

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії

(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Комп'ютерна система контролю робочої зони 3D принтера

Виконав: студент 4 курсу, групи СІ-41

спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»

(шифр і назва спеціальності)

Віцяк В. І.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Жаровський Р.О.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Луцик Н.С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Осухівська Г.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Осухівська Г.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)
«25» квітня 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія»
(шифр і назва спеціальності)

студента Віцяка Володимира Івановича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Комп'ютерна система контролю робочої зони 3D принтера

Керівник роботи кандидат технічних наук, доцент кафедри КС Жаровський Руслан Олегович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 24 » квітня 2026 року № 4/9-188

2. Термін подання студентом завершеної роботи 19.06.2026

3. Вихідні дані до роботи Технічне завдання

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Аналіз технічного завдання

2. Проектна частина

3. Практична частина

4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Структурна схема

2. Блок схема роботи

3. Схема електрична принципова

4. Результати роботи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Безпека життєдіяльності, основи охорони праці</i>			

7. Дата видачі завдання 25.04.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розробка технічного завдання</i>	<i>26.01 – 02.02</i>	
2.	<i>Робота над першим розділом «Аналіз технічного завдання»</i>	<i>03.02 – 15.02</i>	
3.	<i>Робота над другим розділом «Проектна частинв»</i>	<i>20.04 – 25.04</i>	
4.	<i>Робота над третім розділом «Практична частина»</i>	<i>26.04 – 05.05</i>	
5.	<i>Робота над четвертим розділом «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»</i>	<i>07.05 – 25.05</i>	
6.	<i>Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу</i>	<i>26.05 – 7.06</i>	
7.	<i>Перевірка на академічний плагіат, перевірка керівником та консультантами</i>	<i>8.06 – 14.06</i>	
8.	<i>Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра</i>	<i>15.06 – 21.06</i>	
9.	<i>Захист кваліфікаційної роботи бакалавра</i>	<i>26.06</i>	

Студент

_____ (підпис)

Віцяк Володимир Іванович

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Жаровський Руслан Олегович

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Віцяк В. І. Комп'ютерна система контролю робочої зони 3D принтера: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра: спец. 123 – комп'ютерна інженерія. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2026.

Ключові слова: 3D-принтер, FDM-друк, робоча камера, контроль температури, Arduino, термостабілізація, PID-регулювання, нагрівальний елемент, автоматичне керування.

У кваліфікаційній роботі розроблено комп'ютерну систему контролю робочої зони FDM 3D-принтера для автоматичного підтримання температурного режиму під час друку. Проведено аналіз причин виникнення дефектів друку, пов'язаних із нерівномірним охолодженням моделей та термічною усадкою пластиків.

Запропоновано структуру системи на базі мікроконтролера Arduino ATmega328P із використанням датчиків температури DS18B20 і термопари К-типу, нагрівального елемента та системи циркуляції повітря. Розроблено програмне забезпечення мовою C++ у середовищі Arduino IDE.

Проведено експериментальні дослідження алгоритмів регулювання температури. Встановлено, що пороговий алгоритм із диференціальною складовою забезпечує стабілізацію температури з похибкою до $+0,4$ °C.

ANNOTATION

Vitsiak V. I. Computer System for Monitoring the Working Area of a 3D Printer: Bachelor's Graduation Thesis: speciality 123 – computer engineering. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2026.

Keywords: 3D printer, FDM printing, working chamber, temperature control, Arduino, thermal stabilization, PID control, heating element, automatic control.

In the qualification work, a computer control system for the working area of an FDM 3D printer has been developed to automatically maintain the temperature regime during printing. An analysis of the causes of printing defects associated with uneven cooling of models and thermal shrinkage of plastics has been carried out.

A system structure based on the Arduino ATmega328P microcontroller has been proposed using DS18B20 temperature sensors and a K-type thermocouple, a heating element, and an air circulation system. Software has been developed in C++ in the Arduino IDE environment.

Experimental studies of temperature control algorithms have been conducted. It has been established that a threshold algorithm with a differential component provides temperature stabilization with an error of up to $+0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1	АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ	11
1.1	Системи і технологічні проблеми 3D друку	11
1.2	Огляд існуючих рішень	14
1.3	Аналіз можливих рішень поставленого завдання	18
РОЗДІЛ 2	ПРОЄКТНА ЧАСТИНА	21
2.1	Розробка узагальненої структури комп'ютерної системи	21
2.2	Обґрунтування вибору апаратного забезпечення системи контролю робочої зони 3D принтера	24
2.2.1	Вибір мікроконтролера	24
2.2.2	Обґрунтування вибору температурних датчиків	25
2.2.3	Обґрунтування вибору нагрівального елемента	27
2.2.4	Обґрунтування вибору блоку живлення	31
2.3	Обґрунтування вибору програмного забезпечення	33
2.4	Проектування комп'ютерного засобу	36
РОЗДІЛ 3	ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА	40
3.1	Електрична схема системи контролю робочої зони 3D-принтера	40
3.2	Програмна частина	41
3.3	Експериментальне дослідження	44
3.3.1	Релейний алгоритм	45
3.3.2	Пороговий алгоритм	45

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Віцяк В. І.				Лім.	Арк.	Аркушіє
Перевір.	Жаровський Р.					6	
Реценз.					ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41		
Н. Контр.	Луцик Н.С.						
Затверд.	Осухівська Г.М.						
					Комп'ютерна система контролю робочої зони 3D принтера		

3.3.3	Пороговий алгоритм із диференціальною складовою	46
3.3.4	Пропорційний алгоритм	47
3.3.5	PID – регулювання.	48
РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ ..		51
4.1	Вимоги пожежної безпеки при гасінні електрообладнання	51
4.2	Заходи з техніки безпеки при експлуатації обладнання	53
ВИСНОВКИ		57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		59
Додаток А Технічне завдання		
Додаток Б Перелік елементів		

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

FDM – Fused Deposition Modeling

PLA – Polylactic acid

ABS – акрилонітрилбутадієнстирол

PETG – поліетилентерефталатгліколь

PTC – Positive Temperature Coefficient

					<i>КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						8
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Сучасні технології адитивного виробництва активно використовуються у промисловості, машинобудуванні, медицині, освіті та наукових дослідженнях. Одним із найпоширеніших методів адитивного виробництва є FDM-друк, який базується на пошаровому нанесенні термопластичного матеріалу відповідно до цифрової моделі. Простота реалізації, доступність обладнання та широкий вибір матеріалів забезпечили значне поширення даної технології як у професійній сфері, так і серед побутових користувачів.

Однією з основних проблем FDM-друку є забезпечення стабільних температурних умов у робочій зоні 3D-принтера. Під час друку термопластичні матеріали піддаються циклам нагрівання та охолодження, що супроводжується термічною усадкою та виникненням внутрішніх механічних напружень. У результаті цього можуть виникати деформації моделей, викривлення геометрії, розтріскування, відшарування шарів та відрив кутів виробу від друкувального столу. Особливо помітно ці дефекти проявляються при друку ABS, PETG, Nylon та іншими інженерними пластиками.

Для покращення умов друку у сучасних 3D-принтерах застосовуються закриті робочі камери, системи підігріву та циркуляції повітря. Проте професійні системи термостабілізації мають складну конструкцію та високу вартість, що суттєво обмежує їх використання у навчальних лабораторіях, домашніх майстернях та малих виробництвах. Тому актуальною є задача створення доступної комп'ютерної системи контролю робочої зони 3D-принтера, здатної забезпечувати автоматичне підтримання необхідного температурного режиму та підвищення якості друку.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка комп'ютерної системи контролю робочої зони 3D-принтера для автоматичного моніторингу температурних параметрів та підтримання стабільного температурного режиму під час друку [1].

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз причин виникнення дефектів під час FDM-друку;
- розробити структуру системи контролю робочої зони 3D-принтера;
- обґрунтувати вибір апаратного та програмного забезпечення;
- реалізувати систему автоматичного регулювання температури;
- провести експериментальні дослідження алгоритмів керування температурою та оцінити їх ефективність.

Практичне значення роботи полягає у розробці доступної системи автоматичного контролю температури робочої області 3D-принтера, яка дозволяє зменшити кількість дефектів друку, підвищити стабільність технологічного процесу та покращити якість виготовлених виробів.

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

1.1 Системи і технологічні проблеми 3D друку

Технології адитивного виробництва є одним із найбільш перспективних напрямків розвитку сучасної техніки та автоматизованого виробництва. Особливого поширення набули системи тривимірного друку, які дозволяють виготовляти фізичні об'єкти шляхом пошарового нанесення матеріалу відповідно до цифрової моделі. Завдяки розвитку мікропроцесорної техніки, систем автоматичного керування та цифрового моделювання 3D-принтери активно використовуються у промисловості, машинобудуванні, медицині, архітектурі, освіті та наукових дослідженнях (рис. 1.1).

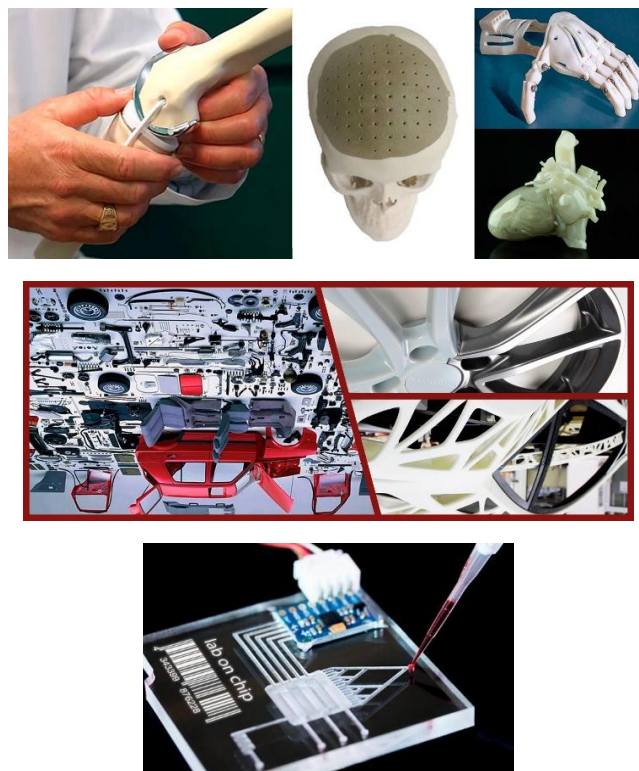


Рисунок 1.1 – Сфери використання тривимірного друку

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Віцяк В. І.			Аналіз технічного завдання	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Жаровський Р.					11	10
Реценз.						ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41		
Н. Контр.		Луцик Н.С.						
Затверд.		Осухівська Г.М.						

Найбільш поширеною технологією тривимірного друку є FDM (Fused Deposition Modeling) (рис. 1.2), яка базується на пошаровому формуванні виробу шляхом екструзії термопластичного матеріалу через нагріте сопло. У процесі друку пластик розплавляється, наноситься шарами та поступово охолоджується, формуючи готовий виріб. Якість друку при цьому значною мірою залежить від стабільності температурних режимів та умов у робочій зоні принтера.

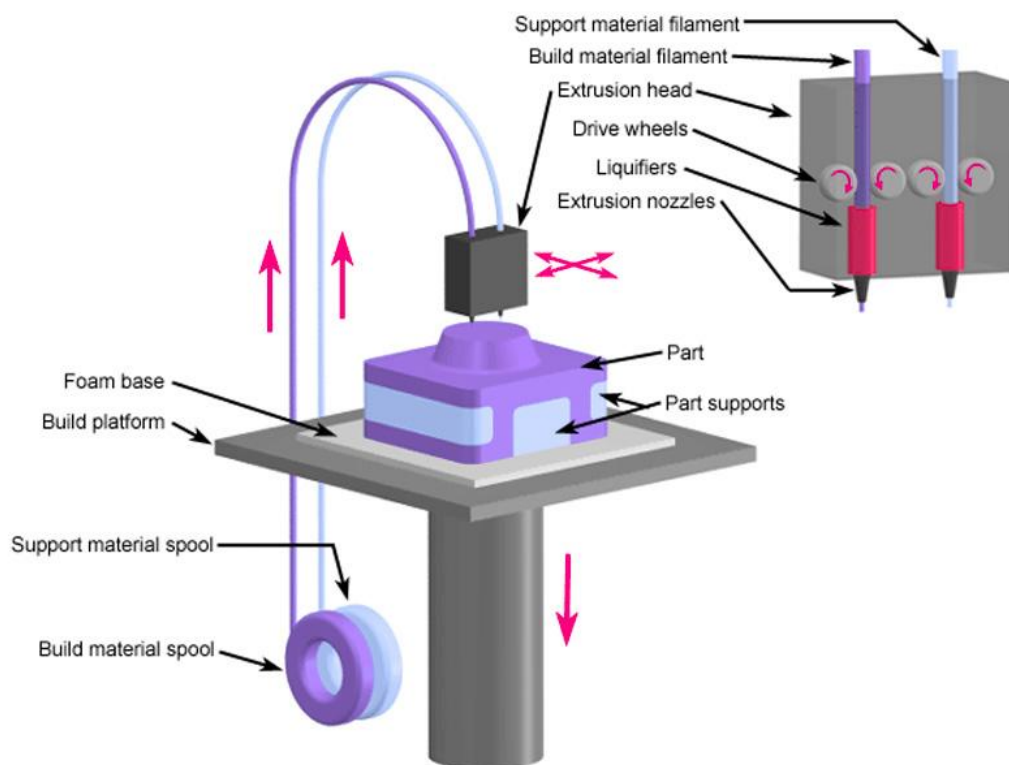


Рисунок 1.2 – Технологія тривимірного друку

Під час друку термопластиками виникає ряд технологічних проблем, пов'язаних із термічними процесами. Основною проблемою є нерівномірне охолодження надрукованої моделі. Після нанесення пластик поступово охолоджується та зменшується у розмірах, що призводить до виникнення внутрішніх механічних напружень. У результаті цього можуть спостерігатися:

- деформація виробу;
- викривлення геометрії;

- розтріскування моделі;
- відшарування окремих шарів;
- відрив кутів моделі від друкувального столу;
- погіршення точності друку.

Особливо сильно ці проблеми проявляються під час друку матеріалами ABS, Nylon, PETG та іншими інженерними пластиками, які мають значну термічну усадку. Навіть незначні перепади температури або потоки холодного повітря можуть суттєво впливати на якість виготовленого виробу.

Найзручнішим для друку та найменш вибагливим є пластик PLA. Даний матеріал характеризується невеликою термічною усадкою, хорошою адгезією до друкувального столу та відносно низькою температурою друку. PLA менш схильний до деформацій, викривлення геометрії та відшарування від столу у порівнянні з ABS та іншими інженерними пластиками. Проте навіть при використанні PLA закритого корпусу принтера не завжди достатньо для забезпечення якісного друку.

Практика експлуатації 3D-принтерів показує, що навіть під час друку PLA-пластиком можуть виникати дефекти, пов'язані з відшаруванням кутів моделі від друкувального столу (рис. 1.3).

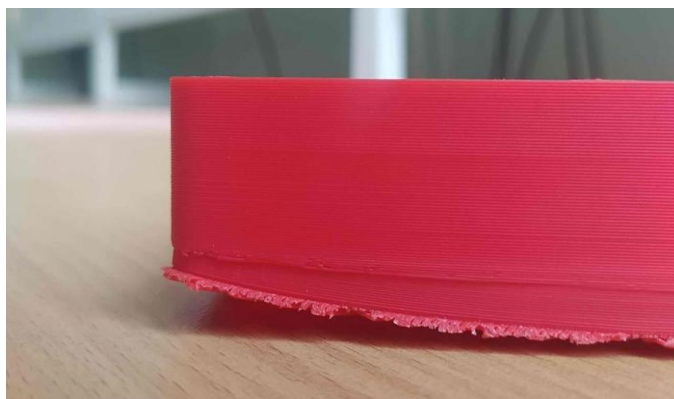


Рисунок 1.3 – Відшарування кутів моделі, надрукованої PLA пластиком на 3D-принтері Flashforge Adventurer 3

Ще більше проблем із відшаруванням моделей спостерігається при спробах друкувати пластиком ABS (рис. 1.4).

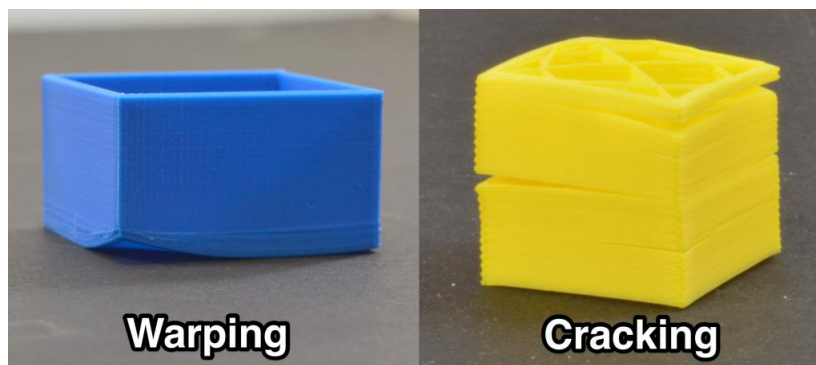


Рисунок 1.4 – Відшарування кутів моделі, надрукованої ABS пластиком

Цей пластик міцніший, але має два головні недоліки:

- під час друку видає неприємний і шкідливий запах;
- схильний до великої термодетформації при охолодженні, внаслідок чого відшаровується від столу сильніше, ніж PLA.

1.2 Огляд існуючих рішень

Описані вище проблеми при друці стримують появу 3D принтерів великого розміру, оскільки це призводить до вище згаданих проблем і роблять великий розмір осі Z а XY рідко коли перевищують 200x200мм. Користувачі борються з застосуванням різних сильних клейових складів, які частково вирішують проблему, але виникає нова проблема - відділення деталі від столу. Чим сильніша адгезія вашого складу тим більше шансів зіпсувати саму деталь і навіть поламати скло при відділенні деталі.

Як ми знаємо, пластик має усадку. У середньому усадка за лінійними розмірами становить від 0.3 до 2% залежно від типу пластику, який ми використовуємо. Усадка є зменшенням лінійних розмірів деталі після остигання пластику. Оскільки деталь приклеєна до столу, стіл не змінює своїх

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

розмірів, він перешкоджає цьому процесу усадки, і виникає сила (назвемо F для великих деталей і f для малих деталей)

Якщо деталь не велика, то сила f недостатня для відокремлення деталі від столу, і проблема не виникає. При перевищенні певного розміру сила f стає досить великою F і її сили вже вистачає для того, щоб кути деталі відійшли від столу (рис.1.5).

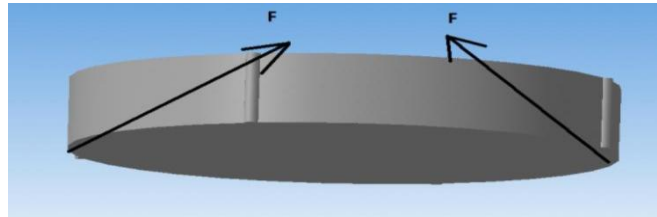


Рисунок 1.5 – Пояснення деламінації

Найпростіший варіант обійти проблему це поділ нижньої площини деталі лініями завтовшки 0.1 чи 0.3мм на глибину 5-8мм (рис.1.6).

Деталь друкується як багато дрібних деталей на висоту 5-8мм і далі вони об'єднуються в цілу деталь - на такій висоті вже процеси усадки біля поверхні столу зменшуються і деламінації не відбувається.

Залежно від розміру деталі, товщину щілини є сенс змінювати в діапазоні 0.1-0.3мм і глибину прорізу так само від 5 до 8-10 мм.

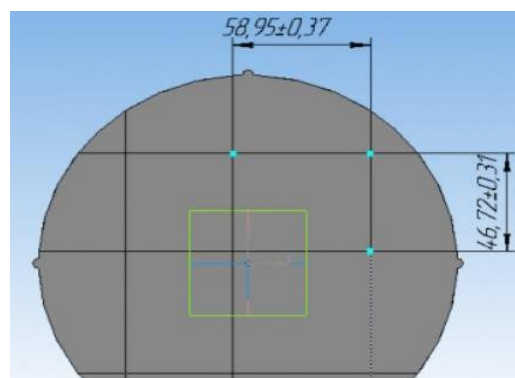


Рисунок 1.6 – Поділ нижньої частини моделі

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Цей та інші способи мають ряд недоліків: необхідність змащування столу клеєм або нанесення на нього двостороннього скотчу або зміною моделі та її міцності.

Для додаткової можливості налаштування друку добре матиме можливість регулювати температуру повітря всередині зони друку.

Більшість бюджетних та напівпрофесійних 3D-принтерів мають відкриту конструкцію робочої області (рис.1.7). У таких системах модель постійно піддається впливу навколишнього середовища, а температура в області друку залежить від температури приміщення, роботи вентиляції та випадкових потоків повітря. Це призводить до нестабільності температурного режиму та погіршення повторюваності результатів друку.

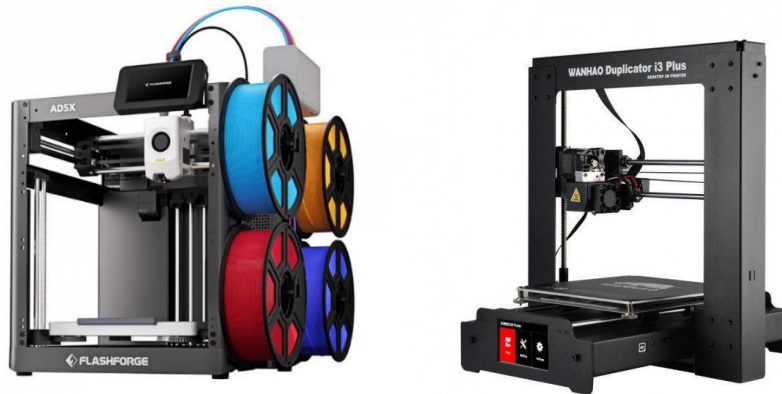


Рисунок 1.7 – Відкрита конструкція робочої області 3D-принтерів

Для зменшення впливу зовнішніх факторів у сучасних принтерах використовують закриті друкувальні камери (рис.1.8). Наявність закритого корпусу дозволяє частково стабілізувати температуру повітря всередині робочої області. Однак навіть у таких системах температура може змінюватися через нерівномірний нагрів, роботу вентиляторів, зміну температури навколишнього середовища та тепловиділення компонентів принтера.

У професійних та промислових моделях 3D-принтерів застосовуються спеціалізовані системи контролю робочої камери, які містять:

- датчики температури;

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

- системи підігріву повітря;
- засоби циркуляції повітря;
- мікропроцесорне керування;
- автоматичні алгоритми стабілізації температури.



Рисунок 1.8 – Закриті друкувальні камери робочої області 3D-принтерів

Прикладом є 3DGence Industry F340, який оснащений термокамерою з автоматичним підтриманням температури, системою контролю матеріалу та вбудованими засобами моніторингу параметрів друку. Максимальна температура друкувальної камери даного принтера становить 85 °С.

Для високотемпературного друку застосовується AON-M2, який підтримує температуру всередині камери до 120 °С. Такі системи використовуються для друку високотемпературними матеріалами типу PEEK та Ultem, однак характеризуються значною вартістю та складністю реалізації.

Подібні системи дозволяють підтримувати стабільні умови друку та значно покращують якість готових виробів. Проте промислові рішення мають високу вартість та складну конструкцію, тому їх використання у навчальних або побутових системах є економічно недоцільним.

1.3 Аналіз можливих рішень поставленого завдання

У зв'язку з цим актуальною є задача створення комп'ютерної системи контролю робочої зони 3D-принтера, яка забезпечуватиме автоматичний моніторинг температурних параметрів та підтримку заданого температурного режиму [2].

Система повинна реалізовувати функції збору, обробки та аналізу інформації від датчиків температури, а також формувати керуючі сигнали для виконавчих елементів. Центральним елементом такої системи доцільно використовувати мікроконтролер, який забезпечує:

- опитування датчиків;
- обробку вимірних значень;
- реалізацію алгоритмів регулювання;
- керування нагрівальними елементами;
- взаємодію з користувачем.

Однією з основних вимог до системи є забезпечення стабільності температурного режиму всередині робочої камери. Температура повинна підтримуватись автоматично відповідно до заданого значення. При цьому система має компенсувати теплову інерційність робочої області та вплив зовнішніх факторів.

Також важливо забезпечити рівномірний розподіл температури всередині робочої камери. Для цього система повинна містити вентилятор циркуляції повітря, або розподілену площу нагріву, що дозволить уникнути локальних перегрівів та температурних градієнтів.

Не менш важливою вимогою є забезпечення безпечного режиму роботи системи. При надмірному нагріванні робочої камери можуть перегріватися:

- крокові двигуни;
- драйвери двигунів;
- блок живлення;

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- пластикові елементи корпусу;
- електронні модулі принтера.

Тому система повинна працювати в обмеженому температурному діапазоні. На основі аналізу існуючих рішень та особливостей роботи FDM-принтерів доцільно обмежити максимальну температуру робочої камери значенням близько 70 °С. Точність підтримки температури повинна становити не більше ± 2 °С. Час виходу системи на заданий режим не повинен перевищувати 10–15 хв залежно від об'єму камери. Такі параметри температури є достатні для покращення умов друку більшістю термопластиків та одночасно безпечною для основних компонентів принтера.

Для забезпечення зручності використання система повинна мати інтерфейс користувача, який дозволить:

- встановлювати необхідну температуру;
- переглядати поточні параметри;
- контролювати режим роботи системи;
- змінювати параметри регулювання.

У ролі такого інтерфейсу може використовуватись LCD-дисплей із кнопками керування.

Важливою вимогою є також можливість реалізації різних алгоритмів автоматичного регулювання температури. Залежно від обраного алгоритму можуть змінюватися:

- швидкість виходу системи на задану температуру;
- величина перерегулювання;
- точність стабілізації;
- частота комутації виконавчих елементів.

Для реалізації системи можуть використовуватись:

- релейний алгоритм;
- пороговий алгоритм;
- пропорційне регулювання;

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- PID-регулювання;
- пороговий алгоритм з диференціальною складовою.

Для контролю температури можуть використовуватись цифрові датчики типу DS18B20 або термопари К-типу з модулем MAX6675. Цифрові датчики DS18B20 забезпечують:

- діапазон вимірювання від -55 до $+125$ °С;
- точність вимірювання $\pm 0,5$ °С;
- цифровий інтерфейс 1-Wire;
- можливість підключення декількох датчиків до однієї шини.

Для підігріву робочої камери можуть використовуватись керамічні нагрівачі або РТС-нагрівачі потужністю 50–150 Вт. Потужність нагрівального елемента визначається об'ємом камери, тепловими втратами та необхідною швидкістю виходу системи на робочий режим.

Для забезпечення рівномірного розподілу температури всередині камери доцільно використовувати вентилятори типорозміру 40–80 мм із напругою живлення 12 В. Швидкість повітряного потоку повинна бути достатньою для усунення локальних перегрівів, але не викликати надмірного охолодження моделі.

Ще однією важливою вимогою є простота конструкції та невисока вартість системи. Це дозволить використовувати розроблену систему не лише у промислових умовах, а й у навчальних лабораторіях, домашніх майстернях та малих виробництвах.

Таким чином, розроблювана комп'ютерна система повинна забезпечувати автоматичний контроль температури робочої зони 3D-принтера, підтримку стабільного температурного режиму, взаємодію з користувачем та можливість реалізації різних алгоритмів керування. Реалізація такої системи дозволить підвищити якість друку, зменшити кількість дефектів та забезпечити повторюваність результатів при використанні різних типів термопластичних матеріалів.

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

2.1 Розробка узагальненої структури комп'ютерної системи

Відповідно до результатів аналізу технологічних проблем FDM-друку, проведеного у першому розділі, було встановлено, що якість виготовлення виробів значною мірою залежить від температурного режиму робочої зони 3D-принтера. Основними причинами виникнення дефектів друку є нерівномірне охолодження моделі, термічна усадка пластику та вплив зовнішніх потоків повітря. Для зменшення впливу цих факторів доцільно застосувати комп'ютерну систему контролю робочої зони 3D-принтера, яка забезпечуватиме автоматичний моніторинг температурних параметрів та підтримку необхідного температурного режиму.

Систему будемо будувати за модульним принципом. Основними будуть підсистема вимірювання, керування, виконавчих механізмів, інтерфейсу користувача та системи живлення.

Центральним елементом системи є мікроконтролер, який виконує функції обробки інформації, реалізації алгоритмів регулювання та формування керуючих сигналів для виконавчих елементів. Мікроконтролер забезпечує опитування датчиків, аналіз температурних параметрів та підтримання заданого режиму роботи системи.

До мікроконтролера підключено підсистему датчиків, яка призначена для контролю температурних параметрів робочої області принтера. Система датчиків складається з:

- датчика температури повітря робочої камери;
- датчиків температури виконавчих механізмів 3D-принтера.

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Віцяк В. І.</i>			Проектна частина	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушіє</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Жаровський Р.</i>					21	19
<i>Реценз.</i>						ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Луцик Н.С.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Осухівська Г.М.</i>						

Датчик температури повітря використовується для контролю температурного режиму всередині робочої камери. Отримані дані передаються до мікроконтролера, де виконуються їх обробка та порівняння із заданим значенням температури [3].

Додатково система може контролювати температуру виконавчих механізмів принтера, зокрема крокових двигунів, драйверів та інших елементів, температура яких може підвищуватись у процесі роботи. Це дозволяє забезпечити безпечний режим експлуатації системи та запобігти перегріванню компонентів.

На основі інформації, отриманої від датчиків, мікроконтролер формує сигнали керування виконавчими механізмами. До складу виконавчих механізмів входять:

- нагрівальний елемент;
- вентилятор нагрівального елемента.

Нагрівальний елемент використовується для підігріву повітря всередині робочої камери 3D-принтера. Основним його завданням є підтримання необхідної температури робочої області та зменшення швидкості охолодження надрукованої моделі.

Вентилятор нагрівального елемента забезпечує циркуляцію теплого повітря всередині робочої камери. Це дозволяє уникнути локальних перегрівів та температурних градієнтів, а також забезпечує рівномірний розподіл температури в області друку.

Керування виконавчими механізмами здійснюється через спеціальний блок виконавчих механізмів, який виконує функції силової комутації навантаження. У ролі таких елементів можуть використовуватись MOSFET-транзистори або релейні модулі, які забезпечують комутацію нагрівального елемента та вентилятора відповідно до команд мікроконтролера.

Для забезпечення взаємодії користувача із системою передбачено інтерфейс користувача. До його складу входять:

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

- LED-дисплей;
- кнопки керування.

LED-дисплей використовується для відображення поточних параметрів роботи системи, зокрема температури робочої камери, встановленої температури та режиму роботи системи. Кнопки керування дозволяють користувачу змінювати параметри роботи, задавати необхідну температуру та вибрати режими регулювання [4].

Живлення системи здійснюється від окремого джерела живлення мікроконтролера та джерела живлення нагрівального елемента. Використання окремих джерел живлення дозволяє розділити силову та логічну частини системи, зменшити вплив імпульсних перешкод та підвищити стабільність роботи електронних компонентів.

Узагальнена структура розроблюваної системи наведена на рис. 2.1.

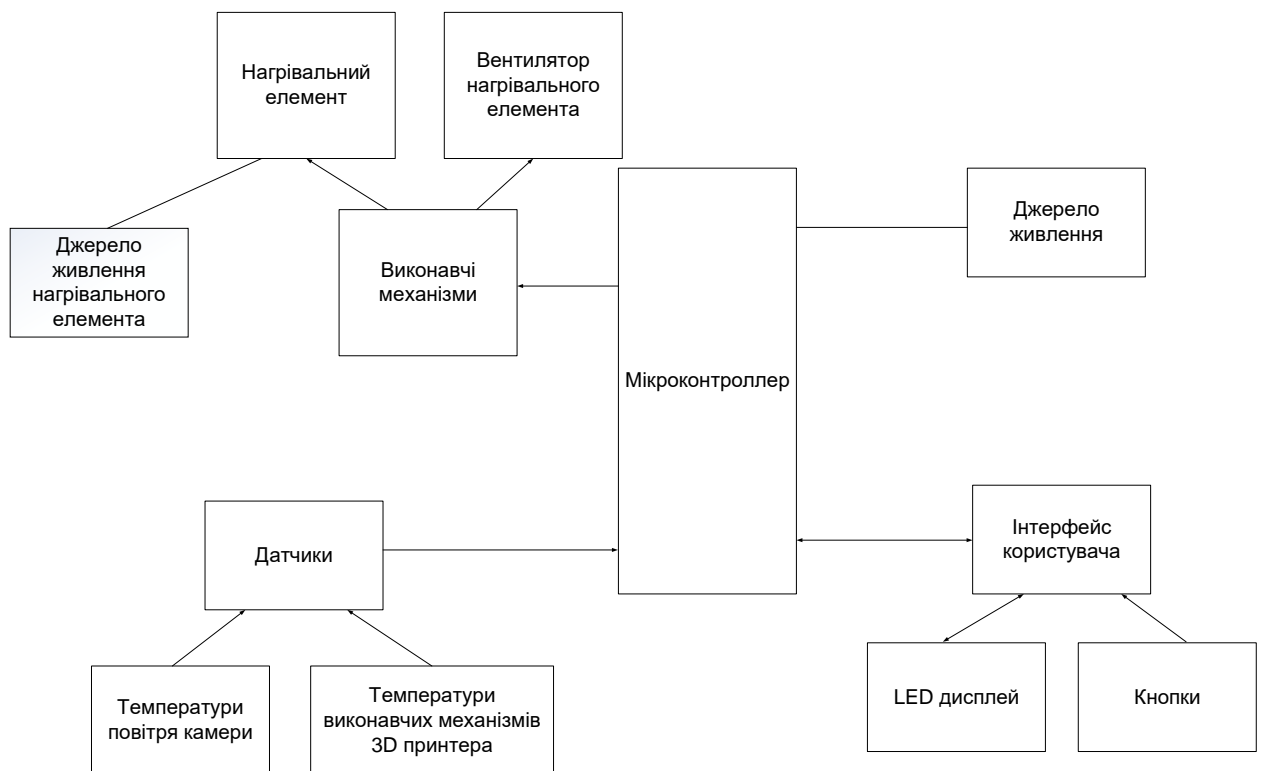


Рисунок 2.1 – Узагальнена структура комп’ютерної системи контролю робочої зони 3D-принтера

Запропонована структура системи дозволяє реалізувати автоматичний контроль температури робочої зони 3D-принтера, забезпечити стабільність температурного режиму та покращити якість друку термопластичними матеріалами. Модульна побудова системи забезпечує можливість її подальшої модернізації, розширення функціональних можливостей та адаптації до різних моделей 3D-принтерів.

2.2 Обґрунтування вибору апаратного забезпечення системи контролю робочої зони 3D принтера

Відповідно до розробленої структури комп'ютерної системи контролю робочої зони 3D-принтера необхідно обґрунтувати вибір основних апаратних компонентів системи. Основними критеріями вибору є:

- забезпечення необхідних технічних параметрів;
- сумісність компонентів;
- простота реалізації;
- надійність роботи;
- невисока вартість;
- можливість подальшої модернізації системи.

2.2.1 Вибір мікроконтроллера

Відповідно до рис. 2.1 центральним елементом системи є мікроконтролер, який виконує функції:

- опитування датчиків температури;
- обробки отриманих даних;
- реалізації алгоритмів регулювання;
- формування керуючих сигналів на транзистори;
- взаємодії з користувачем.

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Для реалізації системи було обрано платформу Arduino на базі мікроконтролера ATmega328P. Дане рішення характеризується простотою програмування, широкою підтримкою периферійних модулів та достатніми апаратними ресурсами для реалізації системи контролю температури [5, 6]. Основні характеристики мікроконтролера наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні технічні параметри мікроконтролера ATmega328P

Параметр	Значення
Тип мікроконтролера	ATmega328P
Архітектура	AVR, 8-біт
Тактова частота	16 МГц
Напруга живлення	5 В
Flash-пам'ять	32 КБ
SRAM	2 КБ
EEPROM	1 КБ
Кількість цифрових входів/виходів	14
Кількість PWM -виходів	6
Кількість аналогових входів	6
Розрядність АЦП	10 біт
Максимальний струм одного GPIO	40 мА
Інтерфейси зв'язку	UART, SPI, I2C
Підтримка переривань	Є
Робочий температурний діапазон	-40...+85 °С
Тип корпусу	DIP-28 / TQFP-32
Споживана потужність	Низька
Підтримка програмування	Arduino IDE
Основне призначення у системі	Керування датчиками та вик. мех.

2.2.2 Обґрунтування вибору температурних датчиків

Для забезпечення ефективної роботи системи необхідно здійснювати контроль двох основних температурних параметрів:

- температури повітря всередині робочої камери;
- температури друкуючої головки 3D-принтера.

Оскільки температурні режими цих вузлів суттєво відрізняються, доцільно використовувати різні типи датчиків температури.

Для контролю температури повітря робочої камери доцільно використовувати цифровий датчик DS18B20. Даний датчик забезпечує достатню точність вимірювання в діапазоні температур, необхідному для роботи системи контролю робочої зони. Основні характеристики датчика DS18B20 наведені в табл. 2.2.

Максимальна температура робочої камери в системі становить близько 70 °С, тому використання DS18B20 є цілком достатнім. Перевагами даного датчика є простота підключення, низька вартість та висока завадостійкість.

Для контролю температури друкуючої головки необхідно використовувати датчик, здатний працювати при значно вищих температурах [7, 8]. Температура сопла 3D-принтера під час друку може становити:

- для PLA: 190–220 °С;
- для ABS: 230–260 °С;
- для PETG: 220–250 °С;
- для Nylon: до 270 °С.

У зв'язку з цим для вимірювання температури друкуючої головки доцільно використовувати термопару К-типу з модулем MAX6675 або MAX31855 (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Основні технічні параметри датчиків температури

Параметр	DS18B20	Термопара К-типу + MAX6675
Призначення	Температура камери	Температура друкуючої головки
Діапазон вимірювання	-55...+125 °С	0...+1000 °С
Точність	±0,5 °С	±2 °С
Тип виходу	Цифровий	Цифровий
Інтерфейс	1-Wire	SPI
Напруга живлення	3–5 В	3,3–5 В
Роздільна здатність	9–12 біт	0,25 °С
Стійкість до високих температур	Середня	Висока
Основна перевага	Простота підключення	Робота при високих температурах

Використання двох різних типів датчиків дозволяє оптимізувати систему відповідно до умов роботи окремих вузлів 3D-принтера. Датчик DS18B20 забезпечує точний контроль температури повітря робочої камери, тоді як термопара К-типу дозволяє контролювати високотемпературний режим друкуючої головки.

2.2.3 Обґрунтування вибору нагрівального елемента

Одним з важливих параметрів при виборі теплової потужності нагрівального елемента необхідно враховувати розмір камери друку 3D принтера. В цій роботі при виборі геометричних розмірів термокамери спиратимемося на реальні розміри 3D принтера Flashforge Adventurer 3, що має зону друку 150x150x150мм. При такій зоні друку принтер має габаритні розміри камери друку: висота $h=35$ см, ширина $b=30$ см, глибина $a=35$ см

Підсумковий об'єм:

$$V = h \cdot b \cdot a = 35 \cdot 30 \cdot 35 = 36750 \text{ см}^3 \approx 37 \text{ л.} \quad (2.1)$$

Маса повітря в такому обсязі становитиме

$$m = V \cdot \rho = 37 \cdot 1,2 = 44,4 \text{ г,} \quad (2.2)$$

де $\rho = 1.2$ г/л - щільність повітря при температурі 20 С. (при підвищенні температури до 70 °С щільність повітря зменшується до 1.0 г/л).

Маса повітря розрахована в (2.2) є дуже мала в порівнянні з масою пластикових деталей огорожувальної конструкції, та інших елементів, що є всередині принтера. Тому основною теплоємністю володітимуть саме елементи принтера, а не саме повітря.

Основні втрати потужності будуть припадати на теплопередачу назовні принтера, що відбувається через пластикові поверхні. Для передачі тепла

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повітря нагріє пластикові огороджувальні поверхні, а потім вони будуть віддавати тепло у зовнішнє середовище.

Таким чином, тепловий опір складатиметься з:

- R1 - тепловий опір у внутрішнього повітря – пластик;
- R2 - тепловий опір залежний від товщини пластику;
- R3 - тепловий опір пластик – зовнішнє повітря.

Товщину пластикових поверхонь прийемо 3 мм. Для проведення теплового розрахунку скористалися спеціалізованим програмним пакетом MathCAD (рис. 2.2).

Тепловий опір пластикової коробки 35x35x30 см з товщиною стінок 3мм

$h := 0.35$ $a := 0.3$ $b := 0.35$ $d := 0.003$ m

Температура всередині камери T1 та зовн. повітря T3 $T1 := 70$ $T3 := 20$ C

Площа поверхні $S := (h \cdot a + h \cdot b + b \cdot a) \cdot 2 = 0.665$ m^2

Коефіцієнт конвективної тепловіддачі повітря $\alpha := 8.7$ $\frac{Br}{m^2 \cdot K}$

Ступінь чорноти пластику $\beta := 0.85$

Постійна Стефана - Больцмана $\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8}$ $\frac{Br}{m^2 \cdot K^4}$

Питома теплопровідність пластику $\lambda := 0.2$ $\frac{Br}{m \cdot K}$

1 Тепловий опір повітря-внутрішня поверхня $R1 := \frac{1}{\alpha \cdot S} = 0.173$ $\frac{K}{Br}$

2 Тепловий опір залежний від товщини пластику $R2 := \lambda \cdot \frac{d}{S} = 9.023 \times 10^{-4}$ $\frac{K}{Br}$

3. Тепловий опір пластик – зовнішня поверхня

3.1. Тепловий опір конвективної тепловіддачі $R3' := \frac{1}{\alpha \cdot S} = 0.173$ $\frac{K}{Br}$

3.2 Тепловий опір випромінюванню

Для першого етапу розрахунку температуру поверхні пластику встановимо, на рівні середньої між температурою повітря всередині та ззовні. $T2 := \frac{T1 + T3}{2} = 45$ C

Після проведення розрахунку із п. 6 візьмемо уточнену температуру T2 $T2 := 39$ C

Тепловий потік, що випромінюється поверхнею

$$Q3 := S \cdot \beta \cdot \sigma \cdot [(T2 + 273)^4 - (T3 + 273)^4] = 67.49$$
 Br

Тепловий опір $R3'' := \frac{T2 - T3}{Q3} = 0.282$ $\frac{K}{Br}$

Тепловий опір пластик - зовнішня поверхня $R3 := \frac{R3' \cdot R3''}{R3' + R3''} = 0.107$ $\frac{K}{Br}$

4. Сумарний повний тепловий опір $R := R1 + R2 + R3 = 0.281$ $\frac{K}{Br}$

5. Потужність втрат у довкілля $Q := \frac{(T1 - T3)}{R} = 178.036$ Br

6 Виконаємо корегувальний розрахунок

Температура пластику (тепловим опором товщини пластику нехтуємо) $T2' := T1 - Q \cdot R1 = 39.227$ C

Температура зовнішнього повітря $T3' := T2' - Q \cdot R3 = 20.161$ C

Температура T3' отримана рівною температурі навколишнього повітря, отже корегувальний розрахунок вірний

Рисунок 2.2 – Тепловий розрахунок у програмному пакеті MathCAD

В результаті розрахунку було отримано значення теплової потужності втрат у доквілля $Q=178$ Вт. Якщо система, що розробляється, матиме таку потужність, то максимальна температура буде нагрівати середовище камери друку до заданих 70°C . Але встановиться така температура за дуже тривалий проміжок часу. Тому система, що розробляється, повинна мати запас по потужності. У таких системах рекомендується мати запас 30..50 %. Прийmemo потужність нагрівача $P = 240$ Вт, що на 35 % більше, ніж розраховане $Q=178$ Вт.

Використання нагрівача з потужністю, рівною лише тепловим втратам, призводило б до тривалого виходу системи на робочий температурний режим та недостатньої стабільності роботи при зміні зовнішніх умов. Тому для забезпечення необхідного запасу потужності було прийнято рішення збільшити потужність нагрівача приблизно на 35 %. У результаті номінальна потужність нагрівального елемента була обрана рівною 240 Вт.

Для живлення нагрівального елемента використовується напруга 24 В постійного струму. Вибір напруги 24 В обумовлений такими причинами:

- безпечніший рівень напруги у порівнянні з мережею 230 В;
- сумісність із більшістю компонентів 3D-принтерів;
- можливість використання стандартних імпульсних блоків живлення;
- зменшення теплових втрат у силових елементах;
- простота реалізації PWM -керування.

При потужності нагрівача 240 Вт необхідний робочий струм становить:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{240}{24} = 10 \text{ А.}$$

Необхідний опір нагрівального елемента:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{24}{10} = 2,4 \text{ Ом.}$$

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

У ролі нагрівального елемента було обрано ніхромовий дріт. Дане рішення є технічно та економічно доцільним завдяки:

- низькій вартості матеріалу;
- доступності;
- простоті виготовлення нагрівача;
- високій термостійкості;
- можливості отримання необхідної потужності;
- довговічності в умовах циклічного нагріву.

Для практичної реалізації використовувався ніхромовий дріт діаметром 1,2 мм із питомим опором приблизно 0,46 Ом/м.

Необхідна довжина дроту для отримання опору 2,4 Ом визначається за формулою:

$$l = \frac{R}{\alpha} = \frac{2,4}{0,46} \approx 5,22 \text{ м.}$$

Проведені експериментальні дослідження показали, що при струмі 10 А температура дроту значно перевищує 100 °С, що є достатнім для нагрівання повітря всередині робочої камери до необхідної температури.

Використання ніхромового дроту дозволяє реалізувати нагрівальний елемент із мінімальними фінансовими витратами без необхідності застосування спеціалізованих промислових нагрівачів. Крім цього, конструкція нагрівача може бути легко модифікована шляхом зміни довжини або конфігурації дроту для отримання іншої теплової потужності.

Для забезпечення ефективного теплообміну ніхромовий дріт доцільно розмістити всередині циліндричного каркаса з примусовою циркуляцією повітря. Таке конструктивне рішення забезпечує:

- рівномірне нагрівання повітря;
- зменшення локальних перегрівів;
- підвищення ефективності теплопередачі;

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- охолодження самого нагрівального елемента;
- компактність конструкції.

Таким чином, використання нагрівального елемента на основі ніхромового дроту є технічно обґрунтованим та економічно доцільним рішенням для системи контролю робочої зони 3D-принтера.

2.2.4 Обґрунтування вибору блоку живлення

Для забезпечення роботи системи контролю робочої зони 3D-принтера необхідно реалізувати два окремі кола живлення:

- силове коло живлення нагрівального елемента та вентилятора;
- коло живлення мікроконтролера та цифрових компонентів системи.

Розділення системи живлення на силову та логічну частини дозволяє:

- зменшити вплив імпульсних перешкод;
- підвищити стабільність роботи мікроконтролера;
- зменшити ймовірність збоїв під час комутації нагрівача;
- підвищити електробезпеку системи;
- спростити реалізацію силових частини.

Основним споживачем електричної енергії є нагрівальний елемент. Додатково від силового джерела живлення працює вентилятор циркуляції повітря.

Потужність нагрівального елемента: $P_n = 240 \text{ Вт}$.

Напруга живлення нагрівача: $U = 24 \text{ В}$.

Необхідний струм навантаження: $I = 10 \text{ А}$.

Струм вентилятора становить приблизно 0,08 А, тому сумарний струм навантаження:

$$I_{\text{заг}} \approx 10 + 0,08 = 10,08 \text{ А}$$

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для забезпечення надійної роботи системи блок живлення повинен мати запас по струму не менше 30–50 %. Це необхідно для:

- компенсації пускових струмів;
- зменшення навантаження на елементи блока живлення;
- забезпечення стабільності напруги;
- можливості подальшого збільшення потужності нагрівача.

У результаті було обрано імпульсний блок живлення 24 В, 15 А, 360 Вт.

Основні технічні параметри блока живлення:

- вихідна напруга – 24 В;
- максимальний струм – 15 А;
- максимальна потужність – 360 Вт;
- тип – імпульсний;
- ККД – понад 80 %;
- захист від короткого замикання;
- захист від перевантаження;
- захист від перенапруги.

Для живлення мікроконтролера Arduino, LCD-дисплея, температурних датчиків та інших цифрових компонентів необхідна стабілізована напруга 5 В.

Система керування споживає відносно невеликий струм:

- Arduino Uno/Nano – до 50 мА;
- LCD Shield – до 30 мА;
- датчики температури – до 5 мА;
- допоміжні компоненти – до 20 мА.

Сумарний струм споживання логічної частини не перевищує 150–200 мА. Для живлення логічної частини доцільно використати окремий блок живлення 5 В або DC-DC понижувальний перетворювач 24→5 В. Найбільш доцільним рішенням є використання імпульсного понижувального DC-DC перетворювача. У ролі такого перетворювача може використовуватись модуль на базі LM2596.

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Основні параметри DC-DC перетворювача:

- вхідна напруга – до 40 В;
- вихідна напруга – 5 В;
- максимальний струм – до 3 А;
- ККД – до 90 %;
- регулювання вихідної напруги;
- захист від перегріву та короткого замикання.

Використання окремого перетворювача для логічної частини дозволяє: забезпечити стабільне живлення мікроконтролера, зменшити рівень перешкод, уникнути просідання напруги під час роботи нагрівача, підвищити надійність системи.

Таким чином, для живлення системи контролю робочої зони 3D-принтера доцільно використовувати два окремі кола живлення:

- силове джерело 24 В, 15 А, 360 Вт для нагрівального елемента та вентилятора;
- DC-DC перетворювач 24→5 В для живлення мікроконтролера та цифрових компонентів системи.

2.3 Обґрунтування вибору програмного забезпечення

Для реалізації комп'ютерної системи контролю робочої зони 3D-принтера необхідно використовувати програмні засоби, які забезпечують розробку, компіляцію, налагодження та завантаження програмного забезпечення у мікроконтролер. Оскільки апаратною основою системи є мікроконтролер Arduino на базі ATmega328P, основним середовищем розробки було обрано Arduino IDE (рис.2.4).

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

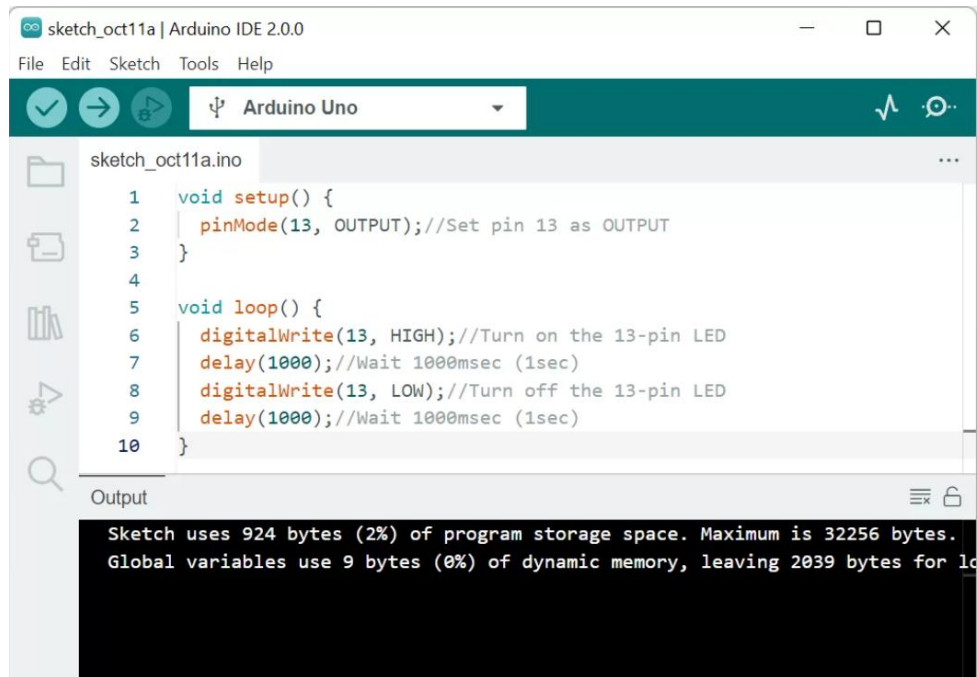


Рисунок 2.4 - Середовище розробки

Дане середовище забезпечує написання програмного коду мовою C/C++, компіляцію проекту, автоматичне підключення бібліотек та завантаження прошивки у пам'ять мікроконтролера через USB-інтерфейс.

Для реалізації програмного забезпечення використовується мова програмування C/C++, яка забезпечує високу швидкодію та ефективне використання апаратних ресурсів мікроконтролера. Використання даної мови є доцільним для систем реального часу, оскільки вона дозволяє реалізувати алгоритми автоматичного регулювання температури з мінімальними затримками.

Для роботи з LCD-дисплеєм використовується бібліотека LiquidCrystal. Дана бібліотека забезпечує керування символьними LCD-дисплеями на базі контролера HD44780 та дозволяє реалізувати: виведення текстової інформації, відображення температурних параметрів, індикацію режимів роботи системи, формування інтерфейсу користувача.

Використання бібліотеки LiquidCrystal значно спрощує роботу з дисплеєм та дозволяє уникнути низькорівневого програмування контролера дисплея.

Для реалізації обміну даними з цифровим датчиком температури DS18B20 використовується бібліотека OneWire. Вона забезпечує програмну реалізацію протоколу 1-Wire, який використовується для зв'язку між мікроконтролером та датчиком температури. Особливістю 1-Wire є можливість підключення декількох датчиків до однієї сигнальної лінії, що дозволяє спростити структуру системи та зменшити кількість з'єднувальних провідників.

Для спрощення роботи з датчиками DS18B20 додатково використовується бібліотека DallasTemperature. Вона реалізує високорівневі функції: ініціалізації датчиків, запуску вимірювання температури, зчитування температурних значень, налаштування роздільної здатності вимірювання.

Для обміну даними між мікроконтролером та персональним комп'ютером використовується стандартна бібліотека Serial. Вона забезпечує передачу даних через UART-інтерфейс та використовується для: налагодження програмного забезпечення, контролю параметрів роботи системи, візуалізації температурних графіків, аналізу роботи алгоритмів регулювання.

Передавання даних через Serial Plotter дозволяє в реальному часі спостерігати зміну температури та оцінювати стабільність роботи системи регулювання.

Для реалізації автоматичного регулювання температури використовується програмна реалізація PID-алгоритму. Крім PID – регулювання у програмному забезпеченні реалізовано також пороговий, релейний та порогово-диференціальний алгоритми керування, що дозволяє проводити порівняння ефективності різних методів регулювання температури.

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Для керування потужністю нагрівального елемента використовується PWM - регулювання, яке реалізується апаратними засобами мікроконтролера. Широтно-імпульсна модуляція дозволяє плавно змінювати потужність нагріву та підвищує енергоефективність системи.

Таким чином, використання середовища Arduino IDE, мови програмування C/C++ та спеціалізованих бібліотек LiquidCrystal, OneWire, DallasTemperature і Serial є технічно обґрунтованим рішенням для реалізації програмного забезпечення системи контролю робочої зони 3D-принтера.

2.4 Проектування комп'ютерного засобу

Наступним етапом після вибору необхідних базових компонентів є розробка функціональної схеми [16]. Функціональна схема комп'ютерної системи контролю робочої зони 3D-принтера наведена на рис. 2.5. Вона відображає взаємодію основних функціональних вузлів системи та принцип передачі сигналів між окремими компонентами.

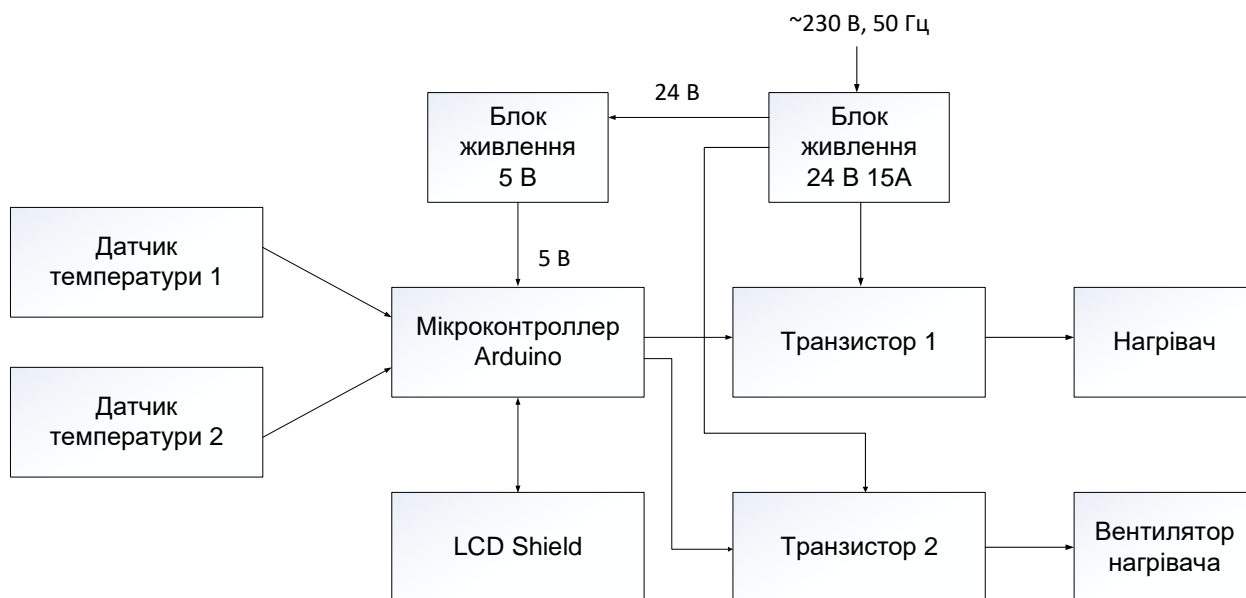


Рисунок 2.5 – Функціональна схема

Основним елементом системи є мікроконтролер Arduino. До мікроконтролера підключені датчики температури, LCD Shield та силові ключі керування нагрівальним елементом і вентилятором. Отримані значення температури передаються до мікроконтролера, де виконуються їх обробка та аналіз.

На основі отриманих даних мікроконтролер формує сигнали керування виконавчими елементами системи [17]. Для комутації силових навантажень використовуються транзисторні ключі, оскільки мікроконтролер працює з логічними рівнями 5 В і не може безпосередньо комутувати потужні навантаження. Транзистор 1 призначений для керування нагрівальним елементом, а транзистор 2 - для керування вентилятором нагрівача.

Потужність нагрівального елемента становить 240 Вт при напрузі живлення 24 В. Робочий струм нагрівача $I = 10$ А. Таким чином, транзистор повинен забезпечувати комутацію струму не менше 10 А з урахуванням запасу надійності.

Для керування нагрівальним елементом було обрано MOSFET-транзистор IRLZ44N. Вибір даного транзистора обумовлений його технічними характеристиками та сумісністю з логічними рівнями Arduino.

Основні параметри транзистора IRLZ44N:

- тип транзистора — N-канальний MOSFET;
- максимальна напруга стік-витік — 55 В;
- максимальний струм стоку — 47 А;
- опір відкритого каналу $R_{ds(on)}$ — приблизно 0,022 Ом;
- керування логічним рівнем 5 В;
- корпус TO-220.

Керування нагрівальним елементом може здійснюватися як у релейному режимі, так і за допомогою PWM - регулювання. Широтно-імпульсна модуляція дозволяє плавно змінювати потужність нагріву та забезпечувати стабільніше підтримання температурного режиму. Максимальний допустимий

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

струм транзистора майже у 4,7 раза перевищує робочий струм нагрівача. Транзистор повністю відкривається при напрузі керування 5 В без використання додаткових драйверів.

Низький опір відкритого каналу дозволяє зменшити втрати потужності на транзисторі. Потужність, яка виділяється на транзисторі при струмі 10 А:

$$P = I^2 \cdot R = 10^2 \cdot 0,022 = 2,2 \text{ Вт.}$$

Отримане значення свідчить про необхідність встановлення невеликого радіатора для відведення тепла від транзистора при тривалій роботі системи.

Використання MOSFET-транзистора також дозволяє реалізувати PWM - регулювання потужності нагрівача, що забезпечує:

- плавне регулювання температури;
- зменшення температурних коливань;
- підвищення точності стабілізації;
- зниження навантаження на нагрівальний елемент.

Для циркуляції повітря використовується вентилятор RX 6015MS із напругою живлення 24 В та струмом споживання приблизно 0,08 А. Оскільки струм вентилятора є незначним, для його керування доцільно використовувати малопотужний транзистор. У ролі силового ключа вентилятора було обрано біполярний транзистор BC547B типу NPN.

Основні параметри транзистора:

- максимальна напруга колектор–емітер — 50 В;
- максимальний струм колектора — 0,2 А;
- коефіцієнт підсилення струму $h_{21e} = 200 \dots 500$;
- корпус TO-92.

Максимальний струм транзистора: $0,2 \text{ А} > 0,08 \text{ А}$, отже, транзистор забезпечує необхідний запас по струму приблизно у 2,5 раза.

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Для захисту транзисторів від імпульсних перенапруг, які виникають під час вимикання індуктивних навантажень, у схемі передбачені захисні діоди.

Таким чином, використання MOSFET-транзистора IRLZ44N для керування нагрівальним елементом та транзистора BC547B для керування вентилятором є технічно обґрунтованим рішенням та забезпечує надійну роботу системи контролю робочої зони 3D-принтера.

Для взаємодії користувача із системою використовується LCD Shield, який містить символічний дисплей та кнопки керування. LCD Shield дозволяє відображати: поточну температуру камери, встановлену температуру, стан нагрівача, режим роботи системи.

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

3.1 Електрична схема системи контролю робочої зони 3D-принтера

Електрична схема комп'ютерної системи контролю робочої зони 3D-принтера розроблена відповідно до функціональної схеми пристрою та обраного апаратного забезпечення описаного в попередньому розділі.

Для контролю температури робочої камери використовується цифровий датчик DS18B20. Датчик підключається до цифрового входу мікроконтролера через інтерфейс 1-Wire. Для коректної роботи шини між сигнальною лінією та напругою живлення встановлюється підтягувальний резистор номіналом 4,7 кОм.

Другий температурний датчик використовується для контролю температури друкуючої головки або виконавчих механізмів 3D-принтера. Для вимірювання високих температур використовується термопара К-типу з модулем MAX6675. Модуль підключається до мікроконтролера через SPI-інтерфейс.

Для відображення параметрів роботи системи використовується LCD Keypad Shield. Даний модуль підключається безпосередньо до Arduino та забезпечує відображення необхідної інформації.

Кнопки LCD Shield використовуються для зміни параметрів системи та вибору режимів роботи.

Керування нагрівальним елементом реалізується за допомогою MOSFET-транзистора IRLZ44N. Затвор транзистора підключається до PWM-виходу мікроконтролера через обмежувальний резистор. Нагрівальний елемент підключається до джерела живлення 24 В через MOSFET-транзистор за схемою комутації по «низькій стороні». При подачі керуючого сигналу

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Віцяк В. І.</i>			Практична частина	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркуші</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Жаровський Р.</i>					40	11
<i>Реценз.</i>						ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Луцик Н.С.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Осухівська Г.М.</i>						

транзистор відкривається та забезпечує проходження струму через ніхромовий нагрівач.

Для захисту транзистора та зменшення впливу імпульсних завад у схемі передбачено:

- резистор підтягування затвора до землі;
- захисні діоди для індуктивних навантажень.

Для керування вентилятором використовується окремий транзисторний ключ. Оскільки вентилятор має відносно невеликий струм споживання, у ролі силового ключа використовується транзистор BC547B. Керування вентилятором здійснюється цифровим виходом мікроконтролера. Розроблена електрична схема пристрою наведена на КС КРБ 123.153.00.00 ЕЗ.

3.2 Програмна частина

Програмна частина системи реалізована мовою C++ у середовищі Arduino IDE та забезпечує керування температурним режимом робочої зони 3D-принтера, обробку даних із датчика температури, формування сигналів керування нагрівачем та взаємодію з користувачем [12].

Для реалізації роботи дисплея та температурного датчика у програмі використовуються бібліотеки:

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
```

Бібліотека LiquidCrystal забезпечує роботу LCD Keypad Shield, OneWire реалізує інтерфейс 1-Wire, а DallasTemperature використовується для роботи з датчиком DS18B20.

Ініціалізація дисплея виконується командою:

```
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7);
```

Цифрові контакти D4–D9 використовуються для передачі команд та даних до LCD-дисплея.

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для підключення температурного датчика використовується аналоговий вхід А1:

```
#define ONE_WIRE_BUS A1
```

У програмі задаються основні параметри роботи системи:

- задана температура;
- коефіцієнти регулювання;
- період оновлення даних;
- параметри PID-регулятора.

Задана температура зберігається у змінній:

```
byte Tz = 50;
```

Керування нагрівальним елементом здійснюється через MOSFET-транзистор, підключений до цифрового виходу D3:

```
int VT_PIN = 3;
```

У програмі реалізовано декілька алгоритмів керування температурою:

- релейний;
- пороговий;
- порогово-диференціальний;
- PID-регулювання.

Основним алгоритмом, який використовується у системі, є порогово-диференціальний алгоритм. Для цього у програмі обчислюється швидкість зміни температури:

$$dT = dT * 0.8 + (T - T_{last}) * 0.2;$$

Після цього виконується прогнозування подальшого нагріву:

$$T_r = T + kDp * dT;$$

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримане значення використовується для формування сигналу керування нагрівачем:

```
VT = (Tz > Tr ? 1 : 0);  
digitalWrite(VT_PIN, VT);
```

Також реалізовано PID-регулювання. При цьому використовуються коефіцієнти:

```
float kP = 50, kI = 0.6, kD = 800;
```

Обчислення PID-сигналу виконується виразом:

```
pid = kP * err + kI * integral + kD * dif;
```

Для обмеження керуючого сигналу використовується функція:

```
PID = constrain(pid, 0, 100);
```

Система обробки кнопок LCD Keypad Shield реалізована наступним чином. Зчитування натискань виконується через аналоговий вхід A0:

```
int buttonValue = analogRead(0);
```

Зміна заданої температури здійснюється кнопками UP та DOWN:

```
if (Tz <= 80) Tz = Tz + 10;  
if (Tz >= 20) Tz = Tz - 10;
```

Для виведення інформації на дисплей використовується функція LCD_Print(). На дисплей виводяться:

- поточна температура;
- задана температура;
- стан нагрівального елемента.

Виведення температури реалізується командами:

```
lcd.print(T, 1);  
lcd.print(Tz);
```

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Для експериментальних досліджень та побудови графіків реалізовано функцію `SerialPortPlotter()`, яка передає дані через послідовний порт:

```
Serial.print(T);  
Serial.print(Tz);
```

Передавання даних через `Serial Port` використовувалось для побудови часових діаграм роботи алгоритмів керування температурою.

Основний цикл роботи програми реалізований у функції `loop()`. У ньому виконується:

- зчитування температури;
- обчислення керуючого сигналу;
- керування нагрівачем;
- оновлення дисплея;
- обробка кнопок;
- передавання даних через `Serial Port`.

Період виконання циклу становить 1000 мс:

```
int period = 1000;
```

Програмна частина забезпечує моніторинг і автоматичне підтримання температурного режиму робочої зони 3D-принтера та дозволяє дослідити різні алгоритми керування температурою [12, 13]. Загальний алгоритм роботи наведено в графічній частині кваліфікаційної роботи.

3.3 Експериментальне дослідження

Експериментальні дослідження проводили на декількох алгоритмах керування. Роздільна здатність вимірювання температури датчиком становила $1/16 \text{ }^\circ\text{C} = 0,0625 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для вибору найкращого алгоритму управління було вирішено провести експериментальну апробацію кількох алгоритмів для стабілізації температури на рівні $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3.1 Релейний алгоритм

Найпростішим алгоритмом керування вважається релейний алгоритм. Було вибрано гістерезис $\Delta T = \pm 1^\circ\text{C}$. Виходять два порогові значення заданої температури.

Наприклад, верхній $T_v = T_z + \Delta T = 51^\circ\text{C}$ та нижній $T_n = T_z - \Delta T = 49^\circ\text{C}$. Якщо реальна температура нижче нижнього значення T_n – вмикається нагрівання. При досягненні верхнього T_v здійснюється вимкнення нагріву. Часові діаграми роботи системи згідно з цим алгоритмом наведено на рис. 3.1.

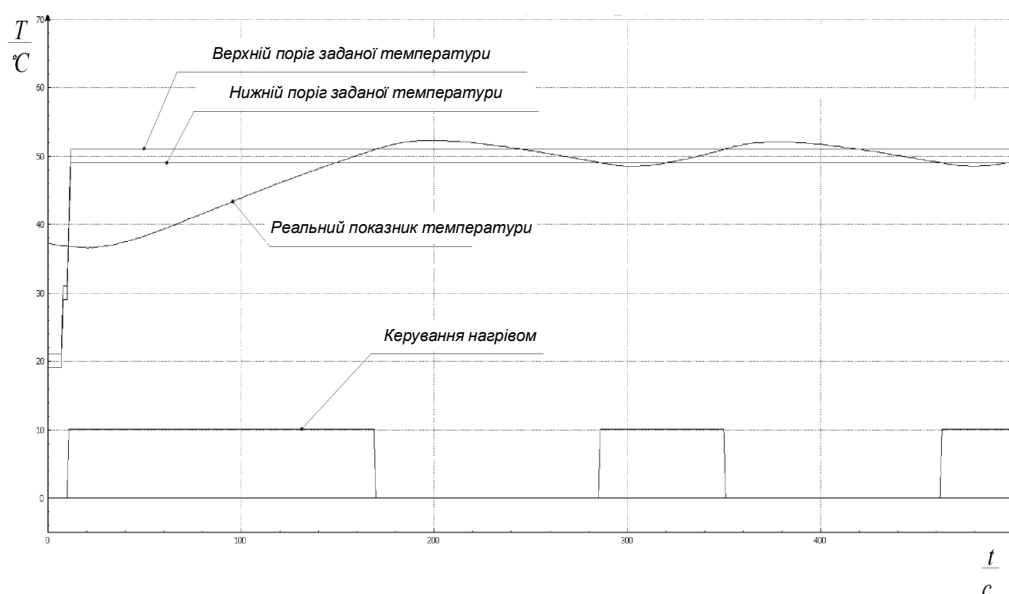


Рисунок 3.1 – Часові діаграми роботи при релейному алгоритмі.

3.3.2 Пороговий алгоритм

При релейному алгоритмі шириною гістерезису можна регулювати частоту включення транзистора. MOSFET-транзистор допускає високу частоту комутації, тому гістерезис може бути зменшений до $\Delta T = 0$. І тут релейний алгоритм перетворюється на пороговий алгоритм. У порівнянні з релейним пороговий має більшу частоту комутації транзистора, але і меншу величину нестабільності температури.

Часові діаграми роботи згідно з цим алгоритмом наведено на рис. 3.2.

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

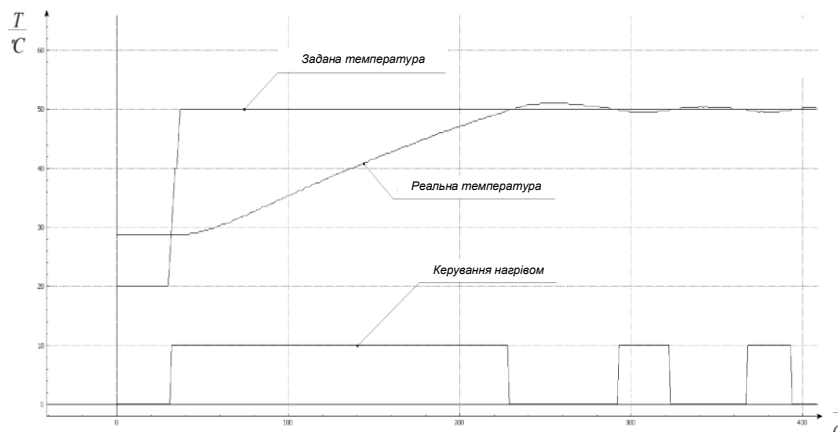


Рисунок 3.2 – Часові діаграми роботи при пороговому алгоритмі.

3.3.3 Пороговий алгоритм із диференціальною складовою

При пороговому алгоритмі спостерігається невелике перерегулювання за температурою. При досягненні заданої температури нагрівання вимикається, проте за інерцією температура підвищується на 1,5 градуса. Для зменшення цього ефекту можна вимкати нагрівання трохи заздалегідь до досягнення заданої температури. Для цього необхідно визначити швидкість наростання температури та помножити її на коефіцієнт k_{Dp} . Отримане значення називається диференціальною складовою (рис. 3.3). Його додають до реальної температури T і вже отримане значення порівнюють із заданою температурою. Таким чином, вимкнення нагрівання відбувається трохи раніше і зменшується величина перегріву.

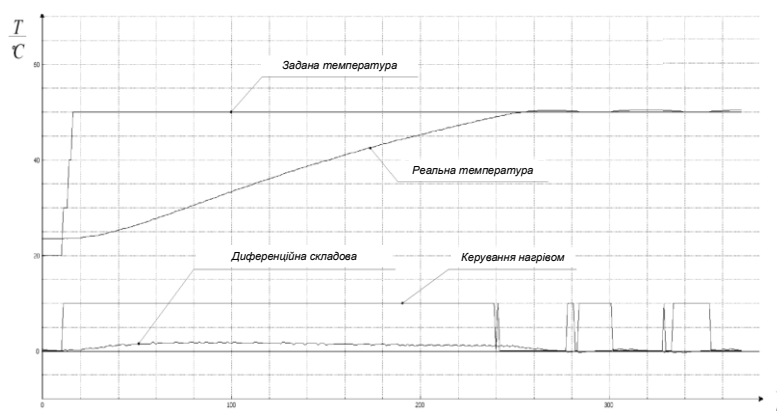


Рисунок 3.3 – Часові діаграми роботи при пороговому алгоритмі з диференціальною складовою

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ

Арк.

46

3.3.4 Пропорційний алгоритм

Усі вище випробувані алгоритми [15] передбачали регулювання нагріву у двох станах: повністю увімкнено і повністю вимкнено. Існує можливість плавного регулювання нагріву за допомогою PWM-регулювання. Тобто середня потужність нагріву регулюється зміною коефіцієнта заповнення PWM-сигналу. В Arduino це реалізується командою analogWrite (рис. 3.4).

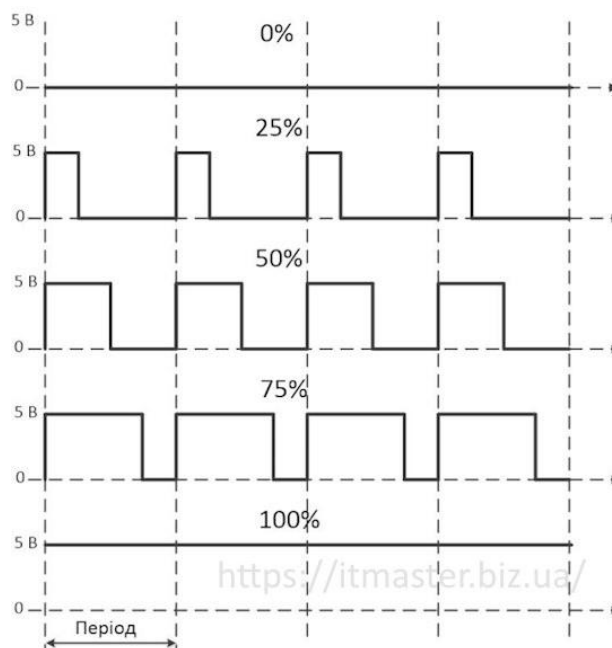


Рисунок 3.4 – Організація PWM в Ардуіно.

У найпростішому випадку сигнал для PWM-керування можна отримувати як різницю між заданою та реальною температурою, помножену на деякий коефіцієнт:

$$PWM = (T_z - T) \cdot k_P.$$

До недоліків пропорційного алгоритму можна віднести наявність перерегулювання і менше значення температури, що встановилася в порівняно із заданою. Часові діаграми роботи згідно з цим алгоритмом наведено на рис. 3.5.

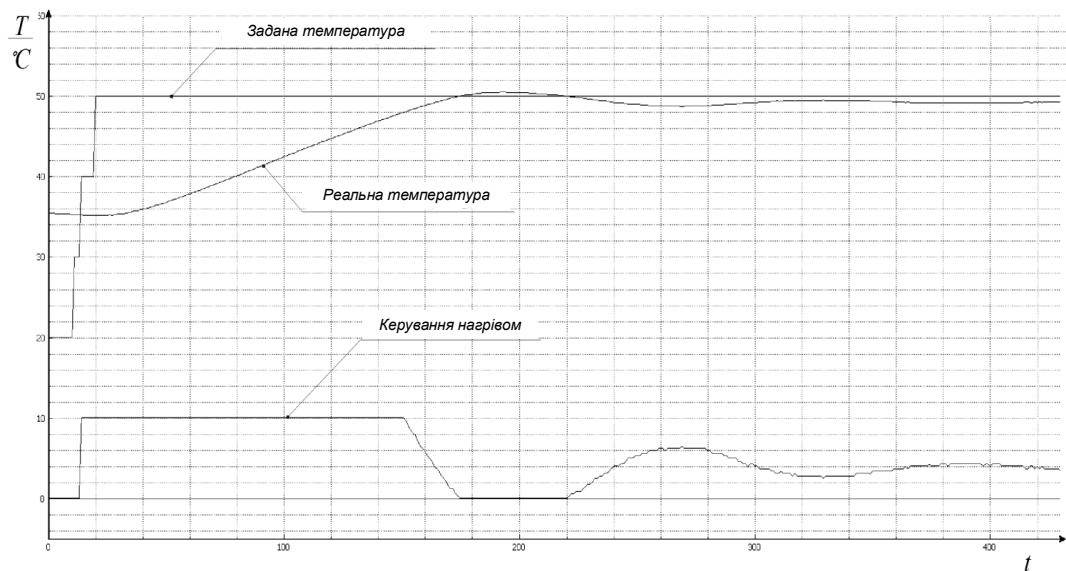


Рисунок 3.5. – Часові діаграми роботи при пропорційному алгоритмі.

3.3.5 PID – регулювання.

Найкращі характеристики має пропорційно-інтегрально-диференціальний (PID) алгоритм регулювання. У ньому сигнал керування формується так:

$$PWM = kP \cdot Err + kI \cdot \int Err \cdot dt + kD \cdot dErr/dt,$$

де $Err = (T_z - T)$ – помилка регулювання (різниця між заданою та реальною температурою), kP , kI , kD – відповідно коефіцієнти для пропорційної, інтегральної та диференціальної складових. Підбираються експериментально, $\int Err \cdot dt$ - інтегральне значення помилки. Зазвичай його обмежують зверху деякою величиною $Imax$, $dErr/dt$ – швидкість зміни помилки.

Часові діаграми роботи згідно з цим алгоритмом наведено на рис. 3.6.

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

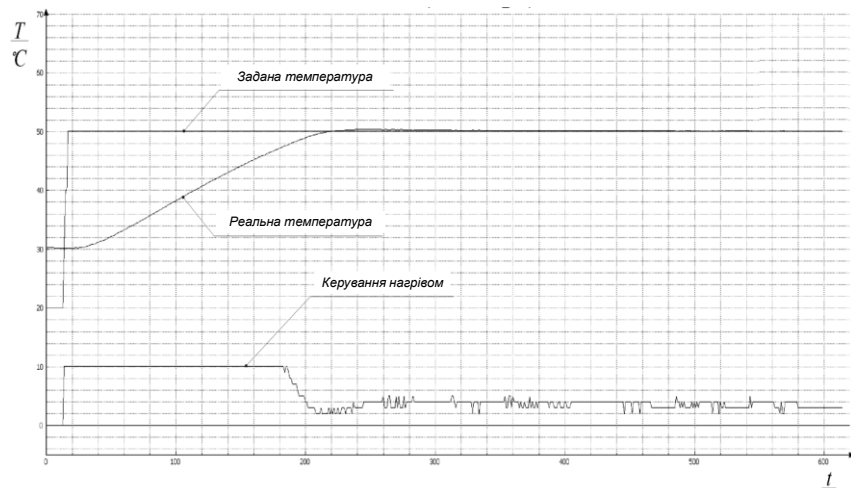


Рисунок 3.6 – Часові діаграми роботи при PID алгоритмі

Було помічено, що при використанні пропорційного або PID-регулювання з'являється високочастотний звук, що пов'язано з частою комутацією транзистора.

Результати експериментальної апробації всіх п'яти перерахованих алгоритмів зведено табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Результати роботи алгоритмів.

Назва алгоритму	Задана т-ра Тз, °C	Коефіцієнти	Макс. т-ра, °C	Перерегулювання, °C	Температура в робочому режимі, °C	Похибка в режимі, °C
1.Релейний	50	$\Delta T=1^{\circ}\text{C}$	52.2	+2.2	48.5...51.9	-1.5...+1.9
2.Пороговий	50	-	51.4	+1.4	49.6...50.6	-0.4...+0.6
3.Пороговий з диф.складовою	50	$kDp=12$	50.4	+0.4	50.0...50.4	0...+0.4
4.Пропорційний	50	$kP=50$	50.5	+0.5	48.7...49.2	-1.3...+0.8
5.PID-регулювання	50	$kP=50, kI=0.6, I_{max} = 100, kD = 800$	50.5	+0.5	50...50.06	0...+0.06
Пороговий з диф. складовою	40	$kDp=12$	40.5	+0.5	40.0...40.5	0...+0.5
Пороговий з диф. складовою	60	$kDp=12$	60.1	+0.1	59.0...60.1	-0.4...+0.1
Пороговий з диф. складовою	70	$kDp=12$	70.0	0	69.6...70.0	-0.4...0

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ

Арк.

49

Незважаючи на вищу точність PID-регулювання, у практичній реалізації спостерігався високочастотний акустичний шум, викликаний частою комутацією MOSFET-транзистора. У той же час пороговий алгоритм з диференціальною складовою забезпечує достатню точність підтримання температури в межах $0...+0,4$ °С, тому саме його було обрано для остаточної практичної реалізації системи. Додатково було проведено дослідження роботи даного алгоритму в діапазоні температур від 40 до 70 °С.

За результатами експериментів встановлено, що обраний алгоритм забезпечує стабільну роботу системи в усьому досліджуваному температурному діапазоні.

					<i>КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Вимоги пожежної безпеки при гасінні електрообладнання

Пожежі, пов'язані з електрообладнанням, належать до особливо небезпечних, оскільки під час їх ліквідації існує ризик ураження людини електричним струмом, поширення полум'я через кабельні лінії, короткого замикання та утворення токсичних продуктів горіння. Такі пожежі можуть виникати внаслідок перевантаження електричної мережі, пошкодження ізоляції проводів, використання несправних електроприладів, порушення правил монтажу або експлуатації електроустановок. Тому при загорянні електрообладнання першочергове значення має не лише швидке гасіння, а й правильна послідовність дій з урахуванням вимог пожежної та електричної безпеки [18].

У разі виявлення ознак загорання електрообладнання необхідно негайно припинити його експлуатацію та, за можливості, відключити електроживлення. Відключення може здійснюватися за допомогою вимикача, автомата захисту, рубильника або іншого комутаційного пристрою. Після знеструмлення обладнання ризик ураження електричним струмом значно зменшується, а вибір засобів пожежогасіння стає ширшим. Якщо ж обладнання залишається під напругою, гасіння потрібно виконувати лише засобами, дозволеними для електроустановок відповідного класу пожежі.

Забороняється гасити електрообладнання, що перебуває під напругою, водою, пінними вогнегасниками або іншими засобами, які проводять електричний струм. Використання таких засобів може спричинити коротке замикання, ураження людини електричним струмом і подальше поширення пожежі. Для гасіння електрообладнання доцільно застосовувати порошкові

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Віцяк В. І.</i>			Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушіє</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Жаровський Р.</i>					51	6
<i>Консульт.</i>						ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Луцик Н.С.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Осухівська Г.М.</i>						

або вуглекислотні вогнегасники, які призначені для ліквідації пожеж електроустановок. Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників передбачають використання вогнегасників для пожеж класу Е, тобто для електроустановок, що перебувають під напругою до 1000 В [19].

Під час використання вогнегасника необхідно дотримуватися безпечної відстані до осередку пожежі та спрямовувати струмінь вогнегасної речовини на основу полум'я, а не на його верхню частину. Гасіння слід виконувати з навітряного боку або з боку виходу з приміщення, щоб у разі посилення горіння або задимлення мати можливість швидко залишити небезпечну зону. Якщо пожежа виникла в електрощитовій, біля силових кабелів або розподільних пристроїв, не можна торкатися металевих корпусів, кабельних трас і струмопровідних елементів до повного відключення живлення.

Вуглекислотні вогнегасники є ефективними для гасіння електрообладнання, оскільки вуглекислий газ не проводить електричний струм і не залишає значних забруднень на обладнанні. Однак під час їх застосування необхідно враховувати небезпеку різкого охолодження розтруба та можливість обмороження відкритих ділянок шкіри. Також у невеликих приміщеннях після використання вуглекислотного вогнегасника необхідно забезпечити провітрювання, оскільки висока концентрація вуглекислого газу може бути небезпечною для людини.

Порошкові вогнегасники також можуть застосовуватися для гасіння електрообладнання, зокрема на початковій стадії загоряння. Вони швидко припиняють процес горіння, однак після використання залишають порошкові залишки, які можуть пошкоджувати електронні компоненти або ускладнювати подальше відновлення обладнання. Тому в приміщеннях із великою кількістю електронної техніки доцільно передбачати наявність вуглекислотних вогнегасників, а порошкові використовувати переважно тоді, коли необхідно швидко локалізувати полум'я та запобігти його поширенню.

Якщо загоряння неможливо ліквідувати первинними засобами пожежогасіння протягом короткого часу, необхідно негайно залишити

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

приміщення, повідомити пожежно-рятувальну службу за номером 101 та попередити інших людей про небезпеку. Не допускається самостійне гасіння пожежі за умов сильного задимлення, поширення полум'я, наявності загрози вибуху, неможливості відключити живлення або відсутності безпечного шляху евакуації. У таких випадках головним завданням є збереження життя і здоров'я людей.

Після ліквідації пожежі забороняється повторно вмикати електрообладнання без перевірки його технічного стану фахівцем. Необхідно встановити причину загоряння, перевірити стан електропроводки, захисних автоматів, розеток, кабелів, блоків живлення та інших елементів. Подальша експлуатація обладнання допускається лише після усунення несправностей і підтвердження його безпечного стану.

Отже, пожежна безпека при гасінні електрообладнання базується на своєчасному відключенні електроживлення, правильному виборі засобів пожежогасіння, дотриманні безпечної відстані, недопущенні використання води для обладнання під напругою та готовності персоналу до евакуації. Виконання цих вимог зменшує ризик ураження електричним струмом, поширення пожежі та виникнення небезпечних наслідків для життя і здоров'я людей.

4.2 Заходи з техніки безпеки при експлуатації обладнання

Експлуатація обладнання в комп'ютеризованих та електронних системах повинна здійснюватися з дотриманням вимог охорони праці, електробезпеки, пожежної безпеки та правил безпечного виконання робіт. Основною метою таких заходів є запобігання травмуванню працівників, ураженню електричним струмом, виникненню пожеж, пошкодженню обладнання та створенню аварійних ситуацій. Відповідно до Закону України «Про охорону праці», роботодавець або відповідальна особа зобов'язані забезпечити належні,

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

безпечні й здорові умови праці, а також організувати контроль за технічним станом обладнання та дотриманням працівниками вимог безпеки [20].

Перед початком роботи необхідно перевірити справність обладнання, цілісність корпусів, електричних кабелів, роз'ємів, заземлення, захисних кожухів і комутаційних елементів. Забороняється експлуатувати пристрої з пошкодженою ізоляцією, слідами перегрівання, механічними дефектами, нестійким кріпленням або несправними елементами керування. Особливу увагу слід приділяти обладнанню, що живиться від електричної мережі, оскільки неправильне підключення або порушення правил експлуатації може призвести до короткого замикання, ураження електричним струмом чи займання.

Під час роботи з електрообладнанням необхідно дотримуватися вимог безпечної експлуатації електроустановок. Усі підключення, ремонтні та налагоджувальні роботи слід виконувати лише після відключення живлення, якщо інше не передбачено технологічною інструкцією. Не допускається торкання відкритих струмопровідних частин, самовільне внесення змін у схему живлення, використання несправних подовжувачів, перевантаження розеток та підключення обладнання без відповідних захисних пристроїв. Для зменшення ризику ураження електричним струмом необхідно застосовувати справне заземлення, автоматичні вимикачі, запобіжники, пристрої захисного вимкнення та інші засоби електрозахисту [21].

До експлуатації обладнання повинні допускатися особи, які пройшли відповідний інструктаж з охорони праці, ознайомлені з правилами безпечної роботи, порядком дій у разі аварійної ситуації та вимогами інструкції з експлуатації обладнання. Проведення вступного, первинного, повторного та позапланового інструктажів дає змогу зменшити ймовірність помилок персоналу під час роботи з технічними засобами. Відповідно до Типового положення про навчання і перевірку знань з питань охорони праці, працівники повинні отримувати необхідні знання та навички для безпечного виконання робіт [22].

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Під час експлуатації обладнання необхідно забезпечити належну організацію робочого місця. Обладнання має бути встановлене на стійкій поверхні або надійно закріплене, а доступ до органів керування, аварійного вимикача та засобів пожежогасіння повинен залишатися вільним. Кабелі живлення і сигнальні лінії слід прокладати так, щоб вони не створювали перешкод для пересування, не зазнавали механічного пошкодження та не контактували з нагрітими поверхнями. Робоче місце повинно мати достатнє освітлення, вентиляцію та відповідати санітарно-гігієнічним вимогам.

Важливим заходом безпеки є регулярний технічний огляд і профілактичне обслуговування обладнання. Під час таких робіт перевіряють стан контактних з'єднань, справність датчиків, виконавчих механізмів, блоків живлення, захисних елементів, корпусів і систем охолодження. У разі виявлення несправностей обладнання необхідно негайно вивести з експлуатації, позначити як несправне та передати на ремонт або заміну. Самостійне усунення несправностей особами, які не мають відповідної кваліфікації, не допускається.

Для попередження пожежної небезпеки слід не допускати перегрівання обладнання, накопичення пилу, перевантаження електричних мереж і використання пристроїв поблизу легкозаймистих матеріалів. У приміщенні мають бути наявні первинні засоби пожежогасіння, а персонал повинен знати порядок їх використання. У разі появи запаху гару, диму, іскріння або нетипового шуму обладнання необхідно негайно вимкнути, від'єднати від джерела живлення та повідомити відповідальну особу.

У разі аварійної ситуації першочерговими діями є припинення роботи обладнання, відключення електроживлення, виведення людей із небезпечної зони та повідомлення відповідальних осіб або аварійних служб. Якщо стався нещасний випадок, необхідно надати домедичну допомогу потерпілому та забезпечити збереження обстановки на місці події до прибуття відповідальних осіб, якщо це не створює додаткової загрози для життя і здоров'я людей.

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Отже, безпечна експлуатація обладнання базується на поєднанні організаційних, технічних і профілактичних заходів. До них належать інструктаж і навчання персоналу, контроль справності обладнання, дотримання правил електробезпеки, правильна організація робочого місця, регулярне технічне обслуговування та готовність персоналу до дій у разі аварійної ситуації. Виконання цих вимог дає змогу зменшити ризик травматизму, забезпечити надійну роботу обладнання та створити безпечні умови праці.

					<i>КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		56

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розроблено комп'ютерну систему контролю робочої зони 3D-принтера, призначену для автоматичного підтримання температурного режиму всередині робочої камери та покращення якості FDM-друку.

У процесі виконання роботи проведено аналіз основних технологічних проблем FDM-друку, пов'язаних із термічною усадкою пластиків, нерівномірним охолодженням моделей та впливом зовнішніх температурних факторів. Встановлено, що нестабільність температурного режиму є однією з головних причин деформації виробів, викривлення геометрії та відшарування моделей від друкувального столу.

На основі проведеного аналізу розроблено узагальнену структуру комп'ютерної системи контролю робочої зони 3D-принтера, до складу якої входять мікроконтролер, температурні датчики, нагрівальний елемент, система циркуляції повітря та інтерфейс користувача. Запропонована структура забезпечує автоматичний моніторинг температури та керування виконавчими механізмами системи.

У роботі обґрунтовано вибір основних апаратних компонентів системи. Як центральний елемент використано мікроконтролер Arduino на базі ATmega328P. Для контролю температури робочої камери обрано цифровий датчик DS18B20, а для вимірювання температури друкуючої головки — термопару К-типу з модулем MAX6675. Для підігріву робочої камери розроблено нагрівальний елемент на основі ніхромового дроту потужністю 240 Вт із живленням від джерела 24 В.

Розроблено програмне забезпечення системи у середовищі Arduino IDE мовою C/C++. У програмі реалізовано функції зчитування температурних параметрів, керування нагрівальним елементом, взаємодії з користувачем та підтримки різних алгоритмів автоматичного регулювання температури.

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У ході експериментальних досліджень проведено порівняння релейного, порогового, пропорційного, PID та порогово-диференціального алгоритмів керування температурою. Встановлено, що найкращим для практичної реалізації є пороговий алгоритм з диференціальною складовою, який забезпечує стабілізацію температури з похибкою в межах $0...+0,4$ °C без виникнення високочастотного акустичного шуму, характерного для PWM та PID-регулювання.

Результати отримані в роботі, підтвердили працездатність та ефективність розробленої системи. Використання системи контролю робочої зони дозволяє покращити стабільність температурного режиму, зменшити кількість дефектів друку та підвищити якість виготовлення виробів на FDM 3D-принтерах.

					<i>КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жаровський Р.О., Луцик Н.С., Осухівська Г.М., Паламар А.М., Тиш Є.В. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія» усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 39 с.

2. Паламар М.І., Стрембіцький М.О., Паламар А.М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів. Навчальний посібник. Тернопіль: ТНТУ. 2019. 150 с.

3. Демчан Н.І, Жаровський Р.О. Оцінка ефективності роботи програмно-апаратного комплексу контролю за вирощування рослин з урахуванням евапотранспирації. Матеріали XIII науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» (17-18 грудня 2025 року). Тернопіль: ТНТУ. 2025. 108-110 с.

4. Демчан Н.І, Жаровський Р.О. Методи та програмно апаратні засоби контролю за вирощування рослин з врахуванням евапотранспирації. Матеріали XIV міжнародної науково-технічної конференції молодих учнів та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (11-12 грудня 2025 року). Тернопіль: ТНТУ. 2025. 254-255 с.

5. Жаровський Р., Цірка І. Архітектура системи збору, передачі та зберігання даних водоспоживання у багатоквартирних будинках. Актуальні задачі сучасних технологій: матеріали XIII наук.-техн. конф.— ТНТУ ім. І.Пулюя (11-12 грудня 2024). Тернопіль, 2024. 45 с.

6. Ключко Д., Лецишин Ю. З., Жаровський Р. О. Комп'ютерна система моніторингу сейсмічної активності земної кори. Інформаційні моделі, системи та технології : матеріали XII наук.-техн. конф. (Тернопіль, 18–19 груд. 2024 р.). — Тернопіль : ТНТУ, 2024. С. 131.

7. Марценюк І.В. Паламар А. М., Жаровський Р. О., Комп'ютеризована система виявлення небезпечних концентрацій метану на основі сенсорних

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

мереж Інформаційні моделі, системи та технології : матеріали XII наук.-техн. конф. (Тернопіль, 18–19 груд. 2024 р.). — Тернопіль : ТНТУ, 2024. С. 494.

8. Паламар А. М., Жаровський Р. О., Гарбіч Ю. С. Система моніторингу атмосферного тиску за допомогою IoT-технологій. Інформаційні моделі, системи та технології : матеріали XII наук.-техн. конф. (Тернопіль, 18–19 груд. 2024 р.). — Тернопіль : ТНТУ, 2024. С. 115.

9. Озарків Т., Жаровський Р. Метод оптимізації EIGRP протоколу для підвищення продуктивності передачі даних в комп'ютерних мережах. Матеріали XI науково-технічна конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя «Інформаційні моделі системи та технології» (13-14 грудня 2023 року). Тернопіль: ТНТУ. 2023. С.167

10. Озарків Т., Жаровський Р. Оптимізація роботи протоколу EIGRP в умовах великих мереж зі складною топологією. Матеріали XII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (6-7 грудня 2023 року). Тернопіль: ТНТУ. 2023. С. 442.

11. Ромашевська Н., Прокопюк О., Жаровський Р. Використання технології віртуалізації у процесі навчання студентів Матеріали X науково-технічної конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя «Інформаційні моделі системи та технології» (7-8 грудня 2022 року). Тернопіль: ТНТУ. 2022. С. 142.

12. Свергун С., Жаровський Р. Тестування програмного забезпечення побудованого на мікросервісній архітектурі. Матеріали X науково-технічної конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя «Інформаційні моделі системи та технології» (7-8 грудня 2022 року). Тернопіль: ТНТУ. 2022. С. 92.

13. Свергун С., Жаровський Р. Тестування програмного продукту, побудованого на мікросервісній архітектурі на основі BDD. Матеріали X науково-технічної конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя «Інформаційні моделі системи та технології» (7-8 грудня 2022 року). Тернопіль: ТНТУ. 2022. С. 93.

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

14. Слюз І., Жаровський Р. Критерії ефективності тестування комп'ютерної інформаційної системи. Матеріали XI Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (7-8 грудня 2022 року). Тернопіль: ТНТУ. 2022. С. 174

15. Слюз І., Жаровський Р. Принципи та основні етапи комплексного тестування комп'ютерної інформаційної системи. Матеріали X науково-технічної конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя «Інформаційні моделі системи та технології» (7-8 грудня 2022 року). Тернопіль: ТНТУ. 2022. С. 93.

16. Ключко Д., Лещишин Ю., Жаровський Р. Методи і засоби моніторингу сейсмічної активності земної кори. Актуальні задачі сучасних технологій: Матеріали XIII міжнар. наук.техн. конф. мол. учених та студентів. Тернопіль, 2024. с. 446

17. Ключко Д., Лещишин Ю., Жаровський Р. Комп'ютерна система моніторингу сейсмічної активності земної кори. Інформаційні моделі, системи та технології: Матеріали XII наук.-техн. конф. ТНТУ ім. І. Пулюя. Тернопіль, 2024. с. 132.

18. Правила пожежної безпеки в Україні. Затв. наказом Міністерства внутрішніх справ України від 30.12.2014 № 1417. Чинний від 10.04.2015. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0252-15> (дата звернення: 13.06.2026).

19. Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників. Затв. наказом Міністерства внутрішніх справ України від 15.01.2018 № 25. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0225-18> (дата звернення: 13.06.2026).

20. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. Поточна редакція від 12.09.2025. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2694-12> (дата звернення: 13.06.2026).

21. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Затв. наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 09.01.1998 № 4. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0093-98> (дата звернення: 13.06.2026).

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

22. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірку знань з питань охорони праці та Перелік робіт з підвищеною небезпекою. Затв. наказом Держнаглядохоронпраці України від 26.01.2005 № 15. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0231-05> (дата звернення: 13.06.2026).

					<i>КС КРБ 123.153.00.00 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		62

Додаток А
Технічне завдання

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії

Кафедра комп'ютерних систем та мереж

“Затверджую”

Завідувач кафедри КС

_____ Осухівська Г.М.

“ 2 ” лютого 2026 р.

КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ РОБОЧОЇ ЗОНИ 3D ПРИНТЕРА

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на 9 листках

Вид робіт:

Кваліфікаційна робота

На здобуття освітнього ступеня «Бакалавр»

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

«УЗГОДЖЕНО»

«ВИКОНАВЕЦЬ»

Керівник кваліфікаційної роботи

Студент групи СІ-41

_____ к.т.н., доц. Жаровський Р.О.

_____ Віцяк В. І.

“ 2 ” лютого 2026 р.

“ 2 ” лютого 2026 р.

Тернопіль 2026

1 Загальні відомості

1.1 Повна назва та її умовне позначення

Повна назва теми кваліфікаційної роботи: «Комп'ютерна система контролю робочої зони 3D принтера».

Умовне позначення кваліфікаційної роботи: КС КРБ 123.153.00.00

1.2 Виконавець

Студент групи СІ-41, факультету комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії, кафедри комп'ютерних систем та мереж, Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, Віщак В. І.

1.3 Підстава для виконання роботи

Підставою для виконання кваліфікаційної роботи є наказ по університету № 4/9-188 від 24.04.2026 р.

1.4 Планові терміни початку та завершення роботи

Плановий термін початку виконання кваліфікаційної роботи – 26.01.2026 р.

Плановий термін завершення виконання кваліфікаційної роботи – 21.06.2026 р.

1.5 Порядок оформлення та пред'явлення результатів роботи

Порядок оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу здійснюється у відповідності до чинних норм та правил ISO, ЕСКД, ЕСПД та ДСТУ.

Пред'явлення проміжних результатів роботи з виконання кваліфікаційної роботи здійснюється у відповідності до графіку, затвердженого керівником роботи. Попередній захист кваліфікаційної роботи відбувається при готовності роботи – наявності пояснювальної записки та графічного матеріалу.

Пред'явлення результатів кваліфікаційної роботи відбувається шляхом захисту на відповідному засіданні ЕК, ілюстрацією основних досягнень за допомогою графічного матеріалу.

2 Призначення і цілі створення системи

2.1 Призначення системи

Комп'ютерна система контролю робочої зони 3D-принтера призначена для:

- автоматичного контролю температури робочої камери;
- підтримання стабільного температурного режиму під час друку;
- керування нагрівальним елементом та системою циркуляції повітря;
- зменшення дефектів FDM-друку;
- підвищення якості виготовлення виробів;
- моніторингу параметрів роботи системи.

2.2 Мета створення системи

Метою кваліфікаційної роботи є розробка комп'ютерної системи контролю робочої зони 3D-принтера для автоматичного моніторингу температурних параметрів та підтримання стабільного температурного режиму під час друку.

2.3 Характеристика об'єкту

Розроблювана система призначена для використання у FDM 3D-принтерах із закритою робочою камерою в умовах навчальних лабораторій, домашніх майстерень та малих виробництв.

3 Вимоги до системи

3.1 Вимоги до системи в цілому

3.1.1 Вимоги до структури та функціонування системи

Система повинна складатися з:

- мікроконтролерного блока керування;
- підсистеми температурних датчиків;
- нагрівального елемента;
- системи циркуляції повітря;
- силових ключів керування;
- інтерфейсу користувача;
- системи живлення.

3.1.2 Вимоги до способів та засобів зв'язку між компонентами системи

Обмін інформацією між компонентами системи повинен здійснюватися через цифрові інтерфейси мікроконтролера.

Для підключення датчика DS18B20 використовується інтерфейс 1-Wire.

Для взаємодії з термопарою К-типу використовується SPI-інтерфейс..

3.1.3 Вимоги до режимів функціонування системи

Для системи передбачаються такі режими роботи:

- режим нагрівання;
- режим підтримання температури;

- аварійний режим.

В аварійному режимі система повинна вимикати нагрівальний елемент при перевищенні допустимої температури.

3.1.4 Вимоги по діагностуванню системи

Для діагностування системи використовуються інструменти діагностування основних процесів системи, які вмонтовані в операційну систему і програмне забезпечення, а також засоби для діагностики апаратного забезпечення.

Інструменти повинні забезпечувати зручний інтерфейс для можливості перегляду діагностичних подій, моніторингу процесу виконання програм.

Система повинна забезпечувати:

- контроль справності температурних датчиків;
- індикацію поточної температури;
- відображення режиму роботи;
- можливість контролю параметрів через Serial Port.

3.1.5 Перспективи розвитку, проектування системи

Дана система може бути розширена завдяки використанню додаткових програмних і апаратних компонентів. Система повинна передбачати можливість:

- підключення додаткових температурних датчиків;
- реалізації нових алгоритмів керування;
- розширення функцій моніторингу;
- інтеграції з програмним забезпеченням 3D-принтера.

3.2 Показники призначення

Система повинна передбачати можливість масштабування. Можливості масштабування повинні забезпечуватися засобами використовуваного базового програмного і технічного забезпечення.

Система повинна забезпечувати:

- підтримання температури робочої камери в діапазоні 40...70 °С;
- точність стабілізації температури не гірше ± 2 °С;
- автоматичне регулювання температури;
- час виходу на робочий режим не більше 15 хв;
- безперервний режим роботи.

3.2.1 Вимоги до надійності

Система повинна забезпечувати працездатність:

- при тривалій безперервній роботі;
- при короткочасних змінах напруги живлення;
- при зміні температури навколишнього середовища.

Для захисту елементів системи повинні використовуватись:

- запобіжники;
- захисні діоди;
- система аварійного вимкнення нагрівача.

Для захисту апаратури від стрибків напруги і комутаційних завад повинні застосовуватися мережні фільтри.

3.3 Вимоги до безпеки

Зовнішні елементи технічних засобів системи, що перебувають під напругою, повинні мати захист від випадкового дотику, а самі технічні засоби мати занулення або захисне заземлення .

Система електроживлення повинна забезпечувати захисне вимикання при перевантаженнях і коротких замиканнях в колах навантаження, а також аварійне ручне вимикання.

Загальні вимоги пожежної безпеки повинні відповідати нормам на побутове електрообладнання. У разі пожежі не мають виділятися отруйні гази і дим. Після зняття електроживлення має бути доступне застосування будь-яких засобів пожежогасіння.

3.3.1 Вимоги до експлуатації, технічного обслуговування, ремонту і зберігання компонентів системи

Мікроклімат в приміщеннях повинен відповідати нормам виробничого мікроклімату по ДСН 3.3.6.042-99:

- температуру повітря в межах від +10°C до +35°C;
- відносну вологість повітря при 25°C в межах від 30% до 80%;
- атмосферний тиск 760 ± 25 мм рт. ст.

Періодичне технічне обслуговування використовуваних технічних засобів має проводитися відповідно до вимог технічної документації, але не рідше ніж один раз на рік.

Періодичне технічне обслуговування і тестування технічних засобів повинні включати обслуговування і тестування всіх використовуваних засобів, датчики, контролери, системи передачі даних, пристрої безперебійного живлення.

На підставі результатів тестування технічних засобів повинні проводитися аналіз причин виникнення виявлених дефектів і прийматися заходи по їх ліквідації.

3.4 Вимоги до захисту інформації від несанкціонованого доступу

Система повинна забезпечувати захист від несанкціонованого доступу на рівні не нижче встановленого вимогами, що пред'являються до категорії 1Д

по класифікації документа, що діє, “Автоматизовані системи. Захист від несанкціонованого доступу до інформації. Класифікація автоматизованих систем”.

3.4.1 Вимоги по стандартизації і уніфікації

Система повинна відповідати вимогам ергономіки і зручності користування за умови комплектування високоякісним обладнанням (ЕОМ, монітор і інше обладнання), що має необхідні сертифікати відповідності і безпеки.

4 Вимоги до документації

Документація повинна відповідати вимогам ЄСКД та ДСТУ

Комплект документації повинен складатись з:

- пояснювальної записки;
- графічного матеріалу:
 - а) Структурна схема.
 - б) Блок схема роботи комп’ютеризованої системи.
 - в) Схема електрична принципова.
 - г) Результати роботи системи.

*Примітка: У комплект документації можуть вноситися зміни та доповнення в процесі розробки.

5 Стадії та етапи проектування

Таблиця 1 – Стадії та етапи виконання кваліфікаційної роботи бакалавра

№ етапу	Назва етапу виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання
1	Розробка технічного завдання	26.01 – 02.02
2	Робота над першим розділом «Аналіз технічного завдання»	03.02 – 15.02
3	Робота над другим розділом «Проектна частини»	20.04 – 25.04
4	Робота над третім розділом «Практична частина»	26.04 – 05.05
5	Робота над четвертим розділом «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»	07.05 – 25.05
6	Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	26.05 – 7.06
7	Перевірка на академічний плагіат, перевірка керівником та консультантами	8.06 – 14.06
8	Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра	15.06 – 21.06
9	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	26.06

6 Додаткові умови виконання кваліфікаційної роботи

Під час виконання кваліфікаційної роботи у дане технічне завдання можуть вноситися зміни та доповнення.

Додаток Б
Перелік елементів

Позн.	Найменування	К-ть	Примітка
	<u>Мікроконтролер</u>		
DD1	Arduino Uno (Rev3)	1	
	<u>Модулі</u>		
DC1	LM2596	1	
DD0	Adafruit RGB LCD Shield	1	
	<u>Датчики</u>		
DD2	DS18B20	1	
A1	S130083	1	
U1	MAX6675	1	
	<u>Резистори</u>		
R1	FMP100JR-52-100K	1	100 кОМ
R2	FMP100JR-52-1K	1	1 кОМ
R3	FMP100JR-52-5K1	1	5 кОМ
VD5	1N4148	1	
	<u>Транзистори</u>		
VT1	IRLZ44N	1	
VT2	BC547B	1	
F1	Fan – Ventilador	1	12 В
R4	Dryer heater	1	240 Вт, 24 В

					КС КРБ 123.153.00.00 ПЕ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Віцяк В.І.				Комп'ютерна система контролю робочої зони 3D принтера	Літ.	Арк.	Аркуші
Перевір.	Жароєвський Р.						1	
Реценз.						ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41		
Н. Контр.	Луцук Н.С.							
Затверд.	Осухівська Г.М.							
					Перелік елементів			