Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
(позначення документа)

Розроблення програмного забезпечення для 3D-принтера з кінематикою Dual X-Carriage з використанням ПЗ Klipper
(тема)

Виконала:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТАКІТ-22-1
Олександра ЧИГРИН
(власне ім'я, прізвище)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва освітньої програми)

Керівник ас. Роман СТРІЛЕЦЬ
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАРБІ _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Я, Чигрин Олександра Володимирівна, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності Я не надавала і не одержувала недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовувала штучний інтелект під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

13» липня 2026 р. _____ Олександра ЧИГРИН

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет АКІТС
Кафедра КІТАРБІ
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп`ютерно-інтегровані технології
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
«____»_____20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Чигрин Олександрі Володимирівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення програмного забезпечення для 3D-принтера з кінематикою Dual X-Carriage з використанням ПЗ Klipper
затверджена наказом по університету від " 04 " червня 2026р. № 472 Ст
2. Термін подання студентом роботи " 13 " липня 2026р.
3. Вихідні дані до роботи:
3.2 Мікрокомп'ютер – Raspberry Pi 4;
3.4 Плата керування – RURAMPS 1.4;
3.5 Кроковий двигун – Nema 17;
3.4 Драйвери крокового двигуна – TMC2209;
3.5 Програмне забезпечення – Klipper .
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
4.1 Вступ;
4.2 Аналіз предметної області;
4.3 Розробка алгоритму роботи 3D – принтера з кінематикою Dual X-Carriage
4.4 Розроблення програмного забезпечення для 3D-принтера з кінематикою Dual X-Carriage;
4.5 Заходи і розрахунки для забезпечення безпечних умов праці;
4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 10 с. формату А4

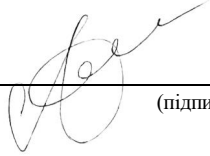
6. Консультанти розділів роботи (п. 6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п. 1)

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	Аналіз технології FDM-друку та особливостей кінематики Dual X-Carriage	28.04 – 04.05.25	виконано
2	Розробка алгоритму роботи 3D – принтера з кінематикою Dual X-Carriage	05.05 – 14.05.26	виконано
3	Розроблення програмного забезпечення для 3D-принтера з кінематикою Dual X-Carriage	15.05 – 31.05.26	виконано
4	Використання елементів теорії автоматичного керування та безпека праці	01.06 – 10.06.26	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	11.06 – 14.06.26	виконано
6	Подання роботи на нормоконтроль	15.06 – 16.06.26	виконано
7	Подання роботи на перевірку Інтернет-системою StrikePlagiarism	16.06 – 17.06.26	виконано
8	Подання роботи на рецензію	06.07 – 07.07.26	виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	08.07 – 10.07.26	виконано
10	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	13.07.26	виконано

Дата видачі завдання 27.04.2026 р.

Здобувач  Олександра ЧИГРИН
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____ Роман СТРІЛЕЦЬ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 55 с., 35 рис., 1 дод., 23 джерела.

DUAL X-CARRIAGE, FDM KLIPPER, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, МІКРОКОМП'ЮТЕР, RASPBERRY PI, WEB-ІНТЕРФЕЙС, ОПЕРАЦІЙНА СИСТЕМА.

Сучасні технології 3D-друку активно розвиваються в багатьох сферах діяльності. Підвищення функціональних можливостей 3D-принтерів потребує використання сучасного програмного забезпечення, яке забезпечує точне керування процесом друку, стабільну роботу обладнання та зручність його налаштування.

Мета роботи – покращення продуктивності роботи 3D-принтера шляхом розроблення програмного забезпечення для кінематики Dual X Carriage на базі прошивки Klipper.

Об'єкт розробки – процес розробки програмного забезпечення для керування 3D-принтерами за технологією FDM з кінематикою Dual X Carrige на основі ПЗ Klipper.

Предмет розробки – методи та засоби керування 3D-принтерами за технологією FDM, що спрямовані на підвищення ефективності 3D-друку.

Отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», зокрема до пункту 9.4 «Розвиток високотехнологічного машинобудування».

ABSTRACT

Explanatory note: 54 pp., 35 figs., 1 appendices, 23 sources.

DUAL X-CARRIAGE, FDM, KLIPPER, SOFTWARE, MICROCOMPUTER, RASPBERRY PI, WEB INTERFACE, OPERATING SYSTEM.

Modern 3D printing technologies are actively developing and are being applied in many fields. Increasing the functional capabilities of 3D printers requires the use of modern software that ensures precise control of the printing process, stable operation of the equipment, and convenient system configuration.

The aim of the work is to develop and configure software for a 3D printer with Dual X-Carriage kinematics based on the Klipper firmware.

The object of the development is the process of developing software for controlling FDM 3D printers with Dual X-Carriage kinematics using Klipper software.

The subject of the development is the methods and tools for controlling FDM 3D printers aimed at improving the efficiency of the 3D printing process.

The obtained results can be attributed to Sustainable Development Goal 9, “Industry, Innovation and Infrastructure,” in particular to Target 9.4, “Development of high-tech mechanical engineering”.

ЗМІСТ

Перелік скорочень 8

Вступ 9

1 Аналіз предметної області 11

1.1 Загальні технології 3D-друку 11

1.2 Аналіз принтерів, побудованих за кінематикою Dual X-Carriage 15

1.3 Аналіз вимог до програмного забезпечення для технології FDM 3D-друку 20

2 Розробка алгоритму роботи 3D – принтера з кінематикою Dual X-Carriage 25

2.1 Структура програмно-апаратного комплексу 25

2.2 Налаштування прошивки Klipper для підтримки кінематики Dual X-Carriage 27

2.3 Реалізація алгоритму керування екструдерами 28

3 Розроблення програмного забезпечення для 3d-принтера з кінематикою Dual X-Carriage 32

3.1 Налаштування конфігурації програмного забезпечення 32

3.2 Налаштування конфігураційного файлу printer.cfg 35

3.3 Теорія автоматичного управління 45

3.4 Безпека праці 49

Висновки 50

Перелік джерел посилання 52

Додаток А Демонстраційний матеріал 55

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ПЗ – програмне забезпечення;

3D (3-Dimensional) – тривимірний;

FDM (Fused Deposition Modeling) – моделювання методом пошарового наплавлення;

KIAUH (Klipper Installation And Update Helper) – допоміжний інструмент для встановлення та оновлення Klipper;

SLA (Stereolithography Apparatus) – апарат стереолітографії;

SLS (Selective Laser Sintering) – селективне лазерне спікання.

ВСТУП

З кожним роком технології 3D-друку стають дедалі популярнішими та знаходять застосування в багатьох сферах діяльності. Їх використовують для виготовлення прототипів, деталей, макетів та інших виробів різної складності. Разом із розвитком 3D-принтерів зростають вимоги не лише до їх конструкції, а й до програмного забезпечення, яке забезпечує точність, стабільність та зручність роботи.

Одним із сучасних рішень є використання кінематики Dual X-Carriage, яка дозволяє застосовувати два незалежні екструдери та виконувати багатоматеріальний або багатоколірний друк. Проте для стабільної роботи такої системи необхідне правильно налаштоване програмне забезпечення, здатне керувати двома каретками та забезпечувати їх точне позиціонування.

Для реалізації цих можливостей доцільно використовувати прошивку Klipper, яка забезпечує швидку обробку команд, підтримує складні кінематичні схеми та дозволяє гнучко налаштовувати параметри роботи 3D-принтера.

Метою кваліфікаційної роботи є покращення продуктивності роботи 3D-принтера шляхом розроблення програмного забезпечення для кінематики Dual X Carriage на базі прошивки Klipper.

Об’єкт розробки – процес розробки програмного забезпечення для керування 3D-принтерами за технологією FDM з кінематикою Dual X-Carriage на основі ПЗ Klipper.

Предмет розробки – методи та засоби керування 3D-принтерами за технологією FDM, що спрямовані на підвищення ефективності 3D-друку.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

– проаналізувати сучасні технології 3D-друку та особливості технології FDM;

– дослідити особливості кінематики Dual X-Carriage та вимоги до програмного забезпечення для керування 3D-принтером;

– обґрунтувати вибір програмного забезпечення Klipper для реалізації системи керування;

– розробити та налаштувати програмне забезпечення для 3D-принтера з кінематикою Dual X-Carriage;

– виконати налаштування операційної системи Linux та конфігурації програмного забезпечення;

– налаштувати конфігураційний файл printer.cfg для забезпечення коректної роботи 3D-принтера;

– розглянути заходи щодо забезпечення безпечних умов прац.

У даній кваліфікаційній роботі проведено аналіз сучасних технологій FDM 3D-друку, особливостей кінематики Dual X-Carriage та вимог до програмного забезпечення для керування 3D-принтером. Виконано розроблення структури програмно-апаратного комплексу, налаштування прошивки Klipper, конфігурацію файлу printer.cfg та реалізацію алгоритму керування двома незалежними екструдерами. Також розглянуто використання елементів теорії автоматичного керування та заходи щодо забезпечення безпечних умов праці під час налаштування й експлуатації 3D-принтера.

Пояснювальну записку оформлено згідно з ДСТУ 3008:2015 [1], а також з рекомендаціями з підготовки і оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти [2-3].

Отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», зокрема до пункту 9.4 «Розвиток високотехнологічного машинобудування».

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Загальні технології 3D-друку

Технологія 3D-друку, що також відома як адитивне виробництво, є сучасним напрямом цифрового виробництва, який ґрунтується на принципі пошарового формування фізичних об’єктів на основі їх тривимірних цифрових моделей. Основною відмінністю адитивного підходу від традиційних субтрактивних методів є те, що деталь створюється шляхом додавання матеріалу, а не його видалення. Це дозволяє значно зменшити кількість відходів виробництва, підвищити ефективність використання сировини та реалізувати виготовлення геометрично складних виробів, які важко або неможливо отримати класичними методами механічної обробки. На рисунку 1.1 зображено основні елементи та комплектацію 3D-принтера, що працює за технологією FDM.

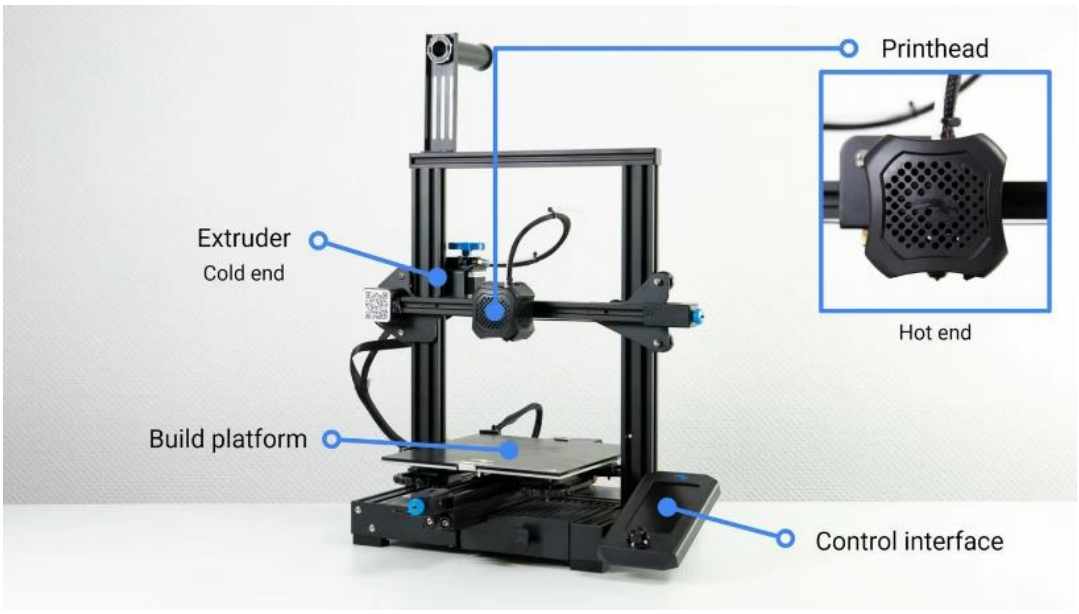


Рисунок 1.1 – Елементи та комплектація 3D-принтера, що працює за технологією FDM

Сучасні технології 3D-друку умовно поділяються на декілька основних напрямів, серед яких найбільш поширеними є FDM (Fused Deposition Modeling),

SLA (Stereolithography Apparatus) та SLS (Selective Laser Sintering). Кожна з цих технологій має свої особливості реалізації, проте найбільш доступною та широко використовуваною залишається саме FDM-технологія, яка застосовується як у побутових 3D-принтерах, так і в промислових системах початкового рівня [4].

На рисунок 1.2 представлено основні технології 3D-друку: FDM, SLA, SLS.

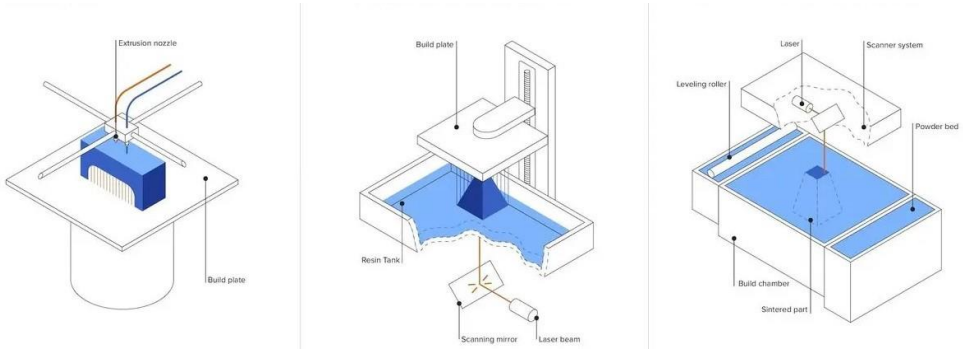


Рисунок 1.2 – Основні технології 3D-друку: FDM, SLA, SLS

FDM-технологія базується на використанні термопластичних матеріалів, які подаються у вигляді нитки – філаменту [5]. Під час процесу друку філамент подається у нагрівальний блок екструдера, де він розплавляється до в’язкого стану, після чого через сопло наноситься на робочу поверхню. Формування виробу відбувається поступово, шляхом накладання послідовних шарів матеріалу, кожен з яких твердне та з’єднується з попереднім, утворюючи цілісну конструкцію. На рисунку 1.3 зображено принцип роботи 3D принтера за технологією FDM.

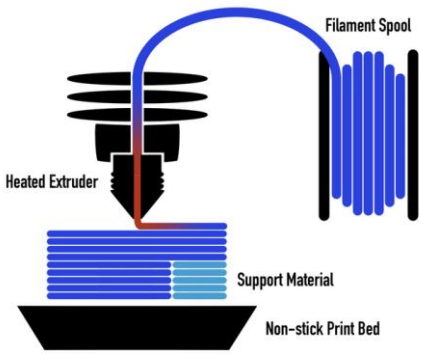


Рисунок 1.3 – Конструкція екструдера та процес подачі філаменту в FDM 3D-принтері

Процес 3D-друку є складною багатопараметричною системою, в якій якість кінцевого виробу залежить від взаємодії механічної, теплової та програмної складових. Важливу роль відіграють параметри температури екструзії, швидкості переміщення екструдера, товщини шару, а також точність позиціонування по осях координатної системи. Навіть незначні відхилення цих параметрів можуть призводити до появи дефектів, таких як розшарування, деформації або порушення геометрії моделі [6].

Як показано на рисунку 1.4, основні параметри процесу 3D-друку поділяються на параметри побудови шару та параметри пристрою, що безпосередньо впливають на якість кінцевого виробу [7].

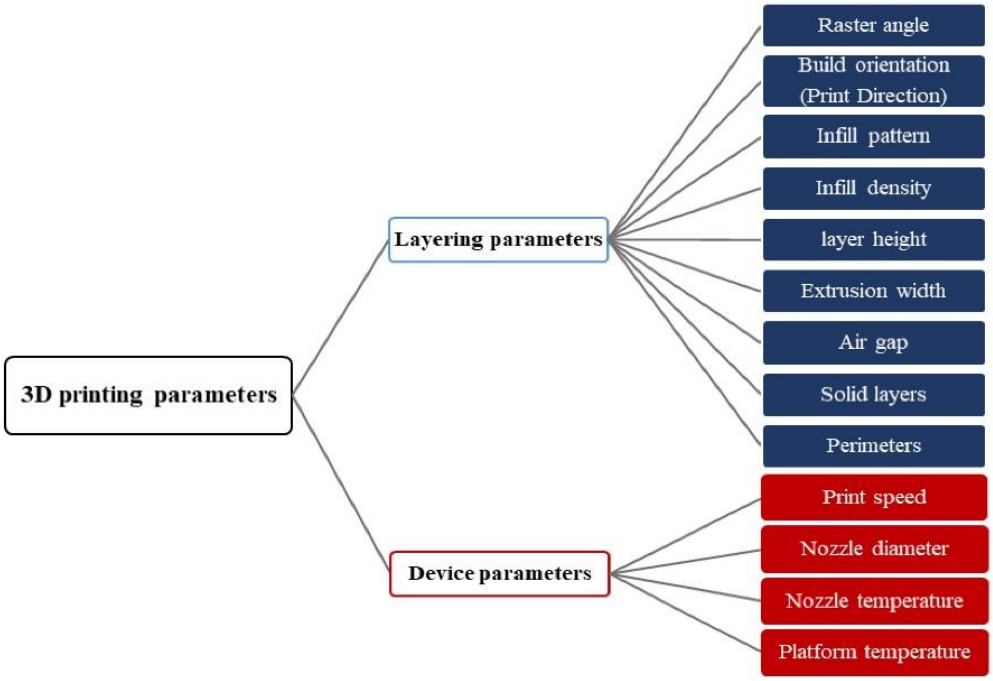


Рисунок 1.4 – Основні параметри процесу FDM 3D-друку

Окреме значення має програмна частина системи 3D-друку, яка відповідає за перетворення цифрової моделі у набір керуючих команд для виконавчих механізмів принтера. Ці команди формуються у вигляді G-code, який містить інформацію про траєкторії руху, швидкість переміщення, температуру нагрівальних елементів та інші технологічні параметри [8].

Таким чином, програмне забезпечення фактично визначає логіку роботи всього пристрою та безпосередньо впливає на якість виготовлення виробів. Як показано на рисунку 1.5, програмне забезпечення здійснює перетворення 3D-моделі у послідовність шарів та формує керуючий код (G-code), який використовується для керування процесом друку [9].

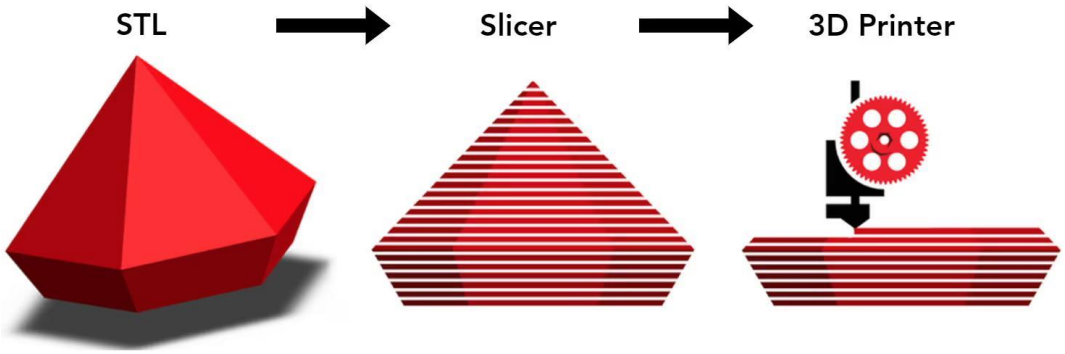


Рисунок 1.5 – Процес перетворення 3D-моделі у G-code для 3D-друку

Сучасні FDM-системи активно застосовуються у різних сферах, зокрема в інженерному прототипуванні, машинобудуванні, архітектурному моделюванні, медицині, освіті та дрібносерійному виробництві. Їх широке розповсюдження пояснюється відносною простотою конструкції, доступністю матеріалів та можливістю швидкого переходу від цифрової моделі до фізичного об’єкта.

Водночас розвиток технологій 3D-друку супроводжується підвищенням вимог до точності, швидкості та функціональності обладнання. Це стимулює впровадження більш складних кінематичних схем, вдосконалення механічних систем та розвиток програмного забезпечення, здатного працювати з багатоканальними та багатоматеріальними конфігураціями [10].

Таким чином, сучасні 3D-принтери перетворюються на складні мехатронні комплекси, ефективність яких напряму залежить від якості програмного керування та алгоритмів обробки даних.

На рисунку 1.6, сучасні 3D-принтери можуть використовувати декілька екструдерів, що дозволяє реалізувати багатоматеріальний друк та підвищити функціональність системи [11].

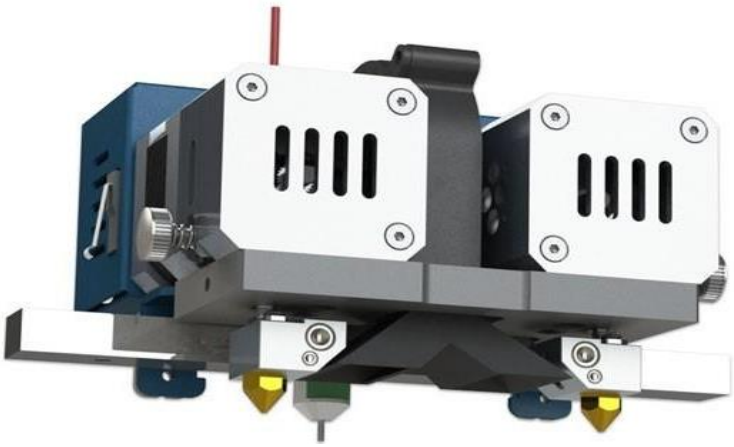


Рисунок 1.6 – Подвійний екструдер 3D-принтера

1.2 Аналіз принтерів, побудованих за кінематикою Dual X-Carriage

Кінематична система Dual X-Carriage є однією з модифікацій класичної Cartesian-архітектури 3D-принтерів, яка передбачає використання двох незалежних кареток, що переміщуються вздовж осі X на спільній напрямній системі. Кожна з кареток зазвичай оснащується окремим екструдером, що дозволяє реалізувати багатоматеріальний або багатоколірний друк без необхідності механічної заміни інструментів у процесі виконання завдання. Як показано на рисунку 1.7, система Dual X-Carriage передбачає використання двох незалежних кареток, що переміщуються вздовж осі X [12].

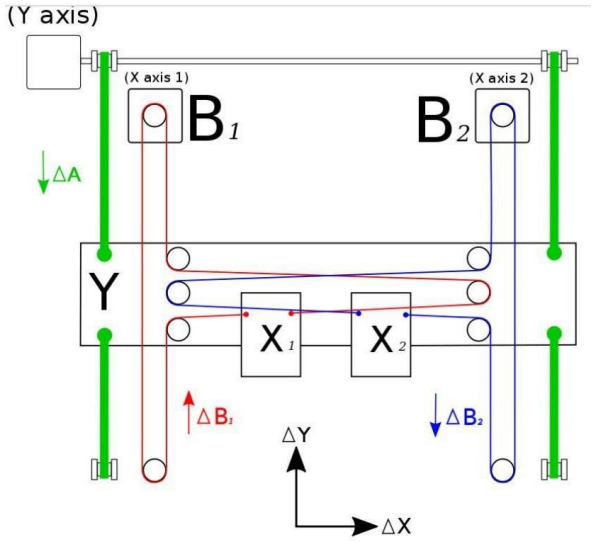


Рисунок 1.7 – Кінематична схема кінематики Dual X-Carriage

Основна ідея даної кінематичної схеми полягає у забезпеченні можливості незалежного функціонування друкувальних вузлів при збереженні єдиної координатної системи. У типовому режимі роботи активною є лише одна каретка, яка виконує безпосереднє нанесення матеріалу, тоді як друга перебуває у неактивному стані або переміщується у спеціальну паркову зону, що виключає її взаємодію з робочою областю [13].

Такий підхід дозволяє уникати небажаного витікання матеріалу з неактивного екструдера, а також зменшує ризик забруднення моделі під час перемикання інструментів. Як показано на рисунку 1.8, у процесі друку один екструдер є активним, тоді як інший переміщується у паркувальну позицію та не бере участі у формуванні виробу.

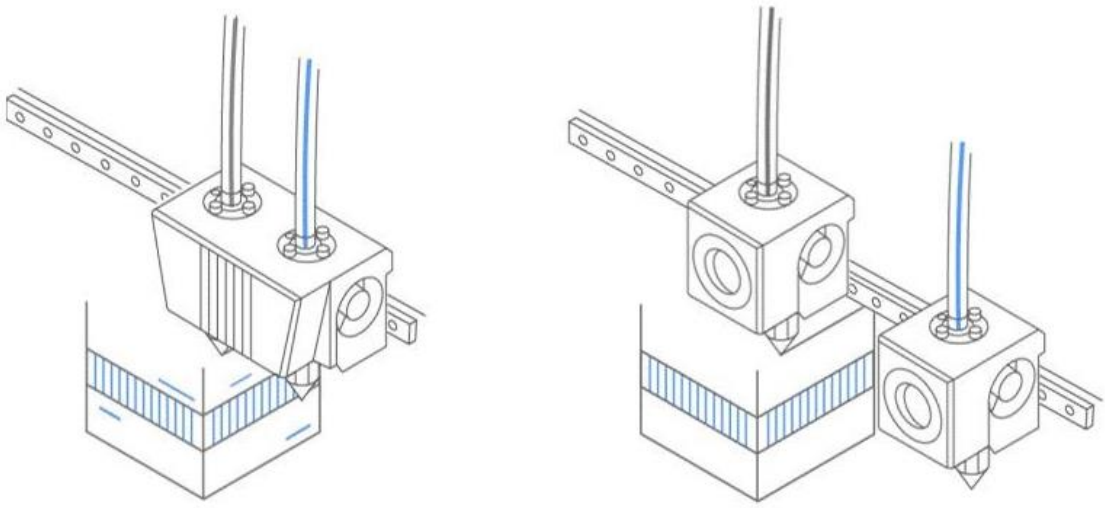


Рисунок 1.8 – Режими роботи екструдерів у системі Dual X-Carriage

З інженерної точки зору Dual X-Carriage є складнішою системою порівняно з класичними однокаретковими принтерами. Це пов’язано з необхідністю точної механічної синхронізації двох рухомих вузлів, а також з ускладненням алгоритмів керування їх положенням у просторі. Додаткову складність створює необхідність узгодження температурних режимів, швидкостей переміщення та моментів перемикання між екструдерами [14].

Практичне застосування Dual X-Carriage-систем дозволяє значно розширити функціональні можливості 3D-принтера. Найбільш поширеним сценарієм є

використання різних матеріалів у межах одного виробу, наприклад поєднання основного конструкційного пластику з підтримуючим розчинним матеріалом. Це особливо актуально при друку складних геометричних моделей, які містять нависаючі елементи або внутрішні порожнини. Крім того, дана кінематична схема дозволяє реалізувати багатоколірний друк без зупинки процесу, що важливо для декоративних та презентаційних виробів.

Водночас впровадження Dual X-Carriage супроводжується рядом технічних викликів. Однією з основних проблем є забезпечення точного позиціонування обох кареток у спільному робочому просторі. Навіть незначні похибки калібрування можуть призводити до зміщення шарів, появи артефактів на поверхні виробу або порушення геометрії моделі. Додатково ускладнюється процес перемикання між екструдерами, оскільки необхідно враховувати не лише механічний рух каретки, але й теплові процеси, пов’язані з нагрівом та охолодженням сопел [15].

На рисунку 1.9 наведено приклад впливу незначні похибки позиціонування екструдерів можуть призводити до зміщення шарів і виникнення дефектів.

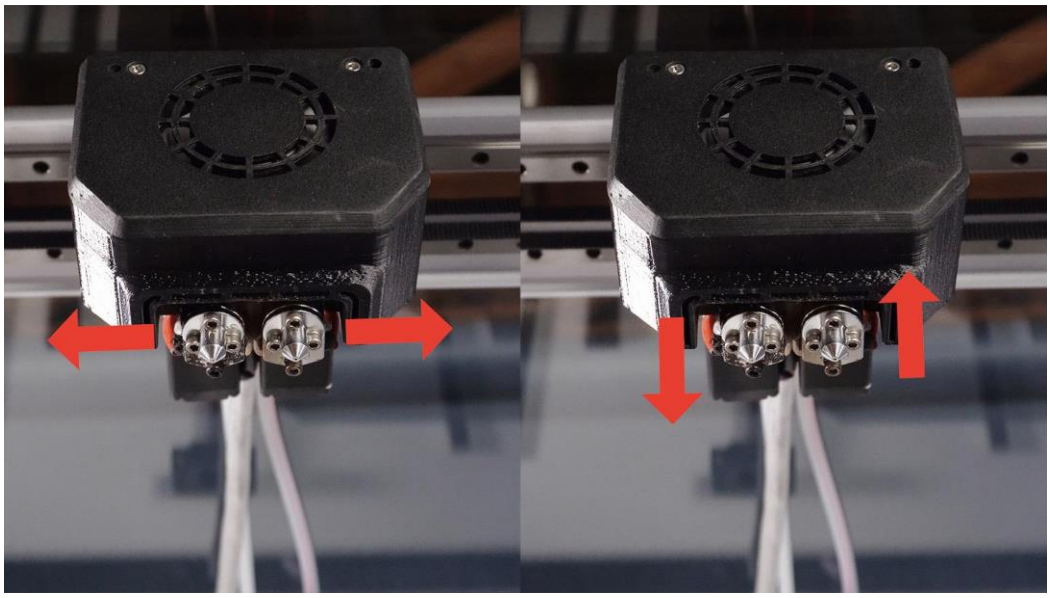


Рисунок 1.9 – Похибки позиціонування екструдерів у системі Dual X-Carriage

З точки зору програмного керування, Dual X-Carriage вимагає більш складної логіки обробки G-code. Система повинна не лише інтерпретувати стандартні команди переміщення, але й координувати поведінку двох незалежних

інструментів у межах однієї координатної системи. Це включає управління станами активності екструдерів, контроль їхнього положення у просторі, а також забезпечення безпечних переходів між робочими режимами [16].

На рисунку 1.10 продемонстровано процес керування рухом двох екструдерів у межах єдиної координатної системи.

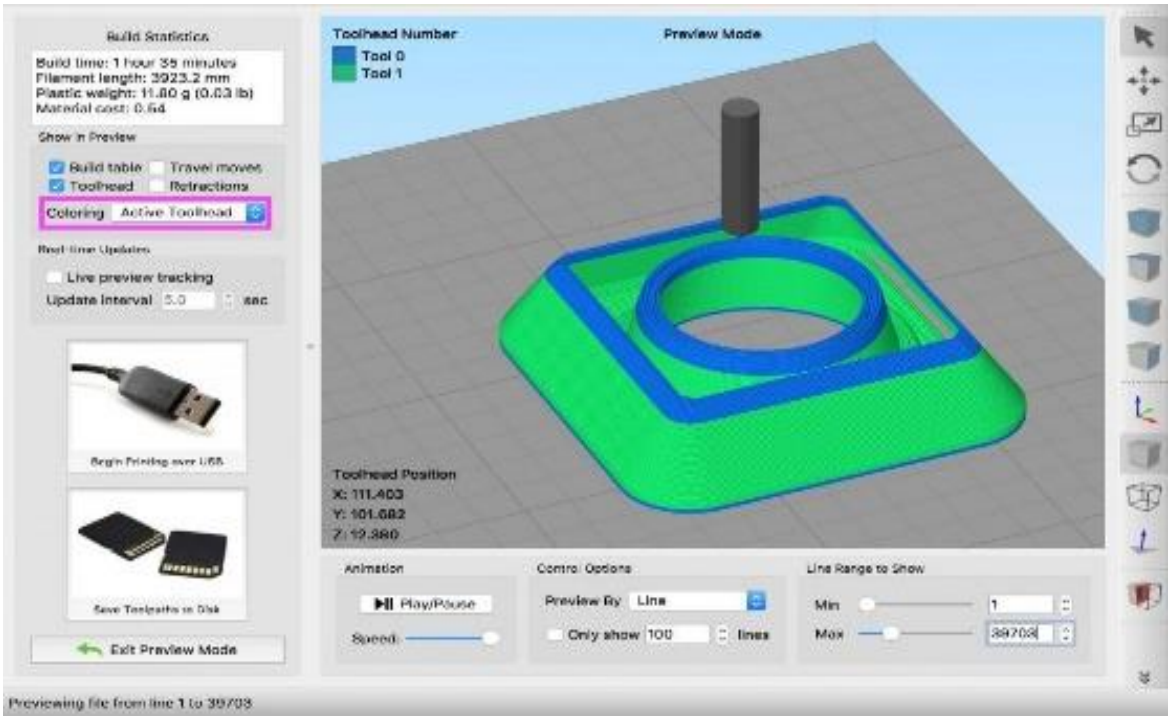


Рисунок 1.10 – Візуалізація G-code при керуванні двома екструдерами

У порівнянні з іншими багатоматеріальними системами, такими як змішувальні екструдери або системи з одним соплом і кількома подачами, Dual X-Carriage має як переваги, так і обмеження. З одного боку, вона забезпечує повну фізичну роздільність матеріалів, що виключає їх змішування в соплі та підвищує якість переходів між різними матеріалами. З іншого боку, така архітектура вимагає більшої механічної складності та більш точного програмного налаштування.

З практичних досліджень та досвіду використання подібних систем відомо, що їх ефективність значною мірою залежить від якості калібрування осей, точності налаштування паркувальних позицій екструдерів та коректності алгоритмів перемикання інструментів. Особливу роль відіграє програмне забезпечення, яке

повинно забезпечувати синхронізацію рухів у реальному часі та запобігати конфліктам між каретками [17].

Додатково слід зазначити, що ефективність використання системи Dual X-Carriage значною мірою визначається оптимальним налаштуванням параметрів друку. Крім того, важливим аспектом є вибір відповідного програмного забезпечення для керування процесом друку.

Сучасні системи, зокрема Klipper, дозволяють реалізувати більш точне керування рухом кареток, підвищити швидкість обробки команд G-code та забезпечити стабільну роботу багатоканальних конфігурацій. Перспективи розвитку кінематики Dual X-Carriage пов’язані з удосконаленням алгоритмів керування, автоматизацією процесів калібрування та інтеграцією систем моніторингу якості друку в реальному часі [18].

На рисунку 1.11 продемонстровано приклад використання системи Klipper для керування процесом 3D-друку та контролю основних робочих параметрів.

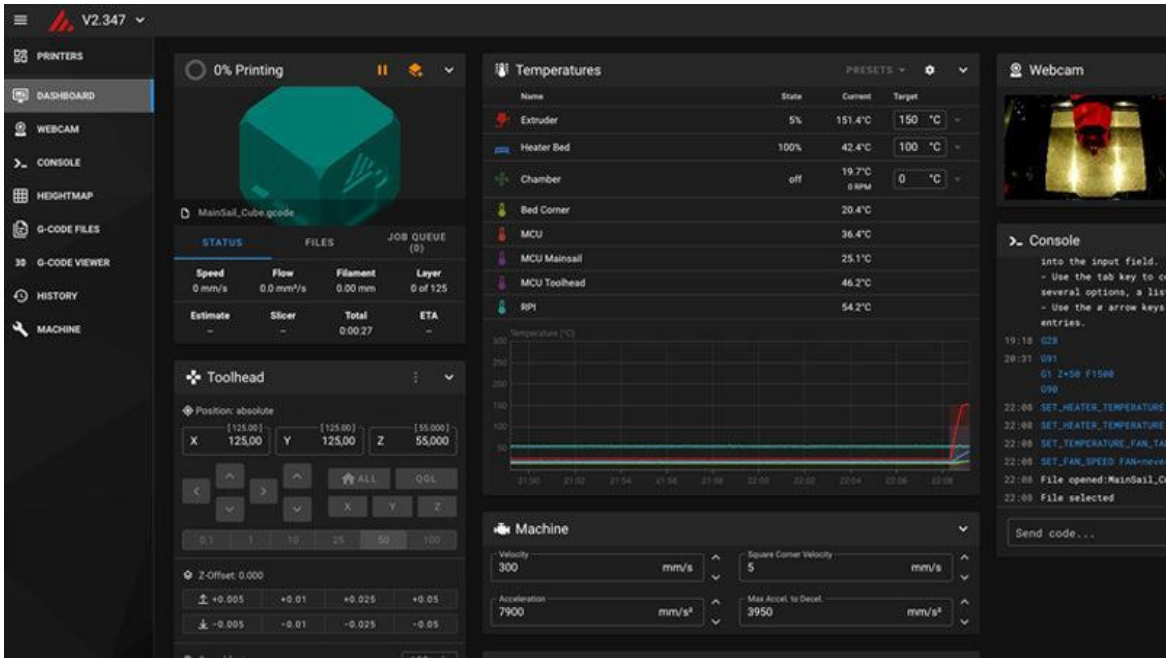


Рисунок 1.11 – Інтерфейс системи керування 3D-принтером на базі Klipper

Таким чином, кінематика Dual X-Carriage є перспективною, але технічно складною для побудови, яке дозволяє значно розширити функціональні можливості FDM 3D-принтерів. Ефективне використання такої кінематики

можливе лише за умови поєднання точної механічної реалізації та сучасного програмного забезпечення, здатного забезпечити стабільне керування багатоканальною системою друку.

1.3 Аналіз вимог до програмного забезпечення для технології FDM 3D-друку

Програмне забезпечення систем керування FDM 3D-принтерами є важливою складовою, яка забезпечує узгоджену роботу всіх елементів пристрою. На відміну від механічної частини, що відповідає за фізичне переміщення виконавчих елементів, програмна складова формує керуючі команди, визначає логіку роботи принтера та забезпечує стабільність технологічного процесу.

У структурі програмного забезпечення FDM 3D-друку можна виділити кілька основних рівнів [19].

Першим рівнем є підготовка тривимірної моделі, яка здійснюється у CAD-системах та спеціалізованих програмах-слайсерах.

Другий рівень забезпечує генерацію керуючих команд у вигляді G-code, де визначаються траєкторії руху, швидкість друку, температурні режими та інші параметри.

Третій рівень відповідає за виконання цих команд за допомогою прошивки контролера, яка безпосередньо керує роботою механічних вузлів.

Однією з ключових вимог до програмного забезпечення є забезпечення високої точності позиціонування. Від правильності розрахунку та виконання траєкторій залежить геометрична точність виробу та якість поверхні. Програмне забезпечення повинно враховувати інерційні властивості механічних елементів, обмеження швидкості та прискорення, а також забезпечувати плавність рухів без різких змін напрямку [20].

На рисунку 1.12 наведено приклад формування шарів та траєкторій друку у програмі-слайсері.

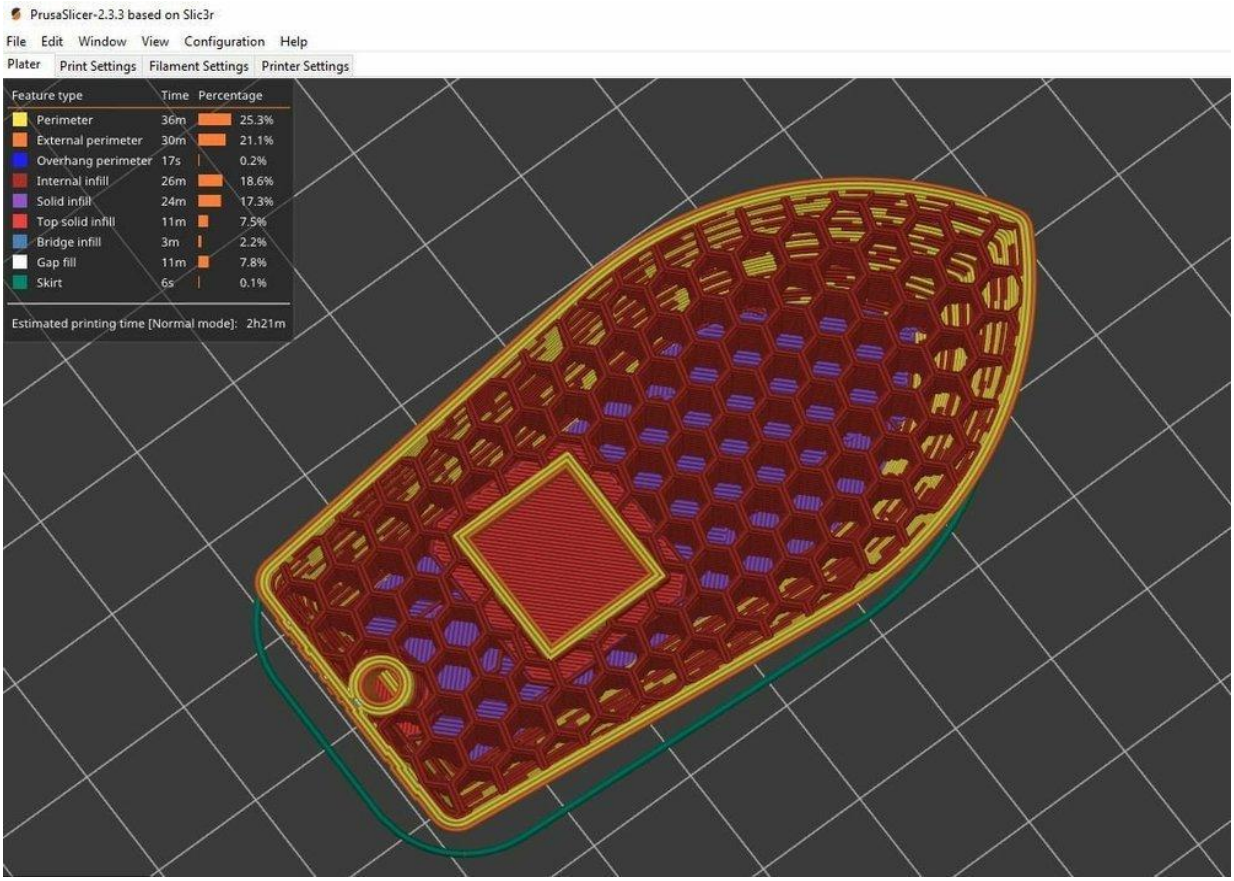


Рисунок 1.12 – Візуалізація шарів та траєкторій друку у програмі-слайсері

Важливим аспектом є також стабільність роботи системи у тривалому режимі. Процес 3D-друку може тривати значний час, тому програмне забезпечення повинно забезпечувати безперервну роботу без збоїв, втрати даних або затримок у виконанні команд. Особливо це важливо при друці складних моделей, що містять велику кількість дрібних елементів [21].

Ще однією вимогою є забезпечення роботи у реальному часі. Система повинна швидко обробляти вхідні команди та передавати їх до виконавчих механізмів без затримок. Навіть незначні затримки можуть призводити до нерівномірності подачі матеріалу, появи дефектів або порушення структури шару.

На рисунку 1.13 наведено приклад моніторингу параметрів 3D-друку в режимі реального часу. А саме температуру сопла, температуру нагрівального стола, роботу вентиляторів та координати місцезнаходження екструдера на робочій платформі [22].

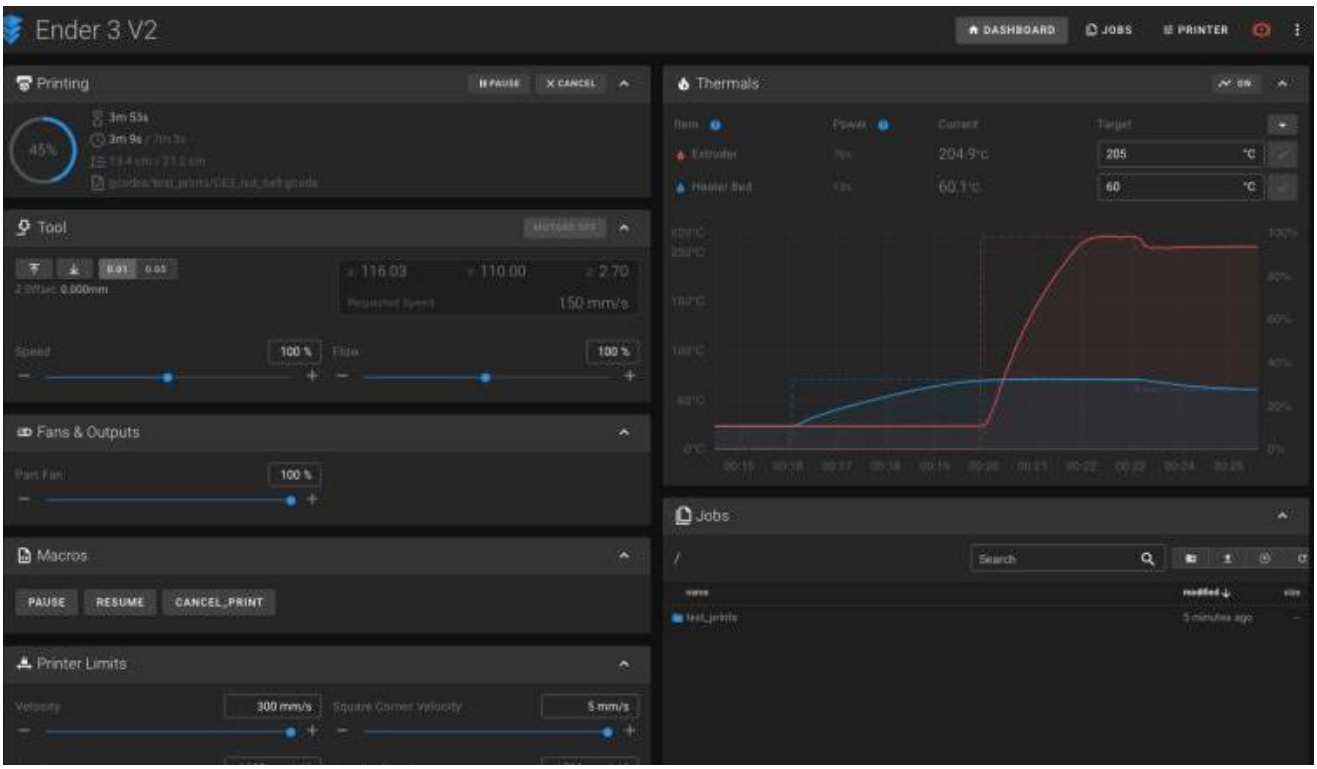


Рисунок 1.13 – Моніторинг параметрів 3D-друку в режимі реального часу (інтерфейс керування 3D-принтером)

У сучасних умовах важливу роль відіграє можливість компенсації механічних похибок. Під час роботи принтера можуть виникати вібрації, люфти та інші небажані ефекти, які впливають на якість друку. Через що виникають дефекти, зміщення, полоси тощо. Таким чином необхідний механізм керування для зменшення негативних факторів на процес друку.

Програмне забезпечення повинно використовувати алгоритми згладжування руху та компенсації відхилень для мінімізації цих факторів. Прикладом може слугувати Input Shaping, що розроблений для зменшення впливу інерції на переміщення екструдера.

Окремої уваги потребує підтримка різних кінематичних схем. Програмне забезпечення повинно бути універсальним та дозволяти налаштування параметрів для різних типів принтерів без зміни базової структури [23].

Це забезпечує гнучкість використання та спрощує процес налаштування обладнання. На рисунку 1.14 наведено приклади різних кінематичних схем 3D-принтерів, а саме кінемтики Prusa, Delta, CoreXY, тощо.



Рисунок 1.14 – Основні типи кінематичних схем 3D-принтерів (Cartesian, CoreXY, Delta)

У випадку використання кінематики Dual X-Carriage вимоги до програмного забезпечення значно зростають. Необхідно забезпечити одночасне або почергове керування двома екструдерами, контролювати їх положення у просторі та реалізувати коректне перемикання між ними. Важливим є запобігання конфліктам між каретками, що може призвести до пошкодження обладнання або зниження якості друку.

Крім того, програмне забезпечення повинно враховувати температурні режими кожного екструдера окремо, забезпечуючи стабільність процесу плавлення матеріалу. Це особливо важливо при використанні різних типів філаменту в межах одного виробу.

Сучасні програмні системи також повинні забезпечувати зручний інтерфейс користувача. Наявність можливості налаштування параметрів друку, візуалізації процесу та контролю стану принтера в режимі реального часу значно підвищує ефективність роботи та зменшує ризик помилок.

У контексті сучасних технологій варто відзначити прошивку Klipper, яка використовує принцип розподілених обчислень. Основні обчислення виконуються

на зовнішньому пристрої, що дозволяє підвищити швидкість обробки команд та точність керування. Такий підхід забезпечує більш ефективне використання ресурсів системи та дозволяє реалізувати складні алгоритми керування. На рисунку 1.15 наведено порівняння традиційної архітектури прошивки та системи Klipper із використанням розподілених обчислень [24].

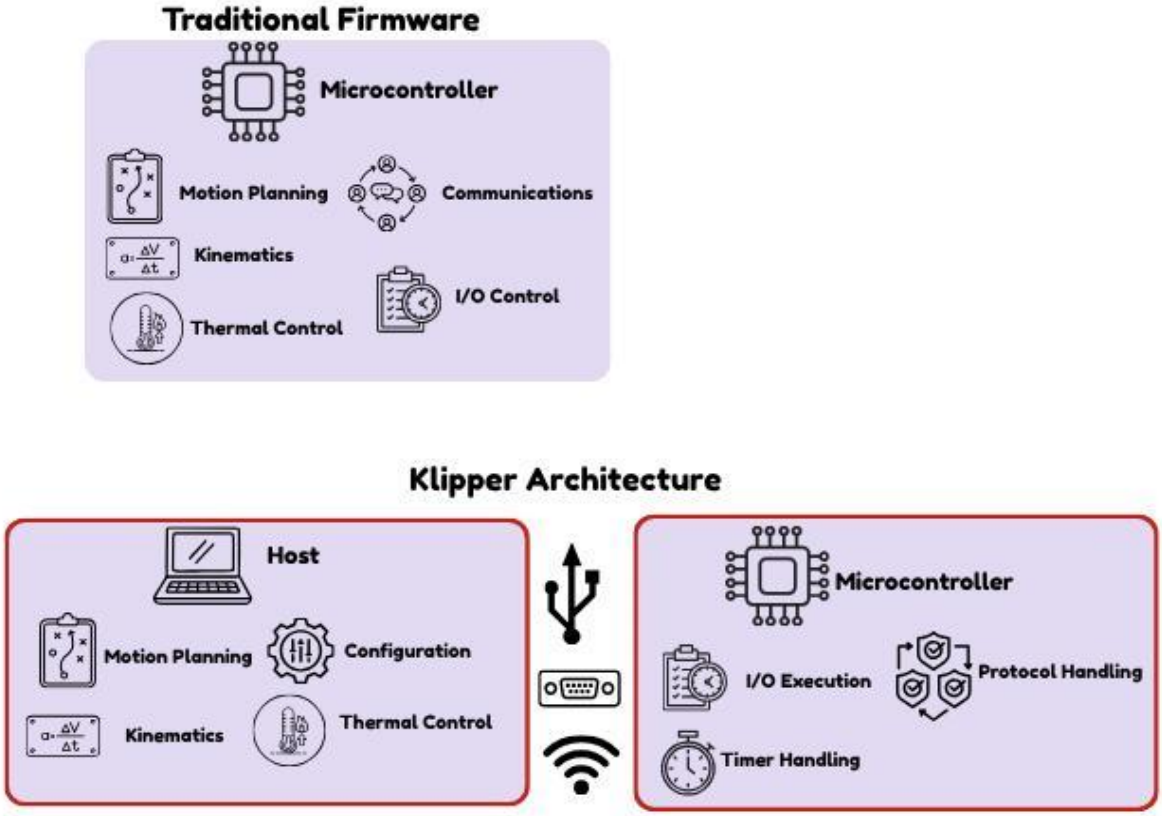


Рисунок 1.15 – Порівняння традиційної прошивки та архітектури Klipper із розподіленими обчисленнями

Таким чином, програмне забезпечення для FDM 3D-друку повинно відповідати ряду вимог, серед яких основними є точність, швидкодія, стабільність роботи, адаптивність до різних кінематичних схем та можливість керування багатоканальними системами. Для принтерів із кінематикою Dual X-Carriage саме програмне забезпечення є ключовим елементом, який визначає ефективність роботи всієї системи.

2 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ РОБОТИ 3D – ПРИНТЕРА З КІНЕМАТИКОЮ DUAL X-CARRIAGE

2.1 Структура програмно-апаратного комплексу

Для реалізації системи керування 3D-принтером із кінематикою Dual X-Carriage було сформовано програмно-апаратний комплекс, який забезпечує виконання процесу FDM 3D-друку, обробку керуючих команд та координацію роботи виконавчих механізмів принтера.

Сучасний 3D-принтер є складною мехатронною системою, у якій поєднуються механічні, електронні та програмні компоненти. Ефективність роботи такої системи безпосередньо залежить від узгодженості роботи всіх її елементів. Особливо важливу роль у роботі принтерів із кінематикою Dual X-Carriage відіграє програмне забезпечення, оскільки саме воно забезпечує синхронізацію двох незалежних кареток та керування процесом перемикання екструдерів.

До складу розробленого програмно-апаратного комплексу входять:

– персональний комп’ютер або веб-інтерфейс керування;

– одноплатний комп’ютер Raspberry Pi;

– прошивка Klipper;

– плата керування на базі мікроконтролера;

– система крокових двигунів;

– два незалежні екструдери;

– нагрівальні елементи;

– система датчиків температури;

– кінцеві вимикачі осей координат;

– механічна система переміщення кареток.

Загальна структура системи побудована за принципом розподілених обчислень. Основна обробка G-code команд виконується на одноплатному комп’ютері Raspberry Pi, на якому функціонує прошивка Klipper. Після обробки

команд сигнали передаються до мікроконтролера плати керування, який забезпечує безпосереднє керування кроковими двигунами, екструдерами та нагрівальними елементами.

Використання такої архітектури дозволяє значно зменшити навантаження на мікроконтролер та підвищити швидкість обробки даних. Це особливо важливо для систем із кінематикою Dual X-Carriage, оскільки одночасне керування двома незалежними каретками потребує виконання великої кількості обчислень у режимі реального часу.

Таким чином було побудовано схему підключення основних електричних компонентів, що зображена на рисунку 2.1.

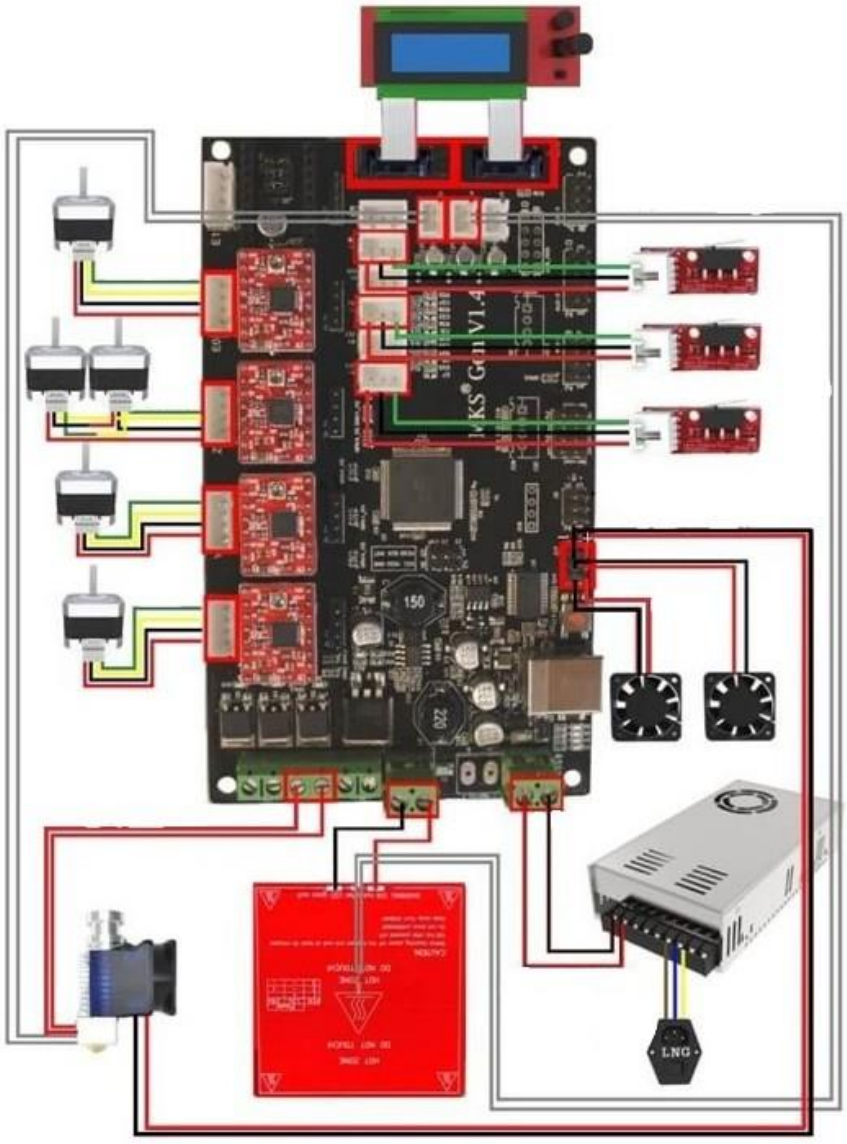


Рисунок 2.1 – Схема підключення електронних компонентів

2.2 Налаштування прошивки Klipper для підтримки кінематики Dual X-Carriage

Для забезпечення роботи системи було виконано налаштування прошивки Klipper відповідно до особливостей кінематики Dual X-Carriage. Основні параметри конфігурації задаються у файлі printer.cfg, який містить налаштування осей координат, екструдерів, температурних режимів та швидкісних характеристик принтера. Для реалізації підтримки двох незалежних кареток було використано модуль dual_carriage, який дозволяє здійснювати окреме керування друкувальними головками. На рисунку 2.2 зображено приклад конфігурації для кінематики Dual X- Carriage

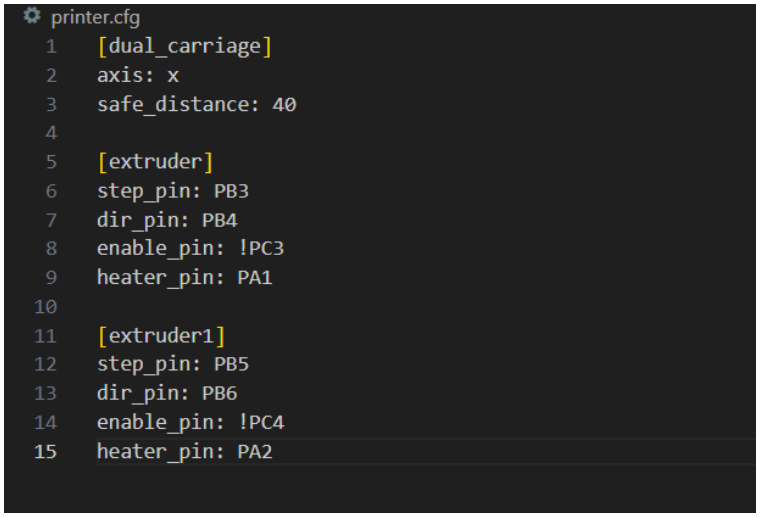


Рисунок 2.2 – Приклад конфігурації printer.cfg

У даній конфігурації задаються параметри двох екструдерів та безпечна дистанція між каретками, необхідна для запобігання механічним зіткненням під час друку.

Під час налаштування системи було виконано:

– конфігурацію кінцевих вимикачів;

– налаштування швидкості переміщення кареток;

– встановлення параметрів прискорення;

– калібрування положення екструдерів;

– налаштування температур нагрівальних елементів.

Окрему увагу було приділено налаштуванню паркувальних позицій екструдерів. Під час перемикання друкувальних головок неактивний екструдер автоматично переміщується у спеціальну область, що дозволяє уникнути потрапляння залишків пластику на поверхню виробу.

2.3 Реалізація алгоритму керування двома екструдерами

Одним із ключових етапів розроблення системи керування 3D-принтером із кінематикою Dual X-Carriage стала реалізація алгоритму керування двома незалежними екструдерами. На відміну від звичайних FDM 3D-принтерів, які використовують лише одну друкувальну головку, система Dual X-Carriage передбачає наявність двох окремих кареток, що переміщуються незалежно одна від одної вздовж осі X. Це дозволяє реалізувати багатоматеріальний та багатоколірний друк, однак потребує більш складного програмного керування.

Основною задачею алгоритму є забезпечення коректної взаємодії між екструдерами під час друку та запобігання механічним конфліктам між каретками. У процесі роботи активним є лише один екструдер, тоді як інший знаходиться у паркувальній позиції. Після отримання команди зміни інструмента система виконує перемикання між друкувальними головками та продовжує друк.

Для перемикання між екструдерами використовуються стандартні G-code команди:

T0

T1

Команда T0 активує перший екструдер, а команда T1 – другий.

Після зміни активного екструдера система виконує переміщення неактивної каретки у безпечну область, що дозволяє уникнути потрапляння залишків пластику на поверхню виробу. Одночасно здійснюється контроль координат кареток для запобігання їх зіткненню у межах робочої області.

Для забезпечення безпечної роботи використовується параметр safe_distance, який визначає мінімально допустиму відстань між каретками:

[dual_carriage]

axis: x

safe_distance: 40

рім контролю переміщення, система забезпечує незалежне керування температурою кожного екструдера. Це дозволяє використовувати різні типи філаменту в межах одного друку та підтримувати стабільний температурний режим під час роботи.

Перед початком друку для кожного екструдера виконується встановлення необхідної температури відповідно до типу матеріалу. Під час друку прошивка безперервно отримує інформацію від температурних датчиків і автоматично регулює потужність нагрівальних елементів, підтримуючи задані параметри. Це забезпечує рівномірне плавлення філаменту та стабільну якість друку протягом усього процесу.

Під час зміни активного екструдера система контролює не лише його положення, а й температурний режим. Неактивний екструдер може підтримувати температуру очікування, що дозволяє скоротити час повторного нагрівання та зменшити тривалість перемикання між друкувальними головками. Такий підхід підвищує продуктивність роботи принтера та забезпечує більш ефективне використання матеріалів.

У процесі реалізації алгоритму особливу увагу було приділено плавності переміщення кареток та стабільності роботи системи. Для цього використовуються алгоритми плавного прискорення та гальмування, що дозволяє зменшити вібрації та покращити якість друку. Для реалізації керування використовується прошивка Klipper, яка забезпечує високу швидкість обробки команд та підтримує складні кінематичні конфігурації. Завдяки використанню розподілених обчислень система здатна швидко обробляти G-code команди та забезпечувати стабільне керування двома незалежними екструдерами.

Таким чином алгоритм паркування з двома екструдерами зображено на рисунку 2.3.

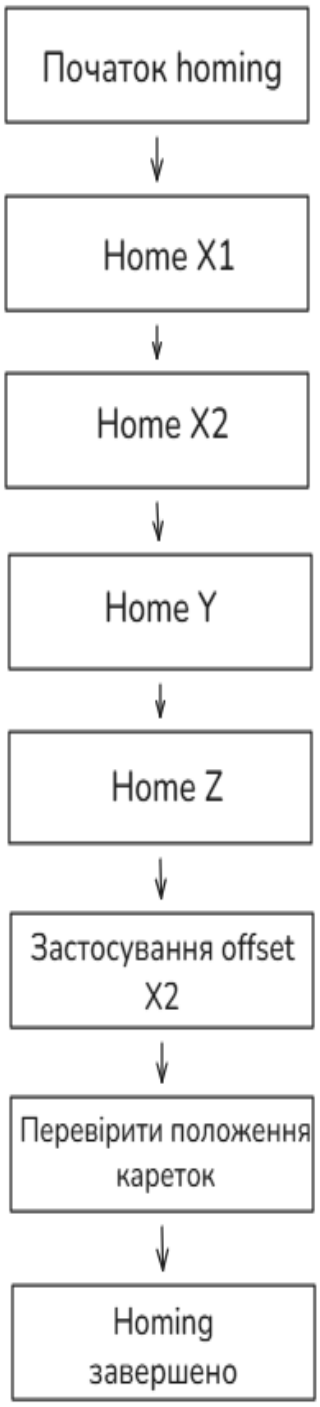


Рисунок 2.3 – Алгоритм паркування з двома екструдерами

Алгоритм заміни екструдерів зображено на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Алгоритм паркування з двома екструдерами

Таким чином було побудовано алгоритм керування 3D-принтером за технологією FDM з кінематикою Dual X-Carriage.

3 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ 3D-ПРИНТЕРА З КІНЕМАТИКОЮ DUAL X-CARRIAGE

3.1 Налаштування конфігурації програмного забезпечення

Після підготовки операційної системи Debian було розпочато встановлення програмного забезпечення, необхідного для керування 3D-принтером з кінематикою Dual X-Carriage. Для цього використовувалася утиліта KIAUH (Klipper Installation And Update Helper), яка значно спрощує процес встановлення компонентів системи Klipper. Дана програма дозволяє автоматизувати інсталяцію основних сервісів, необхідних для роботи принтера, та уникнути ручного налаштування великої кількості системних файлів

Після запуску KIAUH було відкрито меню встановлення компонентів. Спочатку було обрано пункт Klipper. Під час встановлення програма автоматично завантажила необхідні файли, створила службові каталоги та налаштувала роботу прошивки. На рисунку 3.1 показано головне меню програми KIAUH, яке використовується для встановлення, оновлення та керування основними компонентами системи Klipper.

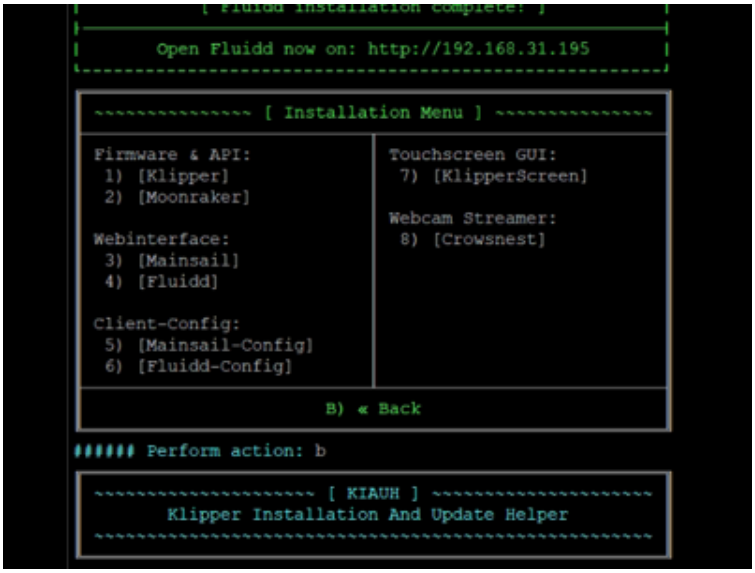


Рисунок 3.1 – Меню встановлення компонентів KIAUH

Наступним етапом було встановлення сервісу Moonraker.

Даний компонент забезпечує взаємодію між прошивкою Klipper та веб-інтерфейсом, а також дозволяє передавати команди керування принтером через мережу.

Після встановлення сервісу Moonraker, було виконано інсталяцію веб-інтерфейсу. На сьогодні в Klipper використовується декілька різних за оформленням веб-інтерфейсів а саме Fluidd та Mainsail. Так як вони відрізняються лише оформленням, було вибрано Fluidd. У процесі встановлення програма повідомила про необхідність використання Moonraker для забезпечення коректної роботи вебінтерфейсу. Для продовження інсталяції було підтверджено відповідний запит, встановлено рекомендовані конфігураційні файли та залишено стандартне значення мережевого порту – 80.

На рисунку 3.2 показано процес встановлення вебінтерфейсу Fluidd за допомогою утиліти KIAUH. Під час інсталяції система повідомляє про відсутність локально встановленого сервісу Moonraker, пропонує продовжити встановлення, встановити рекомендовані конфігураційні файли та налаштувати мережевий порт для подальшої роботи вебінтерфейсу.

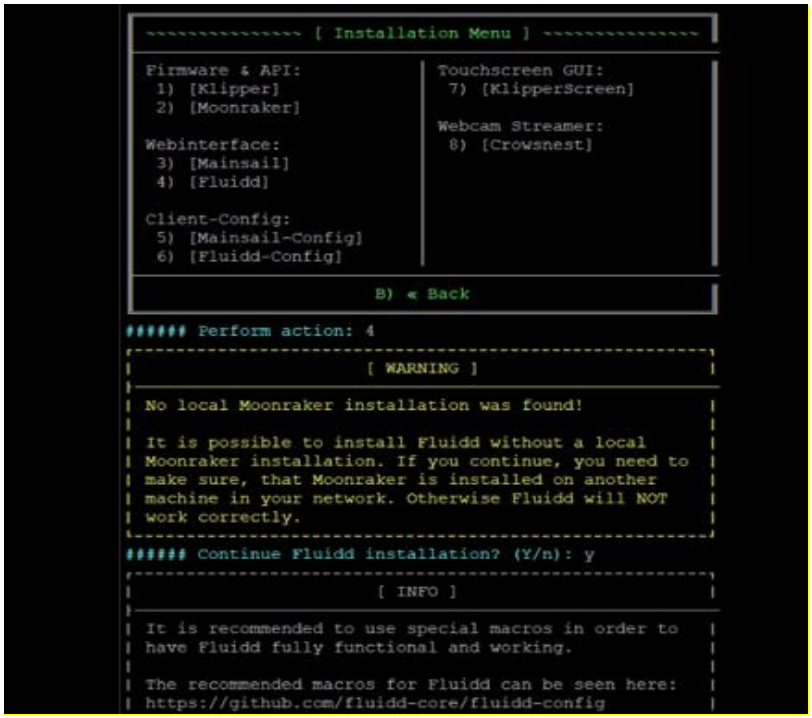


Рисунок 3.2 – Процес встановлення вебінтерфейсу Fluidd

Після завершення встановлення система автоматично відобразила мережеву адресу веб-інтерфейсу http://192.168.31.195:7125, за якою було здійснено підключення через браузер. Отримання цієї адреси підтвердило успішне завершення інсталяції програмного забезпечення, а також готовність системи до подальшого налаштування та роботи.

Наступним кроком було виконано перевірку стану встановлених компонентів у головному меню програми KIAUH. У меню відображається інформація про встановлені модулі, їхній поточний стан та готовність до роботи.

Це дозволяє переконатися, що необхідні компоненти програмного забезпечення успішно встановлені та готові до подальшого налаштування.

На рисунку 3.3 показано головне меню програми KIAUH після встановлення основних компоненті.

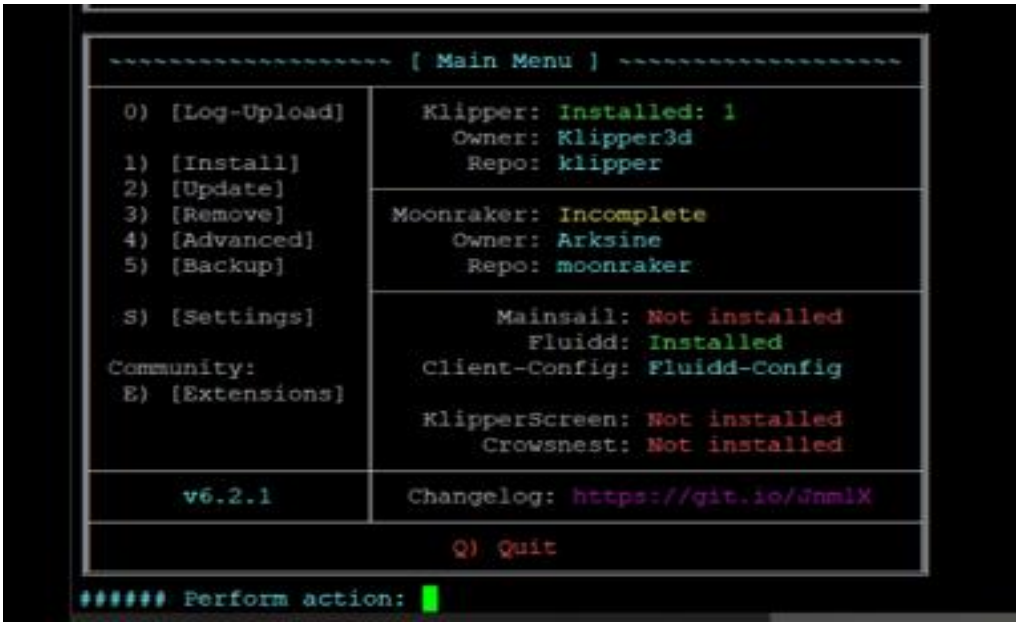


Рисунок 3.3 – Головне меню програми KIAUH після встановлення основних компоненті

Згідно з результатами перевірки, прошивка Klipper та вебінтерфейс Fluidd були успішно встановлені. Після чого було виконано перехід до налаштування конфігураційного файлу printer.cfg, у якому задаються параметри плати керування, крокових двигунів, екструдерів та кінематики Dual X-Carriage.

3.2 Налаштування конфігураційного файлу printer.cfg

Після завершення встановлення операційної системи Linux та програмного забезпечення Klipper було виконано налаштування конфігураційного файлу printer.cfg.

Даний файл є основним конфігураційним файлом прошивки Klipper та містить усі параметри, необхідні для роботи 3D-принтера. Саме в ньому задаються характеристики плати керування, кінематика принтера, параметри крокових двигунів, екструдерів, нагрівальних елементів, датчиків температури та службових макросів. Редагування конфігураційного файлу виконувалося через веб-інтерфейс Fluidd, що дозволяло швидко вносити зміни та перевіряти їх після перезапуску прошивки.

Першим етапом було виконано налаштування підключення плати керування та загальних параметрів роботи принтера.

На рисунку 3.4 показано налаштування підключення плати керування та основних параметрів роботи 3D-принтера.

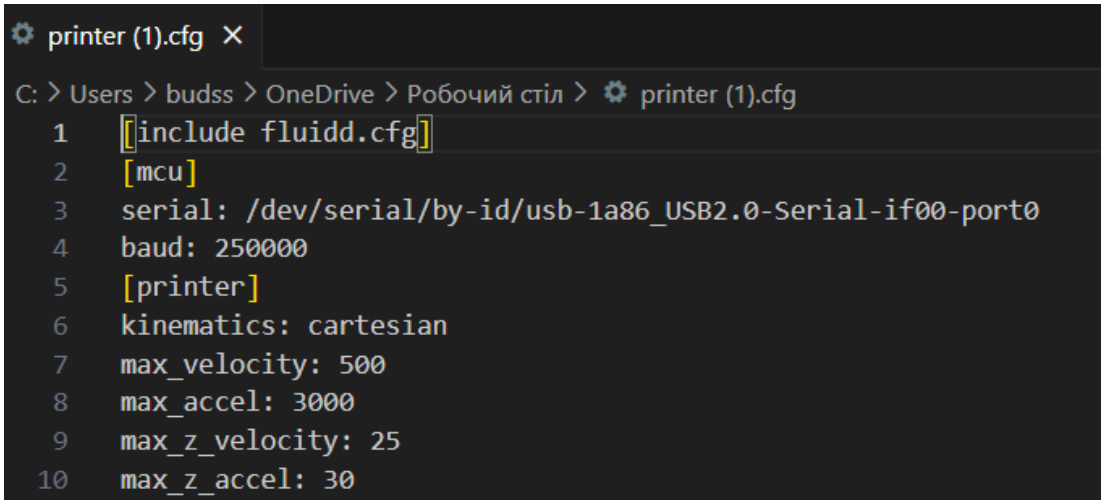


Рисунок 3.4 – Налаштування плати керування та загальних параметрів принтера

У секції [mcu] зазначено серійний порт, через який здійснюється зв'язок між прошивкою Klipper та платою керування. Також встановлено швидкість обміну даними, що забезпечує стабільну передачу команд до мікроконтролера.

У секції [printer] визначено основні характеристики принтера. Було встановлено кінематику типу cartesian, що відповідає конструкції розроблюваного принтера. Крім цього, задано максимальну швидкість переміщення екструдера, максимальне прискорення, швидкість переміщення по осі Z та інші загальні параметри, які використовуються під час друку.

Після налаштування загальних параметрів принтера було виконано налаштування осі X та другої незалежної каретки.

Саме цей етап є одним із найважливіших, оскільки кінематика Dual X-Carriage передбачає використання двох незалежних екструдерів, які повинні працювати узгоджено та без зіткнень.

У секції [stepper_x] було налаштовано параметри першого крокового двигуна. Тут визначено контакти підключення двигуна, кількість мікрокроків, відстань переміщення за один оберт двигуна, параметри кінцевого вимикача, максимальне переміщення каретки та швидкість виконання процедури повернення у початкове положення. Правильне налаштування цих параметрів забезпечує точне позиціонування першої екструдера під час друку.

Після цього було налаштовано секцію [dual_carriage], яка відповідає за роботу другої каретки. У даному розділі визначаються параметри другого крокового двигуна, кінцевого вимикача, максимальної області переміщення та швидкості повернення у початкове положення. Також у конфігураційному файлі задається мінімальна безпечна відстань між каретками (safe_distance), яка запобігає їх можливому зіткненню під час роботи. Крім того, налаштовуються параметри позиціонування другої каретки та її взаємодії з основною кареткою під час виконання друку. Правильне конфігурування секції [dual_carriage] забезпечує коректне перемикання між екструдерами, стабільну роботу кінематичної системи та підвищує надійність процесу друку, особливо під час використання режимів копіювання або дзеркального друку.

На рисунку 3.5 показано налаштування осі X та другої незалежної каретки у конфігураційному файлі printer.cfg.

```
[stepper_x]
step_pin: PC5
dir_pin: PC4
enable_pin: !PA7
microsteps: 16
rotation_distance: 40
endstop_pin: ^PC7
position_endstop: 0
position_max: 400
homing_speed: 50
[dual_carriage]
axis: x
step_pin: ar16
dir_pin: ar17
enable_pin: !ar23
microsteps: 16
rotation_distance: 40
endstop_pin: ^ar2
position_endstop: 400
position_max: 400
homing_speed: 50
# A minimum distance between the carriages to enforce
```

Рисунок 3.5 – Налаштування осі X та другої незалежної каретки

Після налаштування осі X було виконано конфігурування осей Y та Z. Дані осі забезпечують переміщення екструдера по горизонтальній площині та вертикальне переміщення під час формування кожного шару моделі.

У секції [stepper_y] було визначено параметри крокового двигуна осі Y. Зокрема, налаштовано контакти підключення двигуна, кількість мікрокроків, відстань переміщення за один оберт двигуна, кінцевий вимикач, максимальну координату переміщення та швидкість виконання процедури повернення у початкове положення.

Після цього було виконано налаштування осі Z у секції [stepper_z]. У цьому розділі визначено параметри крокового двигуна, що відповідає за вертикальне переміщення екструдера. Також було встановлено параметри кінцевого вимикача, максимальну висоту друку та швидкість повернення осі у початкове положення.

Після завершення налаштування осей Y та Z було перевірено правильність внесених параметрів і збережено конфігураційний файл.

На рисунку 3.6 показано налаштування параметрів осей Y та Z у конфігураційному файлі printer.cfg.

```
[stepper_y]
step_pin: PD10
dir_pin: PC3
enable_pin: !PA7
microsteps: 16
rotation_distance: 40
endstop_pin: ^PC9
position_endstop: 0
position_max: 400
homing_speed: 50
[stepper_z]
step_pin: PD9
dir_pin: PB25
enable_pin: !PA7
microsteps: 16
rotation_distance: 8
endstop_pin: ^PA20
position_endstop: 0
position_max: 436
homing_speed: 50
```

Рисунок 3.6 – Налаштування осей Y та Z

У секції [extruder] було визначено параметри крокового двигуна екструдера, а саме піни підключення, кількість мікрокроків та відстань подачі пластику за один оберт двигуна (rotation_distance). Дані параметри забезпечують рівномірну та точну подачу філаменту під час друку.

Наступним етапом було налаштовано нагрівальний елемент екструдера. Для цього визначено контакт підключення нагрівача (heater_pin) та температурного датчика (sensor_pin). Також було зазначено тип температурного датчика (sensor_type), мінімальну та максимальну допустиму температуру роботи екструдера. Це дозволяє системі постійно контролювати температуру друку та підтримувати її на заданому рівні.

Крім цього, у конфігураційному файлі були визначені діаметр сопла (nozzle_diameter) та діаметр філаменту (filament_diameter).

Дані параметри використовуються прошивкою Klipper під час розрахунку кількості матеріалу, який необхідно подати для друку кожного шару моделі.

Після завершення налаштування першого екструдера було перевірено правильність усіх параметрів та збережено конфігураційний файл.

На рисунку 3.7 показано налаштування першого екструдера у конфігураційному файлі printer.cfg.

```
[extruder]
step_pin: PD6
dir_pin: PD3
enable_pin: !PC1
microsteps: 16
rotation_distance: 33.500
nozzle_diameter: 0.400
filament_diameter: 1.750
heater_pin: PB27
sensor_type: EPCOS 100K B57560G104F
sensor_pin: PA16
control: pid
pid_kp: 15.572
pid_ki: 0.446
pid_kd: 136.064
min_temp: 0
max_temp: 270
```

Рисунок 3.7 – Налаштування першого екструдера у конфігураційному файлі printer.cfg

Після завершення налаштування першого екструдера було виконано конфігурування другого екструдера, який використовується в системі Dual X-Carriage. Наявність двох незалежних екструдерів є основною особливістю даної кінематики, оскільки дозволяє виконувати друк двома матеріалами або двома кольорами без необхідності ручної заміни філаменту.

У секції [extruder1] було визначено параметри другого крокового двигуна, що відповідає за подачу пластику. Для цього було налаштовано контакти підключення двигуна, кількість мікрокроків та відстань подачі матеріалу за один оберт двигуна. Дані параметри забезпечують стабільну та рівномірну подачу філаменту під час друку.

Наступним етапом було налаштовано систему нагрівання другого екструдера. У конфігураційному файлі визначено піни підключення нагрівального елемента, температурного датчика та тип використовуваного датчика температури. Також було встановлено мінімальну та максимальну температуру роботи екструдера, що забезпечує безпечну експлуатацію обладнання.

Крім цього, для другого екструдера було задано діаметр сопла та діаметр філаменту.

На рисунку 3.8 показано налаштування другого екструдера у конфігураційному файлі printer.cfg.

```
71  [extruder1]
72  step_pin: PB26
73  dir_pin: PA15
74  enable_pin: !PD1
75  microsteps: 16
76  rotation_distance: 33.500
77  nozzle_diameter: 0.400
78  filament_diameter: 1.750
79  heater_pin: PB17
80  sensor_type: EPCOS 100K B57560G104F
81  sensor_pin: analog15
82  control: pid
83  pid_Kp: 22.2
84  pid_Ki: 1.08
85  pid_Kd: 114
86  min_temp: 0
87  max_temp: 250
```

Рисунок 3.8 – Налаштування другого екструдера

Після налаштування екструдерів було виконано конфігурування нагрівального столу. Нагрівальний стіл є одним із важливих елементів 3D-принтера, оскільки забезпечує надійне зчеплення першого шару моделі з поверхнею та зменшує ймовірність деформації виробу під час друку.

У секції [heater_bed] було визначено контакт підключення нагрівального елемента (heater_pin), через який плата керування подає живлення на нагрівач столу. Також було налаштовано температурний датчик, для якого вказано його тип (sensor_type) та контакт підключення (sensor_pin). Саме за допомогою цього

датчика прошивка Klipper постійно контролює температуру нагрівального столу під час друку.

Для керування температурою було використано режим watermark. На відміну від PID-регулювання, цей режим підтримує температуру шляхом періодичного вмикання та вимикання нагрівального елемента, що є достатнім для стабільної роботи нагрівального столу та часто використовується у подібних конфігураціях.

Крім цього, було встановлено мінімальну (min_temp) та максимальну (max_temp) допустиму температуру нагрівального столу. Дані параметри використовуються прошивкою для контролю безпечної роботи обладнання та запобігання перегріву.

Після секції [heater_bed] було виконано налаштування вентилятора охолодження у секції [fan]. У цьому розділі визначено контакт підключення вентилятора до плати керування (pin), що дозволяє автоматично керувати його роботою під час друку. Використання вентилятора забезпечує охолодження надрукованих шарів, покращує якість друку та сприяє правильному формуванню виробу.

Після завершення налаштування параметрів нагрівального столу та вентилятора конфігураційний файл було збережено та перевірено правильність внесених параметрів.

На рисунку 3.9 показано налаштування нагрівального столу та вентилятора охолодження у конфігураційному файлі printer.cfg.

```
88  [heater_bed]
89  heater_pin: PC23
90  sensor_type: EPCOS 100K B57560G104F
91  sensor_pin: PA6
92  control: watermark
93  min_temp: 0
94  max_temp: 130
95  [fan]
96  pin: PB18
```

Рисунок 3.9 – Налаштування нагрівального столу та вентиляторів

Після налаштування основних параметрів принтера було створено службові макроси, які забезпечують коректну роботу двох незалежних екструдерів.

Використання макросів дозволяє автоматизувати виконання команд та спрощує процес перемикання між друкувальними головками під час друку.

Спочатку було налаштовано макрос PARK_extruder, який використовується для паркування першої каретки. Під час його виконання система зберігає поточне положення екструдера, після чого переміщує каретку у визначене паркувальне положення. Після завершення виконання команди попередній стан координат автоматично відновлюється. Такий підхід дозволяє безпечно звільнити робочу область перед активацією іншого екструдера та запобігти можливому зіткненню кареток.

Після цього було налаштовано макрос T0, який використовується для активації першого екструдера. Під час виконання даного макросу автоматично виконується паркування поточного екструдера, активується перший екструдер, обирається перша каретка та скидається зміщення координат. Завдяки цьому перемикання між екструдерами відбувається автоматично без необхідності ручного втручання користувача.

Використання макросів PARK_extruder та T0 забезпечує правильну послідовність дій під час зміни активного екструдера та підвищує надійність роботи 3D-принтера з кінематикою Dual X-Carriage.

На рисунку 3.10 показано конфігурацію макросів PARK_extruder та T0, які використовуються для паркування першої каретки та активації першого екструдера.

```
97  # Helper script to park the carriage (called from T0 and T1 macros)
98  [gcode_macro PARK_extruder]
99  gcode:
100     SAVE_GCODE_STATE NAME=park0
101     G90
102     G1 X0
103     RESTORE_GCODE_STATE NAME=park0
104
105 # Activate the primary extruder
106 [gcode_macro T0]
107 gcode:
108     PARK_{printer.toolhead.extruder}
109     ACTIVATE_EXTRUDER EXTRUDER=extruder
110     SET_DUAL_CARRIAGE CARRIAGE=0
111     SET_GCODE_OFFSET Y=0
```

Рисунок 3.10 – Налаштування макросів PARK_extruder та T0

Після налаштування макросів для першого екструдера було виконано конфігурування макросів PARK_extruder1 та T1, які забезпечують роботу другого екструдера.

Макрос PARK_extruder1 використовується для автоматичного переміщення другої каретки у паркувальне положення. Під час його виконання система зберігає поточний стан координат, після чого друкувальна головка переміщується у визначене положення. Після завершення виконання команди попередні координати автоматично відновлюються. Це дозволяє безпечно виконувати перемикання між екструдерами та запобігає можливому зіткненню кареток.

Після цього було налаштовано макрос T1, який використовується для активації другого екструдера. Під час виконання макросу автоматично виконується паркування поточної каретки, активується другий екструдер, вибирається друга каретка та встановлюються необхідні параметри зміщення координат. Завдяки цьому процес перемикання між друкувальними головками відбувається автоматично та не потребує ручного налаштування.

Після завершення налаштування було перевірено правильність роботи макросів та можливість автоматичного перемикання між двома екструдерами під час друку.

На рисунку 3.11 показано конфігурацію макросів PARK_extruder1 та T1, які використовуються для паркування другої каретки та активації другого екструдера.

```
112
113 [gcode_macro PARK_extruder1]
114 gcode:
115     SAVE_GCODE_STATE NAME=park1
116     G90
117     G1 X200
118     RESTORE_GCODE_STATE NAME=park1
119
120 [gcode_macro T1]
121 gcode:
122     PARK_{printer.toolhead.extruder}
123     ACTIVATE_EXTRUDER EXTRUDER=extruder1
124     SET_DUAL_CARRIAGE CARRIAGE=1
125     SET_GCODE_OFFSET Y=15
126
127 # A helper script to activate copy mode
128 [gcode_macro ACTIVATE_COPY_MODE]
129 gcode:
```

Рисунок 3.11 – Налаштування макросів PARK_extruder1 та T1

На завершальному етапі було налаштовано спеціальні макроси ACTIVATE_COPY_MODE та ACTIVATE_MIRROR_MODE, які реалізують додаткові можливості кінематики Dual X-Carriage. Дані режими дозволяють використовувати два незалежні екструдери не тільки для друку різними матеріалами, але й для одночасного виготовлення декількох виробів.

Макрос ACTIVATE_COPY_MODE використовується для активації режиму Copy Mode. Після виконання даної команди обидві каретки починають працювати синхронно та одночасно друкують дві однакові моделі. Використання цього режиму дозволяє скоротити час виготовлення деталей і підвищити продуктивність 3D-принтера без втрати якості друку.

Наступним було налаштовано макрос ACTIVATE_MIRROR_MODE, який використовується для активації режиму дзеркального друку. У цьому режимі друга каретка повторює переміщення першої, але у дзеркальному відображенні. Такий режим є зручним під час одночасного виготовлення симетричних деталей та дозволяє значно прискорити процес виробництва.

На рисунку 3.12 показано налаштування макросів ACTIVATE_COPY_MODE та ACTIVATE_MIRROR_MODE у конфігураційному файлі printer.cfg.

```
# A helper script to activate copy mode
[gcode_macro ACTIVATE_COPY_MODE]
gcode:
    SET_DUAL_CARRIAGE CARRIAGE=0 MODE=PRIMARY
    G1 X0
    ACTIVATE_EXTRUDER EXTRUDER=extruder
    SET_DUAL_CARRIAGE CARRIAGE=1 MODE=PRIMARY
    G1 X100
    SET_DUAL_CARRIAGE CARRIAGE=1 MODE=COPY
    SYNC_EXTRUDER_MOTION EXTRUDER=extruder1 MOTION_QUEUE=extruder

# A helper script to activate mirror mode
[gcode_macro ACTIVATE_MIRROR_MODE]
gcode:
    SET_DUAL_CARRIAGE CARRIAGE=0 MODE=PRIMARY
    G1 X0
    ACTIVATE_EXTRUDER EXTRUDER=extruder
    SET_DUAL_CARRIAGE CARRIAGE=1 MODE=PRIMARY
    G1 X200
    SET_DUAL_CARRIAGE CARRIAGE=1 MODE=MIRROR
    SYNC_EXTRUDER_MOTION EXTRUDER=extruder1 MOTION_QUEUE=extruder
```

Рисунок 3.12 – Налаштування макросів ACTIVATE_COPY_MODE та ACTIVATE_MIRROR_MODE

3.3 Теорія автоматичного управління

Для дослідження роботи системи автоматичного керування температурою нагрівального елемента 3D-принтера було використано програмне середовище MATLAB. Дослідження виконано за допомогою математичного моделювання, що дозволяє оцінити роботу PID-регулятора, перевірити стійкість системи та проаналізувати її динамічні характеристики [25].

Для виконання дослідження було розроблено MATLAB-скрипт, який формує математичну модель нагрівального елемента 3D-принтера, автоматично розраховує параметри PID-регулятора, виконує аналіз стійкості системи, будує перехідну характеристику та визначає запаси стійкості.

Код програми наведено нижче:

```
clc;
clear;
close all;
K = 1.8;      % °C / %PWM
T = 45;       % c
L = 2;        % c
s = tf('s');
G0 = K / (T*s + 1);
[numDelay, denDelay] = pade(L, 1);
Delay = tf(numDelay, denDelay);
G = G0 * Delay;
disp;
G
C = pidtune(G, 'PID');
disp;
C
Kp = C.Kp;
Ki = C.Ki;
```

```
Kd = C.Kd;
fprintf('Kp = %.4f\n', Kp);
fprintf('Ki = %.4f\n', Ki);
fprintf('Kd = %.4f\n', Kd);
W = feedback(C*G, 1);
figure;
step(W);
grid on;
title;
p = pole(W);
disp;
disp(p);
if all(real(p) < 0)
   disp;
else
   disp;
end
figure;
margin(C*G);
grid on;
title;
[Gm, Pm, Wcg, Wcp] = margin(C*G);
fprintf('Gain margin = %.4f\n', Gm);
fprintf('Phase margin = %.2f градусів\n', Pm);
fprintf('Wcg = %.4f рад/с\n', Wcg);
fprintf('Wcp = %.4f рад/с\n', Wcp);
if Pm > 30
   disp;
else
   disp;
```

```
end
info = stepinfo(W);
disp;
disp(info);
```

У результаті виконання програми було отримано передаточну функцію об'єкта керування та автоматично розраховано параметри PID-регулятора. Також виконано перевірку стійкості замкненої системи, побудовано перехідну характеристику, діаграму запасів стійкості та визначено показники якості регулювання.

На рисунку 3.13 наведено діаграму запасів стійкості, отриману в середовищі MATLAB. За результатами аналізу встановлено, що система автоматичного керування є стійкою та має достатній запас стійкості, що забезпечує її стабільну роботу.

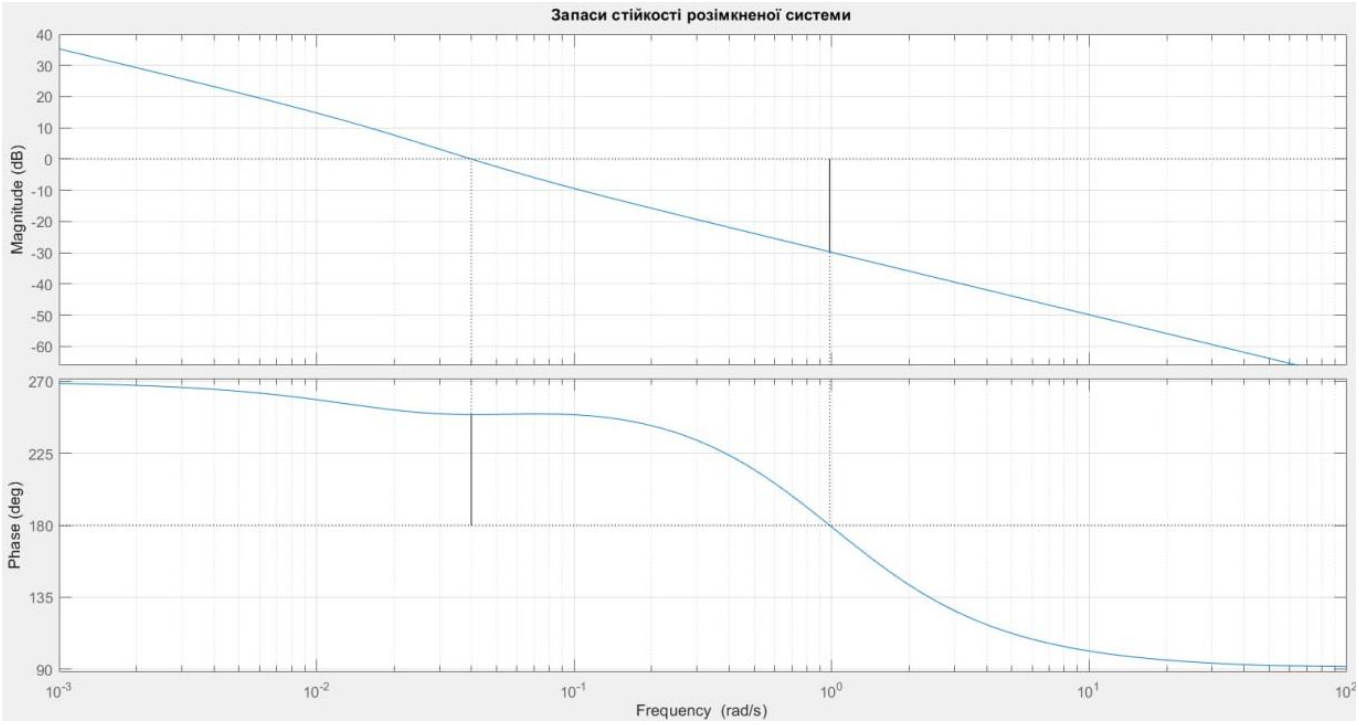


Рисунок 3.13 – Запаси стійкості розімкненої системи

У результаті моделювання було отримано перехідну характеристику замкненої системи, яка наведена на рисунку 3.14.

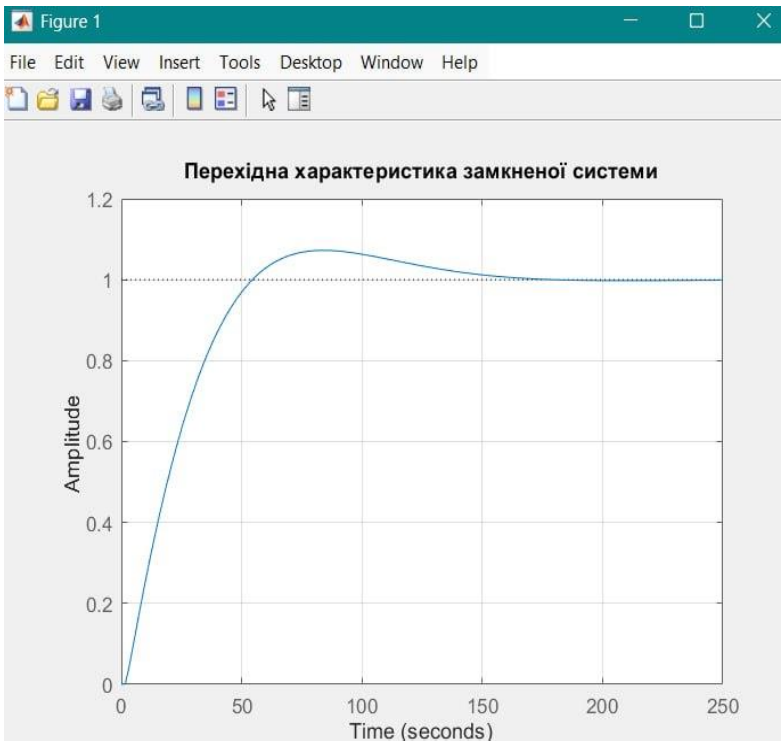


Рисунок 3.14 – Перехідна характеристика замкненої системи

Після виконання розрахунків у середовищі MATLAB було автоматично визначено параметри PID-регулятора. Отримані значення наведено на рисунку 3.15.

```
Continuous-time PI controller in parallel form.
Model Properties
Kp = 0.8023
Ki = 0.0324
Kd = 0.0000
```

Рисунок 3.15 – Результати розрахунку параметрів PID-регулятора

На рисунку 3.16 наведено значення полюсів замкненої системи . Усі полюси мають від'ємну дійсну частину, що свідчить про стійкість системи автоматичного керування. За результатами дослідження встановлено, що система є стійкою.

```
Полюси замкненої системи:
  -0.9349 + 0.0000i
  -0.0276 + 0.0250i
  -0.0276 - 0.0250i
```

Рисунок 3.16 – Полюси замкненої системи

Після аналізу полюсів замкненої системи було встановлено, що всі вони мають від'ємну дійсну частину. Це свідчить про стійкість системи автоматичного керування та правильність налаштування PID-регулятора.

За результатами проведеного дослідження можна зробити висновок, що система є стійкою та забезпечує стабільну роботу 3D-принтера.

3.4 Безпека праці

Робоче місце повинно бути обладнане справною комп'ютерною технікою, достатнім освітленням та зручним робочим столом. Монітор рекомендується розташовувати на відстані 50–70 см від очей, а його верхній край має знаходитися приблизно на рівні очей користувача. Це дозволяє зменшити навантаження на зір та шийний відділ хребта [26].

Під час роботи за комп'ютером необхідно робити короткі перерви через кожні 45–60 хвилин, щоб знизити втому очей та уникнути тривалого статичного навантаження. Також рекомендується підтримувати правильну поставу та використовувати зручне робоче крісло.

Під час підключення плати керування та інших електронних компонентів необхідно виконувати всі роботи лише при вимкненому живленні обладнання. Це дозволяє уникнути пошкодження електронних компонентів і зменшує ризик ураження електричним струмом.

Під час експлуатації 3D-принтера необхідно дотримуватися правил пожежної безпеки, оскільки екструдер і нагрівальний стіл працюють при високих температурах. Не рекомендується залишати принтер без нагляду під час друку, а поруч із робочим місцем бажано мати первинні засоби пожежогасіння.

Дотримання наведених вимог безпеки забезпечує комфортні умови праці, безпечну експлуатацію обладнання та зменшує ризик виникнення аварійних ситуацій під час налаштування й використання 3D-принтера.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи були успішно виконані поставлені завдання та досягнуто основної мети – розроблено та налаштовано програмне забезпечення для 3D-принтера з кінематикою Dual X-Carriage на основі прошивки Klipper.

У першому розділі було проаналізовано технологію FDM 3D-друку, особливості кінематики Dual X-Carriage та вимоги до програмного забезпечення для керування 3D-принтером. Також було розглянуто можливості використання прошивки Klipper для роботи з даною кінематичною схемою.

У другому розділі виконано встановлення операційної системи Linux, інсталяцію та налаштування програмного забезпечення Klipper, сервісу Moonraker і вебінтерфейсу Fluidd. Було створено та налаштовано конфігураційний файл printer.cfg, у якому задано параметри плати керування, крокових двигунів, двох екструдерів, нагрівального столу, вентиляторів та макросів для роботи режимів Dual X-Carriage. Після завершення налаштування було перевірено працездатність системи та підтверджено її готовність до подальшої експлуатації.

У третьому розділі виконано практичне налаштування програмного забезпечення для 3D-принтера з кінематикою Dual X-Carriage. Проведено налаштування операційної системи Linux, конфігурації програмного забезпечення та конфігураційного файлу printer.cfg, що забезпечує коректну взаємодію апаратних і програмних компонентів системи. Також розглянуто використання елементів теорії автоматичного керування для підтримання стабільної роботи екструдерів і нагрівального столу та наведено заходи щодо забезпечення безпечних умов праці під час експлуатації 3D-принтера.

Також у роботі розглянуто використання елементів теорії автоматичного керування для підтримання температурного режиму екструдерів і нагрівального столу, а також наведено основні вимоги безпеки праці під час налаштування та експлуатації 3D-принтера.

Отримані результати підтвердили можливість використання прошивки Klipper для ефективного керування 3D-принтером з кінематикою Dual X-Carriage.

Розроблена конфігурація може бути використана як основа для подальшого вдосконалення системи та підвищення якості й стабільності 3D-друку.

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. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»освітньоїпрограми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»:Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, В.А. Андрусевич, О. В. Токарєва,С.П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2022. – 151 с.

3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботибакалаврадля студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизаціятакомп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизаціятакомп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов, А.О.Андрусевич, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В Сичова. – Харків: ХНУРЕ,2022. – 55 с.

4. 3D-друк FDM. Пояснення простими словами; режим доступу (https://3d4u.com.ua/uk/blog/post/103-3d-printing-fdm-explained-in-simple-words?srsltid=AfmBOoqWVotCRGz9I4siw41cM-WKSH9O06oBcqRjJPyUTunRO9Cd9TDU) дата використання [06.07.26].

5. Технології друку 3D принтерів: порівняння видів FDM, SLA і SLS; режим доступу (https://lbl-corp.com/blog/tekhnolohii-druku-3d-prynteriv-porivniannia-vydiv-fdm-sla-i-sls/?srsltid=AfmBOoqkXB6ZPJl_U2Ah8xa_hm9_K7I0VG2LNLJqyT1dOnqpZdINFoig) дата використання [06.07.26].

6. FDM-друк: переваги, етапи, нюанси; режим доступу (https://polydream.com.ua/blog/fdm-druk-perevagi-etapi-nyuansi/?srsltid=AfmBOoqboDCUzH7XHp99hq9NqJzD7-DujsgsRLotNkkfHHhxLrDlu-PJ) дата використання [06.07.26].

7. Marlin Firmware Documentation; режим доступу (https://marlinfw.org/) дата використання [06.07.26].

8. G-code Reference; режим доступу (https://marlinfw.org/meta/gcode/) дата використання [11.07.26].

9. Klipper Documentation; режим доступу (https://www.klipper3d.org/) дата використання [12.05.26].

10. Klipper Features; режим доступу (https://www.klipper3d.org/Features.html) дата використання [11.07.26].

11. Moonraker Installation; режим доступу (https://moonraker.readthedocs.io /en/latest/installation/) дата використання [03.06.26].

12. Moonraker Configuration; режим доступу (https://moonraker.readthedocs.io /en/stable/configuration/) дата використання [08.06.26].

13. Fluidd Documentation; режим доступу (https://docs.fluidd.xyz/) дата використання [15.06.26].

14. Debian Documentation; режим доступу (https://www.debian.org/doc/) дата використання [22.06.26].

15. Oracle VM VirtualBox User Manual; режим доступу (https://www.virtualbox. org/manual/) дата використання [29.06.26].

16. Raspberry Pi Documentation; режим доступу (https://www.raspberrypi.com /documentation/) дата використання [03.07.26].

17. RepRap Wiki. RAMPS 1.4; режим доступу (https://reprap.org/wiki/ RAMPS_1.4) дата використання [05.07.26].

18. Raspberry Pi OS Documentation; режим доступу (https://www.raspberrypi. com/software/) дата використання [10.07.26].

19. Raspberry Pi Hardware Documentation; режим доступу (https://www. raspberrypi.com/documentation/computers/) дата використання [11.07.26].

20. Python Documentation; режим доступу (https://docs.python.org/3/) дата використання [09.07.26].

21. Доля В. М. Діагностика та контроль робочих процесів: навч. посіб. Харків: НТУ «ХПІ», 2019 – 129 с.

22. Невлюдов І. Ш., Филипенко О. І., Шостак Б. О. Людино-машинний інтерфейс в технічних засобах автоматизації. Харків: ХТМТ, 2019 – 244 с.

23. OctoPrint Documentation; режим доступу (https://docs.octoprint.org/) дата використання [07.07.26].

24. Mainsail Documentation; режим доступу (https://docs.mainsail.xyz/) дата використання [08.07.26].

25. Невлюдов, І.Ш., Токарєва О.В. Теорія автоматичного управління (збірник задач): навчальний посібник – Харків: ХНУРЕ, 2020 – 240 с.

26. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Організація керування умовами праці» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т.Є. Стиценко, Г.В. Пронюк, Н.М. Сердюк. – Харків, 2017. – 108 с.