв.}$$

З рис. 3.15 видно, що значення температури повітря в області друку становить 40°C, при цьому так само, як і в попередній системі присутні незначні коливання.

Короткі висновки щодо показників якості наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. – Характеристики термістора

Показники якості	П-регулятор	ПІ-регулятор	ПІД-регулятор
Перерегулювання, %	3.25	11.25	15
Час перехідного процесу, хв	0.6	15	3
Колівання системи	±0.5	±0.27	-

Регулювання здійснюватиметься за допомогою ПІД-регулятора. Так як в даному випадку він забезпечив найменші коливання системи за середнього часу перехідного процесу та найбільше перерегулювання. Цей вид регулятора виявився найефективнішим і забезпечив досить високу точність під час управління цим процесом. Для реалізації цього способу регулювання, як видно з малюнка 3.13, була сформована зворотний зв'язок за температурою повітря в області друку. Для врахування зміни температури повітря на суматор був поданий синусоїдальний сигнал з амплітудою, що дорівнює трьом, що означає зміну зовнішньої температури в межах від  $22 \pm 3^\circ\text{C}$ .

### 3.5 Розробка математичної моделі адаптивної системи керування

Огороджувальні конструкції – це конструкції, що служать обмеження обсягу певної області. Призначення огороджувальних конструкцій – захист внутрішньої сфери від негативних природних і техногенних чинників: пилу, перепади температур, вітру, вологи тощо.

Огороджувальна конструкція, розроблена для 3Д принтера prusa i3, представлена малюнку 3.16.

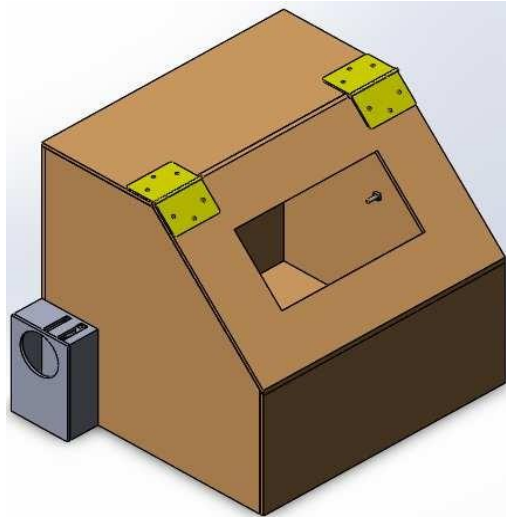


Рисунок 3.16 – Огороджувальна конструкція для 3Д принтера

Причому з відкритою та закритою кришкою об'єкт управління має різні параметри, а саме площа огороджувальної конструкції із закритою кришкою дорівнює  $F_{ок} = 0.87 \text{ м}^2$ , з відкритою  $F_{ок} = 0.72 \text{ м}^2$ . Це видно з формул 3.13 та 3.19.

Зберемо математичну модель системи підтримки температури за допомогою програми Simulink для різних параметрів об'єкта управління (різної площі огороджувальної конструкції). Для того щоб змоделювати впливи, що обурюють (стрибки температури, що обумовлюються впливом сильного потоку холодного повітря на об'єкт управління) і наочно показати їх вплив на об'єкт управління був обраний блок генератора пульсуючого сигналу. Його параметри підібрані таким чином, щоб максимально наблизити обурення, що моделюється, до реального. Період виникнення коливання 9 хв, що наближено можна порівняти з вітряною погодою та друку з відкритим вікном у приміщенні. Амплітуда обурення  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ , що означає у разі обурення зниження температури на  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Так само обурення починають виникати тільки після 27 хв після початку

роботи системи, тим самим показуючи роботу системи за нормальних погодних умов та з їхньою різкою зміною.

Математична модель системи підтримки температури при  $F_{ок} = 0.87$  м<sup>2</sup>. Постійна часу обігривається області дорівнює:

$$T_{пм} = \frac{G_{пм} \cdot c_{пм}}{F_{ок} \cdot k_{ок}} = \frac{0.1 \cdot 1.005}{0.87 \cdot 19.398} = 0.006 \text{ год}$$

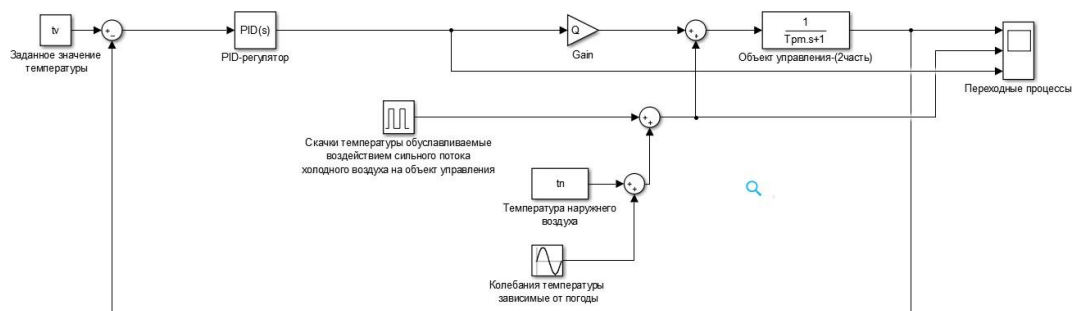


Рисунок 3.17 – Структурна схема замкнутої системи регулювання температури

На графіку синім кольором зображено температуру повітря в області друку ( $t_{п}$ ), а червоним зовнішню температуру повітря ( $t_{з}$ ).

Визначимо показники якості перехідного процесу для  $t_{п}$ .

Перерегулювання

$$\sigma = \frac{t_{п,max} - t_{п,уст}}{t_{п,уст}} \cdot 100\% = \frac{46 - 40}{40} \cdot 100\% = 15\%$$

$$t_{п,п} = 0.05 \text{ год} = 3 \text{ хв.}$$

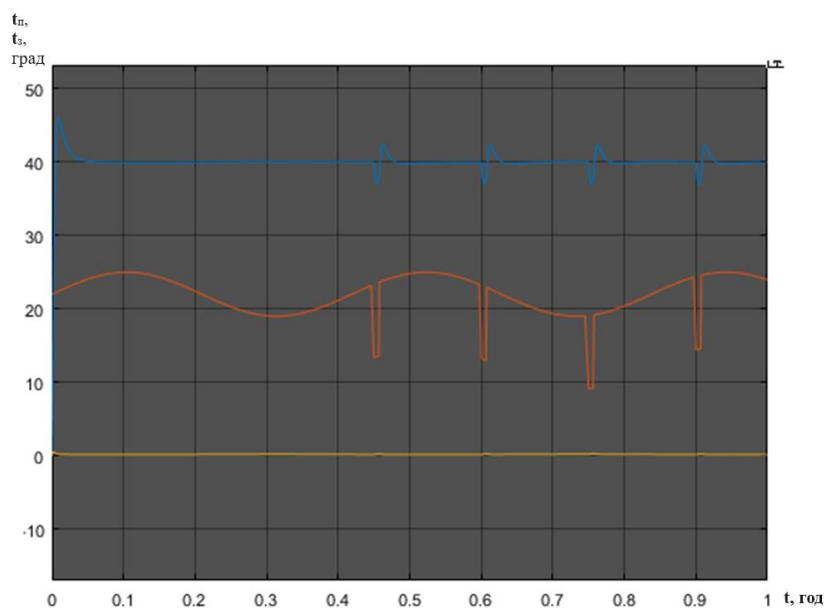


Рисунок 3.18 – Графік перехідного процесу



При цьому параметри ПД – регулятора мають значення:

$$K_p = 0.01.$$

$$K_I = 3.72.$$

$$K_D = -2.4.$$

де  $K_p$  – пропорційний коефіцієнт ПД-регулятора;

$K_I$  – інтегральний коефіцієнт ПД-регулятора;

$K_D$  – диференціальний коефіцієнт ПД-регулятора.

Математична модель системи підтримки температури при  $F = 0.72 \text{ м}^2$ .

Постійна часу області, що обігривається, дорівнює:

$$T_{\text{пм}} = \frac{G_{\text{пм}} \cdot c_{\text{пм}}}{F_{\text{ок}} \cdot k_{\text{ок}}} = \frac{0.1 \cdot 1.005}{0.72 \cdot 19.398} = 0.007 \text{ год}$$

На графіку синім кольором зображено температуру повітря в області друку ( $t_{\text{п}}$ ), а червоним зовнішню температуру повітря ( $t_3$ ).

Визначимо показники якості перехідного процесу для  $t_{\text{п}}$ .

$$\sigma = \frac{t_{\text{п.мах}} - t_{\text{п.уст}}}{t_{\text{п.уст}}} \cdot 100\% = \frac{46 - 40}{40} \cdot 100\% = 15\%.$$

Перерегулювання

$$t_{\text{п.п}} = 0.05 \text{ год} = 3 \text{ хв.}$$

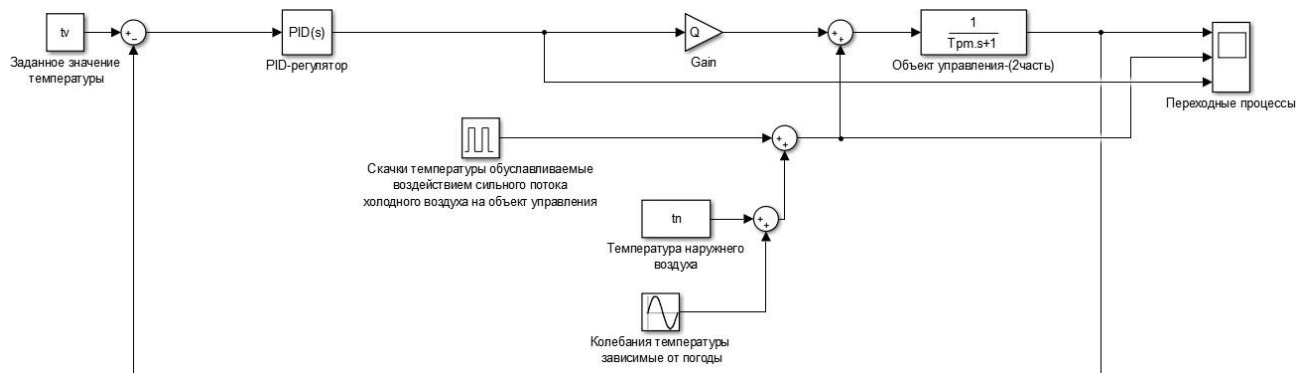


Рисунок 3.19 – Структурна схема замкнutoї системи регулювання температури

На графіку синім кольором зображено температуру повітря в області друку ( $t_{\text{п}}$ ), а червоним зовнішню температуру повітря ( $t_3$ ).

Визначимо показники якості перехідного процесу для  $t_{\text{п}}$ .

При цьому параметри ПД – регулятора мають значення:

$$K_p = 0.01.$$

$$K_I = 3.19.$$

$$K_D = -2.8.$$

де  $K_p$  – пропорційний коефіцієнт ПІД-регулятора;

$K_I$  – інтегральний коефіцієнт ПІД-регулятора;

$K_D$  – диференціальний коефіцієнт ПІД-регулятора.

Також в ході моделювання було виявлено, що при виникненні збурення слід проводити перебудову параметрів ПІД регулятора в залежності від температури збурення зафіксованої датчиками, щоб згладити його вплив на перехідний процес.

Основні параметри ПІД-регулятора при зниженні температури обуренням наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. – Параметри ПІД – регулятора при зниженні температури обуренням

Значення температури, °C	$K_p$	$K_I$	$K_D$
-10	0.02	3.19	-2.8
-10.5	0.02	3.19	-2.8
-11	0.025	3.19	-2.8
-11.5	0.025	3.19	-2.8
-12	0.03	3.19	-2.8
-12.5	0.03	3.19	-2.8
-13	0.035	3.19	-2.8
-13.5	0.035	3.19	-2.8
-14	0.04	3.19	-2.8
-14.5	0.04	3.19	-2.8
-15	0.045	3.19	-2.8
-15.5	0.045	3.19	-2.8

При цьому показники якості перехідного процесу до перебудови дорівнюють:

- перерегулювання:

$$\sigma = \frac{t_{п.мах} - t_{п.уст}}{t_{п.уст}} \cdot 100\% = \frac{42.1 - 40}{40} \cdot 100\% = 5.25\%.$$

- час перехідного процесу:

$$t_{п.п} = 0.02 \text{ год} = 1.2 \text{ хв.}$$

І після перебудови (причому для всіх температур ідентичні):

- перерегулювання:

$$\sigma = \frac{t_{п.мах} - t_{п.уст}}{t_{п.уст}} \cdot 100\% = \frac{40.8 - 40}{40} \cdot 100\% = 2\%.$$

- час перехідного процесу:

$$t_{п.п} = 0.02 \text{ год} = 1.2 \text{ хв.}$$

#### 4. БЕЗПЕКА ТА ЕКОЛОГІЧНІСТЬ ПРОЕКТУ

Метою цього розділу є оцінка безпеки та екологічності об'єкту дипломної роботи.

Більшість заходів безпеки реалізована на проектному етапі. На цьому рівні проектування в конструкцію обладнання закладаються понад п'ять десятків різних вимог безпеки відповідно до положень понад два десятки стандартів системи стандартів безпеки праці (ССБП) та інших нормативних документів.[4]

Безпека обладнання відповідно до вимог ДСТУ 12.0.001, ДСТУ 12.0.003, ДСТУ 12.1.019 та ДСТУ 12.2.003 забезпечується:

- вибором принципів дії, конструктивних схем, безпечних елементів конструкції тощо;
- застосуванням у конструкції безпечних матеріалів та речовин;
- застосуванням у конструкції засобів механізації, автоматизації та дистанційного керування;
- виконанням ергономічних та естетичних вимог;
- вибором безпечних органів управління;
- застосуванням у конструкції засобів захисту;
- дотримання вимог безпеки при експлуатації, монтажних роботах, транспортуванні та зберіганні;
- розміщенням обладнання на майданчику;
- вибором електрообладнання та конструкції обладнання з урахуванням пожежної безпеки;
- включенням вимог безпеки до технічної документації з монтажу, експлуатації, ремонту, транспортування та зберігання;
- контролем за дотриманням вимог безпеки, правил експлуатації та трудового законодавства з охорони праці працюючими.

У цій роботі розроблено заходи щодо забезпечення безпечної експлуатації обладнання протягом усього терміну служби.

Обладнання 3Д принтера та його корпусу при експлуатації та в умовах, встановлених експлуатаційною та ремонтною документацією за вимогами ДСТУ

2.601 та ДСТУ 2.602, не повинно створювати небезпеки у надзвичайних ситуаціях внаслідок впливу вологості, високої температури, сонячної радіації, механічних коливань, високих та низьких тисків, агресивних речовин, вітрових навантажень, зледеніння та інших негативних факторів, що мають місце при надзвичайних ситуаціях.

#### *Безпека елементів 3Д-принтера.*

3Д принтер включає:

- корпусні та кріпильні елементи;
- крокові двигуни;
- контролер;
- кабелі;
- датчики;
- нагрівальні елементи;
- лінійні напрямні та швп.

Усі елементи 3Д принтера, якщо не зазначено іншого, не становлять високої пожежної (ДСТУ 12.1.004) та вибухонебезпечності (ДСТУ 12.1.010).

#### *Корпусні та кріпильні елементи.*

3Д принтер містить корпусні елементи, виконані із пластику та акрилу, а також кріпильні вироби (гвинти, гайки).

Відповідно до вимог ДСТУ 12.1.019, корпусні та кріпильні елементи розглянутого 3Д принтера не становлять високої електричної небезпеки, так як корпусні вироби не проводять струму, а кріпильні елементи не контактують з струмопровідними частинами об'єкта управління.

#### *Крокові двигуни.*

Крокові двигуни 3Д принтера забезпечують рух головки екструдера по осях X, Z та нагрівального столу по осі Y. Крокові двигуни забезпечують безпеку працюючих частин при введенні в експлуатацію та експлуатації, а також при дотриманні вимог, передбачених експлуатаційною документацією. Відповідність вимогам безпеки ДСТУ 12.1.019 та ДСТУ 12.1.038 також забезпечується такими властивостями крокових двигунів:

- крокові двигуни мають алюмінієві корпуси, що виключають контакт робітника з їх внутрішніми частинами за нормального режиму роботи;
- елементи конструкції сервоприводів не мають гострих кутів, кромок, задирок і поверхонь з нерівностями, що становлять небезпеку травмування працюючих;
- конструкція сервоприводу виключає мимовільне ослаблення або роз'єднання кріплень складальних одиниць та деталей за рахунок їхнього надійного кріплення.

#### *Контролер.*

Arduino мега отримує електричну енергію від блоку живлення, якої забезпечує крокові двигуни, датчики, LCD дисплей і нагрівачі, а також здійснює управління та обмін інформацією з ними. Контролер забезпечує безпеку працюючих при введенні в експлуатацію та експлуатації при дотриманні вимог, передбачених експлуатаційною документацією. Відповідність вимогам безпеки ДСТУ 12.1.019 та ДСТУ 12.1.038 також забезпечується такими властивостями контролера:

- контролер має пластикові корпуси, що виключають контакт працюючого з їх внутрішніми частинами за нормального режиму роботи;
- максимальне значення напруги в електричних ланцюгах контролера – 12 В, що відповідно до вимог ДСТУ 12.1.038 не перевищує гранично допустимої напруги дотику тривалістю 1 с та більше при аварійному режимі роботи електроустановки;
- елементи конструкції контролера не мають гострих кутів, кромок, задирок і поверхонь з нерівностями, що становлять небезпеку травмування працюючих;
- конструкція контролера виключає мимовільне ослаблення або роз'єднання кріплень складальних одиниць та деталей за рахунок їхнього надійного кріплення.

#### *Кабель.*

У комплектах є дво-, і трижильні кабелі живлення та зв'язку. Електрична безпека при користуванні кабелями забезпечується такими їх властивостями:

- наявність робочої ізоляції;
- максимальне значення напруги між жилами кабелів, крім кабелів живлення, становить 5 В, що згідно з вимогами ДСТУ 12.1.038 не перевищує граничного значення напруги дотику постійного струму при нормальному режимі електроустановки – 8 В;
- напруга між жилами кабелів живлення 3Д принтера становить 12, 24 В, що відповідно до вимог ДСТУ 12.1.038 не перевищує гранично допустимої напруги дотику тривалістю 1 с і більше при аварійному режимі роботи електроустановки;
- кінці проводів мають з'єднувачі, що виключають можливість мимовільного короткого замикання.

Датчики, нагрівальні елементи та дисплей для виведення інформації. Усі датчики, а також дисплеї для виведення інформації використовують постійний струм з напругою не більше 5 В, що згідно з вимогами ДСТУ 12.1.038 не перевищує граничного значення напруги дотику постійного струму при нормальному режимі електроустановки – 8 В. А нагрівальні елементи використовують напругу 24, що відповідно до вимог ДСТУ 12.1.038 не перевищує гранично допустимої напруги дотику тривалістю в 1 с і більше при аварійному режимі роботи електроустановки.

#### *Безпека вихідних матеріалів.*

Безпека 3Д принтера забезпечується використанням у конструкції переважно безпечних матеріалів та речовин. Відповідно до вимог, ДСТУ 12.3.002:

- матеріали 3Д принтера не впливають на робітників. При використанні матеріалів, які можуть надавати шкідливий вплив, передбачені відповідні засоби захисту працюючих;
- використання нових речовин та матеріалів дозволено лише після затвердження в установленому порядку відповідних гігієнічних нормативів.

Інформацію щодо матеріалів, які входять до складу елементів 3Д принтера подано в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. – Матеріали, що входять до складу елементів 3Д принтера

Найменування матеріалу	Клас небезпеки
Інженерний пластик, акрил (корпусні елементи, корпуси датчиків та контролера)	4
Сталь, алюміній (кріпильні вироби, корпуси крокових двигунів, нагрівальні елементи, шгп)	4
Мідь (кабелі живлення та зв'язку)	4
Склотекстоліт, фольга, напівпровідникові матеріали та ін. (друковані плати та електронні схеми бортових контролерів, крокових двигунів та датчиків)	4

Всі речовини та матеріали пройшли гігієнічну перевірку та перевірку на пожежну безпеку. Матеріали конструкції обладнання (табл. 4.1) не надають небезпечного та шкідливого впливу на організм людини і не створюють пожежонебезпечні ситуації при виконанні передбачених умов експлуатації.

*Безпека органів керування.*

Конструкції органів управління 3Д принтером забезпечують оптимальні умови праці відповідно до вимог ДСТУ 12.2.064, ДСТУ 12.2.061, ДСТУ 12.2.003:

- органи управління мають засоби екстреного (аварійного) виключення;
- відстань між органами управління виключає можливість зміни положення органу управління під час маніпуляції із суміжним органом управління.

*Безпека засобів захисту, що входять до конструкції.*

Засоби захисту забезпечують безпеку під час експлуатації 3Д принтера та сконструйовані з урахуванням вимог ДСТУ 12.2.003, ДСТУ 12.2.049, ДСТУ 12.2.061:



- засоби захисту виконують своє призначення безперервно в процесі функціонування елементів 3Д принтера або у разі виникнення небезпечної ситуації;

- конструкція та розташування засобів захисту не обмежує технологічні можливості обладнання, та забезпечують зручність експлуатації та технічного обслуговування.

#### *Безпека при монтажних та ремонтних роботах.*

Безпека при монтажних та ремонтних роботах забезпечується засобами захисту, інструментами та пристроями, що задовольняють вимоги відповідних державних стандартів.

Засоби захисту, інструменти та пристрої піддаються огляду та випробуванням.

До обслуговування виробу допускаються особи, які пройшли спеціальний інструктаж і вивчили цей технічний опис та інструкцію з експлуатації.[9]

При монтажі та експлуатації повинні дотримуватися:

- правила влаштування електроустановок;
- правила технічної безпеки під час експлуатації електроустановок споживачів.

#### *Безпека при транспортуванні та зберіганні.*

Маса мобільного робота не перевищує 10 кг, тому йому не потрібні вантажопідйомні засоби у процесі монтажу, транспортування, зберігання та ремонту.

Єдина умова зберігання - це дотримання температурного режиму (від -10 до +40 ° С) та відносної вологості 40-0%. 3Д принтер транспортується у коробці, суворо у вертикальному положенні.

#### *Безпека розміщення.*

Відповідно до вимог, ДСТУ 12.3.002, ДБН 31-01-03:

- лабораторні (робочі, монтажні) майданчики, на яких виконуються роботи, відповідають вимогам діючих будівельних норм та правил, а також правил, затверджених органами державного нагляду;

- організація робочих місць відповідає вимогам безпеки з урахуванням ергономічних вимог, які встановлюються у державних стандартах на конкретні виробничі процеси, виробниче обладнання та робочі місця.

Вимоги до професійного відбору. До обслуговування 3Д принтера допускаються особи:

- які пройшли інструктаж, навчання та перевірку знань з охорони праці;
- які не мають медичних протипоказань.

#### *Пожежна безпека.*

Пожежна безпека обладнання повинна бути забезпечена відповідно до вимог цих стандартів, ДСТУ 12.1.004, ДСТУ 12.1.018, ПУЕ, ПТЕ, та ПТБ, ДБН 3.05.06, ДБН 3.05.07. З урахуванням цих показників обрано тип виконання, вид вибухозахисту електрообладнання та ступінь його захисту від пилу та вологи.

Для забезпечення пожежної безпеки об'єкта, де передбачається робота з 3Д принтером, необхідно використовувати заходи пожежної профілактики:

- організаційні (інструктаж персоналу, розробка плану евакуації тощо);
- технічні (пристрій не горючих перегородок);
- режимні (паління у спеціальних місцях);
- експлуатаційні (профілактичні огляди). Контроль виконання вимог безпеки.

Контроль за виконанням вимог безпеки при експлуатації 3Д принтером покладається на посадових осіб відповідно до правових та нормативних документів щодо створення безпеки та нормальних умов праці.

Безпека за надзвичайних ситуацій. У разі виникнення НС необхідно:

- відключити електроживлення у лабораторії;
- виконати розпорядження посадових інструкцій;
- залишити будівлю та надійти у розпорядження начальника ЦЗ та НС.

#### *Екологічна безпека 3Д-принтера.*

Одним із екологічних показників є екологічна безпека вихідних матеріалів та речовин, що входять до конструкції обладнання. При виготовленні та

експлуатації 3Д принтера виконано всі нормативні природоохоронні вимоги. У конструкції застосовані переважно безпечні та екологічні відповідно до стандартів ДСТУ та охорони навколишнього середовища, сертифіковані матеріали та речовини, що пройшли гігієнічну перевірку та перевірку на пожежну небезпеку.

*Висновки у розділі.*

У роботі розроблено комплекс організаційних, технічних та інших заходів, спрямованих на безпеку праці. Впровадження в лабораторію 3Д принтера та заходів з дотриманням вимог ДСТУ, ДБУ дозволить вважати цю роботу відносно безпечною та екологічною.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання даної роботи були вивчені існуючі температурні аспекти, що виникають у процесі друку 3Д моделі, розглянуті існуючі кінематичні схеми 3Д принтерів і підібрані комплектуючі для складання розробленої системи управління.

З урахуванням розмірів об'єкта управління розроблено та представлено 3Д модель корпусу, всередині якого планується підтримувати заданий рівень температури. Розглянуто об'єкт управління та вивчено його характеристики. Розроблено принципову електричну схему адаптивної системи управління.

Розроблено дослідний лабораторний стенд, температура всередині якого підтримується за допомогою П-, ПІ- та ПІД-регуляторів. Складено математичну модель об'єкта управління, обрано тип регулятора на основі проведених досліджень. В даній кваліфікаційній роботі було проведено проектування автоматизованої системи управління процесами екструзії полімерного матеріалу під час друку 3Д принтером.

Система відповідає цілям роботи, виконує всі задачі керування розробленим технологічним процесом в різних умовах функціонування.

У процесі вирішення завдань даної дипломної роботи було розглянуто технологічний об'єкт і параметри цього об'єкта, які підлягають контролю. Була описана та створена схема інформаційно-матеріальних потоків процесів екструзії полімерного матеріалу під час друку 3Д принтером.

На основі аналізу функціональних завдань автоматизації була розроблена таблиця вхідних-вихідних сигналів.

Для здійснення задач регулювання були розроблені контури регулювання системи, на основі яких розроблена функціональна схема автоматизації системи, її наведено в додатках.

Був проведений аналіз та підбір обладнання для побудови системи автоматизації. Діапазони вимірювань датчиків задовольняють умовам експлуатації системи.

Можемо вважати завдання та цілі досягнутими.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Інструктивні вказівки до виконання курсових і дипломних проектів/ укладачі: В. Д. Червяков, О. Ю. Журавльов, І.В. Щокотова.— Суми : СумДУ, 2013. — 69 с.
2. Ванін В. В. Оформлення конструкторської документації : навч. посіб./ В. В. Ванін, А. В. Блюк, Г. О. Гнітецька. — К. : Каравела, 2018. — 200 с.
3. Васильківський І. С. Виконавчі пристрої систем автоматизації: навчальний посібник / І. С. Васильківський, В. О. Фединець, Я. П. Юсик. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. — 220 с.
4. Гасило Ю. А. Охорона праці в галузі та цивільний захист: навчальний посібник / Ю. А. Гасило, О. А. Крюковська. К. О. Левчук, Р. Я. Романюк. — Кам'янське : ДДТУ, 2017. — 369 с.
5. Голубєв Л.П., Романенко В.В. «Дослідження програмного забезпечення для виявлення та виправлення дефектів 3D-друку». Вісник ХНТУ ; №3(74), 2020 р. / УДК 62-552.7.
6. Дослідження якості поверхні при виготовленні моделей на 3D-принтері / Е. Я. Чонка, О. Г. Новаковський, В. В. Серов // Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: збірник наукових праць X Всеукраїнської науковотехнічної конференції – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2019. – С. 201-202.
7. Інструктивні вказівки до виконання курсових і дипломних проектів / укладачі : В. Д. Черв'яков, О. Ю. Журавльов, І. В. Щокотова – Суми : Сумський державний університет, 2013. – 69 с.
8. Олійник В. Розвиток технологій 3D друку [Електронний ресурс] / ЦДПУ ім. Володимира Вінниченка, фізико-математичний ф-т. — Режим доступу: <https://phm.cuspu.edu.ua/nauka/naukovo-populiarni-publikatsii/878-rozvytoktekhnohii-3-d-druku.html/> — 15.11.2023.
9. Охорона праці та цивільний захист: Підручник для студентів, які навчаються за спеціальностями галузей знань «Автоматизація та приладобудування» / О. Г. Левченко, О. І. Полукаров, В. В. Зацарний, Ю. О.

Полукаров, О. В. Землянська. За ред. О. Г. Левченка. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 420 с.

10. Пістун Є. П., Стасюк І. Д. Основи автоматики та автоматизації. Навчальний посібник. Друге видання, змінене і доповнене. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. - 336 с.

11. Савицький В., Федоришин Р. Технічні засоби автоматизації: навчальний посібник. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2018. – 292 с.

12. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування : навчальний посібник / О. Д. Манжілевський, Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 105 с

13. Трегуб В.Г. Автоматизація об'єктів періодичної дії: підручник. – К.: Видавництво Ліра-К, 2017. - 136 с.

14. Яригін В.А. Методологія покращення характеристик міцності деталі, що виготовлена методом 3D друку // В.А Яригін., С.П Вислоух.// Збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 6–9 листопада 2019 р. –Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка». – С. 209-213.

15. 3D друк методом наплавлення [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://pro3d.com.ua/a366711-druk-metodom-naplavlennya.html> (дата звернення 20.11.23). – Назва з екрана.

16. 3D printing. — Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_printing/](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing/) — 18.11.2023.

17. Arduino Uno [Electronic resource]: [Web-site]. – Electronic data. – Arduino, 2018. – Access mode: <https://www.arduino.cc> (appeal date 18.11.2023). – Caption from screen.

18. Bernier, C. Functional Design for 3D Printing: Designing 3D Printed Things for Everyday Use. O'Reilly Media, 2019.

19. Different Types of 3D Printers. — Режим доступу: <https://3dinsider.com/3dprinter-types/> — 17.11.2023.

20. Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer, 2018.
21. Hernandez, J. The 3D Printing Revolution. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2022.
22. Redwood, B., Hudson, B. The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications. 3D Hubs, 2017.
23. Riechert, C. 3D Printing Projects: 20 Design Projects for Your 3D Printer. Barron's Educational Series, 2020.
24. Types of 3D Printing Technology. — Режим доступа: <https://all3dp.com/1/typesof-3d-printers-3d-printing-technology/> — 16.11.2023.