

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

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

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

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
(рівень вищої освіти)

Розробка та налаштування 3D принтерів на базі програмного засобу Klipper  
(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,  
групи АКТСІ-20-3

Іван ЖУРКОВ

(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма Системна інженерія  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф КІТАР Нікітін Д.О.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту  
Зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І. Ш

(прізвище, ініціали)

2025 р.

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

20 жовтня 2025 р.

Іван ЖУРКОВ

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики та комп'ютеризованих технологій

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Системна інженерія  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_\_» \_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Журков Іван Вадимович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та налаштування 3D принтерів на базі програмного засобу Klipper

Затверджена наказом університету від 03.09.2025 р. №766 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 31 жовтня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

3.1 Програмне забезпечення – Klipper;

3.2 Модель 3D принтера – Flying Bear Ghost 5 ;

3.3 Плата керування принтером – Robin Nano;

3.4 Плата установки Klipper – Raspberry Pi 4;

3.5 Драйвера крокових двигунів – TMC3060;

3.6 Вихідна напруга на 3D принтер – 24 В.

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

4.1 Вступ;

4.2 Огляд літератури та аналіз існуючих рішень;

4.3 Програмне забезпечення Klipper. Архітектура та функціонал;

4.4 Розробка Оптимізація 3D-принтера на базі Klipper;

4.5 Охорона праці;

4.6 Висновки.

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

---

---

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

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

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір матеріалів для проведення розробки	01.09.2025 – 11.09.2025	виконано
2	Розробка розділу «Огляд літератури та аналіз існуючих рішень»	12.09.2025 – 18.09.2025	виконано
3	Розробка розділу «Програмне забезпечення Klipper. Архітектура та функціонал»	19.09.2025 – 30.09.2025	виконано
4	Розробка розділу «Розробка Оптимізація 3D-принтера на базі Klipper»	01.10.2025 – 07.10.2025	виконано
5	Оформлення кваліфікаційної роботи	08.10.2025 – 11.10.2025	виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернетсервісом StrikePlagiarism	16.10.2025 – 17.10.2025	виконано
7	Подання роботи на рецензію		
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри		
9	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК		

Дата видачі завдання 01 вересня 2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Іван ЖУРКОВ  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доц. Дмитро НІКІТІН  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 63 с., 9 табл., 20 рис., 1 дод., 25 джерела.

3D-ПРИНТЕР, KLIPPER, ОПТИМІЗАЦІЯ ДРУКУ, ПРОШИВКА, КОНТРОЛЕР, ШВИДКІСТЬ ДРУКУ, ТОЧНІСТЬ ДРУКУ, G-CODE, OPEN-SOURCE, СИНХРОНІЗАЦІЯ.

Об'єкт розробки – процес функціонування та управління 3D-принтерами у контексті підвищення їх продуктивності та якості друку.

Предмет розробки – програмне забезпечення Klipper як засіб оптимізації роботи 3D-принтерів, його функціональні можливості, принципи роботи, вплив на точність, швидкість та стабільність друку.

Мета роботи полягає в аналізі та впровадженні програмного забезпечення Klipper для оптимізації роботи 3D-принтерів з метою підвищення якості друку, швидкості обробки завдань та ефективності використання апаратних ресурсів.

У роботі було досліджено поняття та основні принципи технології 3D-друку, вивчено особливості роботи 3D-принтерів та проведено ознайомлення з архітектурою й функціоналом програмного забезпечення Klipper. Окрім того, було розроблено та програмно реалізовано оптимізацію роботи 3D-принтера на базі Klipper, що включає вибір обладнання, інсталяцію та налаштування Klipper, калібрування ключових функцій і створення макросів та G-code скриптів. Також у роботі були виконані розрахунки та впроваджені заходи для забезпечення безпечних умов праці під час експлуатації 3D-принтера.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та налаштуванні 3D-принтерів, а також при впровадженні програмних рішень для підвищення точності та ефективності 3D-друку.

## ABSTRACT

The explanatory note contains: 63 p., 9 table ,20 figures, 1 appendices, 25 sources.

3D PRINTER, KLIPPER, PRINTING OPTIMIZATION, FIRMWARE, CONTROLLER, PRINTING SPEED, PRINTING ACCURACY, G-CODE, OPEN-SOURCE, SYNCHRONIZATION

The object of the study is the process of functioning and management of 3D printers in the context of increasing their productivity and printing quality.

The subject of the study is the Klipper software as a means of optimizing the operation of 3D printers, its functional capabilities, principles of operation, impact on the accuracy, speed and stability of printing.

The purpose of the work is to analyze and implement the Klipper software to optimize the operation of 3D printers in order to improve the quality of printing, the speed of task processing and the efficiency of using hardware resources.

The work investigated the concept and basic principles of 3D printing technology, studied the features of the operation of 3D printers and introduced the architecture and functionality of the Klipper software. In addition, the optimization of the operation of a 3D printer based on Klipper was developed and implemented in software, which includes the selection of equipment, installation and configuration of Klipper, calibration of key functions and creation of macros and G-code scripts. The work also included calculations and measures to ensure safe working conditions during the operation of a 3D printer.

The results obtained can be used in the design and configuration of 3D printers, as well as in the implementation of software solutions to increase the accuracy and efficiency of 3D printing.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	7
Вступ.....	8
1 Огляд літератури та аналіз існуючих рішень.....	10
1.1 Технологія 3D-друку: основні принципи.....	10
1.2 Особливості роботи 3D-принтерів.....	15
1.3 Програмне забезпечення для 3D-принтерів: Marlin, Repetier, Klipper.....	18
1.4 Переваги Klipper над традиційним ПЗ.....	21
1.5 Висновки до першого розділу.....	22
2 Програмне забезпечення Klipper. Архітектура та функціонал.....	24
2.1 Концепція та архітектура Klipper.....	24
2.2 Основні функції та можливості Klipper.....	27
2.3 Можливості оптимізації друку за допомогою Klipper.....	29
2.4 Аналіз САУ для крокового двигуна.....	31
2.5 Висновки до другого розділу.....	33
3 Розробка Оптимізація 3D-принтера на базі Klipper.....	35
3.1 Вибір обладнання та підготовка до встановлення.....	35
3.2 Інсталяція та початкове налаштування Klipper.....	38
3.3 Програмна реалізація та калібрування ключових функцій Klipper.....	42
3.3.1 Калібрування Input Shaping.....	42
3.3.2 Калібрування Pressure Advance.....	43
3.3.3 Калібрування PID-контролера.....	44
3.3.4 Розробка та використання макросів та G-code скриптів.....	44
3.4 Висновки до третього розділу.....	45
4 Охорона праці.....	47
4.1 Правила безпеки під час роботи з 3D-принтером.....	47
4.2 Техніка безпеки при роботі з філаментом для 3D-друку.....	48
4.3 Висновки до четвертого розділу.....	51
Висновки.....	52

Перелік джерел посилання.....	53
Додаток А Програмний код.....	56
Додаток Б Демонстраційний матеріал.....	60

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

CAD – комп’ютерне моделювання;

EBM (Electron Beam Melting) – електронно-променеве плавлення;

FDM (Fused Deposition Modeling) – метод створення тривимірних об’єктів шляхом послідовного наплавлення матеріалу шар за шаром;

FFF (Fused Filament Fabrication) – метод створення тривимірних об’єктів шляхом послідовного наплавлення матеріалу шар за шаром;

LOM (Laminated Object Manufacturing) – технологія пошарового склеювання плівок;

MJM (Multi Jet Modeling) – метод багатоструменевого моделювання;

SLA (Stereolithography Apparatus) – стереолітографія;

SLS (Selective Laser Sintering) – лазерна технологія селективного спікання;

SLM (Selective Laser Melting) – селективне лазерне плавлення;

3DP (Three-Dimensional Printing) – технологія струменевого тривимірного друку.

## ВСТУП

У сучасному світі технології тривимірного друку (3D-друку) стрімко розвиваються та знаходять дедалі ширше застосування в різних галузях – від прототипування й машинобудування до медицини та побутового використання. 3D-принтери стали доступнішими, однак ефективність їх роботи часто залежить не лише від апаратного забезпечення, а й від програмного контролю. Саме тому зростає інтерес до альтернативного програмного забезпечення, яке дозволяє оптимізувати процес друку, підвищити точність, швидкість та стабільність пристрою.

Одним із таких рішень є програмне забезпечення Klipper – потужне програмне забезпечення з відкритим кодом, яке переносить значну частину обчислювальної навантаження з мікроконтролера принтера на зовнішній комп'ютер (наприклад, Raspberry Pi). Такий підхід дозволяє досягти значно кращих показників продуктивності. Klipper підтримує багатозадачність, забезпечує точнішу синхронізацію рухів, розширені можливості налаштування та сумісність із популярними моделями принтерів.

Метою розробки – є аналіз та впровадження програмного забезпечення Klipper для оптимізації роботи 3D-принтерів з метою підвищення якості друку, швидкості обробки завдань та ефективності використання апаратних ресурсів.

Об'єкт розробки – процес функціонування та управління 3D-принтерами у контексті підвищення їх продуктивності та якості друку.

Предмет розробки – програмне забезпечення Klipper як засіб оптимізації роботи 3D-принтерів, його функціональні можливості, принципи роботи, вплив на точність, швидкість та стабільність друку.

Для досягнення окресленої мети доречно розв'язати такі завдання:

- дослідити поняття та основні принципи технології 3D-друку;
- вивчити особливості роботи 3D-принтерів;

– ознайомитися із архітектурою та функціоналом програмного забезпечення Klipper:

– розробити та програмно реалізувати оптимізацію роботи 3D-принтера на базі Klipper;

– втілити заходи і розрахунки для забезпечення умов безпечної праці;

– підготувати та оформити кваліфікаційну роботу відповідно до вимог ДСТУ 3008:2015 [1] і рекомендацій з підготовки і оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти [2-3].

Проведена робота відповідає цілям сталого розвитку (ЦСР): ЦСР 4, ЦСР 9 та ЦСР 12.

## 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

### 1.1 Технологія 3D-друку: основні принципи

3D-друк – це процес створення тривимірних об'єктів шляхом пошарового нанесення матеріалу за цифровою моделлю [4]. Основою технології є адитивний підхід, який, на відміну від традиційного субтрактивного методу, не вирізає матеріал, а навпаки – нарощує його по шарах. Вперше технологія була впроваджена у 1980-х роках, однак із часом ця технологія стала більш доступною, що дозволило розширити її застосування від інженерії до домашнього використання.

Процес починається зі створення тривимірної моделі за допомогою програм для комп'ютерного проектування (CAD) або через 3D-сканування. Далі модель поділяється на окремі шари за допомогою слайсера – спеціальної програми, яка формує набір команд для 3D-принтера. Відповідно до цих інструкцій принтер послідовно формує кожен шар виробу, використовуючи різні типи матеріалів – від полімерів і металів до фоточутливих смол та кераміки. Такий підхід відкрив нові можливості у прототипуванні, індивідуальному виробництві компонентів, а також у малосерійному виробництві.

Завдяки широкому спектру застосування, 3D-друк успішно використовується в різних сферах: від архітектурного проектування та медицини до виготовлення споживчих товарів. До основних переваг цієї технології належать скорочення витрат і часу виробництва, можливість створення складних форм, недоступних для традиційних методів, а також зменшення кількості виробничих відходів, що робить її більш екологічною.

Принцип дії 3D-принтера залежить від використовуваної технології. Їх існує понад 10 видів. Розглянемо найпопулярніші.

1. Stereolithography Apparatus (SLA) – технологія стереолітографії, яка базується на використанні рідких фотополімерів, що тверднуть під

дією ультрафіолету (рисунок 1.1). Після завершення друку готову модель занурюють у спеціальну рідину для видалення зайвих елементів з її поверхні, а потім додатково опромінюють ультрафіолетом для повного затвердіння.

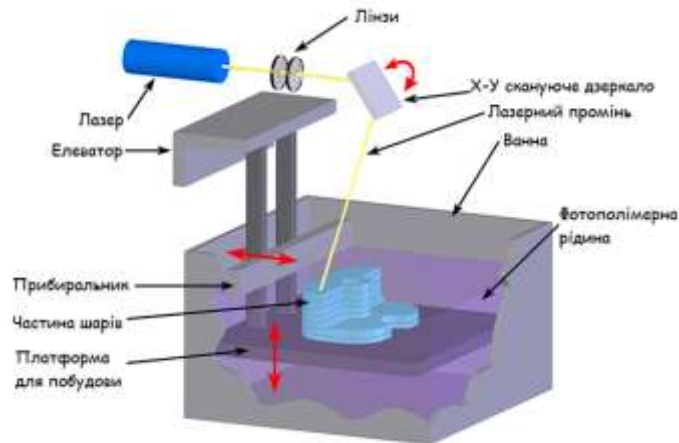


Рисунок 1.1 – Стереолітографія

Метод SLA широко застосовується для виготовлення зубних та кісткових протезів, наукових моделей, декоративних виробів, а також скульптур.

2. Selective Laser Sintering (SLS) – це технологія селективного лазерного спікання, що працює на основі вуглекислотного лазера (рисунок 1.2). В якості сировини для виготовлення моделей застосовують порошкові матеріали, зокрема полімери, скло, кераміку або легкоплавкі метали. Під час нагрівання гранули матеріалу спікаються, але не розплавляються повністю.

Цей метод дозволяє створювати деталі складних форм, механізми і елементи двигунів, точні прототиби конструкцій для тестування.

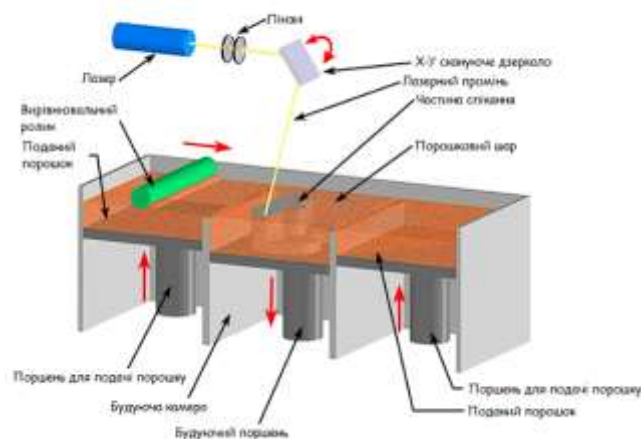


Рисунок 1.2 – Технологія с селективного лазерного спікання

Зазначимо, що Варіантами цієї технології є:

– Selective laser melting (SLM) – селективне лазерне плавлення, яке використовується для роботи з чистими металами без полімерних домішок і дозволяє виготовляти виріб за один етап;

– Electron beam melting (EBM) – електронно-променеве плавлення, де замість лазера використовується електронний промінь. Технологія вимагає роботи у вакуумній камері, але дозволяє використовувати навіть такі метали, як титан [5].

3. Multi Jet Modeling (MJM) – метод багатоструменевого моделювання (рисунок 1.3). Це адитивна технологія 3D-друку, заснована на одночасному розпиленні декількох мікроструменів фотополімерної смоли на платформу побудови. Матеріал миттєво затверджується під впливом ультрафіолетового випромінювання.

Принцип роботи технології MJM полягає в тому, що друкувальні головки наносять мікрокраплі рідкого фотополімерного матеріалу на робочу платформу. Після нанесення кожного шару матеріал одразу затверджується під дією ультрафіолету. Додатково використовується допоміжний (підтримуючий) матеріал, який заповнює порожнини та підтримує виступаючі елементи конструкції. Після завершення друку цей матеріал видаляється механічно або за допомогою спеціального розчинника. Процес повторюється шар за шаром, доки не буде створено повну тривимірну модель.

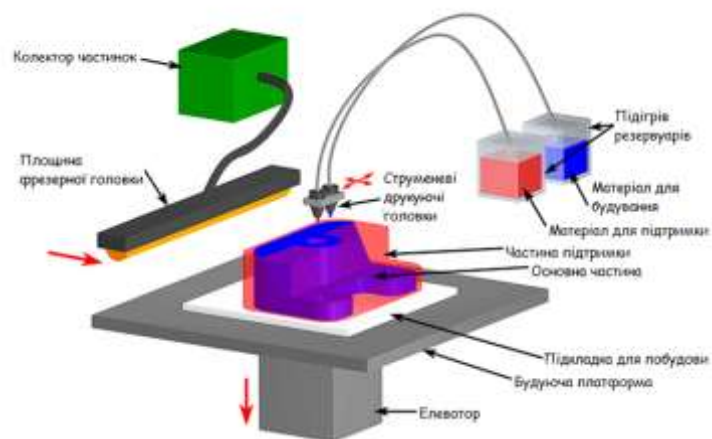


Рисунок 1.3 – Технологія багатоструменевого друку

Принтери, що працюють за цією технологією, виробляє компанія 3D Systems. Через патентні обмеження інші виробники використовують альтернативні назви, зокрема: PolyJet (Photopolymer Jetting) від компанії Stratasys та DODJet (Drop-On-Demand Jet) від Solidscape. Хоча назви різні, а реалізація може частково відрізнятись, основні принципи функціонування залишаються схожими [6].

4. Laminated Object Manufacturing (LOM) – технологія пошарового склеювання плівок (рисунок 1.4).

Тонкі шари матеріалу вирізаються за допомогою лазерного променя або ріжучого леза, після чого шари послідовно з'єднуються між собою. У процесі виготовлення тривимірних моделей можуть використовуватись не лише пластикові матеріали, а й папір, метал або кераміка [6].

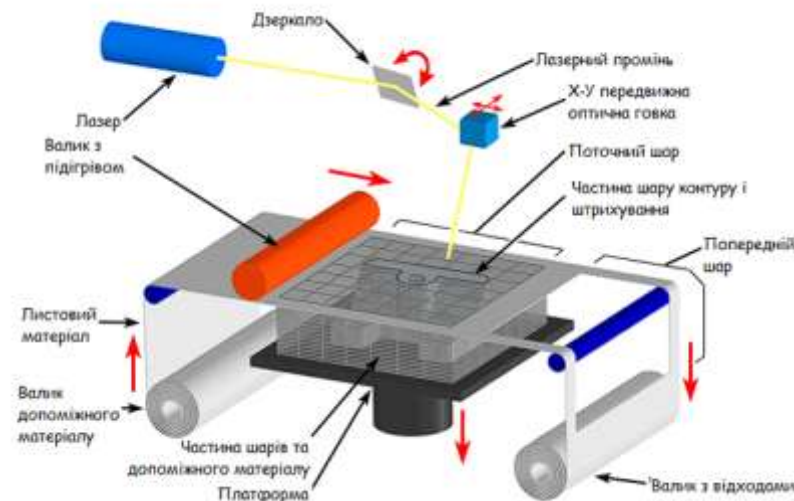


Рисунок 1.4 – Технологія пошарового склеювання плівок

5. Three-Dimensional Printing (3DP) – це технологія струменевого тривимірного друку (рисунок 1.5), за якою, подібно до методу SLS, основою для створення об'єкта слугує порошковий матеріал (зазвичай гіпсовий композит). На відміну від SLS, порошок тут не спікається, а пошарово склеюється шляхом нанесення зв'язувальної речовини [6].

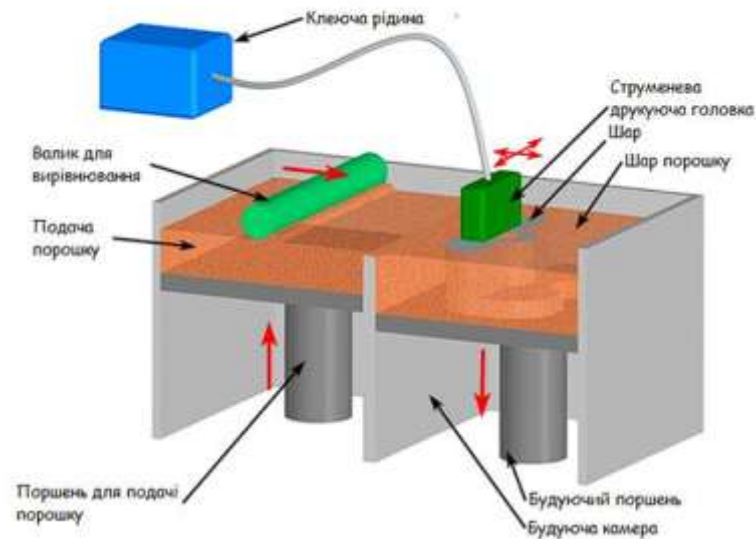


Рисунок 1.5 – Технологія струменевого тривимірного друку

Для створення кожного шару по всій поверхні столу розкочується порошок, після чого струменева голівка наносить рідкий клей за контурами моделі. Платформа опускається, і процес повторюється шар за шаром. Після друку модель нагрівають для прискорення висихання клею. Зайвий порошок збирають і повертають у бункер, а важкодоступні місця очищують повітрям або пензлем. Через пористість порошкового шару поверхня моделі виходить шорсткою, тому її додатково обробляють закріплювачами – воском, парафіном, епоксидною смолою або іншими речовинами для підвищення міцності та гладкості.

6. Fused Deposition Modeling (FDM) – це метод створення тривимірних об'єктів шляхом послідовного наплавлення матеріалу шар за шаром. Технологія також відома під назвою FFF (Fused Filament Fabrication).



Рисунок 1.6 – Технологія пошарового наплавлення

Ця технологія полягає у створенні моделей шляхом послідовного накладання розплавлених пластикових ниток. Готові вироби зазвичай шліфують для досягнення рівної та гладкої поверхні.

Метод FDM ідеально підходить для виготовлення предметів повсякденного використання – від іграшок до деталей побутової техніки. Окрім того, з його допомогою виготовляють деталі обладнання високої точності [4].

Отже, основні принципи технології 3D-друку базуються на адитивному процесі послідовного пошарового нанесення матеріалу для створення тривимірних об'єктів за цифровою моделлю. Різноманітність технологій дозволяє використовувати широкий спектр матеріалів і задовольняти потреби в різних сферах – від медицини до промислового виробництва. Завдяки можливості виготовлення складних форм з мінімальними відходами, 3D-друк є ефективним і екологічним рішенням у сучасному виробництві.

## 1.2 Особливості роботи 3D-принтерів

3D-принтер – це пристрій, призначений для пошарового створення об'єктів на основі цифрових 3D-моделей. Його робота ґрунтується на принципах адитивного виробництва, де матеріал додається, а не видаляється, як у традиційній обробці.

Основні компоненти 3D-принтера включають (рисунок 1.7):

- інтерфейс управління 3D-принтера;
- пластик для 3D-друку (філамент);
- екструдер;
- хотенд (гарячий кінець);
- вентилятор (кулер);
- друкована платформа (стіл).

Розглянемо більш детально основні компоненти 3D-принтера [9]. Сучасні 3D-принтери часто оснащені сенсорними екранами для зручного керування пристроєм. У старіших моделях замість сенсорного інтерфейсу використовується простий РК-дисплей з фізичним колесом прокрутки. Залежно від моделі також можуть бути доступні слот для SD-карти та USB-порт для завантаження файлів.

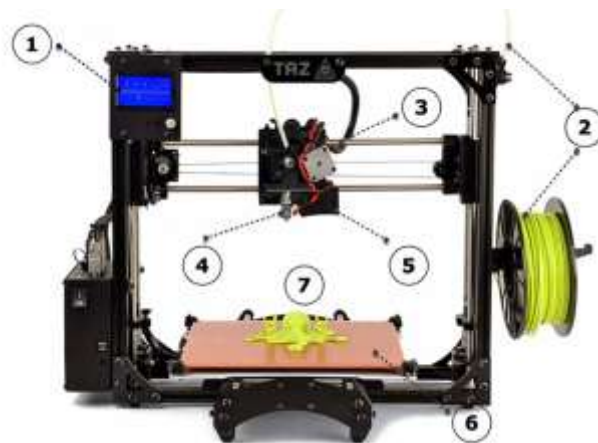


Рисунок 1.7 – Основні компоненти 3D-принтера

Платформа або стіл 3D-принтера – це поверхня, на якій формується модель. Часто платформи обладнані підігрівом, що покращує адгезію (прилипання) першого шару матеріалу і запобігає деформації деталей під час друку.

Екструдер – це ключовий компонент, який відповідає за плавлення та послідовне осадження пластикової нитки (філаменту) для формування моделі. Він складається з двох основних частин:

– гарячий кінець (хотенд): містить нагрівач і сопло, де філамент розплавляється;

– холодний кінець: включає двигун і приводні шестерні, які проштовхують нитку до хотенду [9].

Між гарячим і холодним кінцем розташовані радіатор і вентилятор для охолодження холодного кінця, що запобігає заклинюванню нитки. Крім того, зазвичай є окремий вентилятор охолодження деталей, який швидко охолоджує розплавлений матеріал після виходу з сопла.

Друкувальна головка містить один або декілька екструдерів (стандартні принтери мають один екструдер). У верхній частині голівки розташована трубка, по якій подається філамент у хотенд для подальшого плавлення і нанесення.

Перед початком безпосереднього процесу 3D-друку принтер проходить кілька обов'язкових етапів, які забезпечують якість і точність виготовленої моделі. Кожен з цих кроків є важливим для стабільної роботи пристрою та успішного завершення друку. У таблиці 1.1 наведено покроковий опис основних етапів підготовки та процесу друку на 3D-принтері [6].

Таблиця 1.1 – Основні етапи підготовки та процесу друку на 3D-принтері

Етап друку	Опис процесу
1. Нагрівання	Нагрів хот-енду до 190–250 °С (залежно від пластику), нагрів робочого столу (за наявності).
2. Калібрування	Вирівнювання платформи для забезпечення якісного прилипання першого шару та точності друку.
3. Тестова лінія	Видавлювання тонкої смужки пластику збоку для очищення сопла та стабілізації подачі матеріалу.
4. Друк першого шару	Формування першого шару, що задає геометрію та впливає на міцність виробу.
5. Основний друк	Пошарове нанесення матеріалу для створення повної тривимірної моделі.
6. Охолодження	Поступове охолодження пристрою після завершення друку.
7. Зняття моделі	Акуратне зняття готової моделі з платформи вручну або шпателем.

Увесь цикл може тривати від пів години до 15–20 годин – залежно від розміру, складності моделі та швидкості.

Таким чином, особливість роботи 3D-принтерів полягає у пошаровому адитивному створенні об'єктів на основі цифрових моделей із використанням розплавленого філаменту.

Основними компонентами 3D-принтера є екструдер, хотенд і друкована платформа, які працюють у тандемі для плавлення та нанесення матеріалу.

Процес друку включає кілька важливих етапів – від нагрівання до зняття готової моделі – що гарантують якість і стабільність виробу. Такий підхід відкриває широкі можливості для створення унікальних і функціональних деталей у різних сферах.

### 1.3 Програмне забезпечення для 3D-принтерів: Marlin, Repetier, Klipper

У сучасному виробництві, орієнтованому на гнучкість і цифрову трансформацію, ключову роль відіграє не лише апаратна складова 3D-принтерів, але й програмне забезпечення, яке безпосередньо керує процесом друку. Розглянемо найпоширеніші прошивки для 3D-принтерів – Marlin, Repetier та Klipper, їх особливості та вплив на ефективність і якість друку.

Однією з найстаріших і найбільш поширених у спільноті користувачів 3D-принтерів є прошивка Marlin. Вона з'явилася як форк від прошивки Sprinter і з часом стала стандартом де-факто для принтерів типу RepRap і багатьох комерційних моделей, включаючи Prusa i3.

Її головною перевагою є багатий функціонал, що включає підтримку різноманітних датчиків, функцію відновлення друку після збою, а також гнучкі налаштування, які дозволяють адаптувати прошивку до індивідуальних потреб. Завдяки відкритому вихідному коду, Marlin постійно оновлюється, додаючи нові можливості та підвищуючи стабільність роботи [8].

Ключові характеристики Marlin згруповано в таблиці 1.2.

Marlin реалізує реальну синхронну обробку команд, що дозволяє ефективно керувати рухом осей, екструзією та температурою. Проте через

обмеження обчислювальних ресурсів (особливо у 8-бітних контролерах) Marlin має обмеження в швидкості обробки команд і може викликати дрібні затримки при друці складних моделей.

Таблиця 1.2 – Ключові характеристики Marlin [19]

№ за/п	Характеристика
1	Працює на мікроконтролерах AVR (Atmega), STM32, ESP32, ARM Cortex
2	Має відкритий код, що дозволяє широке налаштування
3	Підтримує розширений набір команд G-code
4	Стабільна робота з дисплеями, сенсорами, датчиками температури, автокалібруванням тощо

Альтернативною прошивкою з розширеним функціоналом є Repetier. Вона з'явилася як альтернатива Marlin і набула популярності завдяки своїй високій стабільності, детальному налаштуванню і сумісності з програмним пакетом Repetier-Host.

Особливості Repetier згруповані в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Особливості Repetier [23]

№ за/п	Особливості
1	Побудована на мові C++ з модульною архітектурою
2	Має підтримку мультитекстурних систем
3	Дає можливість зберігати профілі принтерів і матеріалів
4	Включає вбудований веб-інтерфейс (через Repetier-Server)

У порівнянні з Marlin, Repetier менш поширений, але демонструє менший обсяг коду та менші вимоги до пам'яті, що робить його привабливим для простих конфігурацій. З іншого боку, обмежена підтримка спільноти та повільні оновлення можуть бути недоліком для просунутих користувачів.

Новою парадигмою у керуванні 3D-друком стала прошивка Klipper – високопродуктивна прошивка, яка значно збільшує швидкість друку, використовуючи зовнішній комп'ютер або Raspberry Pi для обробки складних розрахунків [8]. Цей підхід дозволяє максимально розвантажити мікроконтролер принтера та досягти більш плавної та точної роботи. Klipper ідеально підходить

для досвідчених користувачів, які прагнуть отримати найвищу продуктивність від свого обладнання.

На відміну від Marlin і Repetier, Klipper впроваджує радикально інший підхід: використання додаткового одноплатного комп'ютера (найчастіше Raspberry Pi) як головного процесора, тоді як мікроконтролер 3D-принтера виконує лише низькорівневі завдання. Така архітектура дозволяє досягати значно вищої швидкості друку без втрати якості.

Основні переваги Klipper наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Основні переваги Klipper [16]

№ за/п	Переваги
1	Паралельна обробка команд G-code на комп'ютері
2	Використання Python для конфігурації
3	Підтримка Input Shaping – алгоритмів компенсації вібрацій
4	Висока гнучкість у налаштуванні параметрів друку
5	Веб-інтерфейс Moonraker + Fluidd/Mainsail для керування

Klipper підтримує використання макросів, багатопоточності, телеметрії, що робить його вибором №1 серед ентузіастів високошвидкісного друку (наприклад, у спільнотах Voron чи RatRig). Однак, використання додаткового обчислювального ресурсу вимагає більше налаштувань, базових навичок роботи з Linux і конфігураційних файлів.

У рамках даного дослідження було проведено порівняльний аналіз трьох найпоширеніших прошивок для 3D-принтерів – Marlin, Repetier та Klipper. Оцінювання здійснювалося за ключовими параметрами, що впливають на ефективність, гнучкість та зручність використання програмного забезпечення. Результати аналізу наведено у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Порівняльний аналіз програмного забезпечення для 3D-принтерів [16; 19; 23]

Параметр	Marlin	Repetier	Klipper
Тип обробки	На мікроконтролері	На мікроконтролері	На комп'ютері + MCU
Швидкість друку	Середня	Середня	Висока
Простота налаштування	Висока (через Arduino IDE)	Середня	Низька (потрібні навички Linux)
Гнучкість	Висока	Середня	Дуже висока
Підтримка спільноти	Дуже велика	Обмежена	Зростаюча

Отже, в сучасних умовах вибір прошивки для 3D-принтера залежить від цілей користувача: Marlin залишається надійним універсальним рішенням для класичних завдань, Repetier підходить для користувачів, які цінують модульність і простоту, а Klipper пропонує інноваційний підхід для максимальної продуктивності.

#### 1.4 Переваги Klipper над традиційним ПЗ

На відміну від класичних прошивок, які працюють безпосередньо на мікроконтролері 3D-принтера, Klipper реалізує концепцію розподіленої обробки: складна логіка виконання G-кодів переноситься на одноплатний комп'ютер (наприклад, Raspberry Pi), тоді як мікроконтролер виконує лише реального часу інструкції. Така архітектура відкриває ряд суттєвих переваг, серед яких відмітимо наступні.

1. Klipper дозволяє значно збільшити швидкість переміщення головки, зберігаючи при цьому точність і якість друку. Завдяки попередньому буферизації та паралельній обробці G-кодів, зменшуються затримки між командами. Це особливо важливо для принтерів із системами CoreXY, де рух є складнішим у розрахунках.

2. Однією з найбільших інновацій є підтримка Input Shaping – алгоритму, що компенсує вібрації (резонанси), які виникають при швидких прискореннях і

уповільненнях [17]. Це дозволяє уникати рябець (ringing, ghosting) на поверхні моделей без механічної модифікації принтера.

3. Klipper використовує конфігураційні файли у форматі .cfg, які легко змінювати без перепрошивки мікроконтролера. Також система підтримує макроси, умовні оператори (if, gcode\_macro), що дозволяє створювати складні сценарії друку (автоматичний preheat, автоочищення сопла, автовимірювання резонансу тощо) [16].

4. Klipper інтегрується з сучасними веб-інтерфейсами, які дозволяють:

- дистанційно керувати принтером;
- переглядати телеметрію (температури, швидкості, графіки);
- аналізувати лог-файли;
- запускати PID-автонастройки, вимірювання Input Shaping прямо з браузера [22].

5. Завдяки виконанню G-code'ів на потужнішому процесорі Raspberry Pi, Klipper не обмежений частотою мікроконтролера, як Marlin. Це означає кращу точність траєкторій, менше затримок та кращу підтримку складних моделей із великою кількістю дрібних рухів.

6. Klipper дозволяє одночасно керувати кількома 3D-принтерами з одного Raspberry Pi, що робить його особливо вигідним у умовах лабораторій, майстерень або фермерських ферм.

Таким чином, Klipper пропонує сучасний, масштабований та високопродуктивний підхід до керування 3D-принтерами. Його архітектура дозволяє подолати обмеження традиційних прошивок, відкриваючи можливості для високошвидкісного та високоточного друку, автоматизації, а також зручного дистанційного керування.

## 1.5 Висновки до першого розділу

У ході огляду літератури та аналізу існуючих рішень було досліджено основні принципи технології 3D-друку, особливості роботи 3D-принтерів та

сучасне програмне забезпечення для керування процесом друку. Встановлено, що 3D-друк базується на адитивному підході, який дозволяє створювати складні тривимірні об'єкти пошарово, з мінімальними виробничими відходами та високою точністю. Було проаналізовано найпоширеніші технології 3D-друку, такі як SLA, SLS, MJM, LOM, 3DP та FDM, кожна з яких має специфічні переваги та сфери застосування, від медицини до промислового виробництва. Розглянуто основні компоненти 3D-принтера та етапи підготовки й друку, що забезпечують якість і стабільність виробів.

Окрему увагу приділено програмному забезпеченню – Marlin, Repetier та Klipper – та їх впливу на ефективність і гнучкість друку. Встановлено, що традиційні прошивки, як-от Marlin і Repetier, забезпечують надійність і простоту налаштування, тоді як Klipper пропонує високошвидкісну обробку команд, підтримку Input Shaping та розширені можливості дистанційного керування. Порівняльний аналіз показав, що вибір прошивки залежить від цілей користувача та складності завдань друку. Таким чином, 3D-друк є універсальною технологією з широкими можливостями адаптації під різні сфери діяльності. Отримані результати створюють основу для подальшого дослідження оптимізації роботи 3D-принтера на базі прошивки Klipper.

## 2 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ KLIPPER. АРХІТЕКТУРА ТА ФУНКЦІОНАЛ

### 2.1 Концепція та архітектура Klipper

Klipper – це проект з відкритим кодом для розробки прошивки для 3D-принтерів. Він розпочався у 2016 році з метою покращення швидкості обробки даних 3D-принтерами. Сьогодні Klipper підтримує швидкість друку 500 мм/с і вище та має такі новаторські функції, як формування вхідних даних та плавне просування тиску, що значно покращує якість друку.

Klipper використовує філософію проектування, де обчислювальне навантаження розподіляється між контролерами. 32-бітний контролер, такий як Raspberry Pi, виконує обчислювальні ресурсомісткі перетворення G-коду в машинні інструкції. Основний 8-бітний мікроконтролер 3D-принтера потім використовується для безпосереднього взаємодії з обладнанням та передачі перетворених інструкцій [17].

Відмітимо, що Klipper заснований на ідеї перенесення більшої частини обчислювального навантаження з мікроконтролера на потужніший процесор, зазвичай Raspberry Pi. Завдяки цьому:

- забезпечується вища продуктивність;
- розширюються можливості налаштування;
- з'являється гнучка система керування через веб-інтерфейси.

Основна ідея Klipper – це попереднє планування рухів: Raspberry Pi (або інший комп'ютер під Linux) заздалегідь обчислює всі траєкторії і передає мікроконтролеру лише прості інструкції в реальному часі. Завдяки цьому мікроконтролер не витрачає ресурси на розрахунки, а лише виконує задані координати з високою точністю.

Klipper – це не просто прошивка для 3D-принтера, а повноцінна програмна система з розвинутою екосистемою, що забезпечує ефективне управління

процесом 3D-друку. Архітектура Klipper складається з декількох взаємодіючих компонентів, кожен з яких виконує свою важливу функцію в цілісній системі (рисунок 2.1) [15].

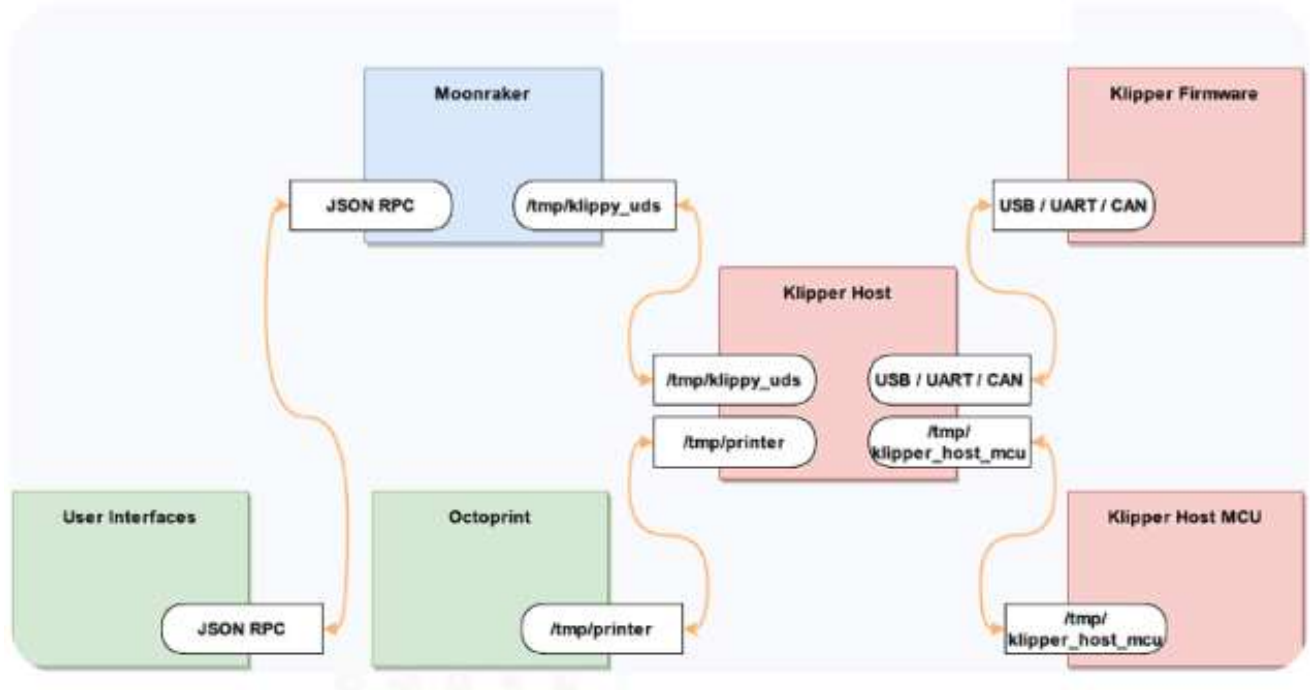


Рисунок 2.1 – Основні компоненти екосистеми Klipper

Коротко розглянемо кожен компонент.

1. Klipper Host є центральним ядром системи Klipper. Зазвичай він працює на одноплатному комп'ютері (SBC) або на будь-якій іншій машині з операційною системою Linux. Цей компонент відповідає за виконання всієї логіки 3D-друку, зокрема:

- читання файлів G-коду, які описують модель для друку;
- планування траєкторії руху крокових двигунів з урахуванням складних обчислювальних функцій, таких як Pressure Advance (передбачення тиску) та Input Shaping (формування сигналу для усунення вібрацій);
- компресія та відправка інструкцій на мікроконтролери принтера;
- зчитування даних з датчиків, наприклад температури, і реагування на ці дані;

– виконання макросів та забезпечення інтерфейсів для взаємодії з іншими компонентами екосистеми.

2. Klipper Firmware – прошивка, що працює безпосередньо на платі 3D-принтера або на підтримуваному мікроконтролері (MCU). Вона підключається до Klipper Host через інтерфейси USB, UART або CAN-Bus і безпосередньо керує апаратним забезпеченням, включаючи двигуни, нагрівачі та датчики. Одночасно один хост може керувати кількома прошивками, які у конфігурації відображаються блоками *mcu*.

3. Klipper Host MCU – це мікроконтролер, що знаходиться на платі 3D-принтера. Він виконує низькорівневі команди, які надсилає хост, з високою точністю та в реальному часі (керування моторами, підігрівом, датчиками тощо).

В особливих випадках SBC, де запускається Klipper Host, також може виконувати функції мікроконтролера, наприклад, керувати акселерометром або іншими периферійними пристроями. Взаємодія між Klipper Host та Host MCU здійснюється через псевдо-термінальний інтерфейс (pseudo-tty) */tmp/klipper\_host\_mcu*. У конфігурації це відображається блоком *mcu rpi*.

4. Moonraker – це багатоцільовий інтерфейс та процес інформаційного брокера, розроблений для розширення можливостей Klipper. Він забезпечує зв'язок між Klipper Host і користувацькими інтерфейсами, такими як веб-додатки. Moonraker також підтримує інтеграції з іншими IoT-сервісами (MQTT, Home Assistant), а також розповсюджує сповіщення про події та оновлення. Зазвичай підключається до Klipper Host через Unix Domain Socket */tmp/klippy\_uds*.

Відмітимо також, що екосистема Klipper підтримує різноманітні інтерфейси користувача, які підключаються до Moonraker через JSON RPC та WebSockets. Серед найпопулярніших: Mainsail, Fluidd, KlipperScreen, mooncord.

5. OctoPrint – перевірений часом інтерфейс для 3D-принтерів, який також підтримує роботу з Klipper. Він підключається до Klipper Host через псевдо-tty */tmp/printer* і пропонує багатий функціонал, а також численні плагіни для налаштування.

Таким чином, архітектура Klipper забезпечує гнучкість, масштабованість і потужність системи 3D-друку за рахунок розподілу функцій між окремими компонентами та інтеграції з різноманітними інтерфейсами й сервісами. Це дозволяє отримати високу продуктивність і розширені можливості управління 3D-принтером.

Основні переваги архітектури Klipper відображені на рисунку 2.2.

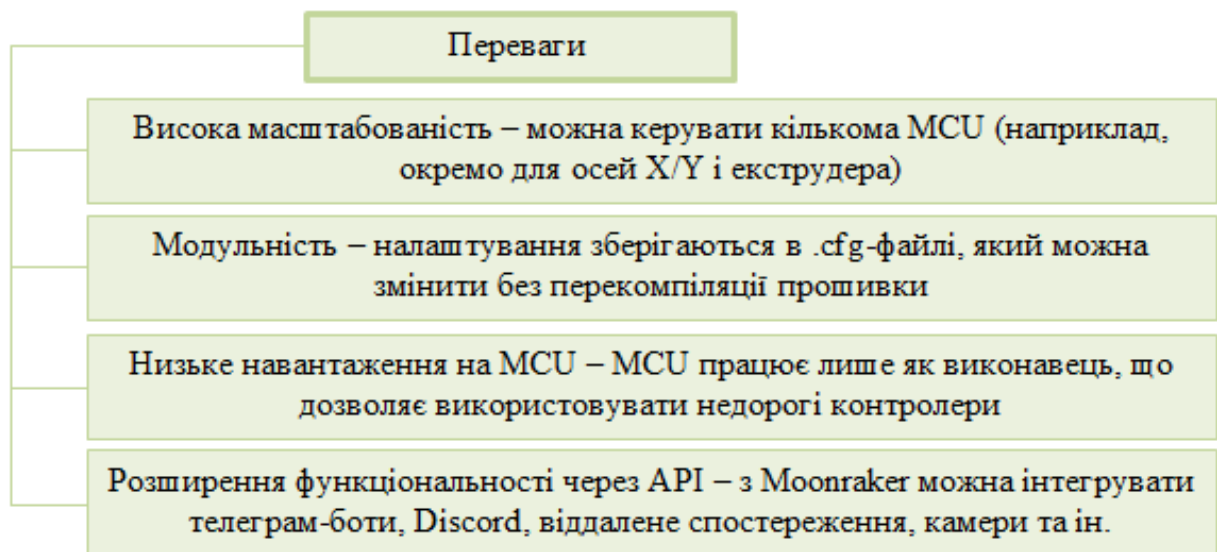


Рисунок 2.2 – Переваги архітектури Klipper

Отже, Klipper представляє собою нову архітектурну парадигму в програмному забезпеченні для 3D-друку. Розподіл функціональності між Raspberry Pi та мікроконтролером дозволяє досягти вищої продуктивності, точності та гнучкості, що недоступні для традиційних прошивок.

## 2.2 Основні функції та можливості Klipper

Як уже згадувалося раніше, відмінною рисою Klipper є розподілена архітектура, яка розділяє функції між хост-системою (наприклад, Raspberry Pi) та MCU (мікроконтролером на платі принтера).

Серед ключових функціональних можливостей Klipper варто виділити наступні (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Основні функції та можливості Klipper [16; 17; 22]

№ за/п	Функція	Опис
1	Висока точність та швидкість друку	Завдяки попередньому плануванню рухів на хості Klipper здатен забезпечувати плавні траєкторії, зменшення ривків та високі швидкості друку без втрати якості
2	Підтримка сучасних алгоритмів компенсації	Klipper реалізує такі методи як <i>Pressure Advance</i> (компенсація тиску в екструдері при зміні швидкості) та <i>Input Shaping</i> (подавлення резонансів та вібрацій), що дозволяє суттєво покращити якість надрукованих моделей
3	Гнучка конфігурація через текстовий файл	Налаштування принтера здійснюється за допомогою простого .cfg-файлу, який можна редагувати без перепрошивки мікроконтролера. Це значно полегшує тестування, налаштування та зміну параметрів
4	Можливість одночасного керування кількома MCU	Klipper дозволяє інтегрувати додаткові мікроконтролери для керування різними частинами принтера (наприклад, для багатозонного підігріву або окремих модулів), що забезпечує масштабованість системи
5	Інтеграція з веб-інтерфейсами	Klipper активно підтримує такі інтерфейси, як Mainsail, Fluidd та API-сервер Moonraker, що дозволяє зручно керувати принтером через браузер, здійснювати моніторинг температур, завантаження файлів, запуск друку тощо
6	Можливість емулювання функцій інших прошивок	Klipper підтримує численні G-code команди, включаючи ті, що використовуються в Marlin, RepRap та інших системах, що забезпечує сумісність із більшістю слайсерів (PrusaSlicer, Cura, SuperSlicer тощо)
7	Розширена система макросів	Користувач може створювати складні сценарії поведінки принтера, які активуються через прості G-code команди, що суттєво розширює функціональність

Бачимо, що Klipper забезпечує потужний набір функцій, які раніше були недоступні у більшості прошивок для 3D-принтерів. Головною перевагою прошивки Klipper є її швидкість та якість друку. 3D-принтери, що працюють на прошивці Klipper, здатні досягати швидкості 500 мм/с і вище. Такі функції, як формування вхідних даних, допомагають підтримувати надзвичайно високу якість цих відбитків. Klipper також легко налаштовується завдяки багатьом опціям графічного інтерфейсу та дистанційного керування 3D-принтерами на базі Klipper.

Головним недоліком Klipper є його залежність від додаткового обладнання. Основна філософія дизайну Klipper полягає в перенесенні

обчислювально ресурсоемних операцій на окрему комп'ютерну плату, таку як Raspberry Pi. Це вимагає використання цих додаткових, дорожчих комп'ютерних плат, тоді як прошивка, така як Marlin, вимагає лише контролерів нижчого рівня та нижчої вартості [17].

Отже, Klipper не лише покращує якість друку та керованість принтера, але й забезпечує високу гнучкість, масштабованість і зручність у користуванні. Ці особливості роблять його потужним інструментом як для професійного, так і для аматорського 3D-друку.

### 2.3 Можливості оптимізації друку за допомогою Klipper

Прошивка Klipper розроблена з урахуванням потреб користувачів у високій якості друку, стабільності та швидкості роботи 3D-принтера. Однією з її головних переваг є можливість гнучкої оптимізації процесу друку, що досягається як апаратними, так і програмними засобами [16].

1. Input Shaping (подавлення вібрацій). Один із найефективніших інструментів оптимізації у Klipper – це Input Shaping. Ця функція дозволяє автоматично або вручну компенсувати вібрації (резонанси) принтера під час швидкого переміщення головки. Завдяки цьому:

- зменшується поява дефектів типу «рінгінг» (хвилі на поверхні моделі);
- можна друкувати на вищих швидкостях без втрати якості;
- знижується навантаження на механіку принтера.

Klipper підтримує декілька типів шейперів, серед яких: ZV, ZVD, MZV, EI, а також автоматичний підбір параметрів через акселерометр.

2. Pressure Advance (компенсація тиску в екструдері). Функція Pressure Advance дозволяє точно налаштувати потік пластику, з урахуванням інерції філаменту при зміні швидкості друку. Вона працює подібно до Linear Advance у Marlin, але реалізована ефективніше.

Результатами її застосування є:

- чіткіші кути та контури деталей;

- зменшення надлишку матеріалу на зупинках та поворотах;
- стабільна якість при різних швидкостях друку.

3. Розділення обчислень між хостом і MCU. Завдяки тому, що складні математичні розрахунки відбуваються на більш потужному хості (наприклад, Raspberry Pi), Klipper забезпечує точніше планування рухів, плавну екструзію та швидку реакцію системи на зміну параметрів. Це дозволяє уникати «пропусків кроків» та нестабільності.

4. Макроси та автоматизація. Система макросів Klipper дає змогу:

- автоматизувати процедури калібрування, паркування головки, заміни філаменту тощо;
- оптимізувати старт друку (наприклад, прогрів лише необхідних елементів у певній послідовності);
- створювати умови для повторюваності якісного результату.

5. Гнучке керування температурними профілями. Klipper дозволяє точно налаштувати температурні криві для хотенду й стола, з урахуванням особливостей матеріалу, що друкується. Також доступне автоналаштування PID-контролерів, що покращує стабільність температури й запобігає перегріву.

6. Моніторинг та віддалене керування. Інтеграція з інтерфейсами Mainsail або Fluidd дає змогу відстежувати процес друку в реальному часі, коригувати параметри на льоту та швидко реагувати на помилки або зміни умов. Це сприяє оперативній оптимізації друку навіть у процесі роботи.

Таким чином, прошивка Klipper забезпечує широкі можливості для оптимізації 3D-друку завдяки інноваційним технологіям управління рухом, температурою та екструзією. Застосування функцій Input Shaping і Pressure Advance дозволяє значно покращити якість друку та зменшити дефекти навіть при високих швидкостях. Розподіл обчислень між хостом і MCU сприяє стабільності системи та точності виконання завдань. Додаткові переваги, такі як макроси, гнучкі температурні профілі та інтерфейси віддаленого керування, роблять Klipper потужним інструментом для досягнення повторювано якісного результату.

## 2.4 Аналіз САУ для крокового двигуна

Згідно із технічним завданням заносимо початкові дані до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення параметрів САУ

Найменування	Позначення	Значення
Коефіцієнт підсилення ПП	$K_{ПП}$	500
Коефіцієнт підсилення драйвера	$K_D$	2,0
Стала часу драйвера	$T_D$	0,005 с
Коефіцієнт моменту двигуна	$K_M$	$0,0111 \text{ Н} \cdot \frac{\text{М}}{\text{А}}$
Стала електромеханічної системи	$T_e = \frac{L}{R}$	0,000567 с
Момент інерції ротора (оцінено)	$J$	$\approx 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Стала часу позиційного датчика	$T_{дат}$	0,02 с
Крок двигуна (без мікрошагу)	$\theta_k$	1,8

$K_M$  обчислено з номінального моменту при номінальному струмі, формула (2.1):

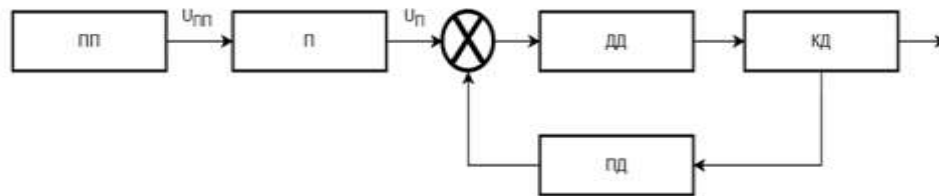
$$K_M = \frac{0,5 \cdot 10^{-2}}{0,45} \approx 0,111 \text{ Н} \cdot \frac{\text{М}}{\text{А}} \quad (2.1)$$

До табл. 2.3 заносимо вимоги, яким повинна задовольняти вихідна САУ.

Таблиця 2.3 – Вимоги, щодо якості процесу управління

Найменування	Позначення	Значення
Максимальний час встановлення	$t_c$	0,5 с
Допустиме перерегулювання	$\sigma$	$\leq 10 \%$
Статична похибка	$\varepsilon_{ст}$	$\leq 1 \%$

На рис. 2.3, наведене функціональна схема САУ.



Лінійна неперервна САУ позиціонування крокового двигуна (КД) містить: КД як об'єкт регулювання, плата керування (ПП), підсилювач (П), позиційний датчик (ПД) і драйвер двигуна (ДД)

Рисунок 2.3 – Функціональна схема САУ

Лінійна неперервна САУ позиціонування крокового двигуна NEMA14 містить: кроковий двигун 36NM2004A4 як об'єкт регулювання, позиційний датчик (енкодер) у ланцюзі негативного зворотного зв'язку, елемент порівняння, підсилювач керування (П), драйвер двигуна (ДД) і плату керування як задавальний пристрій.

Формула елемента порівняння:

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

де  $e(t)$  – сигнал помилки (різниця між бажаним і фактичним положенням двигуна);

$\theta_{зад}(t)$  – задане значення кута повороту двигуна;

$\theta_{вих}(t)$  – фактичне значення кута повороту двигуна.

Формула підсилювача ПП, знаходимо за формулою (2.3):

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

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

$K_{ПП}$  – коефіцієнт підсилення ПП;

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

Передавальна функція драйвера, знаходимо за формулою (2.4):

$$W_D(s) = \frac{K_D}{T_D s + 1}, \quad (2.4)$$

де  $W_D(s)$  – передавальна функція драйвера;

$K_D$  – коефіцієнт підсилення драйвера;

$T_D s$  – стала часу драйвера.

Передавальна функція крокового двигуна, знаходимо за формулою (2.5):

$$W_{\text{двиг}}(s) = \frac{K_M}{J s^2 + T_e s + K_M}, \quad (2.5)$$

де  $W_{\text{двиг}}(s)$  – передавальна функція виконавчого двигуна;

$K_M$  – коефіцієнт моменту двигуна;

$J$  – момент інерції ротора;

$T_e$  – електрична стала часу двигуна;

$s$  – комплексна змінна Лапласа.

Формула позиційного датчика, знаходимо за формулою (2.6):

$$W_{\text{САУ}}(s) = \frac{K_{\text{ПП}} \cdot K_D \cdot K_M}{(T_D s + 1)(J s^2 + T_e s + K_M)(T_{\text{дат}} s + 1)}. \quad (2.6)$$

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

$$\begin{aligned} W_{\text{САУ}}(s) &= \frac{K_{\text{ПП}} \cdot K_D \cdot K_M}{(T_D s + 1)(J s^2 + T_e s + K_M)(T_{\text{дат}} s + 1)}, \\ &= \frac{K_{\text{ПП}} \cdot K_D \cdot 0,0111}{1,0 \cdot 10^{-7} s^2 + 5,66 \cdot 10^{-4} s + 0,0111} \end{aligned}$$

$$W_{\text{САУ}}(s) = \frac{2,22}{1,0 \cdot 10^{-7} s^2 + 5,66 \cdot 10^{-4} s + 0,0111}.$$

## 2.5 Висновки до другого розділу

У другому розділі проведено детальний аналіз програмного забезпечення Klipper, його архітектури та функціональних можливостей для управління 3D-принтерами. Було показано, що розподіл обчислювальних функцій між хост-системою (Raspberry Pi) та мікроконтролером забезпечує високу швидкість і точність друку, що недоступні традиційним прошивкам.

Окремо розглянуто ключові компоненти екосистеми Klipper – Klipper Host, Klipper Firmware, Moonraker та користувацькі інтерфейси, які разом забезпечують гнучкість та масштабованість системи. Встановлено, що Klipper підтримує сучасні алгоритми компенсації руху та тиску (Input Shaping, Pressure Advance), що дозволяє зменшити дефекти на надрукованих моделях.

Проаналізовано можливості оптимізації друку через макроси, гнучке керування температурними профілями та віддалене управління через веб-інтерфейси. Визначено, що головним недоліком Klipper є необхідність додаткового обладнання, зокрема Raspberry Pi, для обчислень.

Розглянуто також приклад автоматизованої системи керування (САУ) для контролю температури нагрівального елемента, наведено відповідні вхідні дані, вимоги та передавальні функції. Показано, що застосування САУ разом із функціями Klipper дозволяє забезпечити стабільність процесу друку та точність виконання завдань.

Загалом, другий розділ підтверджує, що Klipper є потужним інструментом для підвищення якості, продуктивності та керованості 3D-друку.

## 3 ОПТИМІЗАЦІЯ 3D-ПРИНТЕРА НА БАЗІ KLIPPER

### 3.1 Вибір обладнання та підготовка до встановлення

Для проведення оптимізації було обрано 3D-принтер Flyingbear Ghost 5 (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Основні компоненти екосистеми Klipper

Цей принтер відноситься до категорії закритих FDM-принтерів із кінематикою CoreXY, що забезпечує високу швидкість та точність друку. Корпус з акрилових панелей створює закриту камеру, що є важливою перевагою при друкуванні матеріалами, чутливими до перепадів температури, наприклад, ABS або ASA. Ключові характеристики Flyingbear Ghost 5 наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Ключові характеристики 3D-принтера Flyingbear Ghost 5

№ за/п	Характеристика	Опис
1	Область друку	255×210×210 мм, що дозволяє створювати моделі середнього розміру
2	Екструдер	Direct Drive, що забезпечує кращу подачу гнучких матеріалів, ніж у системах типу Bowden
3	Нагрівальний стіл	Підігрів до 110°C, що сприяє надійній адгезії моделей до поверхні
4	Материнська плата	MKS Robin Nano V1.2. Ця плата має достатній функціонал для роботи з Klipper, оскільки вона оснащена потужним мікроконтролером STM32 та тихими драйверами крокових двигунів TMC2208

Зазначимо також, що для ефективного керування 3D-принтером Flyingbear Ghost 5 з прошивкою Klipper, критично важливим є вибір потужного та надійного мікрокомп'ютера. У нашому випадку було використано Raspberry Pi 4 (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Одноплатний мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4

Raspberry Pi має кілька поколінь і модифікацій, які з часом зазнавали змін. Вони відрізняються передусім типами процесорів: наприклад, у першій версії A використовувався ARM1176JZ-F з тактовою частотою 700 МГц, одним ядром та 256 МБ оперативної пам'яті. У новіших моделях застосовуються потужніші рішення – Broadcom BCM2712 або ARM Cortex A76 з архітектурою x64, частотою до 2,4 ГГц, чотирма ядрами та обсягом ОЗП від 4 ГБ до 8 ГБ.

Мікрокомп'ютер обладнано чотирма USB-портами, а починаючи з версії 3B, він отримав інтегровані модулі Wi-Fi та Bluetooth, що дозволяють працювати бездротово. Важливою особливістю Raspberry Pi є використання інтерфейсу GPIO – універсальних контактів для підключення периферійних пристроїв безпосередньо до плати. У сучасних версіях кількість таких пінів сягає 40.

Для підключення дисплеїв передбачено два виходи HDMI та інтерфейс MIPI. Водночас внутрішня пам'ять у пристрої відсутня – операційна система встановлюється та працює з SD-карти. Живлення здійснюється через роз'єм USB Type-C, а в старіших моделях – MicroUSB.

Спеціально для Raspberry Pi розроблено власну операційну систему Raspberry Pi OS, що базується на Linux. Вона оснащена робочим середовищем PIXEL та містить програмне забезпечення Mathematica для виконання обчислень. Окрім того, у системі є утиліта raspi-config, яка забезпечує швидке налаштування основних модулів мікрокомп'ютера (рис. 3.3).

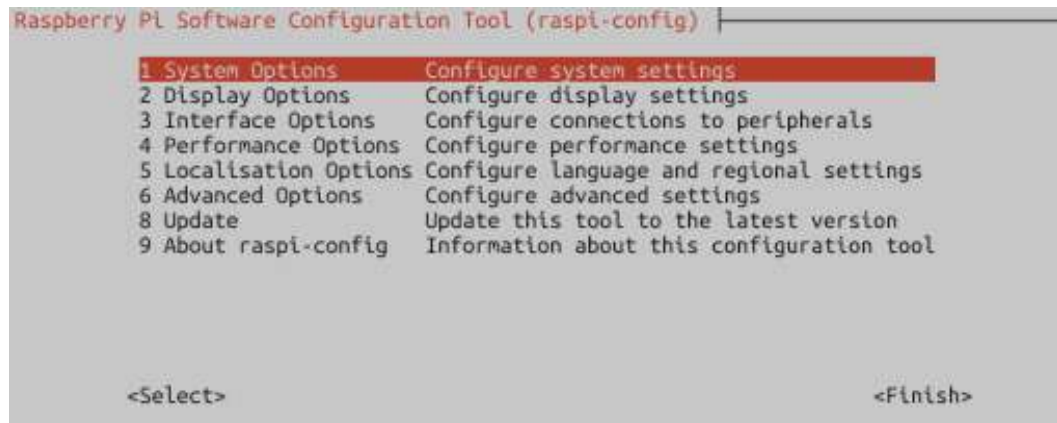


Рисунок 3.3 – Програмне забезпечення raspi-config

Підготовка включала апаратну та програмну частину, які було виконано перед встановленням Klipper.

Апаратна підготовка.

1. Встановлення Raspberry Pi 4. Мікрокомп'ютер був розміщений у спеціальному корпусі та встановлений на раму принтера, що захистило його від механічних пошкоджень та забезпечило належне охолодження.

2. Підключення до плати принтера. Raspberry Pi 4 був під'єднаний до основної плати принтера MKS Robin Nano V1.2 через USB-кабель. Це з'єднання є ключовим для обміну даними між мікрокомп'ютером (який виконує обчислення) та мікроконтролером принтера (який виконує рухи).

3. Електроживлення. Було забезпечено стабільне живлення для Raspberry Pi 4 за допомогою окремого блоку живлення з достатнім струмом.

Програмна підготовка.

1. Завантаження образу Raspberry Pi OS. Офіційний образ Raspberry Pi OS Lite (64-bit) був завантажений на microSD-карту. Ця версія без графічного

інтерфейсу була обрана для мінімального споживання ресурсів та оптимальної продуктивності для роботи Klipper.

2. Встановлення та налаштування Klipper. Для автоматизації процесу був використаний інструмент KIAUH (Klipper Installation And Update Helper), що дозволило швидко інсталювати Klipper, Mainsail/Fluidd та інші необхідні компоненти. Після встановлення було налаштовано файл *printer.cfg*, вказавши конфігурацію Flyingbear Ghost 5, включаючи тип мікроконтролера, драйвери крокових двигунів та порти підключення.

Отже, для оптимізації було обрано 3D-принтер Flyingbear Ghost 5, який поєднує компактність, високу точність та можливість роботи з термочутливими матеріалами. На нашу думку, принтер є оптимальним рішенням для забезпечення стабільної якості друку. Для інтеграції з прошивкою Klipper використано мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4, що володіє достатньою обчислювальною потужністю та зручними інтерфейсами підключення. Підготовчі роботи охоплювали як апаратну, так і програмну частину, включаючи встановлення та налаштування Raspberry Pi OS і Klipper. Такий комплексний підхід забезпечив сумісність усіх компонентів і створив надійну основу для подальшої оптимізації процесу друку.

### 3.2 Інсталяція та початкове налаштування Klipper

Інсталяція та налаштування Klipper є ключовим етапом, що вимагає ретельної підготовки та виконання послідовних кроків. Основна мета – забезпечити безперебійний зв'язок між мікрокомп'ютером (Raspberry Pi 4) і материнською платою принтера (MKS Robin Nano V1.2), а також правильно конфігурувати всі апаратні компоненти для коректної роботи прошивки.

Для спрощення та автоматизації процесу інсталяції використовувався скрипт KIAUH (Klipper Installation And Update Helper). Це консольний інструмент, який дозволяє швидко встановити та оновлювати Klipper, а також

пов'язані з ним веб-інтерфейси (Mainsail або FluidD), які є необхідними для зручного керування принтером через браузер.

1. Завантаження KIAUH. Після підключення до Raspberry Pi 4 по SSH, скрипт KIAUH був завантажений з GitHub за допомогою наступної команди:  
«*Bash cd ~git clone https://github.com/th33xitus/kiauh.git*»

2. Після завантаження, скрипт був запущений для початку інсталяції:  
«*Bash./kiauh/kiauh.sh*»

3. У головному меню KIAUH було обрано опцію «*Install*» та зазначено для інсталяції наступні компоненти:

- Klipper – основний компонент прошивки;
- Moonraker – програмне забезпечення для комунікації між Klipper та веб-інтерфейсом;
- Mainsail – веб-інтерфейс для керування принтером, моніторингу статусу друку, завантаження файлів тощо.

Скрипт автоматично завантажив і встановив усі необхідні залежності.

Після встановлення програмного забезпечення на Raspberry Pi 4, необхідно було скомпілювати та завантажити прошивку Klipper на материнську плату принтера.

Конфігурація прошивки. В KIAUH було обрано опцію «Klipper» → «Configure» та налаштовано параметри прошивки під мікроконтролер плати MKS Robin Nano V1.2. Важливо було обрати правильний процесор та метод завантаження:

- Microcontroller Architecture: STMicroelectronics STM32;
- Processor model: STM32F407;
- Bootloader offset: 16KB;
- Flash method: USB (for DFU) або через SD-карту, залежно від інструкції виробника. У даному випадку було обрано прошивку через SD-карту.

Після конфігурації прошивка була скомпільована.

Прошивка плати. Скомпільований файл `klipper.bin` був скопійований з Raspberry Pi на SD-карту, перейменований на `robin_nano.bin` (згідно з вимогами

плати MKS Robin Nano), і вставлений у слот на материнській платі принтера. Після вмикання принтера прошивка автоматично завантажилася на мікроконтролер.

Після успішної прошивки необхідно було налаштувати основний конфігураційний файл *printer.cfg*, який містить усі параметри принтера. Цей файл є «мозком» Klipper і знаходиться на Raspberry Pi.

Редагування файлу. Доступ до файлу *printer.cfg* був отриманий через веб-інтерфейс Mainsail. У файл були внесені наступні критично важливі параметри:

– зв'язок з мікроконтролером. Було вказано правильний порт USB для зв'язку між Raspberry Pi та платою принтера. «*Ini, TOML [mcu]*».

– драйвери крокових двигунів. Налаштування драйверів TMC2208 для осей X, Y, Z та екструдера, включно з параметрами струму, кроків на мм та напрямку руху. Параметри «*run\_current*» та «*microsteps*» є ключовими (рис. 3.4).

```

1  Ini, TOML
2  [stepper_x]
3  step_pin: PC14
4  dir_pin: PC13
5  enable_pin: !PC15
6  microsteps: 16
7  rotation_distance: 40
8  endstop_pin: !PB12
9  position_endstop: 0
10 position_max: 255
11 homing_speed: 50
12
13 [tmc2208 stepper_x]
14 uart_pin: PA15
15 run_current: 0.800
16 interpolate: True

```

Рисунок 3.4 – Налаштування драйверів TMC2208 для осей X, Y, Z та екструдера, включно з параметрами струму, кроків на мм та напрямку руху

Приклад конфігурації для драйвера TMC2208 на осі X:

– екструдер та стіл. Задані параметри PID для екструдера та нагрівального столу, максимальні температури та швидкості.

Нижче наведено приклад конфігурації для екструдера. Зауважимо, що PID-налаштування важливі для стабілізації температури (рис. 3.5);

```

1 Ini, TOML
2
3 [extruder]
4 step_pin: PB8
5 dir_pin: PB1
6 enable_pin: PB2
7 microsteps: 16
8 rotation_distance: 7.6
9 nozzle_diameter: 0.400
10 filament_diameter: 1.750
11 heater_pin: PA1
12 sensor_type: EPCOS 100K 857560G104F
13 sensor_pin: PC5
14 control: pid
15 pid_Kp: 22.2
16 pid_Ki: 1.08
17 pid_Kd: 114.0
18 min_temp: 0
19 max_temp: 280
20
21 [heater_bed]
22 heater_pin: PA2
23 sensor_type: ATC Semitec 104GT-2
24 sensor_pin: PC4
25 control: pid
26 pid_Kp: 69.2
27 pid_Ki: 1.2
28 pid_Kd: 994.5
29 min_temp: 0
30 max_temp: 110

```

Рисунок 3.5 – Приклад конфігурації для екструдера

– кінематика CoreXY. Визначено кінематику CoreXY та розміри області друку (рис. 3.6);

```

1 Ini, TOML
2 [printer]
3 kinematics: corexy
4 max_velocity: 300
5 max_accel: 3000
6 max_z_velocity: 5
7 max_z_accel: 100

```

Рисунок 3.6 – Приклад налаштування кінематики CoreXY

– розміри області друку (рис. 3.7).

```
1 Ini, TOML
2 [stepper_x]
3 ...
4 position_max: 255
5 [stepper_y]
6 ...
7 position_max: 210
8 [stepper_z]
9 ...
10 position_max: 210
```

Рисунок 3.7 – Налаштування розмірів області друку

Визначили розміри 255 мм×210 мм×210 мм, що є типовим для CoreXY-принтерів. Збереження та перезавантаження. Після збереження файлу *printer.cfg* було виконано команду RESTART у Mainsail, щоб Klipper застосував нові налаштування. У разі виникнення помилок, Klipper надає детальні звіти, що дозволяє швидко їх виправляти.

Таким чином, повна інсталяція та початкове налаштування були успішно завершені. Raspberry Pi 4 тепер виконує обчислювальні завдання, а материнська плата MKS Robin Nano V1.2 працює як «slave» пристрій, отримуючи команди від Klipper. Це створює міцну основу для подальшої оптимізації та калібрування принтера.

### 3.3 Програмна реалізація та калібрування ключових функцій Klipper

Після успішної інсталяції Klipper, наступним етапом є калібрування ключових функцій, що дозволяє значно підвищити якість та швидкість друку. Ці налаштування оптимізують рух механічних частин принтера та процес екструзії філаменту.

#### 3.3.1 Калібрування Input Shaping

Input Shaping – це програмний метод, розроблений для компенсації вібрацій (резонансів), що виникають під час швидких рухів принтера. Ці вібрації можуть спричиняти артефакти на друку, відомі як «ghosting» або «ringing».

Застосовуючи Input Shaping, Klipper вносить невеликі зміни у швидкість руху, щоб «гасити» ці коливання, перш ніж вони почнуть впливати на якість шарів.

Для калібрування вібрацій використовується акселерометр, наприклад, ADXL345, який кріпиться до друкувальної головки. Klipper автоматично виконує серію рухів та вимірює резонансні частоти по осях X та Y.

Опишемо основні кроки калібрування Input Shaping.

1. У *printer.cfg* додали налаштування для нашого акселерометра.
2. Запустили в терміналі Mainsail/Fluidd команду для автоматичного вимірювання резонансів.
3. Після завершення Klipper запропонував оптимальні параметри, які потрібно додати у наш *printer.cfg*.

Код для налаштування акселерометра в *printer.cfg* виглядає наступним чином (рис. 3.8).

```

1  Ini, TOML
2  [adxl345]
3  cs_pin: rpi:None
4  spi_software_sclk_pin: PB4
5  spi_software_mosi_pin: PB5
6  spi_software_miso_pin: PB6
7  axes_map: -z,-y,-x
8
9  [input_shaper]
10 shaper_type_x: mzv
11 shaper_freq_x: 64.6
12 shaper_type_y: mzv
13 shaper_freq_y: 63.8

```

Рисунок 3.8 – Фрагмент конфігураційного файлу *printer.cfg* із налаштуванням акселерометра

### 3.3.2 Калібрування Pressure Advance

Pressure Advance – це функція, яка дозволяє Klipper передбачити наростання тиску в екструдері та зменшити його перед зміною швидкості або зупинкою. Без цієї функції надмірний тиск може призвести до «наростів» (blobs) на кутах і «здуття» наприкінці друку. Правильно налаштований Pressure Advance забезпечує рівномірну товщину стінки та різкі, чисті кути.

Варто зазначити, що калібрування полягає у друці спеціальної моделі, яка дозволяє візуально визначити оптимальне значення Pressure Advance.

Опишемо основні кроки калібрування Pressure Advance.

1. У *printer.cfg* було встановлено *pressure\_advance* на 0, щоб уникнути впливу попередніх налаштувань.
2. Роздрукована тестова модель (наприклад, куб) з різними значеннями *pressure\_advance*.
3. Візуально було визначено, яке значення забезпечує найкращу якість кутів.

Тестовий G-code для калібрування виглядає наступним чином (рис. 3.9).

```

1 G-Code
2 SET_PRESSURE_ADVANCE ADVANCE=0.04
3 G1 E20 F500 ; Друкуємо лінію з PA 0.04
4
5 SET_PRESSURE_ADVANCE ADVANCE=0.06
6 G1 E20 F500 ; Друкуємо лінію з PA 0.06

```

Рисунок 3.9 – Тестовий G-code для калібрування

### 3.3.3 Калібрування PID-контролера

PID-контролер (Proportional-Integral-Derivative) – це механізм, який підтримує стабільну температуру нагрівальних елементів (екструдера та столу). Неправильно налаштований PID може спричинити коливання температури, що негативно впливає на адгезію шарів та якість друку. Калібрування PID дозволяє визначити оптимальні коефіцієнти ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) для стабільної роботи.

В процесі калібрування використовується вбудована функція *PID\_CALIBRATE*, яка нагріває і охолоджує елемент кілька разів, автоматично обчислюючи оптимальні параметри.

Опишемо основні кроки калібрування PID-контролера.

1. Спочатку ми запустили команду *PID\_CALIBRATE* для столу.
2. Klipper автоматично провів цикл нагріву/охолодження.
3. Після завершення результати було збережено в *printer.cfg*.

Розглянемо основні команди для калібрування, що були нами використані в процесі роботи:

### 3.3.4 Розробка та використання макросів та G-code скриптів

Макроси в Klipper – це потужний інструмент для автоматизації складних операцій. Вони дозволяють об'єднати кілька G-code команд в одну, що значно спрощує керування принтером. Основними макросами є.

1. `START_PRINT` – макрос для початку друку, який виконує підготовчі операції: хомінг, прогрів, очищення сопла.
2. `END_PRINT` – макрос для завершення друку, який вимикає нагрів і переміщує головку в безпечну позицію.
3. `CLEAN_NOZZLE` – макрос для автоматичного очищення сопла перед друком. Розглянемо основні макроси в `printer.cfg` (рис. 3.10).

```

1  [set, TEMP
2  [macro_macro START_PRINT]
3  gcode:
4  [! set BED_TEMP = param.BED_TEMP(default:60)|float %]
5  [! set EXTRUDER_TEMP = param.EXTRUDER_TEMP(default:200)|float %]
6
7  # Set bed and extruder temperatures
8  M140 S{BED_TEMP}
9  M104 S{EXTRUDER_TEMP}
10 # Wait for temps to reach
11 M100 S{BED_TEMP}
12 M100 S{EXTRUDER_TEMP}
13
14 # Home the printer
15 G28
16
17 # Purge line
18 G28 G9
19 G1 Z2.8 F3000
20 G1 E30 F3000
21 G1 E300 F30 F3000
22 G28 G9
23
24 [macro_macro END_PRINT]
25 gcode:
26 # Disable stepper
27 M84
28 # Turn off heaters
29 M104 S0
30 M140 S0
31 # Move head to safe position
32 G28
33 G1 Z28 F3000
34 G00
35 G1 E0 F3000

```

Рисунок 3.10 – Основні макроси в `printer.cfg`

Зазначимо, що використання цих макросів дає змогу спростити файли, згенеровані слайсером, і забезпечити однакові налаштування для кожного друку.

### 3.4 Висновки до третього розділу

У розділі було здійснено комплексну оптимізацію 3D-принтера Flyingbear Ghost 5 на базі прошивки Klipper. Для керування використано одноплатний

мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4, який володіє достатньою обчислювальною потужністю та зручними інтерфейсами підключення.

Підготовчі роботи включали апаратну частину та програмну частину. Ці кроки забезпечили сумісність всіх компонентів та створили надійну основу для подальшої оптимізації.

Інсталяція Klipper включала компіляцію та прошивку материнської плати, налаштування основного конфігураційного файлу `printer.cfg` із параметрами драйверів крокових двигунів, кінематики CoreXY, PID-контролера екструдера та нагрівального столу, а також екструдера й нагрівального столу. Це забезпечило коректну роботу всіх апаратних компонентів та безперебійний обмін даними між Raspberry Pi та платою принтера.

Для підвищення якості друку були реалізовані ключові функції Klipper: Input Shaping для гасіння вібрацій та усунення «ghosting», Pressure Advance для стабілізації товщини стінок і чистих кутів, а також PID-контролери для підтримки стабільної температури нагрівальних елементів. Також було впроваджено макроси та G-code скрипти (`START_PRINT`, `END_PRINT`, `CLEAN_NOZZLE`), що автоматизують підготовчі та завершальні операції друку, спрощують керування принтером і забезпечують однакові налаштування для кожного друку.

Отже, проведена оптимізація забезпечила інтеграцію апаратних та програмних компонентів, підвищила стабільність роботи принтера та створила умови для високоякісного друку із можливістю подальшого налаштування та розширення функцій Klipper.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Правила безпеки під час роботи з 3D-принтером

Основними факторами небезпеки, при роботі з 3D принтерами можуть бути [25]:

- небезпека ураження електричним струмом, від відкритих елементів проводки;
- відсутність або недолік необхідного природного освітлення;
- відсутність або недоліки необхідного штучного освітлення;
- знижена світлова і колірна контрастність;
- підвищена пульсація світлового потоку;
- підвищений рівень загальної вібрації;
- підвищений рівень локальної вібрації;
- рухомі тверді, рідкі або газоподібні об'єкти, що завдають удар по тілу працюючого (в тому числі рухомі машини і механізми; рухомі частини виробничого обладнання);
  - нерухомі ріжучі, колючі, обдирають, що розривають (наприклад, гострі кромки, задирки і шорсткість на поверхнях заготовок) частини твердих об'єктів
    - дія сили тяжіння в тих випадках, коли воно може викликати падіння твердих, сипучих, рідких об'єктів на працюючого;
  - підвищений рівень шуму;
  - небезпека і шкідливого впливу газових компонентів (включаючи пари), що забруднюють природне повітря;
  - підвищена або знижена температура в приміщенні;
  - підвищена або знижена відносна вологість.

Щоб захиститись від будь-яких пошкоджень, які можуть виникнути у процесі роботи з принтером необхідно провести заходи з охорони праці, такі як:

- забезпечення надійної ізоляції електронних компонентів;

- проведення інструктажу з техніки безпеки;
- видання засобів індивідуального захисту;
- забезпечення достатньої вентиляції у робочій зоні;
- використовувати природну вентиляцію для необхідних параметрів повітря в приміщенні;
- окреслення небезпечної частини робочої зони;
- впровадження закритого боксу з системою пило пригнічення для очистки виробів;
- проведення профілактичних оглядів електромережі.

#### 4.2 Техніка безпеки при роботі з філаментом для 3D-друку

Працівник повинен бути забезпечений санітарно-гігієнічним одягом, спецодягом та іншими засобами індивідуального захисту відповідно до чинних типових норм і використовувати їх за призначенням. Необхідно чітко знати і дотримуватися інструкцій з пожежної безпеки. Про кожний нещасний випадок потерпілий або свідок повинні негайно повідомити завідувача лабораторією [25].

Якісна система вентиляції виробничих приміщень є необхідною умовою для організації ефективного та безпечного робочого процесу. Експлуатація промислових об'єктів та різноманітного обладнання для виготовлення продукції часто супроводжується викидами шкідливих речовин, тепла, газів, пилу, металевих та полімерних часток, а також надмірної вологи. Це формує основне завдання системи вентиляції у виробничих цехах: ефективне видалення забрудненого повітря і забезпечення приміщень свіжим повітрям. У приміщеннях із концентрованими викидами небезпечних речовин зазвичай використовуються місцеві витяжні системи. Таке обладнання швидко видаляє основні забруднення під час їх виникнення, але не забезпечує належного припливу свіжого повітря. Тому для виробничих приміщень найкращим рішенням є застосування припливно-витяжної вентиляції.

Вентиляція виробничих приміщень може бути реалізована як природна або примусова припливно-витяжна система. Оптимальний тип вентиляції обирається залежно від технологічного процесу, архітектурних особливостей будівлі та кількості людей у цеху. Найкращі показники обсягу та якості повітрообміну в приміщенні забезпечує децентралізована промислова система вентиляції. Припливно-витяжна вентиляція дозволяє створювати різні мікрокліматичні зони в межах одного приміщення без необхідності зведення стін та додаткових перегородок [25]:

- сушіння та попереднє нагрівання пластичних матеріалів повинні проводитися в технологічному обладнанні, що виключає забруднення повітря робочої зони шкідливими речовинами;

- сушіння полімерних порошкових матеріалів для видалення залишкових кількостей вологи повинна здійснюватися в закритих апаратах під розрідженням;

- завантаження прес-порошку в бункери прес-автоматів, реактопласт автоматів, роторних ліній та таблетмашин має бути механізовано;

- технологічне обладнання повинне виключати пиловиділення; при вивантаженні гарячих виробів із пластмас із технологічного обладнання повинен бути виключений безпосередній контакт працівників із цими виробами. Охолодження виробів необхідно здійснювати у передбачених для цього укриттях або спеціальних приміщеннях, обладнаних витяжною вентиляцією;

- вивантаження виробів із пластмас із печей повинне проводитися після остигання їх у печах до температури, що не перевищує 40 °С, при працюючій місцевій вентиляції;

- допускається вивантаження виробів із пластмас із печей при температурі, що не перевищує 150 °С, у спеціальні контейнери, розміщені під аспіраційними пристроями, до повного остигання виробів; – при обробці виробів із пластмас у камерах машин (при нагріванні, промиванні, обробці виробів) перебування працівників усередині камер забороняється;

– при виготовленні та використанні свинцевих форм повинні дотримуватися заходів безпеки, що запобігають забрудненню свинцем повітря робочої зони та шкірних покривів працівників.

Мономери. Більшість із них виділяються в процесі поліконденсації, вони надзвичайно реактивні та біологічно агресивні. Виробничий контакт з цими речовинами може викликати ураження шкіри та слизових оболонок, печінки, органів дихання, центральної нервової системи, індукувати канцерогенез, алергічні захворювання, позначитися на репродуктивній функції організму.

Добавки, що застосовуються у виробництві полімерних сполук. Їх токсичність може бути більшою за токсичність основного полімеру. Використання при виготовленні пластмас різних наповнювачів, які в основному є порошкоподібними речовинами, досить часто викликає запиленість повітря робочої зони, що може призвести до бронхолегеневої захворюваності працівників. Пил також утворюється на стадіях сушіння, дроблення, шліфування, просіювання деяких полімерів.

Газоподібні речовини та пил. Залежно від їх концентрації та тривалості впливу можуть призвести до різних змін в організмі працівників. Діапазон цих порушень досить широкий - від змін окремих показників гемостазу до розвитку гострих та хронічних інтоксикацій та захворювань. Клінічні прояви останніх залежать від переважання тих чи інших компонентів, що використовуються під час виробництва та обробки полімерних сполук.

Гігієнічні вимоги до полімерних матеріалів залежать від їх застосування. Головне, щоб полімери були нешкідливими у токсикологічному відношенні.

Слід максимально обмежувати контакт працівників, особливо рук та інших відкритих частин тіла із шкідливими речовинами; також слід використовувати захисний спецодяг та засоби індивідуального захисту.

Важливе значення має теплоізоляція нагрітого обладнання та комунікацій, герметизація обладнання, забезпечення ефективної роботи вентиляційних установок. Дотримання цих правил допоможе забезпечити безпечну та ефективну роботу з сушильною шафою та філаментами.

### 4.3 Висновки до четвертого розділу

У розділі розглянуто основні заходи безпеки під час роботи з 3D-принтером. Встановлено, що основними факторами небезпеки є електричний струм, рухомі частини обладнання, гострі кромки, коливання температури і вологості, шум, вібрації та шкідливі газоподібні або пилові компоненти. Для зменшення ризиків необхідно дотримуватися правил охорони праці, включаючи ізоляцію електронних компонентів, проведення інструктажів, забезпечення вентиляції, використання засобів індивідуального захисту та регулярну перевірку обладнання.

Особлива увага приділена роботі з сушильною шафою: працівник повинен мати першу групу з електробезпеки, проходити медичні огляди, дотримуватися інструкцій з експлуатації та пожежної безпеки, контролювати стан електропроводки, не залишати обладнання без нагляду та дотримуватися встановлених температурних режимів.

У роботі з філаментом для 3D-друку та полімерними матеріалами наголошено на важливості санітарно-гігієнічного одягу, спецодягу та засобів індивідуального захисту. Вентиляційні системи, включно з припливно-витяжними, забезпечують видалення шкідливих газів, пилу та тепла, а також створюють безпечний мікроклімат у робочій зоні.

Окрім того, обмеження контакту працівників із шкідливими речовинами, герметизація обладнання, теплоізоляція нагрітих частин та ефективне функціонування вентиляції є критично важливими для запобігання інтоксикаціям, захворюванням дихальної системи та травмам.

Отже, комплексне дотримання правил безпеки, правильне використання обладнання та організація вентиляції забезпечують безпечну, ефективну та стабільну роботу з 3D-принтером і супутніми технологічними процесами.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження процесів 3D-друку на прикладі принтера Flyingbear Ghost 5 з використанням прошивки Klipper та розроблено підхід до оптимізації роботи обладнання з урахуванням апаратних, програмних та безпекових аспектів. Особливу увагу приділено аналізу технології 3D-друку, характеристикам різних методів адитивного виробництва та функціоналу сучасного програмного забезпечення, що дозволяє підвищити продуктивність і точність друку.

Дослідження показали, що Klipper забезпечує високу швидкість обробки команд, підтримку алгоритмів Input Shaping та Pressure Advance, а також гнучке дистанційне керування, що сприяє зменшенню дефектів надрукованих виробів і стабілізації процесу. У роботі здійснено інтеграцію апаратної та програмної частин 3D-принтера, включаючи налаштування PID-контролерів, макросів та G-code скриптів, що дозволило автоматизувати ключові операції та забезпечити відтворюваність результатів друку.

Особлива увага приділялася заходам безпеки при роботі з 3D-принтером. Встановлено, що дотримання цих правил є необхідною умовою для забезпечення безпечної, ефективної та стабільної роботи обладнання.

Таким чином, виконані дослідження дозволили не лише підвищити якість і точність 3D-друку, але й сформувавши комплексну методіку оптимізації роботи принтера на базі Klipper із урахуванням апаратних, програмних та безпекових аспектів. Результати роботи мають практичне значення для подальшого вдосконалення технологічних процесів адитивного виробництва, автоматизації керування принтерами та підвищення ефективності використання 3D-технологій у виробничих і дослідницьких проєктах.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, О.В. Токарева, А.І. Бронніков. – Харків: ХНУРЕ, 2022. – 66 с.
3. Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки. Про нас. Офіційний сайт кафедри КІТАМ ХНУРЕ [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://tapr.nure.ua/golovna/pro-nas> (дата звернення: 08.09.2025).
4. Технології 3D друку. URL: [http://www.ixbt.com/printer/3d/3d\\_tech.shtml](http://www.ixbt.com/printer/3d/3d_tech.shtml)
5. Як влаштований 3D-принтер: основні деталі та принцип роботи. URL: [https://easy3dprint.com.ua/uk/yak-vlashtovaniy-3d-printer/#Як\\_працює\\_3D-принтер](https://easy3dprint.com.ua/uk/yak-vlashtovaniy-3d-printer/#Як_працює_3D-принтер)
6. Як працює 3D-принтер? URL: <https://artline.ua/uk/blogs/kak-rabotaet-3d-printer>
7. Як працює 3D-принтер: огляд 5 матеріалів і технологій. URL: <https://surl.li/akqrcs>
8. Як прошити 3D-принтер: Простий посібник. <https://surl.li/dacmue>
9. 3D-друк для початківців: початок роботи з 3D-друком. URL: <https://surl.lu/pztzmq>
10. 3D-друк: як це працює і чому ця технологія змінює світ. URL: <https://easy3dprint.com.ua/uk/3d-druk-yak-tse-pratsyuye/>
11. Afshar R., Jeanne S., Abali B.E. Nonlinear material modeling for mechanical characterization of 3-D printed PLA polymer with different infill densities.

Applied Composite Materials. 2023. №30(3). PP. 987–1001. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10443-023-10122-y>

12. Albar A., Swash M.R., Ghaffar S. The design and development of an extrusion system for 3D printing cementitious materials. In 2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT) (pp. 1-5). Ankara: IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISMSIT.2019.8932771>

13. Geng P., Zhao J., Wu W., Ye W., Wang Y., Wang S., Zhang S. Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament. Journal of Manufacturing Processes. 2019. №37. PP. 266–273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.11.023>

14. Jandyal A., Chaturvedi I., Wazir I., Raina A., Haq M.I.U. 3D printing – a review of processes, materials, and applications in Industry 4.0. Sustainable Operations and Computers. 2022. №3. PP. 33–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.09.004>

15. Klipper Architecture / Ecosystem. URL: <https://klipper.discourse.group/t/klipper-architecture-ecosystem/6313>

16. Klipper Documentation. URL: <https://www.klipper3d.org>

17. Klipper: High precision 3D printer firmware. URL: <https://www.klipper3d.org>

18. Klipper vs. Marlin – 3D Printer Firmware Comparison. URL: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/klipper-vs-marlin/>

19. Marlin Firmware. URL: <https://marlinfw.org>

20. Nazarenko V., Ostroushko B. Comparative research of 3D printer main control parameters and characteristics utilising Klipper firmware. Machinery & Energetics. 2025. № 16(1). PP. 81–90. DOI: <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2025.81>

21. Pivar M., Gregor-Svetec D., Muck D. Effect of printing process parameters on the shape transformation capability of 3D printed structures. Polymers. 2021. №14(1). DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14010117>

22. Reddit Community – r/klippers – Порівняння з Marlin та обговорення конфігурацій. URL: <https://www.reddit.com/r/klippers>
23. Repetier Firmware and Host. URL: <https://www.repetier.com>
24. Wu J. Study on optimization of 3D printing parameters. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. №392 (062050). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/392/6/062050>
25. Запорожець О. І., Халмурадов Б. Д., Серіков Я. О., Дзюндзюк Б. В., Айвазов В. А., Третьяков О. В. Електробезпека : практикум : навч. посіб. — Харків : ХНУРЕ, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. — 152 с.