

Галицький фаховий коледж імені В'ячеслава Чорновола
відділення комп'ютерних технологій
циклова комісія інформатики та комп'ютерних дисциплін

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач відділення
комп'ютерних технологій
Наталія СТЕФУРАК / _____ /

підпис

« ____ » _____ 2024 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
освітньо-професійного ступеня «фаховий молодший бакалавр»
зі спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»
на тему: «Система контролю якості друку на 3D принтері»

Студент групи КІ-41

Денис ПІДЛАТЮК

(підпис)

Керівник роботи

Василь ПАВЛЮС

(підпис)

Консультанти:

з техніко-економічного

обґрунтування

Любов МЕЛЕНЧУК

(підпис)

Нормоконтролер

Надія ГАВРИШКІВ

(підпис)

Тернопіль – 2024

Галицький фаховий коледж імені В'ячеслава Чорновола
відділення комп'ютерних технологій
циклова комісія інформатики та комп'ютерних дисциплін

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач відділення

комп'ютерних технологій

Наталія СТЕФУРАК / _____ /

підпис

« ____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

на здобуття освітньо-професійного ступеня «фаховий молодший бакалавр»

студенту Підлатюку Денису Івановичу

(прізвище, ім'я та по-батькові студента)

1. Тема роботи: «Система контролю якості друку на 3D принтері»
затверджена наказом по коледжу від “ ____ ” _____ 202_ р., № ____
2. Термін здачі студентом завершеної роботи “ ____ ” _____ 202_ р.
3. Вихідні дані до роботи: Octoprint, Klipper, Raspberry pi 4 Model B
4. Перелік питань, які повинні бути розроблені в роботі:
 - а) основна частина: Аналіз існуючих рішень, постановка завдання, проєктування та тестування системи.
 - б) техніко-економічне обґрунтування: Аналіз ринку, розрахунок витрат на проєктування, обґрунтування необхідності розробки.
5. Перелік графічного матеріалу Рисунки збірки 3D-принтера, розробки веб-інтерфейсу, схема робочої плати 3D-принтера.

6. Консультанти роботи: Павлюс В.П, Посвятовська О.Б, Гавришків Н.Г.

Розділ	Консультанти	Підпис, дата	
		Завдання видано	Завдання прийнято
з техніко-економічного обґрунтування	Меленчук Л.І.		
	(вчена ступінь, звання		
	П.І.П. консультанта)		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН кваліфікаційного проектування

№ п/п	Найменування етапу	Терміни	
		Початку	Завершення
1.	Вибір теми, ознайомлення з вимогами до дипломного проектування	26.11.23	12.12.23
2.	Огляд типових рішень та технологій реалізації	12.12.23	25.12.23
3.	Визначення вимог до роботи та формування структури системи	26.12.23	04.01.24
4.	Проектування та реалізація системи	05.01.24	27.02.24
5.	Калібровка та тестування системи	27.02.24	13.03.24
6.	Опрацювання економічного розділу та обрахунок кошторису.	14.03.24	12.04.24
7.	Робота над оформленням кваліфікаційної роботи	12.04.24	16.05.24
8.	Попередній захист пояснювальної записки	18.06.24	18.06.24
9.	Підготовка до захисту кваліфікаційної роботи	19.06.24	28.06.24
10.	Захист кваліфікаційної роботи	29.06.24	29.06.24

7. Дата видачі завдання “___” _____ 202_ р. Керівник Павлюс В.П./

Завдання прийняв до виконання _____ / _____ /

Реферат

Кваліфікаційна робота. Система контролю якості друку на 3D-принтері.
56с., 25 рисунків, 1 додаток, 8 джерел.

Система контролю якості друку на 3D-принтері є об'єктом цього проекту. Розробка такої системи може включати аналіз якості друку, виявлення дефектів під час друку 3D-моделей та сповіщення користувача про неправильну роботу 3D-принтера.

Метою даної кваліфікаційної роботи є створення ефективної системи, яка забезпечить автоматизований процес контролю та виявлення дефектів виготовлених деталей. Основною метою є покращення якості та надійності виробництва шляхом автоматизації контролю якості друку, що сприятиме зменшенню відхилень в параметрах, заощадженню часу і ресурсів, а також удосконаленню кінцевого продукту.

Необхідно впровадити систему контролю якості друку на 3D-принтері для покращення якості та надійності виробництва. Це обумовлено швидким розвитком галузі 3D-друку, що призводить до збільшення попиту на виготовлення високоякісних деталей. Такий механізм дозволить підприємствам залишатися конкурентоспроможними і гарантуватиме високу якість продукції.

Найбільш важливими аспектами роботи є точність і надійність вимірювань, автоматизація процесу контролю, швидкість та ефективність та зручність використання.

Abstract

Qualification work. Quality printing control system for 3D-printer. 56p., 25 figures, 1 appendix, 8 sources.

The quality control system for printing on a 3D printer is the object of this project. Its purpose is to automate the quality control of manufactured parts so that they meet specified standards and requirements. The development of such a system may include analyzing the print quality, detecting defects, automatically adjusting parameters to improve the quality and efficiency of the process, and providing quality monitoring and analysis to further improve the production process.

The goal of this project is to create an effective system that will provide an automated process for controlling and detecting defects in manufactured parts. The main goal is to improve the quality and reliability of production by automating print quality control, which will help reduce deviations in parameters, save time and resources, and improve the final product.

It is necessary to implement a 3D printer quality control system to improve the quality and reliability of production. This is due to the rapid development of the 3D printing industry, which leads to an increase in demand for high-quality parts. Manufacturers need an automated quality control system that would simplify the process, reduce inspection costs, and improve production speed. Such a mechanism will allow companies to remain competitive and guarantee high quality products.

The most important aspects of the work are the accuracy and reliability of measurements, automation of the control process, speed and efficiency, and ease of use.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Аналіз існуючих рішень та постановка завдання	8
1.1 Аналіз предметної області	8
1.2 Огляд існуючих рішень	9
1.3 Постановка завдання.....	12
1.4 Процес навчання штучного інтелекту	13
1.5 Інструменти для навчання штучного інтелекту.....	14
1.6 Огляд технологій, які використовуються	14
2 Проєктування системи.....	17
2.1 Аналіз вимог до проєкту	17
2.2 Метод 1. Використання комп'ютерного зору.....	17
2.3 Метод 2. Машинне навчання	20
2.4 Метод 3. Інтеграція системи з веб-сервером.....	23
2.5 Метод 4. Фізична модифікація 3D-принтера та розширене налаштування моделей перед друком.....	25
2.6 Вибір методу реалізації та його проєктування	28
3 Реалізація та тестування системи	32
3.1 Аналіз та вибір 3D-принтера	32
3.2 Збірка та калібрування 3D-принтера.....	37
3.3 Реалізація системи.....	43
3.4 Тестування системи	46
4 Техніко-економічне обґрунтування	47
4.1 Аналіз ринку	47
4.2 Розрахунок витрат на проєктування	50
4.3 Обґрунтування необхідності розробки	52
Висновки	53
Перелік джерел посилання	54
Додатки.....	55

					КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Підлатюк Д.І.			«Система контролю якості друку на 3D принтері»	Літ.	Арк.
Перевір.		Павлюк В.П.					5
Реценз.		Посвятовська О.Б.				Акрушів	58
Н. Контр.		Гаєришків Н.Г.				ГФК. ВКТ. КІ - 41	
Затверд.		Стефурак Н.А.					

СКОРОЧЕННЯ І УМОВНІ ПОЗНАКИ

USB – Universal Serial Bus

AI – Artificial intelligence

DIY – Do it yourself

Wi-Fi – Wireless Fidelity

GPIO – General Purpose Input/Output

GUI – Graphical user interface

ОС – Операційна система

ML – Machine learning

FDM – Fused Deposition Modeling

SLA – Stereolithography

					КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасні технології 3D-друку надають безліч можливостей для вирішення різноманітних завдань у різних галузях, включаючи машинобудування, медицину, освіту та інші. Однак, однією з ключових проблем є забезпечення високої якості друку. Саме тому актуальним є розвиток систем контролю якості друку на 3D-принтерах, які б забезпечували надійність та якість виготовлених виробів.

Метою цієї кваліфікаційної роботи є розробка системи контролю якості друку на 3D-принтері, що дозволить підвищити якість виробів, зменшити кількість браку та оптимізувати процес виготовлення.

Об'єктом дослідження є процес друку на 3D-принтері, а предметною областю – система контролю якості цього процесу.

Застосування результатів цього дипломного проєкту може бути корисним для промислових підприємств, лабораторій досліджень та розробок, а також для медичних установ та освітніх закладів, де використання 3D-друку стає все більш поширеним.

Таким чином, розробка системи контролю якості друку на 3D-принтері має велике практичне значення та сприятиме подальшому розвитку технології 3D-друку.

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

1.1 Аналіз предметної області

3D-друк – це передова технологія виробництва, яка революціонізує спосіб створення широкого спектру складних об'єктів. Замість традиційних методів обробки матеріалів, таких як різання та лиття, 3D-друк використовує цифрові моделі для створення фізичних об'єктів шляхом нанесення матеріалу шар за шаром. Ця технологія використовується в багатьох галузях, включаючи машинобудування, медицину, ювелірну справу, мистецтво, освіту та будівництво, для швидкого та ефективного створення прототипів, унікальних продуктів і запчастин.

У 3D-друку якість є дуже важливим фактором, оскільки вона визначає придатність продукту для використання за призначенням. Якість можна оцінити за такими параметрами, як геометрична точність (відповідність розміру і форми виробу цифровій моделі), якість поверхні, міцність і функціональність. Для досягнення високої якості друку важливо враховувати низку факторів, зокрема якість принтера, якість матеріалу (чистота, однорідність, відповідність специфікаціям), налаштування програмного забезпечення для друку та умови друку (температура, вологість, вібрація). Людський фактор не менш важливий, оскільки навички оператора та дотримання інструкцій мають значний вплив на якість друку.

Системи управління якістю 3D-принтерів включають в себе ряд програмних і апаратних засобів, що використовуються для моніторингу процесу друку, контролю параметрів друку, виявлення дефектів і коригування процесу друку. Такі системи дозволяють підвищити якість 3D-продукції, знизити витрати і заощадити час. Такі системи дозволяють виявляти дефекти на ранніх стадіях, допомагають запобігти поширенню дефектів і зменшити відходи матеріалу. Вони також можуть оптимізувати процес друку, скорочуючи час, необхідний для виробництва, і підвищуючи продуктивність.

					КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1.2 Огляд існуючих рішень

Перш ніж розпочати розробку проекту системи управління якістю для 3D-принтера, важливо проаналізувати наявні рішення в цій галузі. Після ретельного огляду можна виділити кілька систем, які вже існують на ринку:

– Obico Cloud – хмарна платформа управління виробництвом, призначена для управління якістю 3D-принтерів. Платформа дозволяє віддалено керувати та контролювати 3D-принтери, що робить її ідеальним інструментом для компаній з віддаленими або розподіленими виробничими потужностями.

Однією з ключових переваг Obico Cloud є можливість інтеграції з іншими платформами для спрощення обміну файлами та управління друком. Це полегшує взаємодію з існуючими системами у виробничому середовищі та забезпечує гнучкий підхід до управління виробництвом.

До недоліків Obico Cloud можна віднести обмежену функціональність для складних завдань контролю якості та потенційні проблеми з безпекою даних, оскільки вони зберігаються в хмарі. Крім того, вартість використання платформи може бути значною, особливо для малих і середніх підприємств та новачків у секторі 3D-друку.

– NexusAI – це система, яка використовує штучний інтелект для аналізу надрукованих даних і виявлення дефектів, тим самим підвищуючи точність контролю якості. Однією з головних переваг NexusAI є те, що вона може взаємодіяти з середовищем OctoPrint - OctoPrint – це безкоштовне програмне забезпечення для управління 3D-принтерами, яке пропонує безліч функцій для контролю друку. Інтеграція з OctoPrint (рис. 1.1) дозволяє NexusAI отримувати дані про друк безпосередньо з принтера, полегшуючи процес аналізу та контролю якості.

Недоліками NexusAI є висока вартість впровадження та підтримки системи, а також її обмежена сумісність з різними моделями принтерів та програмним забезпеченням. Крім того, NexusAI може бути складним у використанні для користувачів, які не знайомі зі штучним інтелектом.

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

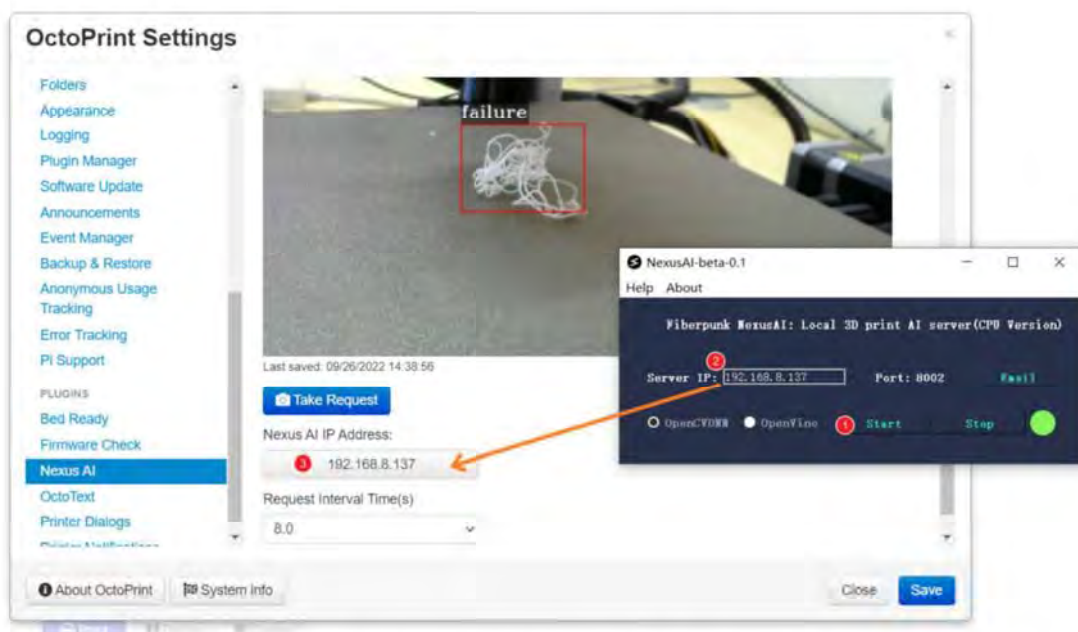


Рисунок 1.1 – Використання NexusAI у середовищі OctoPrint

– Cloud3Dprint – це система, спрямована на спільну роботу над проектами та управління друкуванням на 3D-принтерах. Вона відзначається простотою використання та можливістю інтеграції з різними принтерами, що дозволяє швидко впровадити її у виробничому середовищі.

Основні переваги Cloud3Dprint включають:

- Простота використання: Інтерфейс Cloud3Dprint є досить інтуїтивно зрозумілим, що дозволяє користувачам швидко орієнтуватися та приступити до роботи без великих зусиль.
- Інтеграція з різними принтерами: Cloud3Dprint може працювати з різними моделями 3D-принтерів, що спростовує та пришвидшує встановлення системи на 3д-принтер.
- Спільна робота над проектами: Система дозволяє кільком користувачам одночасно працювати над проектом, обмінюватися файлами та спільно керувати друкуванням.

Проте, серед недоліків Cloud3Dprint можна виділити обмежену функціональність для складних завдань контролю якості. Також, як і в інших хмарних рішеннях, можливість виникнення проблем з безпекою даних через їх

збереження в хмарному середовищі потребує уваги та додаткових заходів захисту.

Крім вищезгаданих, на ринку існують і інші системи контролю якості друку на 3D-принтері, але вони не використовують нейронні мережі, які визначають похибки у роботі 3д-принтера. Ось декілька прикладів:

– MatterControl – це інтегроване програмне забезпечення для управління 3D-друком, яке поєднує в собі можливості сховища файлів, налаштування процесу друку та спільноти користувачів. Воно просте у використанні та має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс. Однак, деякі користувачі вказують на обмежену функціональність у порівнянні з іншими програмами.

– AstroPrint – це платформа для управління 3D-друку, яка забезпечує простоту використання та велику кількість функцій для керування процесом друку. Вона дозволяє віддалено керувати друкаркою через інтернет, переглядати статус друку та використовувати онлайн-сховище для зберігання файлів. Однак, деякі користувачі вказують на обмежену підтримку деяких моделей друкарки і високі вимоги до швидкості Інтернету для стабільної роботи.

– PrusaControl – це програмне забезпечення для управління 3D-друком, яке відкрите для розробників і має активну спільноту користувачів. Воно надає багато можливостей для налаштування процесу друку та підтримує велику кількість різних друкарки. Проте, воно може вимагати деякої експертизи в налаштуванні, що може бути складним для початківців.

При порівнянні можна визначити, що MatterControl і AstroPrint відрізняються хмарним збереженням та керуванням, а PrusaControl спеціалізується на оптимізації для принтерів Prusa.

MatterControl має більше можливостей для редагування 3D-моделей, ніж AstroPrint.

AstroPrint найбільш спрощений у використанні, проте вимагає стабільного інтернет-з'єднання.

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

PrusaControl надає найвищу сумісність з принтерами свого бренду, але обмежується виключно цими пристроями.

Отже, аналіз існуючих рішень показав, що на ринку існує велика кількість програмних засобів для керування та контролю якості друку на 3D-принтері. Кожне з цих рішень має свої переваги і недоліки, і вибір відповідної системи залежить від конкретних потреб користувача. Тому було вирішено розробити власну систему, яка поєднує у собі більшість переваг існуючих проєктів, та без необхідності купувати платну підписку.

1.3 Постановка завдання

Постановка завдання є ключовим етапом у розробці проєкту "Система контролю якості друку на 3D-принтері". Метою даного проєкту є створення програмно-апаратного комплексу, який забезпечить контроль якості друку на 3D-принтері з метою підвищення якості виготовлених виробів, зменшення відходів матеріалів та економії часу.

Для розробки системи контролю якості друку на 3D-принтері потрібно вирішити такі завдання:

- Аналіз існуючих рішень: Провести огляд існуючих систем контролю якості для визначення їх переваг та недоліків.
- Вибір технологій: Визначити технології, які будуть використовуватися для реалізації системи, включаючи мови програмування, фреймворки та інструменти.
- Розробка алгоритмів: Розробити алгоритми для аналізу даних друку та виявлення дефектів.
- Реалізація програмного забезпечення: Реалізувати програмне забезпечення для збору даних з 3D-принтера, аналізу даних та керування процесом друку.
- Інтеграція з OctoPrint: Забезпечити можливість інтеграції з OctoPrint для забезпечення більшої функціональності та зручності управління.

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

- Тестування та налагодження: Провести тестування розробленої системи для перевірки її працездатності та виявлення можливих проблем.
- Документування: Підготувати документацію з описом системи та інструкціями щодо її використання та налагодження.
- Впровадження: Впровадити систему в експлуатацію на виробничому обладнанні та надати підтримку користувачам.

1.4 Процес навчання штучного інтелекту

Процес навчання штучного інтелекту для системи контролю якості друку на 3D-принтері включає в себе кілька ключових етапів. Перш за все, необхідно зібрати дані під час друку, які будуть використовуватися для навчання моделі. Ці дані можуть включати в себе інформацію про швидкість друку, температуру, розміри шарів та інші параметри процесу друку.

Після збору даних вони піддаються попередній обробці, включаючи очищення від шумів та артефактів. Далі дані можуть бути розділені на навчальні та тестові набори для оцінки точності моделі.

Для навчання моделі штучного інтелекту використовуються різні алгоритми машинного навчання, такі як нейронні мережі з глибоким навчанням або методи класифікації та регресії. Вони навчаються виявляти типові дефекти на основі навчальних даних, такі як перекося, недоліки заповнення або некоректне зчеплення шарів.

Після завершення навчання моделі вона може бути протестована шляхом сканування готового виробу для оцінки її точності та ефективності. При необхідності модель може бути покращена або переналаштована для отримання кращих результатів.

Цей процес вимагає відповідної експертизи в області машинного навчання та обробки даних, а також вимагає великої уваги до деталей та обробки даних для досягнення високої точності виявлення дефектів під час друку на 3D-принтері.

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

1.5 Інструменти для навчання штучного інтелекту

Для навчання штучного інтелекту в проекті з розробки системи контролю якості друку на 3D-принтері можна використати різноманітні інструменти та бібліотеки, що допоможуть у створенні та навчанні моделей нейронних мереж, такі як:

- TensorFlow – це одна з найпопулярніших відкритих бібліотек для машинного навчання, розроблена компанією Google. Вона містить різноманітні інструменти для побудови та навчання нейронних мереж, включаючи моделі з глибоким навчанням.

- Keras – це високорівневий інтерфейс для TensorFlow, який спрощує процес створення та навчання нейронних мереж. Він дозволяє швидко створювати складні моделі з мінімальними зусиллями.

- OpenCV – це бібліотека комп'ютерного зору, яка може бути використана для обробки зображень з камери 3D-принтера та аналізу дефектів друку. Вона надає інструменти для роботи з зображеннями, включаючи виявлення контурів, знаходження об'єктів та аналіз кольорів.

- PyTorch – це бібліотека для машинного навчання та обчислювальних операцій, яка стала популярною серед дослідників і розробників завдяки своїй простоті та гнучкості [2].

Вона надає інструменти для побудови та навчання нейронних мереж, а також для обробки даних та візуалізації результатів навчання. PyTorch дозволяє швидко реалізувати складні моделі та ефективно використовувати ресурси обчислювального обладнання для навчання штучного інтелекту [7].

1.6 Огляд технологій, які використовуються

Raspberry Pi 4 – це невелика одноплатна комп'ютерна плата, яка стала популярною в області вбудованих систем і проектів DIY (зроби сам). Вона працює на базі ARM-процесора і має вбудований Wi-Fi та Bluetooth, що робить її хорошим вибором.

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Raspberry Pi 4 має чотири ядра Cortex-A72, які працюють на частоті до 1,5 ГГц, що робить його потужнішим у порівнянні з попередніми моделями Raspberry Pi. Він також має підтримку до 4 ГБ оперативної пам'яті, два порти micro HDMI для підключення моніторів, два порти USB 3.0 та два порти USB 2.0, а також гігабітний Ethernet.

OctoPrint – це програмне забезпечення для управління 3D-принтером, яке дозволяє віддалено керувати процесом друку через веб-інтерфейс.

Воно може бути встановлене на одноплатний комп'ютер, такий як Raspberry Pi, що дозволяє підключити друкарку до мережі Інтернет і керувати нею з будь-якого пристрою з веб-браузером.

Він надає багато функцій для контролю над процесом друку, таких як перегляд статусу друку, керування рухом друкарки, зміна налаштувань друку під час його виконання та багато іншого.

Крім того, воно підтримує різні друкарки і може бути розширене за допомогою плагінів для додаткових функцій, таких як моніторинг температури, попередження про помилки друку та інші.

Операційна система Raspberry Pi 4 може бути встановлена на microSD-карту, що дозволяє швидко змінювати систему і використовувати різні дистрибутиви, такі як Raspbian, Ubuntu, або інші операційні системи Linux. Raspberry Pi 4 також має роз'єм GPIO (General Purpose Input/Output), який дозволяє підключати до нього різноманітні сенсори, актуатори та інші периферійні пристрої для створення різних електронних проєктів.

Klipper – це програмне забезпечення, яке дозволяє використовувати Raspberry Pi як контролер для 3D-принтера. Він дозволяє значно підвищити швидкість та точність друку, оскільки обробка команд відбувається на Raspberry Pi, а не на самому принтері. [1]

Також Klipper має відкрите програмне забезпечення, що дозволяє використовувати різні модифікації та налаштовувати для покращення якості друку.

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Нейронні мережі – це математичні моделі, які намагаються імітувати роботу людського мозку для розв'язання різних завдань.

В контексті системи контролю якості друку на 3D-принтері, нейронні мережі можуть бути використані для аналізу даних процесу друку та виявлення відхилень від норми, що може свідчити про наявність дефектів.

У розділі 1 ретельно досліджено ключові аспекти, які визначають контекст та постановку завдання проекту щодо розробки системи контролю якості для 3D-друку.

Із аналізу предметної області, у розділі розглядаються основні поняття, технології та процеси, що пов'язані з 3D-друком та контролем якості.

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
						16
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ

2.1 Аналіз вимог до проєкту

Цей модуль спрямований на аналіз способів реалізації проєкту «Система контролю якості друку на 3D-принтері», порівняння їх між собою, вибору найоптимальнішого методу який буде поєднувати у собі сумісність між встановленими пристроями, простоту встановлення та максимальну ефективність.

Варто визначити, які критерії будуть важливими для даної системи, а саме:

- можливість реалізації системи на мікрокомп'ютері Raspberry Pi 4;
- сумісність із OctoPrint та Klipper;
- візуально відображати роботу принтера через веб-камеру на веб-сторінці;
- не сповільнювати процес друкування моделі на 3D-принтері;
- сповіщення користувача про дефекти та зупинку друку.

Після аналізу вимог, можна визначити, що для реалізації дипломного проєкту «Система контролю якості друку на 3D-принтері» підходять такі методи:

- Використання комп'ютерного зору.
- Машинне навчання.
- Інтеграція з веб-сервером.

Варто розглянути кожен метод детальніше, щоб визначити найкращий варіант реалізації та обрати спосіб реалізації для проєкту.

2.2 Метод 1. Використання комп'ютерного зору

Даний метод вбачає імплементування комп'ютерного зору у систему контролю якості друку, який аналізуватиме зображення через веб камеру, та визначаючи дефекти при друці.

					КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Комп'ютерний зір – це галузь штучного інтелекту , яка використовує машинне навчання та нейронні мережі, щоб навчити комп'ютери та системи отримувати значущу інформацію з цифрових зображень, відео та інших візуальних даних, а також надавати рекомендації або вживати заходів, коли вони бачать дефекти або проблеми.

Якщо штучний інтелект дозволяє комп'ютерам мислити, то комп'ютерний зір дає їм можливість бачити, спостерігати і розуміти.

Комп'ютерний зір працює майже так само, як людський, за винятком того, що людина має перевагу.

Людський зір має перевагу в тому, що впродовж життя він навчається розрізняти об'єкти, визначати, як далеко вони знаходяться, чи рухаються, чи щось не так із зображенням.

Комп'ютерний зір навчає машини виконувати ці функції, але він повинен робити це за набагато менший час за допомогою камер, даних і алгоритмів, а не сітківки, зорових нервів і зорової кори.

Оскільки система, навчена перевіряти продукцію або спостерігати за виробничими активами, може аналізувати тисячі продуктів або процесів за хвилину, помічаючи непомітні дефекти або проблеми, вона може швидко перевершити людські здібності. Комп'ютерний зір потребує багато даних. Він аналізує дані знову і знову, доки не зможе розрізняти відмінності і, зрештою, розпізнавати зображення.

Наприклад, щоб навчити комп'ютер розпізнавати автомобільні шини, йому потрібно надати величезну кількість зображень шин і предметів, пов'язаних з шинами, щоб він зміг знайти відмінності і розпізнати шину, особливо ту, яка не має дефектів.

Реалізація системи контролю якості шляхом використання бібліотеки OpenCV відкриває широкі можливості для підвищення якості та ефективності виробничих процесів.

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вона базується на записі відео процесу друку та подальшому аналізі зображень за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору шляхом оброблення зображення та встановлених параметрів.

OpenCV було створено, щоб забезпечити загальну інфраструктуру для додатків комп'ютерного зору і прискорити використання машинного сприйняття в комерційних продуктах.

Через те, що OpenCV є ліцензованим продуктом Apache 2, OpenCV дозволяє компаніям легко використовувати та модифікувати код. Бібліотека налічує понад 2500 оптимізованих алгоритмів, що включає у себе повний набір як класичних, так і найсучасніших алгоритмів комп'ютерного зору та машинного навчання.

Спільнота користувачів OpenCV налічує понад 47 тисяч осіб, а кількість завантажень перевищує 18 мільйонів.

Бібліотека широко використовується в компаніях, дослідницьких групах та урядових установах, такі як Google, Yahoo, Microsoft, Intel, IBM, Sony, Honda, Toyota.

Він підтримує інтерфейси C++, Python, Java та MATLAB і підтримує Windows, Linux, android та Mac OS. OpenCV здебільшого орієнтований на додатки технічного зору в реальному часі.

Для реалізації проєкту цим методом необхідно встановити повну версію OpenCV на Raspberry Pi 4, забезпечити взаємодію із Klipper та написати програму, яка буде визначати дефекти та зупиняти друк. При створенні програми варто враховувати, що система яка побудована на OpenCV зможе виявляти лише базові дефекти, або зупиняти друк навіть якщо немає недоліків на моделі, тому потрібно самостійно прописувати кожен дефект у коді для правильного функціонування. Цей метод має свої переваги та недоліки, а саме:

Переваги:

- можливість використання з різними моделями 3D-принтерів;
- швидкість аналізу зображень у реальному часі;

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

– можливість оперативно реагувати на виявлення дефектів та негайно припиняти друк для уникнення виробничих відходів.

Недоліки:

- потреба вирізати та обробляти об'єкт із зображення;
- складність розробки та налаштування системи;
- потреба у якісному освітленні та потужних обчислювальних ресурсах для точного аналізу зображень;
- необхідність розробляти програму під кожен дефект, що значно збільшить час виконання проєкту та додасть навантаження як і на принтер, так і на Raspberry Pi;
- ймовірність зупинення друку без наявних дефектів.

Отже, для правильного функціонування проєкту із використанням комп'ютерного зору необхідно безліч умов, а також багато часу на розробку.

2.3 Метод 2. Машинне навчання

Реалізація проєкту цим методом є найскладнішим із варіантів, але в той ж час пропонує найбільше можливостей. Перед тим, як аналізувати метод реалізації системи контролю якості друку на 3D-принтері варто розглянути детальніше термін машинного навчання та 3D-друку.

WAI – це система, яка може виконувати лише певні завдання, такі як розпізнавання мови, обробка природної мови, розпізнавання зображень тощо. Ці системи зазвичай базуються на методах машинного навчання та глибокого навчання. ML визначається як навчання для оптимізації показників продуктивності за допомогою комп'ютерного програмування з використанням досвіду або даних прикладів, де основним методом є нейронні мережі.

Зі збільшенням обчислювальних потужностей і розробкою великих обсягів доступних даних, DL, як відгалуження ML, показав значні результати у висновках і обробці зображень. Виходячи з цього, WAI широко використовується в різних сферах, включаючи безпілотні автомобілі,

					КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

робототехніку та боротьбу зі спамом, щоб забезпечити зручність та ефективність людського життя.

У виробництві технологія ІІІ може надавати інформацію на місці на основі датчиків і декількох алгоритмів для забезпечення розумного виробництва, яке включає автоматизацію і робототехніку, аналіз і прогнозування даних, контроль якості і виявлення дефектів, а також прогнозоване обслуговування.

Штучний інтелект глибоко вплинув на виробництво, спонукаючи галузь до інтелекту та ефективності, і є найбільшою інвестицією в штучний інтелект після банківського сектору, роздрібної торгівлі та професійних послуг. Як виробнича технологія, що швидко розвивається і поєднує в собі автоматизоване проектування, комп'ютерне числове програмне керування, механічні технології та матеріалознавство.

3D-друк – це метод швидкого створення прототипів, який використовує дані з комп'ютера для перетворення їх на фізичний об'єкт.

На відміну від традиційних методів виробництва, 3D-друк створює об'єкти шляхом накладання матеріалу шар за шаром, а не видалення матеріалу, що дозволяє створювати складніші структури, а також підвищує продуктивність і гнучкість.

У 1986 році Чарльз Халл розробив перше покоління технології 3D-друку Stereo lithography appearance, яка також використовується в таких галузях, як аерокосмічна та автомобільна промисловість.

Сьогодні технологія 3D-друку використовується в багатьох галузях, таких як виробництво та охорона здоров'я.

Вона дозволяє створювати предмети різних форм і розмірів, у тому числі моделі людських органів. Розвиток технології 3D-друку прискорив процес розробки та просування продукції на ринок і має хороший потенціал для виготовлення специфічних моделей органів, забезпечуючи ефективний засіб передопераційної підготовки для лікарів з невеликим хірургічним досвідом.

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Отже, для реалізації проєкту цим методом необхідно зібрати базу даних із відео/фотографіями із видимими дефектами, та використовуючи бібліотеку TensorFlow створити модель нейронної мережі для класифікації зображень на «дефектні» та «не дефектні» та навчати її використовуючи приклади дефектів.

Для отримання кращого результату варто створити критерії оцінювання готової моделі, після чого внести їх у модель. Процес навчання вимагає потужну відеокарту новіших ревізій, тож іноді нейронні мережі навчають на платних серверах із необхідним обладнанням.

Переваги:

- моделі машинного навчання можуть досягати високої точності у виявленні дефектів, що надає можливість виявляти навіть незначні недоліки;
- система може автоматично виявляти дефекти та при необхідності припиняти друк без необхідності втручання оператора;
- метод може бути застосований до різних типів 3D-принтерів та матеріалів, що робить його універсальним рішенням для вирішення проблем контролю якості;
- з використанням додаткових даних та підходів до навчання, модель може постійно вдосконалюватися та підвищувати свою точність.

Недоліки:

- для ефективного навчання моделі необхідно мати достатню кількість даних з різними видами дефектів, що може бути складним для забезпечення;
- розробка та налаштування моделі машинного навчання може бути складною та вимагати спеціалізованих знань;
- навчання та використання моделі може вимагати значних обчислювальних ресурсів, що може бути проблемою для менш потужних пристроїв;
- модель потребує постійного оновлення та вдосконалення для підтримки високої точності та ефективності.

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Отже, даний метод є найскладнішим у реалізації, але пропонує відмінну якість роботи, але потребує значно більший ресурс для навчання, ніж використання плати Raspberry Pi 4.

2.4 Метод 3. Інтеграція системи з веб-сервером

Інтеграція системи контролю якості друку на 3D-принтері з веб-сервером є важливим етапом для забезпечення доступу до системи в реальному часі та для зручності користувачів у відстеженні процесу друку.

Цей процес включає створення веб-інтерфейсу для відображення відеопотоку з камери, що контролює процес друку, та додавання елементів управління, таких як кнопки для запуску, призупинення або зупинки друку, а також відображення інформації про стан друку та виявлені дефекти.

Raspberry Pi містить все, що можна знайти в комп'ютері загального призначення: процесор, пам'ять і графічний вивід.

Завдяки своїй гнучкості та відносно низькій вартості, Raspberry Pi відкриває світ можливостей, будь то створення власної електроніки, навчання програмуванню, створення ретро-ігрової консолі або, налаштування веб-сервера.

Отже, що таке веб-сервер? У найпростішому розумінні веб-сервер – це система, яка доставляє контент, зазвичай веб-сторінки, користувачам через Інтернет. Коли користувач хоче відвідати певний веб-сайт, його браузер надсилає запит на сервер, де зберігаються файли цього веб-сайту.

Сервер у відповідь надсилає запитані файли назад до браузера, який потім відображає веб-сайт користувачеві.

Зручність веб-сервера полягає в тому, що його можна розмістити на будь-якому комп'ютері, підключеному до Інтернету.

Raspberry Pi є чудовою платформою для розміщення веб-сервера, особливо для особистих проєктів, тестових середовищ або невеликих веб-додатків.

Існує безліч практичних застосувань для власного веб-сервера Raspberry Pi. Він забезпечує розвиток необхідних навичок, також це безпечно,

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

контрольоване середовище для розміщення особистих або бізнес-проектів, від особистого блогу до системи домашньої автоматизації.

Ще його можна використовувати як локальне середовище розробки, де можна тестувати і налаштовувати веб-додатки, перш ніж перенести їх на більший загальнодоступний сервер.

Запуск веб-сервера на Raspberry Pi може стати кроком до більшої конфіденційності та контролю. Замість того, щоб покладатися на сторонні хостингові сервіси, можливо контролювати свої дані і те, як вони обробляються.

Також можливо налаштовувати і розширювати сервер у мірі зростання потреб, додаючи такі функції, як файловий сервер, медіа-сервер або навіть сервер хмарного зберігання даних.

Незважаючи на мініатюрний розмір і низьку вартість, Raspberry Pi має потужність і гнучкість, що робить його ідеальною платформою для розміщення веб-сервера.

Використовуючи Raspberry Pi можна створити власний веб-сервер, через який можна отримати повний доступ до 3D-принтера та 3D-друку через використання програмного забезпечення OctoPrint (рис.2.1) [4].

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

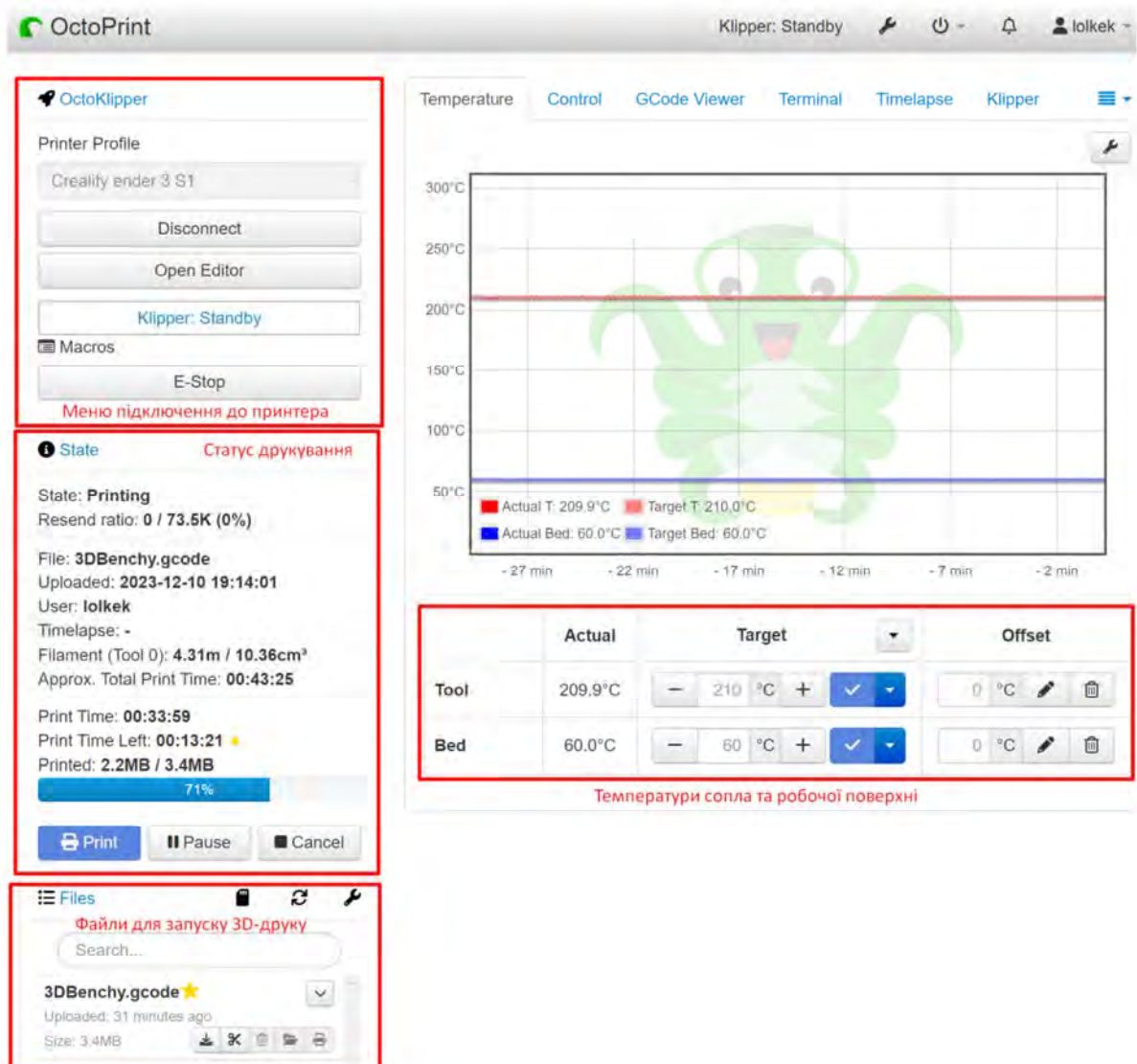


Рисунок 2.1 – Веб-сервер на базі OctoPrint

Серед переваг даного методу можна виділити зручність користування, миттєву передачу файлів та розширення функцій керування 3D-принтером, але наразі не можливо імплементувати систему виявлення дефектів та оповіщення користувача не використовуючи платні сервіси.

2.5 Метод 4. Фізична модифікація 3D-принтера та розширене налаштування моделей перед друком.

3D-принтери бувають різних типів, але самі поширені з них – це FDM(Fused Deposition Modeling) та SLA(Stereolithography). Вони відрізняються

технологією друку та матеріалами, які використовуються для виготовлення моделей (рис. 2.2).

Параметр	FDM принтери	SLA принтери
Принцип роботи	Використовує термопластичний філамент, що плавиться та відкладається шар за шаром	Використовує лазер або світлову ванну для затвердіння смоли шар за шаром
Якість друку	Зазвичай нижча, з більш вираженими шарами	Висока, з відмінною деталізацією та гладкістю
Роздільна здатність	Зазвичай менша, залежно від моделі	Висока, з можливістю друкувати дуже дрібні деталі
Швидкість друку	Зазвичай вища, особливо на великих об'ємах	Зазвичай повільніший через процес затвердіння смоли
Матеріали	Обмежений вибір термопластичних філаментів	Широкий вибір смол з різними властивостями
Витратні матеріали	Дешевші в порівнянні з смолами	Дорожчі, але можуть давати кращі результати
Витратність матеріалу	Може бути високою через відходи та підтримуючі структури	Зазвичай менше відходів, бо смола затвердівається точково
Безпека	Менше шкідливих випарів через використання термопластика	Потребує обережного відношення через використання рідини
Вартість принтера	Зазвичай дешевший	Зазвичай дорожчий

Рисунок 2.2 – Порівняння 3D-принтерів

SLA принтери мають відмінну якість друку, але потребують додаткової обробки моделей, та використовують значно дорожчі матеріали, тому доречніше використовувати саме FDM принтери [3].

Моделі FDM 3D-принтерів, які пропонують компанії, зазвичай мають брак можливостей або не надійну механічну складову. Тому є необхідність модернізувати прилади самостійно. У суспільстві 3D-друку безліч варіантів модифікацій та налагоджень під конкретні принтери і при успішній модернізації, все-таки, можливо досягти якості, яку можуть запропонувати лише промислові варіанти 3D-принтерів.

Завдяки фізичним модифікаціям можливо покращити якість друку, але для коректної роботи необхідно також налаштовувати параметри друку самих моделей. Деякі із налаштувань вимагають втручання у прошивку принтера та підбір параметрів певними методами.

Один із таких алгоритмів – Linear Advance. Він змінює процес вираховування рухів поверхні та сопла, та оптимізує їх, завдяки чому можливо збільшити швидкість друку вдвічі без втрати якості (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Приклад використання Linear Advance з різними коефіцієнтами

Для налаштування цього алгоритму проводять певні калібрування. Один з етапів включає друк тестової моделі, шари якої друкуються з різними параметрами та після візуального огляду вноситься коефіцієнт відхилення у прошивку.

Щодо фізичних модифікацій, зазвичай модернізують системи охолодження сопла та встановлення датчиків сканування робочої поверхні (рис.2.4).



Рисунок 2.4 – Приклад фізичної модернізації охолодження

Інколи необхідно повністю змінювати систему подачі філаменту, заміну крокових двигунів або заміна ремнів та заміна материнської плати.

У дороговартісних FDM 3D-принтерах інколи одразу встановлені необхідні модифікації, але і у них є потреба у модернізації.

Отже, завдяки фізичним та системним модифікаціям можливо досягти відмінної якості та швидкості, але це вимагає певних навичок в інженерії, 3D-моделюванні та великий обсяг часу. Також є ймовірність повністю вивести з ладу робочий 3D-принтер.

2.6 Вибір методу реалізації та його проектування

Після аналізу методів рішення проєкту «Система контролю якості друку на 3D-принтері», вирішено об'єднати кожен із методів та збудувати систему на їх основі.

Система буде працювати завдяки:

- вивід та оброблення зображення через бібліотеку OpenCV;
- використання нейронної мережі та завдяки Tensorflow;
- можливість контролю та перегляду друку моделей принтером через веб-сервер завдяки OctoPrint та встановленим плагінам;

– імплементация аналогу Linear Advance та встановлення прошивки Klipper.

Для графічного представлення процесу роботи системи було розроблено схему показану на рисунку 2.5.

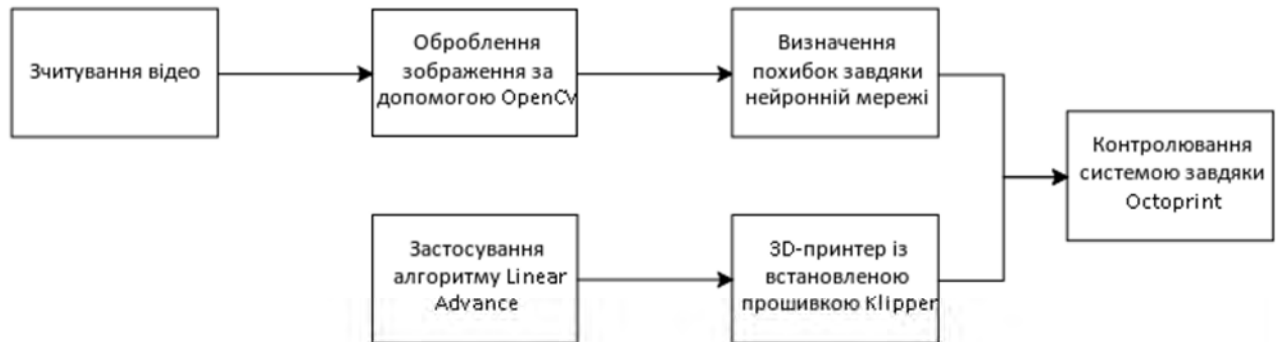


Рисунок 2.5 – Схема взаємодії функціонування системи

Для того, щоб реалізувати систему необхідно встановити програмне забезпечення OctoPrint, навчану нейронну мережу, програму оброблення на Raspberry Pi, замінити прошивку 3D-принтера на Klipper, та забезпечити їх функціонування.

Для налаштувань, завантаження та взаємодії із системою необхідно:

- підключити Raspberry Pi до живлення та стабільного інтернету;
- дізнатись IP-адресу Raspberry pi та забезпечити SSH підключення;
- приєднати веб-камеру до Raspberry pi та організувати хороше освітлення;
- персональний комп'ютер, який підключений до тієї ж мережі, що і Raspberry Pi;
- програми для віддаленого встановлення та менеджменту файлів через SSH;
- MicroSD із встановленою прошивкою Klipper до поточного типу принтерів.

Для успішного встановлення системи необхідно правильно налаштувати параметри операційної системи, вказати локальний адрес, увімкнути доступ через протокол SSH, дані про мережу (рис.2.6).

The screenshot shows the 'OS Customization' window with three tabs: 'ЗАГАЛЬНІ' (General), 'СЕРВІСИ' (Services), and 'НАЛАШТУВАННЯ' (Settings). The 'ЗАГАЛЬНІ' tab is active. It contains the following settings:

- ☒ Встановити ім'я хосту: test .local
- ☒ Встановити ім'я користувача і пароль
 - Ім'я користувача: lolke
 - Пароль: [masked]
- ☒ Налаштувати Wi-Fi
 - SSID: _Bruh_
 - Пароль: [masked]
 - ☐ Показати пароль ☐ Прихована SSID
 - Країна Wi-Fi: UA
 - ☐ Змінити налаштування регіону
 - Часова зона: Europe/Kiev
 - Розкладка клавіатури: US

Рисунок 2.6 – Налаштування операційної системи перед встановленням

Після встановлення операційної системи, та підключення до Raspberry Pi через SSH (рис.2.7) необхідно оновити систему до останньої версії, та встановити I/O пакети для підтримки OpenCV, завантажити середовище програмування python, після чого можливо починати реалізацію системи. Важливо все встановити правильно, адже через цей етап можуть виникнути похибки у функціонуванні приладу.

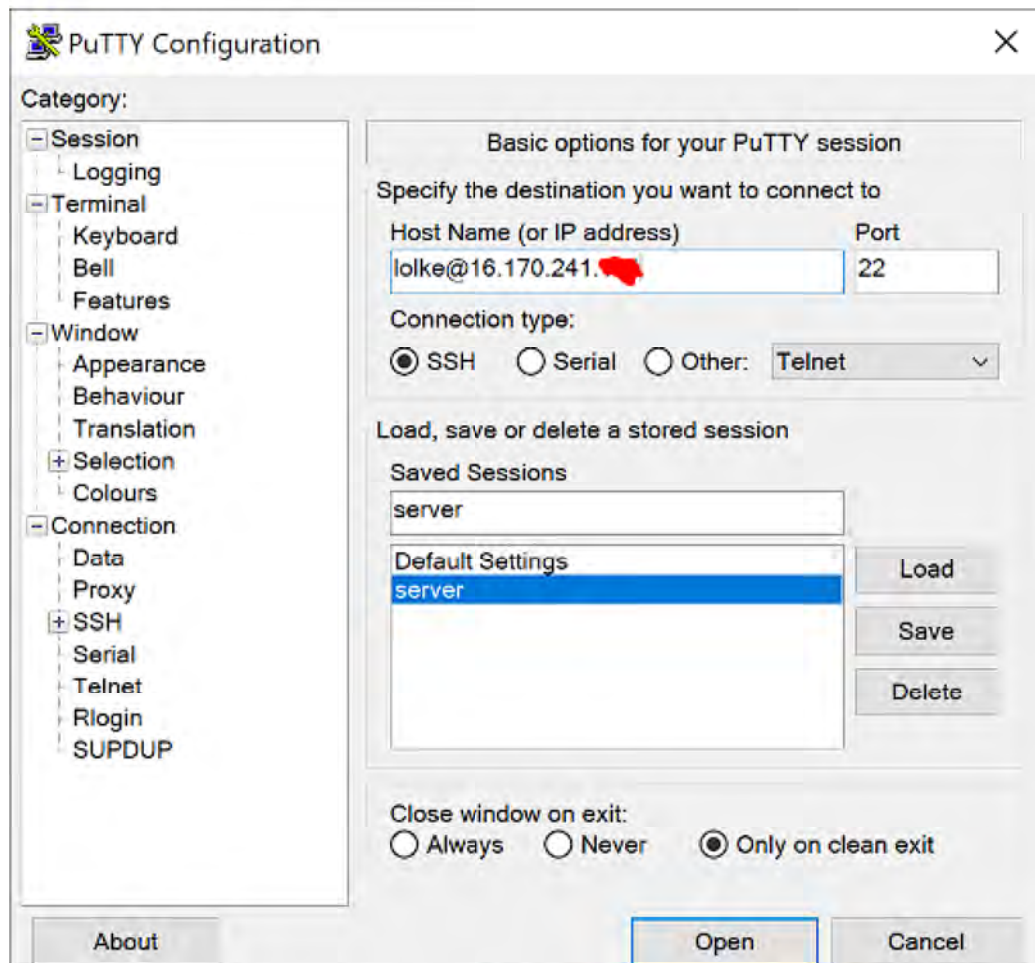


Рисунок 2.7 – Підключення до Raspberry Pi через програму PuTTY

Отже, у даному розділі проведено ретельний аналіз способів реалізації дипломного проєкту «Система контролю якості друку на 3D-принтері», вибір методу та підготовка до його створення.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

3.1 Аналіз та вибір 3D-принтера

Для реалізації системи необхідно обрати сумісний 3D-принтер із системою Klipper. Варто зазначити, що для цього не обов'язково купляти дорогі або важкодоступні моделі, а лише замінити певні компоненти. Цей спосіб вимагає просунутих навичок, коштів та можливий ризик повністю зруйнувати робочий 3D-принтер. У кожного із них своя будова та деталі, тому варто детально розглянути, на що звертати увагу при виборі.

Основні вимоги до 3D-принтера:

- система подачі філаменту типу Direct;
- керуючі плати типу ARM, AVR, PRU;
- драйвери крокових двигунів TMC2209 або краще;
- ефективне охолодження сопла та філаменту.

Завдяки системі “DirectExtruder” філамент поступає через друкарську голову, завдяки встановленому кроковому двигуну. Більш поширені принтери із типом «Bowden» (рис.3.1), у якому кроковий двигун закріплений на рамі, і пластик подається через трубку.

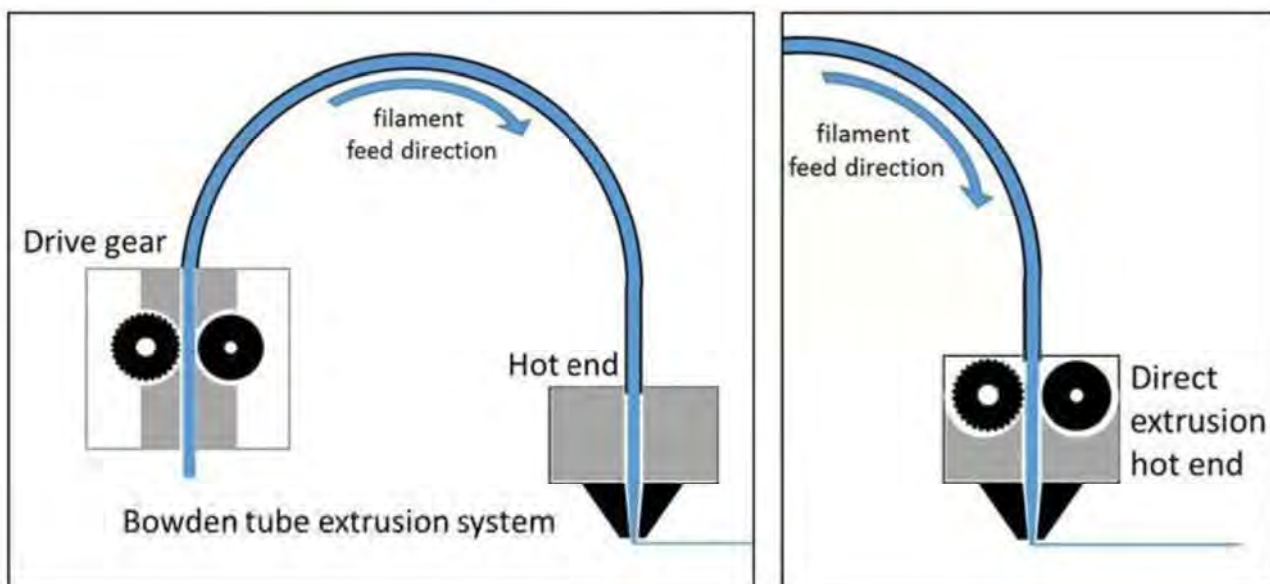


Рисунок 3.1 – Порівняння систем подачі філаменту Bowden та Direct

Завдяки прямому постачанню, можливо реалізувати систему, на якій готові моделі будуть мати меншу кількість дефектів, та можливість використовувати широкий спектр матеріалів філаменту. Для реалізації проєкту це необхідність, адже завдяки цьому можливо реалізувати набагато точнішу систему виявлення дефектів. Також це стосується і системи охолодження. Завдяки ефективному розподіленню тепла, під час друку моделі не виникатимуть поширені дефекти, та дозволить друкувати навіть гнучкими матеріалами (силікон).

Для встановлення програмного забезпечення Klipper необхідно мати нову ревізію драйверів та відповідну плату із їх підтримкою.

Драйвери відповідають за ефективність роботи крокових двигунів, і у нових версіях усунута помилка пропуску кроків.



Рисунок 3.2 – Драйвери крокових двигунів TMC2209

Отже, після аналізу необхідних умов для реалізації системи, варто розглянути готові рішення 3D-принтерів, на яких і буде реалізовуватись проєкт:

1) Купівля дешевого 3D-принтера:

На перший погляд, це непоганий варіант, адже він здешевить вартість реалізації проєкту, але не треба забувати, що у дешевих реалізаціях завжди проявляються певні недоліки, і їх прибрати можливо тільки фізично. Ціна комплекту модернізації та сам принтер може обійтись дорожче ніж зразу модернізований прилад, та пропадає необхідність витратити час.

2) Збірка власного 3D-принтера:

Це справді хороший варіант для більшості підприємств, у яких необхідно мати вузько направлені функції, або покращені базові характеристики. Завдяки

цьому можливо реалізувати максимально ефективну систему із усіма необхідними функціями, але це потребує ще вищого рівня навичок та надзвичайно великий капітал.

3) Купівля сучасного 3D-принтера:

Цей варіант один із найкращих, адже у таких рішеннях встановлюють сучасне обладнання, яке одразу має підтримку усього необхідного. Завдяки великому вибору та популярності серед користувачів можливо знайти безліч модифікацій, які покращують роботу 3D-принтера безкоштовно, та деякі з них виготовляються на самому пристрої.

Отже, обрано використання сучасного 3D-принтеру, а саме Creality Ender 3 S1.

3D-принтери від компанії Creality є дуже поширеними серед суспільства через доступну вартість та кількість можливостей за цю ціну. Ця версія принтера є вдосконаленим рішенням ender 3 з розширеним спектром функцій, яку вже перевірено роками.



Рисунок 3.3 – Creality Ender 3 S1

Характеристики 3D-принтера:

- Технологія друку: FDM (Метод послідовного наплавлення).
- Матеріал друку: PLA-пластик, ABS-пластик, TPU, PETG.
- Кількість друкуючих сопел: 1 шт.

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

- Товщина шару, що наноситься: 0.05-0.4 мм.
- Діаметр сопел: 0.4 мм.
- Габарити області друку: 220 x 220 x 270 мм.
- Програмне забезпечення для 3D друку: Simplify3D, Creality Slicer, Cura.
- Діаметр нитки: 1.75 мм.
- Максимальна швидкість друку: 150 мм/с.
- Діагональ екрану: 4.3".
- Підтримка карт пам'яті.
- Інтерфейс USB Type-C.
- Дійсна швидкість друку без втрати якості: 30 мм/с.

3D принтери базуються на кількох ключових компонентах і принципах, які працюють разом для створення тривимірних об'єктів шляхом поступового накладання шарів розплавленого матеріалу. Основні елементи та їхні функції включають екструдер, крокові двигуни, нагрівальні елементи, систему управління та плату керування.

Екструдер складається з подаючого механізму та нагрівального блоку. Подаючий механізм включає в себе мотор, який проштовхує філамент (термопластичний матеріал) через систему подачі до нагрівального блоку. Нагрівальний блок містить нагрівальний елемент (як правило, резистор або керамічний нагрівач), який розплавляє філамент до необхідної температури. Температура контролюється термістором, який забезпечує зворотний зв'язок для регуляції нагріву.

Крокові двигуни є важливою частиною механіки 3D принтера. Вони забезпечують точний рух екструдера та платформи по трьох осях: X, Y та Z. Крокові двигуни керуються сигналами від плати керування, яка відправляє імпульси струму для здійснення крокових рухів. Один кроковий двигун переміщує екструдер по осі X, інший - по осі Y, а третій двигун піднімає або опускає платформу по осі Z. Завдяки високій точності цих двигунів, принтер може створювати деталі з високою роздільною здатністю.

					КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Система управління складається з мікроконтролера та плати керування. Мікроконтролер обробляє G-code, набір інструкцій, які визначають рухи принтера, температуру нагріву, швидкість друку та інші параметри. Плата керування відповідає за обробку сигналів від мікроконтролера і передає їх до відповідних компонентів принтера, таких як крокові двигуни, нагрівальні елементи і вентилятори. Ця система забезпечує синхронізовану роботу всіх частин принтера.

Платформа, або стіл друку, забезпечує стабільну основу для нанесення шарів матеріалу. Вона може бути нагрітою, щоб покращити адгезію першого шару і запобігти деформаціям об'єкта під час охолодження. Нагрівання платформи контролюється термістором, подібно до нагрівального елемента екструдера.

Під час друку програмне забезпечення для нарізки (slicer) перетворює цифрову 3D модель на G-code. Цей код містить інструкції для мікроконтролера принтера, які визначають шляхи руху екструдера, температуру нагріву і швидкість подачі матеріалу. В результаті, екструдер плавить філамент і накладає розплавлений матеріал шар за шаром, створюючи тривимірний об'єкт.

3.2 Збірка та калібрування 3D-принтера

Складання 3D принтера включає кілька основних етапів, кожен з яких потребує акуратності та уваги до деталей. Перш за все потрібно підготувати інструменти: гайкові ключі, шестигранні ключі, плоскогубці (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Деталі 3D принтера

Крок 1. Зберіть раму принтера. З'єднайте алюмінієві профілі рами за допомогою шестиграних болтів та гайок. Переконайтеся, що рама вирівняна та стійка.

Крок 2. Встановіть двигуни осі X та Y. Прикрутіть двигуни до кареток осі X та Y за допомогою філіпсових гвинтів. Під'єднайте кабелі двигунів до плати керування.

Крок 3. Встановіть ремені осі X та Y. Проведіть ремені через ролики та шестерні двигунів. Натягніть ремені та закріпіть їх за допомогою затискачів.

Крок 4. Встановіть каретку осі Z. Прикрутіть каретку осі Z до рами принтера за допомогою філіпсових гвинтів. Встановіть стрижень осі Z в каретку.

Крок 5. Встановіть екструдер. Прикрутіть екструдер до каретки осі Z за допомогою філіпсових гвинтів. Під'єднайте кабель екструдера до плати керування (рис. 3.5).



Рисунок 3.5 – Встановлення екструдера

Крок 6. Встановіть платформу друку. Прикрутіть платформу друку до каретки осі Z за допомогою філіпсових гвинтів.

Крок 6: Прикріпіть дисплей до правої сторони бази за допомогою гвинтів M5x8. Прикріпіть блок живлення до лівої сторони бази за допомогою гвинтів M5x8.

Крок 7: Підключіть кабелі до відповідних двигунів та кінцевих вимикачів (рис. 3.6). [6]



Рисунок 3.6 – Підключення кабелів

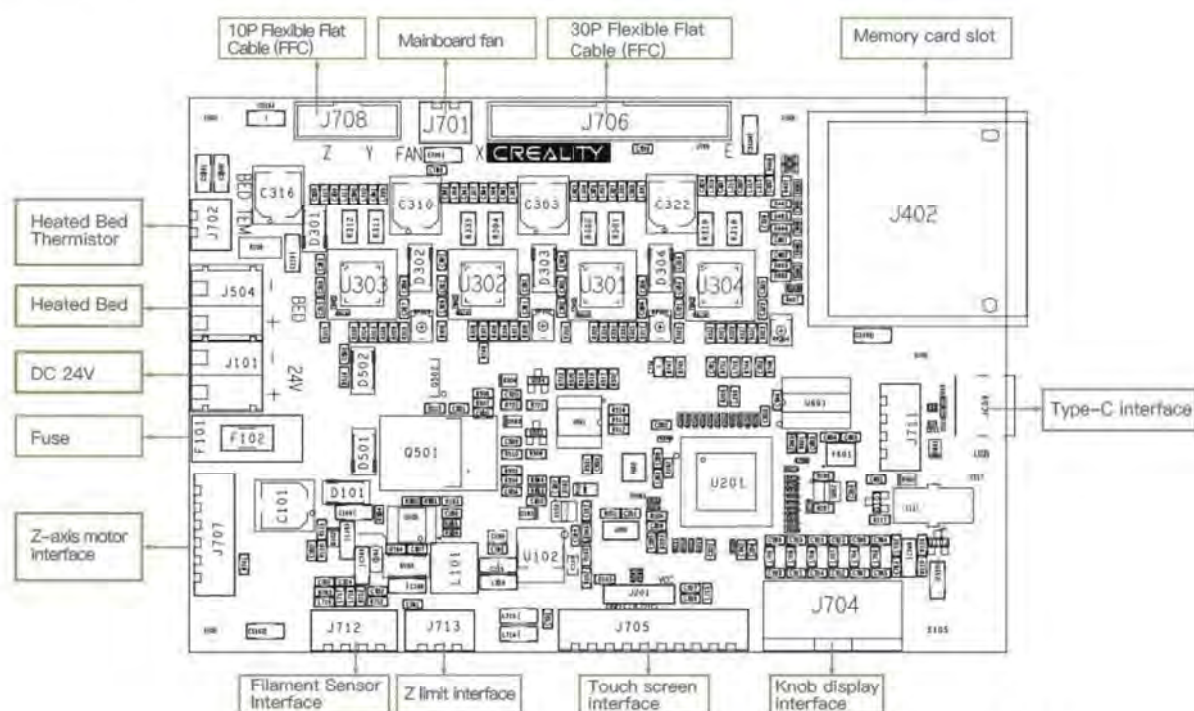
Крок 8: Фінальна перевірка та налаштування. Перевірте всі з'єднання: переконайтеся, що всі гвинти закручені щільно та ремені X та Y осей натягнуті правильно. Вирівняйте платформу за допомогою регулювальних гвинтів на її

кутах. Переконайтеся, що насадка екструдера знаходиться на правильній висоті над платформою.

Крок 9: Підключіть живлення, встановіть програмне забезпечення для керування 3D принтером на комп'ютері та налаштуйте параметри друку відповідно до рекомендацій виробника.

Завершивши всі ці кроки, можна розпочати свій перший друк на 3D принтері.

Основою 3D принтера є обчислювальна машина, яка забезпечує його роботу і на рисунку 3.7 показано будову тієї, що встановлена на принтері, який використовується для реалізації проєкту.



на цьому етапі. Після цього потрібно нагріти сопло та робочу поверхню. Якщо все працює правильно можна переходити до наступного етапу.

Далі при нагрітому соплі та поверхні проводимо калібровку початкової точки Z шляхом затиснення пружин поверхні та вимірювання проміжку від сопла до стола листком A4 (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 – Калібровка осі Z

Після цього калібруємо рух філаменту. Калібрування відкатів (retraction) на 3D принтері є важливим процесом, який допомагає зменшити нитки та краплі пластику, що можуть виникати під час друку. Відкат – це рух філаменту назад у екструдер для зменшення тиску і запобігання витіканню матеріалу, коли екструдер переміщується без друку. Правильно налаштований відкат покращує якість поверхні друкованого об'єкта, роблячи його чистішим і точнішим.

Причини калібрування відкату включають зменшення ниток (stringing), запобігання краплям та покращення якості друку. Нитки – це тонкі ниточки пластику, які можуть з'явитися між різними частинами моделі, коли екструдер переміщується над нею без друку. Відкат допомагає витягнути розплавлений пластик назад у екструдер, щоб запобігти утворенню ниток. Краплі – це невеликі грудочки пластику, які можуть капати з екструдера на модель під час переміщення. Відкат знижує тиск у форсунці, що запобігає витіканню пластику.

Правильний відкат забезпечує чистіші переходи між друкованими частинами, що покращує загальну якість об'єкта.

Процес калібрування відкати починається з підготовки. Спочатку вибирається філамент, який буде використовуватися для друку. Переконається, що принтер налаштований на рекомендовані температури друку для цього філаменту. Використовується програма для нарізки (slicer), яка дозволяє налаштовувати параметри відкату, наприклад, Cura, PrusaSlicer або Simplify3D.

Процес калібрування включає налаштування базових параметрів, таких як відстань відкату (Retraction Distance) та швидкість відкату (Retraction Speed). Відстань відкату – це відстань, на яку філамент витягується назад у екструдер. Починають з базового значення, рекомендованого для конкретного типу екструдера (наприклад, 5 мм для Bowden екструдера або 2 мм для прямого приводу). Швидкість відкату – це швидкість, з якою філамент витягується назад. Починають з середнього значення (наприклад, 40 мм/с).

Вибирається проста тестова модель, яка має багато рухів екструдера між окремими частинами, наприклад, тест на нитки або куб з проміжками. Запускається друк і спостерігаються результати. Перевіряється модель на наявність ниток та крапель. Якщо є багато ниток, збільшується відстань відкату на 1 мм і тест повторюється. Якщо нитки все ще присутні, збільшується швидкість відкату на 5-10 мм/с і тест повторюється. Якщо з'являються пропуски в друці після відкату, зменшується відстань або швидкість відкату.

Продовжується коригування відстані і швидкості відкату, доки не досягається мінімальна кількість ниток та крапель. Записуються оптимальні значення для подальшого використання з цим філаментом. Вводяться знайдені оптимальні значення у постійні налаштування в програмі для нарізки.

Калібрування відкатів на 3D принтері є критично важливим процесом для забезпечення високої якості друку. Це допомагає зменшити небажані нитки і краплі пластику, що можуть зіпсувати зовнішній вигляд моделі. Поступове

					КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

налаштування параметрів відстані та швидкості відкату дозволяє досягти оптимальних результатів і покращити загальну якість друку.

Далі, калібруємо алгоритм Linear Advance.

Linear Advance – це вдосконалена технологія калібрування екструдера у 3D принтерах, яка дозволяє більш точно контролювати подачу філаменту під час друку. Основна ідея полягає в тому, щоб компенсувати інерційні ефекти та пружність філаменту, що дозволяє уникнути проблем з надмірним або недостатнім екструдюванням матеріалу, особливо під час зміни швидкості руху екструдера.

У традиційних системах екструдювання, коли принтер змінює швидкість руху екструдера, виникає проблема з подачею філаменту.

Якщо швидкість зменшується, екструдер продовжує подавати філамент з попередньою швидкістю, що призводить до надмірного екструдювання і утворення надлишкових скупчень матеріалу.

Якщо швидкість збільшується, навпаки, може виникати недостатнє екструдювання, що призводить до утворення пустот.

Linear Advance вирішує ці проблеми за допомогою попереднього планування подачі філаменту з урахуванням очікуваних змін швидкості руху екструдера. Основна ідея полягає в тому, щоб змінювати тиск у форсунці пропорційно до зміни швидкості руху. Це досягається шляхом введення параметра K, який визначає, наскільки екструдер повинен компенсувати зміни швидкості.

Калібрування починається з вибору початкового значення параметра K. Потім виконується тестовий друк, де поступово змінюється значення K, щоб визначити оптимальне значення, яке забезпечує найкращу якість друку. Типовий тестовий об'єкт може містити різні сегменти з поступовим збільшенням та зменшенням швидкості друку, що дозволяє спостерігати ефект зміни параметра K на якість екструдювання (рис. 3.9).

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

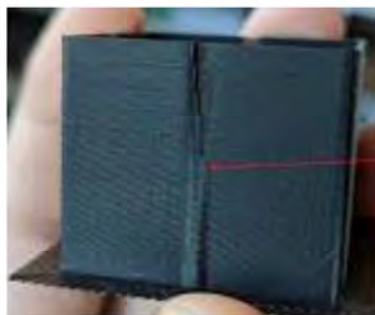


Рисунок 3.9 – Тестова модель із зміною параметра К

Основні переваги використання Linear Advance включають:

- Покращена якість друку: зменшення дефектів, таких як надмірне екструдкування на кутах та недостатнє екструдкування на прямих ділянках.
- Точність: більш точний контроль подачі філаменту дозволяє створювати деталі з більшою точністю та деталізацією.

Отже, Linear Advance є важливою технологією для вдосконалення процесу екструдкування в FDM 3D принтерах, забезпечуючи точний і стабільний друк завдяки компенсації змін швидкості руху екструдера.

Після успішних калібровок вводимо значення К-фактора та заміру величини відкатів і вносимо у попередньо встановлений слайсер.

3.3 Реалізація системи

Для реалізації програмного забезпечення проєкту необхідно виконати певні дії, які описано нижче.

Завантажуємо Raspberry Pi Imager з офіційного сайту. Після встановлення octopi-klipper за шляхом Other specific-purpose OS >> 3D Printing >> octopi-klipper. Редагуємо налаштування вписуючи дані WIFI (рис. 3.10).



Рисунок 3.10 – Встановлення OctoKlipper

Після встановлення витягуємо картку з ПК та встановлюємо у Raspberry Pi. Використовуючи програму puTTY на ПК який підключений до тієї ж мережі, як і сама Raspberry Pi та підключаємось до плати (рис. 3.11).

```
lolke@octopi: ~
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.

-----
Access OctoPrint from a web browser on your network by navigating to any of:

    http://octopi.local
    http://192.168.0.105

https is also available, with a self-signed certificate.

-----
This image comes without a desktop environment installed because it's not
required for running OctoPrint. If you want a desktop environment you can
install it via

    sudo /home/lolke/scripts/install-desktop

-----
OctoPrint version : 1.9.3
OctoPi version    : 1.0.0

-----
lolke@octopi:~$
```

Рисунок 3.11 – Підключення через SSH

Через браузер підключаємось до octoprint та налаштовуємо його відповідно до мережі та від моделі принтера. Ці налаштування потрібні для вбудованого слайсера, тому їх можна пропустити (рис. 3.12).

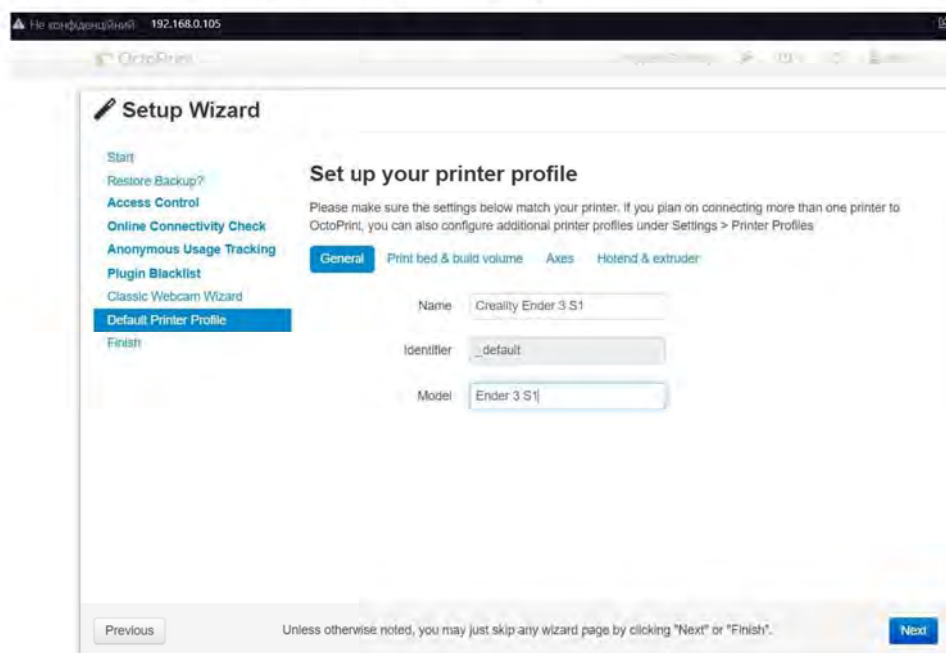


Рисунок 3.12 – Налаштування профілю OctoPrint

Після успішного налаштування raspberrypi Pi необхідно налаштувати сам принтер для правильної роботи з Klipper.

Через puTTY переходимо у папку Klipper. Необхідно налаштувати Klipper під принтер. Вписуємо команду `make menuconfig` та налаштовуємо, після цього будуємо образ командою `make`.

Варто мати на увазі, що 3D-принтери від Creality можуть мати різні типи плат. Тип плати можна побачити у прошивці. У даному випадку STM32F401, але також попадаються і F103.

Через менеджер файлів завантажуюмо на SD-карту файл `klipper.bin` та ставимо у принтер. Варто зауважити, що після встановлення `klipper` екран не буде працювати, через те що екран розрахований під прошивку `marlin`, але досі можливий доступ через octoprint.

Після усіх цих етапів встановлюємо навчану нейронну мережу через використання OpenCV та PyTorch, та розробляємо програму виявлення похибок.

[Додаток А]

					КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4 Тестування системи

Після тестування реалізованої системи, можна виявити, що принтер почав працювати набагато ефективніше, та завдяки нейронній мережі кількість похибок на моделі значно зменшилась. Усі команди, які подає користувач через веб-інтерфейс виконуються належним чином, але черга виконання команд може вплинути на результат. Наприклад при керуванні соплом появляється повідомлення, що перед керуванням друкуючої голови необхідно припаркувати робочу поверхню. Також при зміні певних параметрів необхідно перезавантажувати сервер для збереження налаштувань.

Обрано невелику тестову модель, на якій використовуються безліч різних параметрів (рис. 3.13).

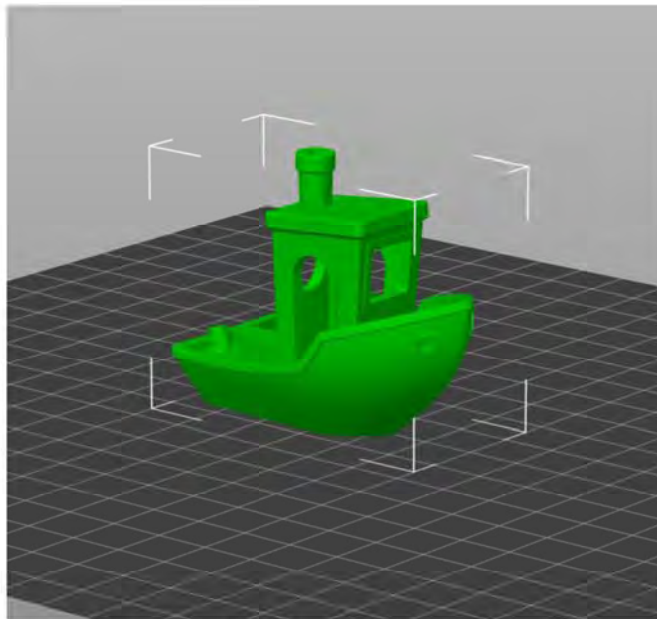


Рисунок 3.13 – Тестова модель

Без модифікацій ця модель друкується приблизно 1.3 години. Після налаштування усього ПЗ та встановлення gaspberry рі час скоротився до близько 45 хвилин.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

4.1 Аналіз ринку

Основні характеристики розробленої системи:

- збільшена швидкість друку до 3х від стандартного FDM 3D-принтера;
- можливість повного контролю принтером через веб-сервер;
- підключення до 3D-принтера із будь-якої точки світу;
- компіляція та завантаження 3D-моделей через веб-сервер;
- покращення якості моделей без втрати швидкості;
- вбудований штучний інтелект виявлення дефектів під час друкування;
- сповіщення користувача про наявність похибок.

Недоліки:

- висока вартість розробки системи;
- відсутність кваліфікованих спеціалістів;
- можливий ризик виведення 3D-принтера з ладу при відсутності досвіду та навичок;
- розробка системи витрачає багато часу.

Проект «Система контролю якості друку на 3D-принтері» можливо вважати унікальним, адже у ньому поєднанні усі необхідні функції під час друку та можливість дистанційного керування.

Сьогодні швидкість виробництва та гнучкість управління технологічними процесами є ключовими факторами успіху в багатьох галузях промисловості. Зменшення часу друку та контроль якості на 3D принтерах дозволяє не тільки підвищити продуктивність, але й зменшити витрати на електроенергію та обслуговування обладнання. Дистанційне керування принтером через смартфон або інший гаджет відкриває нові можливості для управління виробничими процесами, дозволяючи оперативно реагувати на зміну умов та потреб ринку.

Ринок 3D принтерів стрімко зростає, що обумовлено збільшенням попиту на індивідуалізовані та малосерійні вироби.

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

На ринку представлено безліч моделей, кожна з яких має свої переваги та недоліки. Тому, варто розглянути рішення, які вже існують на даний момент (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Класифікація 3D принтерів

Категорія	Модель	Переваги	Недоліки	Вартість
для початківців	Anycubic i3 Mega	Доступна ціна, простота у використанні, гарна якість друку	Шумний в роботі, обмежений вибір матеріалів для друку	Приблизно 200-300 доларів США
середній рівень	Creality CR-10	Велика робоча зона, доступна ціна, проста конструкція	Відсутність автоматичного вирівнювання платформи, обмежений вибір матеріалів	Приблизно 300-400 доларів США
професійний рівень	Ultimaker 3	Висока якість друку, підтримка двох матеріалів, велика робоча зона	Висока ціна, потребує багато місця для встановлення	Приблизно 3,500-4,000 доларів США

Окремо варто виокремити один із найвідоміших 3D-принтерів із вбудованим штучним інтелектом – це Creality K1, який має систему зупинки друку при похибках.



Рисунок 4.1 – Creality K1

У принтер вмонтована камера, яка автоматично зупиняє друк через використання нейронної мережі. Основний недолік такого рішення — ціна.

Такий принтер коштує понад 50000 грн, який підійде лише для підприємств [5].

Планшети із вбудованим інтерфейсом відносно доступні у ціні, та мають одразу вбудовану операційну систему Klipper, але зазвичай розробники блокують частину функціоналу, тому це рішення підійде лише для ознайомлення із Klipper.

Для професійного користування це рішення не підходить, а також ціна таких пристроїв може перевищувати вартість самого 3D-принтера (рис.4.2).



Рисунок 4.2 – Creality Sonic Pad

					КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

4.2 Розрахунок витрат на проектування

Загальна вартість кваліфікаційної роботи станом на 27.05.2024 – 25000 грн.

Таблиця 4.2 – Вартість складових системи

Необхідні елементи	Загальна вартість
3D-принтер Creality Ender 3 S1	20000 грн.
Raspberry Pi 4 Model B 4 GB	3400 грн.
Охолодження на Raspberry Pi	200 грн.
Блок живлення	400 грн.
SD-Картка	150 грн.
Type – C кабель	150 грн.
Додаткові витрати	700 грн.
Загальна вартість	25000 грн.

У додаткові витрати входить філамент для тестування та Адгезивне покриття робочої поверхні.

Розраховану заробітну плату працівників показано на таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Розрахунок ЗП працівників

Номер	Посада	Оклад, грн/міс	ПДФО (18%), грн	Військовий збір (1.5%), грн	ЄСВ (22%), грн	Кількість місяців	Загальна сума з/п, грн (до оподаткування)	Сума з/п, грн
1	Старший науковий співробітник	5426	976.68	81.39	1193.72	5	27130	21,839.65

Продовження таблиці 4.3

2	Інженер I категорії	4458	802.44	66.87	980.76	5	22290	17,953.45
3	Інженер II категорії	4141	745.38	62.12	911.02	5	20705	16,681.00
						Усього зарплати:	70,125	56,474.10

Загальні витрати на проектування показано на рисунку 4.3.

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
Зарплата працівників	56,474.10	Зарплата за 5 місяців для 3 працівників
Відрахування на соціальні потреби	12427.00	22% від заробітної плати
Контрагентські роботи і послуги	8472.01	Вартість послуг зовнішніх підрядників, 15% від ЗП
Витрати на відрядження	7834.05	Витрати на відрядження для одного працівника
Інші прямі витрати	14567.32	
Усього прямих витрат	99774.48	Загальна сума прямих витрат
Накладні витрати	29932.34	30% від прямих витрат
Планові накопичення	29832.56	23% від накладних та прямих витрат
Усього, кошторисна вартість проекту	159539.38	Сума прямих, накладних витрат та планові накопичення
Податок на додану вартість	31907.87	20% від кошторисної вартості проекту
Загалом, договірна ціна розробки	191447.25	Сума кошторисної вартості роботи та податку на додану вартість

Рисунок 4.3 – Кошторис витрат на проектування

4.3 Обґрунтування необхідності розробки

Дана система включає у себе повне дистанційне керування, можливість контролю, калібровки, модифікації будь-якого аспекту 3D-принтера дистанційно, окрім фізичних ушкоджень, Значне покращення якості друку моделей та збільшення швидкості без наявних дефектів. У разі виявлення похибок нейронна мережа відправляє лист користувачеві, та автоматично зупиняє процес друку.

Певні недоліки можливо усунути шляхом здобуття відповідного досвіду та навичок у модифікації подібних систем, тому таким чином можливо скоротити час на розробку.

При розробці системи можливо зекономити шляхом вибору дешевшої моделі 3D-принтера, наприклад Creality Ender 3 (рис.4.3).



Рисунок 4.3 – Creality Ender 3

Даний принтер не підтримує ОС Klipper через застарілу плату, тому можливо замінити модель головної плати, що значно здешевить вартість системи. Головним недоліком такого рішення є високий ризик виведення принтера із ладу, адже необхідно повністю перепрограмувати принтер під використання нової плати, та випаювати деякі компоненти.

Загальна ціна такого рішення із заміною комплектуючих сягатиме 17000 грн, але при усіх ризиках та необхідність витрачання часу на переробку принтера вирішено відкинути даний варіант.

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота на тему "Система управління якістю друку на 3D-принтері" дало значні результати та дозволило зробити кілька важливих висновків.

По-перше, було проведено комплексний аналіз новітніх технологій та методів контролю якості 3D-друку. У цьому дослідженні були розглянуті різні підходи, включаючи використання комп'ютерного зору, методів машинного навчання та інших передових технологій. Вивчення існуючих рішень дозволило визначити основні напрямки, які можуть слугувати основою для розробки унікальної системи управління якістю друку на 3D-принтері.

Проект використовує комп'ютерний зір для виявлення дефектів на різних етапах друку та автоматично корегує параметри друку для усунення виявлених дефектів. Це забезпечує високу якість готової продукції та знижує рівень браку.

Випробування нової системи показали значне підвищення ефективності роботи 3D-принтерів. Використання нейронних мереж та інших інструментів машинного навчання значно зменшило кількість помилок у надрукованих моделях.

Така система особливо важлива для промислових компаній, дослідницьких центрів, медичних установ та навчальних закладів, де 3D-друк використовується на постійній основі. Таким чином, розроблена система допоможе компаніям підвищити свою конкурентоспроможність та забезпечити високу якість продукції.

Отже, розроблена система є важливим кроком у розвитку технології 3D-друку, її впровадження має велике практичне значення і сприяє подальшому прогресу в цій галузі, забезпечуючи високу якість продукції та ефективність виробничого процесу.

					<i>КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Документація Klipper – прошивка 3d-принтера : веб-сайт.

URL: <https://www.klipper3d.org/> (дата звернення 03.05.2024)

2. Модуль навчання нейронної мережі PyTorch: веб-сайт.

URL: <https://pytorch.org/> (дата звернення 09.05.2024)

3. Різниця FDM та SLA 3D-принтерів : веб-сайт.

URL: <https://monofilament.com.ua/ua/publikatsiji/fdm-abo-sla-scho-obrati> (дата звернення 07.05.2024)

4. Швидкий веб-інтерфейс для 3D-принтера : веб-сайт.

URL: <https://octoprint.org/> (дата звернення 21.05.2024)

5. Онлайн магазин : веб-сайт. URL: <https://artline.ua/uk/product/3d-printer-creality-cr-k1> (дата звернення 21.05.2024)

6. Інструкція збірки 3D принтера : веб-сайт.

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=JImq9P893jk> (дата звернення 25.05.2024)

7. Як навчити нейронну мережу через використання PyTorch : веб-сайт.

URL: <https://pytorch.org/tutorials/> (дата звернення 31.05.2024)

					КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

Додаток А. Алгоритм роботи системи

Лістинг програмного коду

```
import cv2
import onnxruntime as ort
import numpy as np
import smtplib
from email.mime.text import MIMEText

# Завантаження моделі ONNX
model_path = 'model.onnx'
session = ort.InferenceSession(model_path)

# Функція для обробки зображення та передбачення похибок
def detect_errors(image):
    # Передобробка зображення
    blob = cv2.dnn.blobFromImage(image, scalefactor=1.0,
size=(224, 224), mean=(0, 0, 0), swapRB=True, crop=False)
    blob = np.transpose(blob, (0, 2, 3, 1))
    blob = np.array(blob, dtype=np.float32)

    # Виконання передбачення
    input_name = session.get_inputs()[0].name
    result = session.run(None, {input_name: blob})

    # Обробка результату (припускаємо, що вихідний шар моделі
видає ймовірність похибки)
    error_probability = result[0][0]
    return error_probability > 0.5 # Поріг для виявлення
похибки

# Функція для відправки повідомлення електронною поштою
def send_email(message):
```

					КР.КІ 24.538.10.000 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

sender = 'your_email@gmail.com'
receiver = 'user_email@gmail.com'
password = 'your_email_password'

msg = MIMEText(message)
msg['Subject'] = '3D Printer Error Detected'
msg['From'] = sender
msg['To'] = receiver

with smtplib.SMTP_SSL('smtp.gmail.com', 465) as server:
    server.login(sender, password)
    server.sendmail(sender, receiver, msg.as_string())

# Захоплення зображення з камери
cap = cv2.VideoCapture(0)

while True:
    ret, frame = cap.read()
    if not ret:
        break
    # Виявлення похибок на зображенні
    if detect_errors(frame):
        send_email("Error detected on the 3D printer. Please
check the print immediately.")
        print("Error detected! Notification sent.")

    # Відображення зображення (для візуалізації)
    cv2.imshow('3D Printer Monitoring', frame)

    # Натисніть 'q' для виходу з циклу
    if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('q'):
        break
cap.release()
cv2.destroyAllWindows()

```