

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)

Розроблення програмного забезпечення на основі Klipper  
для принтерів з кінематикою Delta  
(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,  
групи АКТАКІТ-21-2

Ілля ХАПЛІН  
(власне ім'я прізвище)

Спеціальності 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 асистент Роман СТРИЛЕЦЬ  
(посада, власне ім'я прізвище)

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАР

Ігор НЕВЛЮДОВ  
(підпис) (власне ім'я прізвище)

2025р.

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки  
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  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР \_\_\_\_\_  
(підпис)

« 28 » квітня 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Хапіліну Іллі Олеговичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення програмного забезпечення на основі Klipper для принтерів з кінематикою Delta

затверджена наказом по університету від « 19 » травня 2025р. № 390 Ст.

2. Термін подання студентом роботи « 17 » червня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи 3.1 Діодний лазер – 5 Вт, 12 В;

3.2 Мікрокомп'ютер – Raspberry Pi 4; 3.3 Плата керування – Arduino Mega 2560; 3.4 Плата розширення – RAMPS 1.6; 3.5 Кроковий двигун – Nema 17;

3.6 Драйвери крокового двигуна – TMC2209; 3.7 Механічні кінцеві вимикачі;

3.8 Вентилятор охолодження – 20×20 мм, 12 В; 3.9 Блок живлення – 12 В,

350 Вт; 3.10 Екран – RaspberryPi 480×320, 3,5'; 3.11 Програмне забезпечення – Klipper.

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

4.1 Вступ;

4.2 Аналіз сучасних Delta-принтерів;

4.3 Вибір електронних компонентів для реалізації програмного модуля принтеру з кінематикою «Delta»;

4.4 Розробка програмного забезпечення на основі Klipper для принтера з кінематикою «Delta»;

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

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 сучасних Delta-принтерів	28.04 – 04.05.25	виконано
2	Вибір електронних компонентів для реалізації програмного модуля Delta-принтеру	05.05 – 14.05.25	виконано
3	Розробка програмного забезпечення на основі Klipper для принтерів з кінематикою Delta	15.05 – 31.05.25	виконано
4	Заходи і розрахунки для забезпечення безпечних умов праці	01.06 – 10.06.25	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	11.06 – 14.06.25	виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-системою StrikePlagiarism	15.06 – 17.06.25	виконано
7	Подання роботи на рецензію	18.06 – 20.06.25	виконано
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри	21.06 – 23.06.25	виконано
9	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	24.06.25	виконано

Дата видачі завдання 28.04.2025р.

Здобувач  
(підпис)



Ілля ХАПЛІН

Керівник роботи



асистент Роман СТІЛЕЦЬ

(підпис) (посада, власне ім'я прізвище)

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

«17» червня 2025 р.  Ілля ХАПІЛІН

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 58 с., 1 табл., 49 рис., 1 дод., 18 джерел.

DELTA, KLIPPER, ЛАЗЕР, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, МІКРОКОМП'ЮТЕР, WEB-ІНТЕРФЕЙС, ОПЕРАЦІЙНА СИСТЕМА, МЕНЮ.

Мета роботи – підвищення ефективності функціонування Delta-принтерів за рахунок розроблення програмного забезпечення для модулів керування що функціонує на прошивці Klipper.

Об'єкт розробки – процес розробки програмного модуля для прошивки Klipper, зробленого для керування 3D-принтерами з кінематикою Delta.

Предмет розробки – програмне забезпечення обладнання з системами числового програмного керування.

В роботі проведено аналіз призначення та технологічних можливостей сучасних принтерів із кінематикою Delta. Проведено вибір електронних компонентів для реалізації програмного модуля керування Delta-принтером. Побудовано загальна блок-схема Delta-принтеру. Розроблено програмне забезпечення для модуля керування Delta-принтером. Проведено заходи і розрахунки для забезпечення безпечних умов праці в лабораторії де виконувалася кваліфікаційна робота.

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: 58 pp., 1 tab., 40 figs., 1 appendices, 18 sources.

DELTA, KLIPPER, LASER, SOFTWARE, MICROCOMPUTER, WEB-INTERFACE, OPERATING SYSTEM, MENU.

The aim of the work is to improve the efficiency of Delta 3D printers by developing control module software based on the Klipper firmware.

The object of development is the process of developing a software module for the Klipper firmware designed to control 3D printers with Delta kinematics .

The subject of development is software for equipment with numerical control systems.

The paper analyzes the purpose and technological capabilities of modern Delta-printers. The selection of electronic components for the implementation of the software module for controlling a Delta-printers was carried out. A general block diagram of a Delta-printers is constructed. Software for the Delta-printers control module was developed. Measures and calculations were taken to ensure safe working conditions in the laboratory where the qualification work was performed.

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

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	8
Вступ .....	9
1 Аналіз сучасних Delta-принтерів .....	11
1.1 Аналіз документації .....	11
1.2 Введення до 3D друку .....	11
1.3 Особливості кінематики Delta та зв'язок із Klipper .....	12
1.4 Порівняння Klipper з іншими прошивками .....	13
1.5 Аналіз вимог і потреб користувачів, для яких розробляється ПЗ .....	15
2 Вибір компонентів для реалізації програмного модуля Delta-принтерів .....	17
2.1 Електронні компоненти Delta-принтеру .....	17
2.2 Побудова загальної блок-схеми Delta-принтера .....	25
3 Розроблення ПЗ на основі Klipper для Delta-принтеру .....	32
3.1 Налаштування ОС Raspbian .....	32
3.2 Встановлення програмного забезпечення Klipper .....	38
3.4 Експериментальна частина .....	49
4 Заходи і розрахунки для забезпечення безпечних умов праці .....	53
4.1 Аналіз умов праці на робочому місці .....	53
4.2 Промислова безпека на робочому місці .....	53
4.3 Виробнича санітарія в приміщенні .....	54
Перелік джерел посилання .....	59
Додаток А Демонстраційний матеріал .....	62

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БД – база даних;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

КПО – коефіцієнт природної освітленості;

ОЗП – оперативно-запам'ятовуючий пристрій;

ОС – операційна система;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПК – персональний комп'ютер;

ЧПК – числове програмне керування;

DDL – прямий діодний лазер.

## ВСТУП

З кожним роком зростає актуальність 3D друку, бо ж він значно полегшує наше життя. Одним із ключових напрямів є вдосконалення програмного забезпечення для керування 3D принтерами, що дозволяє як вдосконалити якість друку так і зробити користування легшим. На сьогоднішній день в очі кидаються принтери з кінематикою Delta, вони працюють дуже швидко, вирізняються точністю та компактною конструкцією, але потребують спеціалізованого програмного забезпечення для ефективного керування їхньою складною кінематикою.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності функціонування Delta-принтерів за рахунок розроблення програмного забезпечення для модулів керування що функціонує на прошивці Klipper.

Актуальність теми зумовлена великим попитом на якісну продукцію та гнучкі рішення в галузі 3D друку, а також необхідністю створення програмного забезпечення, яке буде враховувати унікальні особливості кінематики Delta. Відсутність універсальних програмних модулів, адаптованих до особливостей таких принтерів, створює потребу в розробленні спеціалізованого програмного забезпечення, яке підвищить точність, швидкість і зручність друку.

Завдання роботи:

- проаналізувати особливості кінематики Delta та вимоги до програмного забезпечення;
- дослідити архітектуру Klipper і можливості її адаптації;
- розробити програмний модуль для оптимізації роботи принтерів Delta;
- провести тестування та оцінити ефективність розробленого рішення;
- сформулювати рекомендації щодо використання розробки.

Об'єкт розробки – програмний модуль для прошивки Klipper,

зроблений для керування 3D-принтерами з кінематикою Delta. Цей модуль є свого роду програмним забезпеченням, яке розширює функціонал Klipper.

Предмет розробки – програмне забезпечення на основі Klipper для оптимізації роботи таких принтерів.

Методи дослідження включають аналіз літератури, математичне моделювання кінематики, програмування на Python, тестування на реальному обладнанні та порівняльний аналіз результатів.

Наукова новизна полягає в розробленні спеціалізованого модуля для Klipper, який враховує особливості кінематики Delta та оптимізує траєкторії руху.

Практична цінність роботи полягає в створенні доступного рішення для користувачів і розробників 3D-принтерів, що сприяє підвищенню продуктивності та якості друку.

Робота була виконана згідно з ДСТУ 3008-15[1], а також навчального посібника [2] та методичних вказівок [3] з підготовки кваліфікаційної роботи.

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ DELTA-ПРИНТЕРІВ

## 1.1 Аналіз документації

У процесі підготовки до кваліфікаційної роботи було проведено детальне ознайомлення з офіційною документацією [4-8], програмними бібліотеками [9-12] та науково-технічною літературою [13-14], що стосується розробки та вдосконалення програмного забезпечення для 3D-принтерів. Особливу увагу приділено як теоретичним засадам, так і практичним аспектам, зокрема - конфігурації, налаштуванню та підтримці прошивок.

Аналіз джерел дозволив виявити ключові тенденції та проблемні питання, пов'язані з функціональністю, гнучкістю та адаптивністю різних систем керування принтерами. В роботах акцентується на високому попиті на 3D-принтери та продукти, виготовлені за їх допомогою, що зумовлює постійну потребу в удосконаленні як обладнання, так і програмного забезпечення.

Окрему цінність становлять публікації, що висвітлюють процес створення та оптимізації прошивок для 3D-принтерів. В них розглядається різниця між прошивками за параметрами гнучкості, автоматизації калібрування, можливості розширення та сумісності. Вивчення цих матеріалів підтвердило актуальність обраної теми кваліфікаційної роботи та обґрунтованість технічного підходу.

## 1.2 Введення до 3D друку

3D-друк – це технологія адитивного виробництва, що дозволяє створювати фізичні об'єкти шляхом пошарового накладання матеріалу відповідно до попередньо заданої цифрової моделі. Сфера застосування 3D-принтерів давно вийшла за межі побутового використання: сьогодні вони

активно використовуються в промисловості, медицині, архітектурі, освіті та багатьох інших галузях.

Популярність цієї технології пояснюється низкою переваг, серед яких - висока швидкість виготовлення деталей, здатність до відтворення складних геометричних форм та можливість індивідуалізації виробів. Робота 3D-принтера базується на взаємодії трьох ключових компонентів: самого пристрою, витратного матеріалу та відповідного програмного забезпечення.

Існує кілька типів 3D-принтерів, що відрізняються за принципом дії та кінематикою руху. У межах цієї роботи обрано принтер з кінематикою типу Delta, що вирізняється високою динамікою руху та потребує специфічних програмних рішень для ефективного функціонування.

### 1.3 Особливості кінематики Delta та зв'язок із Klipper

Принтери з кінематикою типу Delta вирізняються конструкцією, у якій використовуються шість важелів, з'єднаних у три пари, що забезпечують просторове переміщення друкуючої головки. Такий підхід дозволяє досягти високої швидкості та плавності рухів, однак вимагає складних попередніх розрахунків та ретельного калібрування. Водночас підвищення швидкості друку до рівня 200 мм/с може спричинити вібрації й поштовхи, що погіршують якість друку. Ці ефекти, однак, можуть бути компенсовані шляхом програмної корекції.

Одним з найбільш гнучких програмних рішень для керування 3D-принтером є прошивка Klipper. Її ключова перевага полягає в архітектурі: обчислення виконуються на зовнішньому комп'ютері (зазвичай - на Raspberry Pi), що знижує навантаження на мікроконтролер принтера та забезпечує надзвичайно низьку затримку обробки команд у порівнянні з іншими прошивками.

Попри очевидні переваги, Klipper не має попередньо налаштованої оптимізації для швидкостей вище 200 мм/с і не включає автоматичну

компенсацію вібрацій, що особливо важливо для принтерів типу Delta. Окрім того, ця прошивка потребує індивідуального налаштування, що може ускладнити її використання для недосвідчених користувачів.

Водночас відкритий код Klipper, написаний мовою Python, відкриває широкі можливості для модифікації та розширення функціоналу, що робить цю прошивку надзвичайно привабливою для дослідників і розробників.

#### 1.4 Порівняння Klipper з іншими прошивками

Для обґрунтування вибору прошивки Klipper серед актуальних рішень було проаналізовано три найпопулярніші прошивки: Marlin, Repetier та Klipper. Усі вони підтримують кінематику Delta, проте відрізняються за архітектурними особливостями, продуктивністю та функціональністю.

У функціональному плані Marlin забезпечує повний контроль над параметрами друку: регулювання температури, швидкості, обробка G-коду, а також автоматичне калібрування. Відкрита архітектура сприяє широкій підтримці апаратного забезпечення.

Серед переваг варто відзначити високу сумісність з різними моделями принтерів, активну спільноту користувачів, наявність численних бібліотек і документації. Це робить Marlin привабливим варіантом для базових і бюджетних систем.

До недоліків відносять значне навантаження на мікроконтролер, особливо при використанні 8-бітних плат, що знижує продуктивність і якість друку. Також складність оновлення на 32-бітну платформу може викликати труднощі у менш досвідчених користувачів. Швидкість друку на Delta-принтерах обмежується до 150-180 мм/с, а перевищення цього порогу призводить до вібрацій і втрати точності.

У функціональному плані Repetier аналогічно підтримує обробку G-коду, конфігурування параметрів кінематики та інтеграцію з поширеними

слайсерами. Додатковою перевагою є можливість задавати параметри через конфігураційні файли, що спрощує налаштування.

Серед переваг можна виокремити гнучку архітектуру, підтримку SCARA-кінематики, зручний веб-інтерфейс для керування через браузер, а також стабільну роботу з великими G-кодами. Крім того, прошивка дозволяє реалізовувати індивідуальні модифікації, зокрема, додавання сенсорів для автокалібрування.

До недоліків відносять відсутність розподіленої обчислювальної архітектури, через що всі обчислення виконуються на мікроконтролері, що знижує ефективність на високих швидкостях. Крім того, калібрування потребує багаторазових повторень, а оптимізація для кінематики Delta залишається обмеженою.

У функціональному плані Klipper вирізняється сучасною архітектурою, де обчислення перенесено на зовнішній пристрій (наприклад, Raspberry Pi), тоді як мікроконтролер виконує лише команди. Це забезпечує високу ефективність обробки G-коду, розширену підтримку кінематики Delta, гнучке налаштування та можливість створення власних модулів на Python.

Серед переваг слід зазначити високу продуктивність, затримки виконання команд становлять менше 8 мс на 8-бітних і близько 5 мс на 32-бітних платах. Це дозволяє досягти швидкості друку до 300 мм/с без втрати якості. Klipper також підтримує точне калібрування з похибкою до 0,05 мм, має відкритий код та активно розвивається. Підтримка сучасних платформ робить його надзвичайно перспективним вибором.

До недоліків відносять складність первинного налаштування: необхідність встановлення прошивки на окремий пристрій і робота через SSH можуть створити бар'єри для новачків. Крім того, у стандартній конфігурації відсутні механізми компенсації вібрацій на високих швидкостях, що потребує додаткових рішень.

Прошивка Marlin є оптимальною для бюджетних принтерів і користувачів, яким не критична висока швидкість друку. Repetier демонструє

гнучкість та комфорт у використанні, однак його обмеження в архітектурі знижують ефективність у системах з кінематикою Delta. Klipper ж надає найкраще співвідношення між продуктивністю, сучасними технологіями та гнучкістю, що робить його найбільш доцільним вибором для високошвидкісного та точного 3D-друку.

### 1.5 Аналіз вимог і потреб користувачів, для яких розробляється ПЗ

Розробка та удосконалення програмного модуля для управління 3D-принтерами з кінематикою Delta на основі прошивки Klipper вимагає глибокого аналізу потреб та очікувань цільової аудиторії. Без урахування цих аспектів створення ефективного та зручного програмного забезпечення є малоімовірним.

Користувачі 3D-принтерів представлені широким спектром категорій - від студентів-ентузіастів до інженерів та фахівців з промислових галузей. Саме тому розуміння їхніх специфічних запитів дозволяє не лише обґрунтувати вибір функціональності, а й підвищити практичну цінність кінцевого продукту. У межах дослідження було проаналізовано численні користувацькі відгуки, розміщені на спеціалізованих форумах і веб-сайтах, присвячених тематиці 3D-друку.

Для систематизації даних користувачів було умовно поділено на три основні групи: хобісти, представники малого бізнесу, а також інженери та науковці. Нижче подано стислий аналіз кожної категорії.

У функціональному плані користувачі цієї групи найчастіше використовують бюджетні моделі Delta-принтерів (наприклад, Anycubic Kossel або FLSUN Q5) для створення декоративних елементів, деталей побутового призначення чи аматорських прототипів.

Серед переваг, на які орієнтуються хобісти, - простота налаштування, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та сумісність із доступними платформами, зокрема Raspberry Pi 4. Основні потреби зводяться до спрощеної процедури

калібрування та можливості роботи з різними прошивками без необхідності глибоких технічних знань.

До труднощів, що найчастіше згадуються, належить складність початкового налаштування та ручне калібрування, яке вимагає точного введення параметрів і часто займає кілька годин.

У функціональному аспекті представники малого бізнесу, як правило, мають чіткі вимоги до якості та швидкості друку. Їх діяльність охоплює малосерійне виробництво, виготовлення функціональних деталей або прототипів.

Серед ключових очікувань - висока продуктивність обладнання, автоматична компенсація вібрацій та сумісність із сучасними контролерами. Основною проблемою, яку вони виділяють, є поява дефектів на виробах при високій швидкості друку, зумовлена вібраціями.

Таким чином, розробка рішення для цієї групи користувачів повинна передбачати надійні алгоритми стабілізації та забезпечення якості друку при швидкостях понад 200 мм/с.

Ця категорія користувачів орієнтована на експериментальне та дослідницьке використання 3D-принтерів. Їх запити найскладніші, адже вони не лише експлуатують обладнання, а й активно модифікують прошивки, інтегрують стороннє програмне забезпечення та створюють власні алгоритми.

Серед найважливіших вимог - наявність відкритого коду, можливість адаптації програмного модуля до специфічних завдань, підтримка кастомних рішень, зокрема оптимізація траєкторій руху для складних моделей. Зазначалося також, що в Klipper наразі відсутні готові модулі для покращеного управління рухом, що створює додаткове навантаження на користувача.

## **2 ВИБІР ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ DELTA-ПРИНТЕРІВ**

### **2.1 Електронні компоненти Delta-принтеру**

З метою розроблення програмного забезпечення (ПЗ), що базується на прошивці Klipper, для Delta-принтеру спершу доцільно дібрати електронні компоненти. У зв'язку з цим потрібно створити загальну схему Delta-принтеру, а також визначити електронні компоненти, котрі необхідні для його функціонування.

Зразок Delta-принтеру продемонстровано на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд принтеру з кінематикою «Delta»

Загальна будова 3D-принтера з кінематикою типу Delta передбачає використання трьох вертикальних колон, які містять синхронізовані осі переміщення. На відміну від класичних декартових систем, де переміщення здійснюється переважно по осях X, Y та Z незалежно, Delta-кінематика базується на координатній трансформації, що забезпечує рух екструдера за рахунок одночасної зміни положення всіх трьох приводів. Завдяки цьому система отримує високу швидкість і плавність руху, що особливо цінується при друці об'ємних або складних моделей.

Фізичну реалізацію переміщення у Delta-принтерах забезпечують три крокові двигуни, зазвичай типу Nema 17, розташовані на верхній або нижній частині рами. Вони керують переміщенням кареток вздовж вертикальних напрямних, що в свою чергу, через паралельні важелі, впливають на положення гарячого кінця (екструдерної голівки) у просторі. Типовий вигляд крокового двигуна Nema 17 наведено на рисунку 2.2.

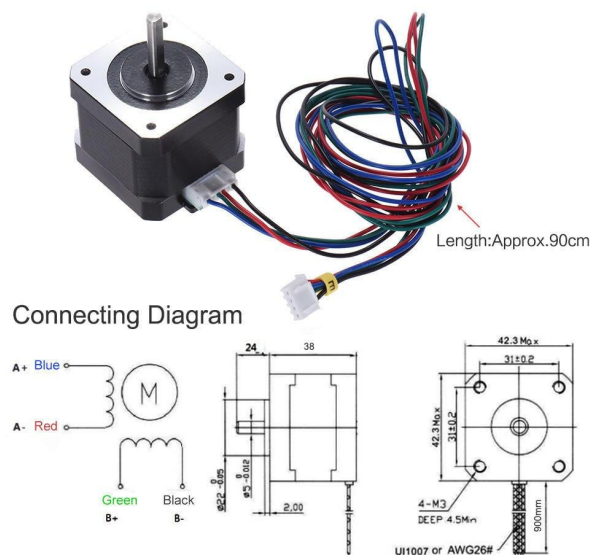


Рисунок 2.2 – Кроковий двигун Nema 17

Ще одним важливим елементом конструкції є плата керування, яка відповідає за взаємодію всіх компонентів принтера. Вона отримує та обробляє G-code, який формується у слайсерах на основі 3D-моделей.

Сучасне програмне забезпечення, зокрема Klipper, значно покращує обчислювальні можливості системи, перекинувши частину обробки на окремий комп'ютер, наприклад, Raspberry Pi.

Плати керування можуть бути побудовані на різних мікроконтролерах: Arduino Mega, STM32, ESP32, Raspberry RP2040 тощо. Кожен тип має свої особливості, як-от кількість портів вводу/виводу, частоту роботи, об'єм пам'яті та підтримку периферійних пристроїв. На рисунку 2.3 зображено плату на базі Raspberry RP2040.

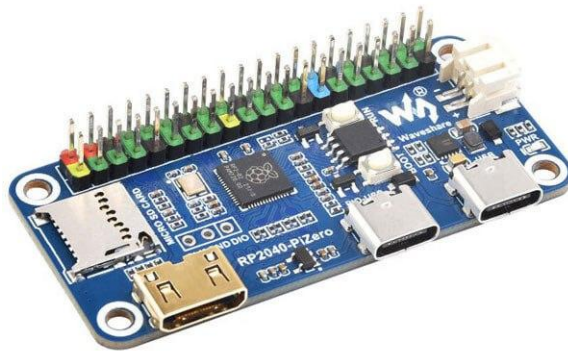


Рисунок 2.3 – Плата керування Raspberry RP2040

Для розширення можливостей підключення використовується додаткова плата – шилд (плата розширення), яка дозволяє зручно під'єднувати драйвери, датчики, вентилятори, термістори та інші елементи. На рисунку 2.4 зображено типовий приклад такої плати – RAMPS, що сумісна з Arduino Mega 2560.

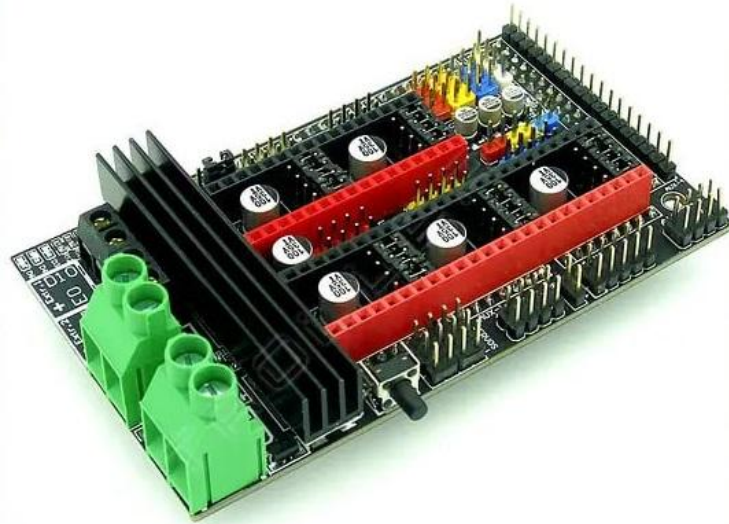


Рисунок 2.4 – Плата розширення RAMPS для Arduino Mega 2560

Керування кроковими двигунами забезпечується спеціальними драйверами, які подають живлення та формують імпульси відповідно до сигналів від мікроконтролера. До ключових характеристик драйверів належать: максимальний струм, кількість підтримуваних мікрокроків та тепловий захист. Найпоширенішими драйверами для 3D-принтерів є DRV8825, TMC2209, що забезпечують високу точність позиціонування завдяки підтримці мікрокрокування до 256 мікрокроків. Наразі найбільшої популярності набули такі драйвери, як DRV8825, TMC2209 тощо.

Приклад драйвера крокового двигуна TMC2208 наведено на рис. 2.5.

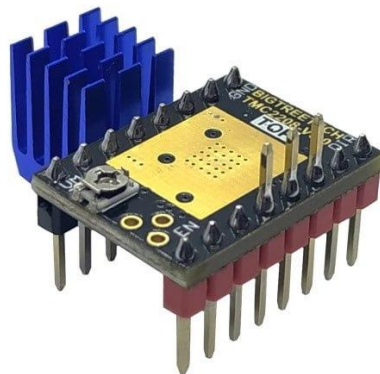


Рисунок 2.5 – Драйвер крокового двигуна TMC2208

Наступним загальним елементом обрано власне лазер. Лазери налічують декілька різновидів, першим серед яких буде діодний лазер, тобто напівпровідниковий лазер, який завдяки р-п переходу перетворює електричну енергію на когерентне оптичне випромінювання.

Наочний приклад діодного принтера продемонстровано на рисунку 2.6.

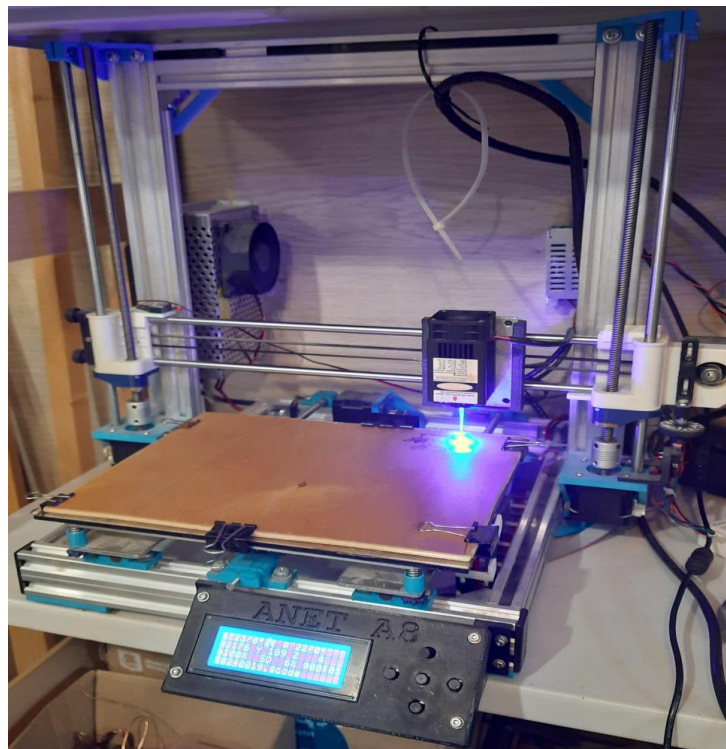


Рисунок 2.6 – Загальний вигляд діодного принтера

У конструкції 3D-принтерів з кінематикою типу Delta ключову роль відіграють точні та синхронізовані рухи трьох незалежних приводів, розташованих по вертикальних осях. Кожен з них переміщує каретку, яка, в свою чергу, з'єднана з платформою (інструментом - зазвичай екструдером) за допомогою важелів. Така система дозволяє здійснювати просторові переміщення з високою точністю завдяки складній зворотній кінематиці.

Для забезпечення точного управління такими рухами необхідна електроніка, здатна виконувати складні обчислення у реальному часі. Саме тому для побудови системи управління доцільно застосовувати прошивку

Klipper, яка відділяє обчислювальні функції від низькорівневого управління. Обчислення (розрахунок кінематики, планування траєкторій) виконуються на мікрокомп'ютері, а мікроконтролер лише реалізує команди управління моторами, сенсорами та нагрівачами.

Для роботи Klipper необхідний сумісний мікрокомп'ютер. Найпоширенішими рішеннями є представники лінійки Raspberry Pi, які мають достатню обчислювальну потужність для інтерпретації G-кодів, планування рухів та синхронної взаємодії з мікроконтролером через UART, USB або SPI.

Raspberry Pi зарекомендували себе як універсальні пристрої в галузі 3D-друку, особливо завдяки підтримці таких інтерфейсів як USB, GPIO, I2C та SPI, а також сумісності з великою кількістю додаткового ПЗ: OctoPrint, Mainsail, Fluidt тощо. Їх компактність, енергоефективність та підтримка Linux-подібних операційних систем дозволяє інтегрувати мікрокомп'ютери у корпус принтера без шкоди для ергономіки пристрою.

На рисунку 2.7 зображено приклад одноплатного мікрокомп'ютера Raspberry Pi, який може використовуватись у складі системи управління 3D-принтером з Delta-кінематикою.



Рисунок 2.7 – Зразок одноплатного мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4

Raspberry Pi має кілька модифікацій, що змінювалися з часом. Основні відмінності між ними стосуються типу процесора, об'єму оперативної пам'яті та функціональних можливостей.

Наприклад, перша версія Raspberry Pi A оснащена процесором ARM1176JZ-F з тактовою частотою 700 МГц, одним ядром та 256 МБ оперативної пам'яті. Натомість новіші моделі, такі як Raspberry Pi 5, можуть мати процесори Broadcom BCM2712 або ARM Cortex-A76 з архітектурою ARM64 (x64), частотою до 2.4 ГГц, 4 ядрами та 4–8 ГБ оперативної пам'яті.

Мікрокомп'ютер також має 4 порти USB. Починаючи з версії 3B, пристрій доповнено модулями Wi-Fi та Bluetooth, що дозволяє бездротове підключення до мережі та інших пристроїв.

Однією з ключових переваг Raspberry Pi є інтерфейс GPIO (General Purpose Input/Output) - набір контактів, які дають змогу підключати різноманітну периферію безпосередньо до плати. У новітніх моделях таких пінів 40.

Raspberry Pi також обладнаний двома портами HDMI та інтерфейсом MIPI, що дозволяє підключати спеціальні екрани та камери напряму. Водночас внутрішній накопичувач у пристрої відсутній, тому операційна система зберігається на SD-карті.

Живлення подається через порт USB Type-C у новіших версіях або MicroUSB у старіших моделях.

Для Raspberry Pi розроблено спеціальну операційну систему - Raspberry Pi OS (раніше - Raspbian), що базується на Linux. Вона оснащена графічним середовищем PIXEL, а також містить корисне ПЗ, зокрема Mathematica для математичних обчислень.

Система налаштовується через зручну утиліту raspi-config, яка дозволяє легко конфігурувати основні параметри пристрою. На рисунку 2.8 показано її інтерфейс.

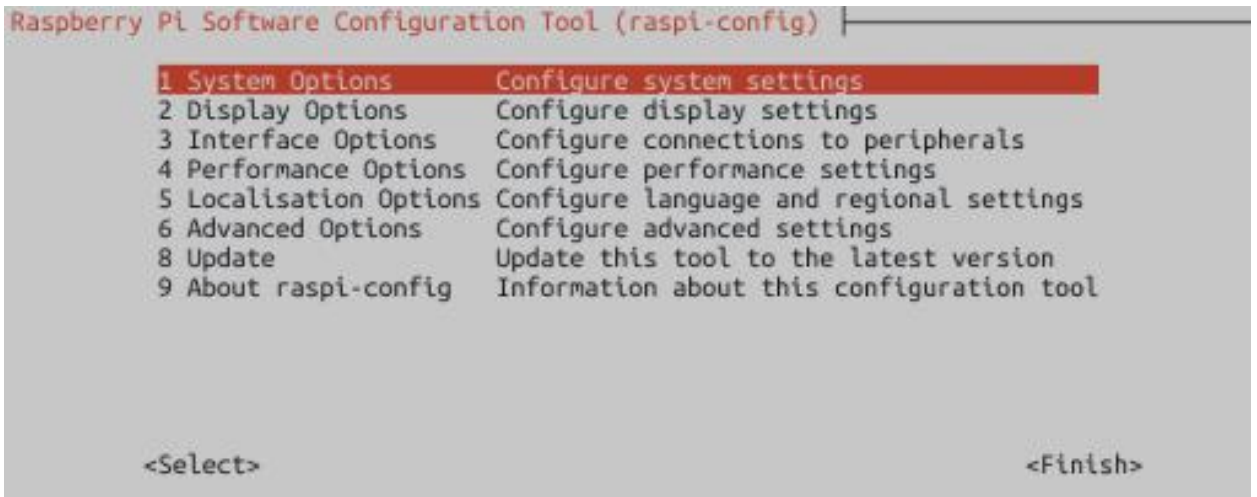


Рисунок 2.8 – Програмне забезпечення raspbian-config

Наступним одноплатним мікрокомп'ютером, який заслуговує на увагу, є Orange Pi, що майже повністю копіює архітектуру Raspberry Pi, проте відрізняється центральним процесором. У новітніх версіях Orange Pi використовується Rockchip RK3588Sx64, що забезпечує конфігурації з обсягом оперативної пам'яті від 4 ГБ до 32 ГБ. Мікрокомп'ютер оснащено стандартним інтерфейсом GPIO, кількома USB-портами, виходом HDMI, інтерфейсом MIPI для підключення камери, а також двома інтерфейсами MIPI для дисплеїв. Підтримуються різноманітні операційні системи: OrangePi OS (власна розробка), а також Android, Ubuntu, Armbian, Debian тощо. Встановлення ОС відбувається на SD-карту, аналогічно до Raspberry Pi.

Порівнюючи обидві лінійки мікрокомп'ютерів у контексті побудови 3D-принтерів з кінематикою типу Delta, Orange Pi є більш бюджетною альтернативою. Проте, разом із нижчою ціною, вона характеризується і дещо обмеженішими можливостями: меншою кількістю GPIO-пінів, USB-портів, а також меншою стабільністю програмного забезпечення у порівнянні з Raspberry Pi. Це може мати суттєве значення при налаштуванні й підтримці коректної роботи прошивки Klipper, яка є чутливою до продуктивності та сумісності обладнання.

Одноплатний комп'ютер Orange Pi зображено на рисунку 2.9.

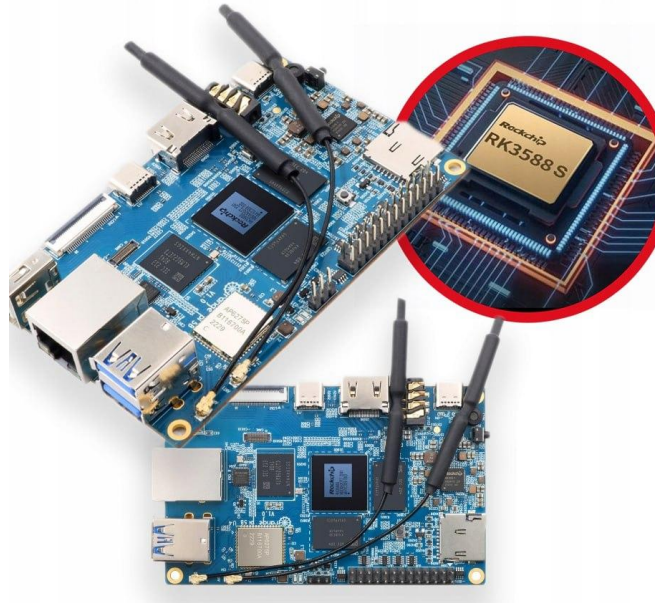


Рисунок 2.9 – Одноплатний мікрокомп'ютер Orange Pi 4

Таким чином, можна зробити висновок, що для реалізації 3D-принтера з кінематикою Delta та прошивкою Klipper, доцільніше обрати Raspberry Pi останнього покоління, оскільки попри вищу вартість, він забезпечує стабільнішу роботу, кращу документацію та підтримку з боку спільноти.

## 2.2 Побудова загальної блок-схеми Delta-принтера

Враховуючи попередній аналіз основних компонентів, які входять до складу 3D-принтера з кінематикою типу Delta, можемо зробити висновок щодо обов'язкових елементів, необхідних для стабільної та ефективної роботи такого пристрою:

- мікрокомп'ютер, що відповідає за запуск та підтримку програмного забезпечення Klipper, а також за зв'язок із платою керування принтера;
- екран керування, який забезпечує інтерфейс взаємодії користувача з мікрокомп'ютером і програмним забезпеченням Klipper;
- плата керування, що безпосередньо взаємодіє з периферійними пристроями: кроковими двигунами, нагрівачами, термісторами та кінцевими

вимикачами;

- драйвери крокових двигунів, які трансформують сигнали керування з плати у точні переміщення виконавчих механізмів (каретки, екструдера тощо);

- кінцеві вимикачі, що слугують для визначення нульових координат у кожній осі (X, Y, Z), забезпечуючи точну початкову калібровку;

- нагрівачі стола та екструдера, які забезпечують необхідну температуру для процесу друку;

- термістори, що зчитують температуру з нагрівальних елементів і передають її на контролер для стабілізації температури;

- блок живлення, що забезпечує електричне живлення всіх складових системи, включно з мікрокомп'ютером, платою та нагрівачами.

Таким чином, на основі проведеного аналізу та складеної блок-схеми було окреслено перелік основних компонентів, які формують електронну частину 3D-принтера з кінематикою Delta.

Узагальнену блок-схему компонування 3D-принтера з кінематикою Delta наведено на рисунку 2.10.

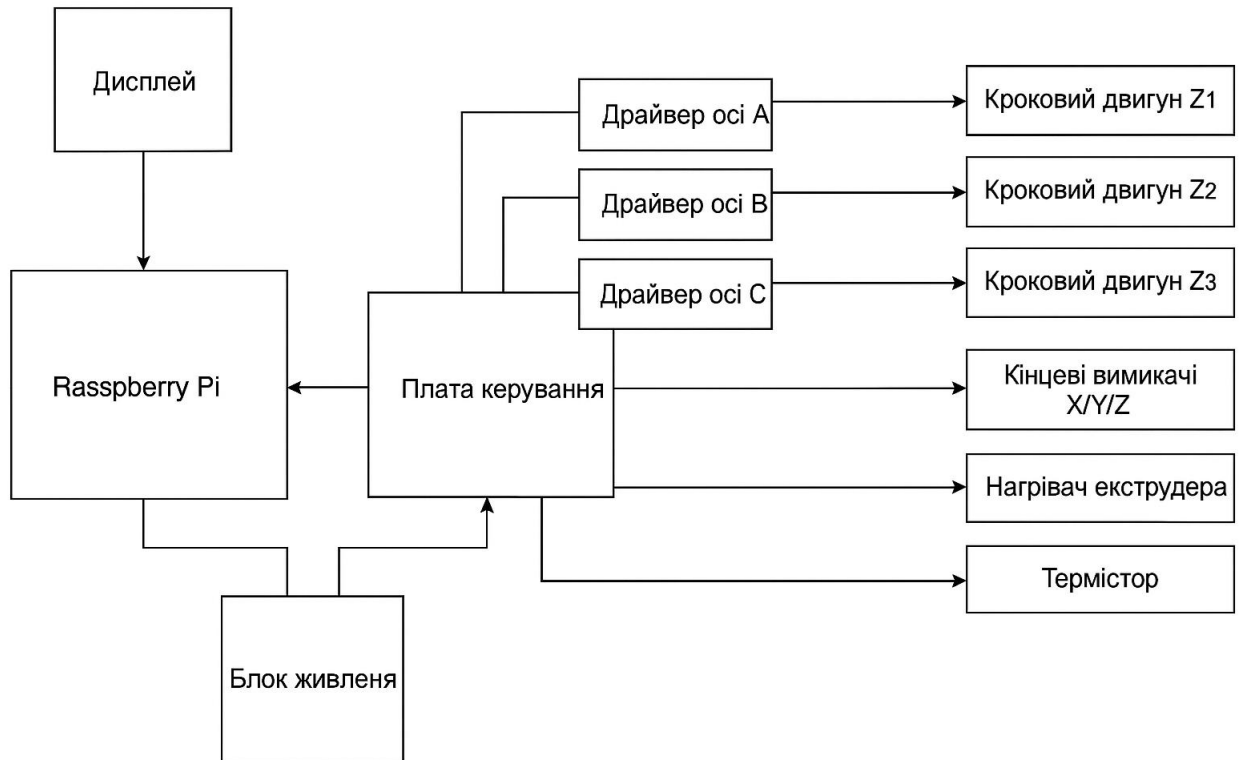


Рисунок 2.10 – Загальна блок-схема Delta-принтеру

З метою побудови принтера з кінематикою «Delta» доцільно залучити такі компоненти:

- мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4;
- плату керування Arduino Mega 2560;
- плату розширення RAMPS 1.6;
- драйвери крокового двигуна TMC2209;
- механічні кінцеві вимикачі;
- крокові двигуни Nema 17;
- діодний лазер 5 Вт, 12 В;
- вентилятор охолодження 20×20 мм, 12 В;
- блок живлення 12 В, 350 Вт;
- екран RaspberryPi 480×320, 3,5”.

Таким чином, після аналізу компонентів та їхнього підбору необхідно розробити схему підключення у ПЗ Friyzing.

Живлення схеми реалізується шляхом застосування блока живлення 350 Вт, 12 В, який містить у своїй комплектації три роз'єма для живлення «+», а також три роз'єма «-», де останні три відповідають за живлення від мережі, тобто за заземлення, нуль та фазу.

Приклад блоку живлення Mean Well представлено на рисунку 2.11.



Рисунок 2.11 – Блок живлення Mean Well

Живлення Raspberry реалізується через піни GPIO, зокрема, 5V Power та GND, оскільки через них виконується живлення власне RaspberryPi 4. Схему пінів GPIO продемонстровано на рисунку 2.12.

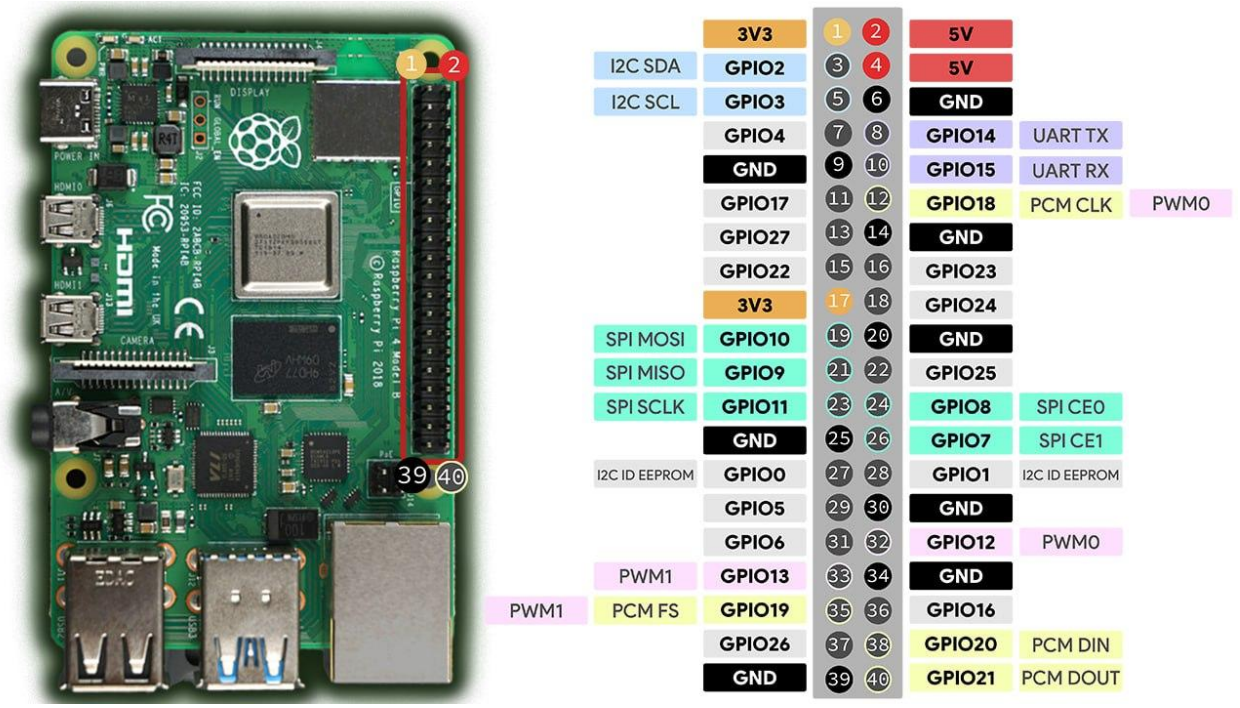


Рисунок 2.12 – Pin out Raspberry Pi 4

Для живлення Raspberry доречно послуговуватись 5 В та 3 А, тому з блоку живлення необхідно встановити Step-down-перетворювач, який 12 В перетворить на 5 В, а також матиме 3 А струму. Як приклад такого перетворювача наведемо MP1584, який представлено на рисунку 2.13.

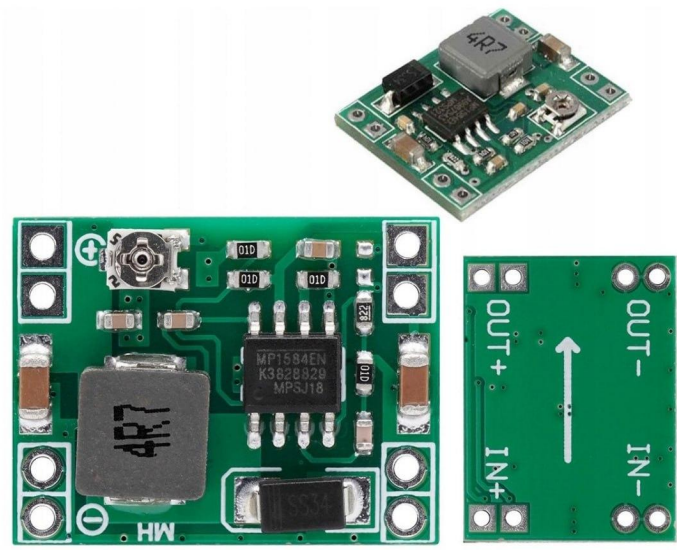


Рисунок 2.13 – Перетворювач напруги MP1584

На Arduino живлення подається до RAMPS, після чого RAMPS живить

уже власне Arduino Mega. Підключення всіх інших електронних компонентів реалізується відповідно до загальної схеми підключення RAMPS, приклад якої продемонстровано на рисунку 2.14.

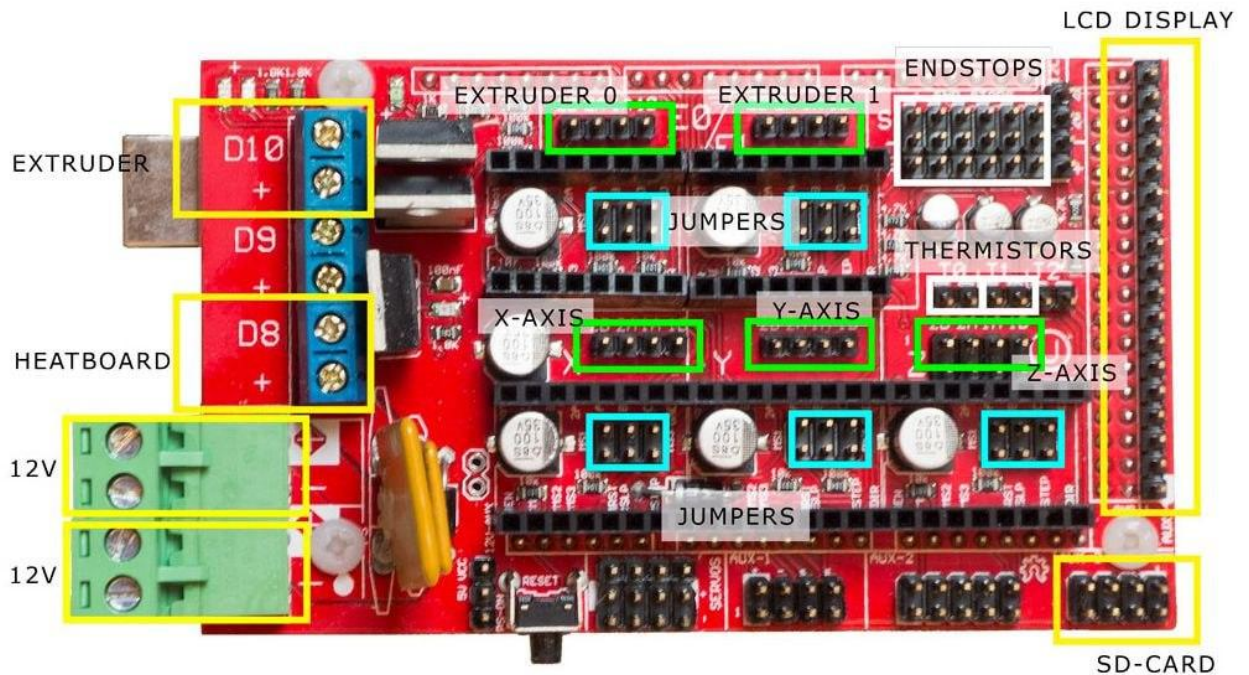


Рисунок 2.14 – Pinout RAMPS

Підключення інструментального модуля (наприклад, принтера або екструдера) в системі Delta-принтера зазвичай виконується через керувальні виходи плати керування, що підтримують функцію ШІМ (широтно-імпульсної модуляції) для точного регулювання потужності.

У даному випадку було використано вихід D8, який дозволяє як подавати живлення на інструмент, так і регулювати його інтенсивність через ШІМ-сигнал.

Для керування Delta-принтером доречно послуговуватися екраном RaspberryPi480×320, 3,5”, який представлено на рисунку 2.15.



Рисунок 2.15 – Екран RaspberryPi480×320 / 3,5”

Так, підключення екрану можна виконати за наявності HDMI-кабелю. В іншому разі деякі екрани потребують не лише підключення через HDMI задля виведення зображення, але й окремого живлення через вихід MicroUSB. Підключення екрана можливе за допомогою кабелю HDMI, однак деякі моделі дисплеїв, окрім HDMI-з'єднання для передачі зображення, потребують також окремого живлення, яке забезпечується через порт MicroUSB.

## 3 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ KLIPPER ДЛЯ DELTA-ПРИНТЕРУ

### 3.1 Налаштування ОС Raspbian

З метою налаштування програмного забезпечення для Delta-принтеру передусім доцільно встановити та налаштувати операційну систему Raspbian. Для цього необхідно:

- 1) завантажити образ операційної системи з офіційного сайту Raspberry Pi;
- 2) створити завантажувальний образ на SD-карті за допомогою програмного забезпечення Balena Etcher, яке забезпечить коректну роботу ОС на мікрокомп'ютері Raspberry Pi.

Процес створення завантажувального образу продемонстровано на рисунку 3.1.

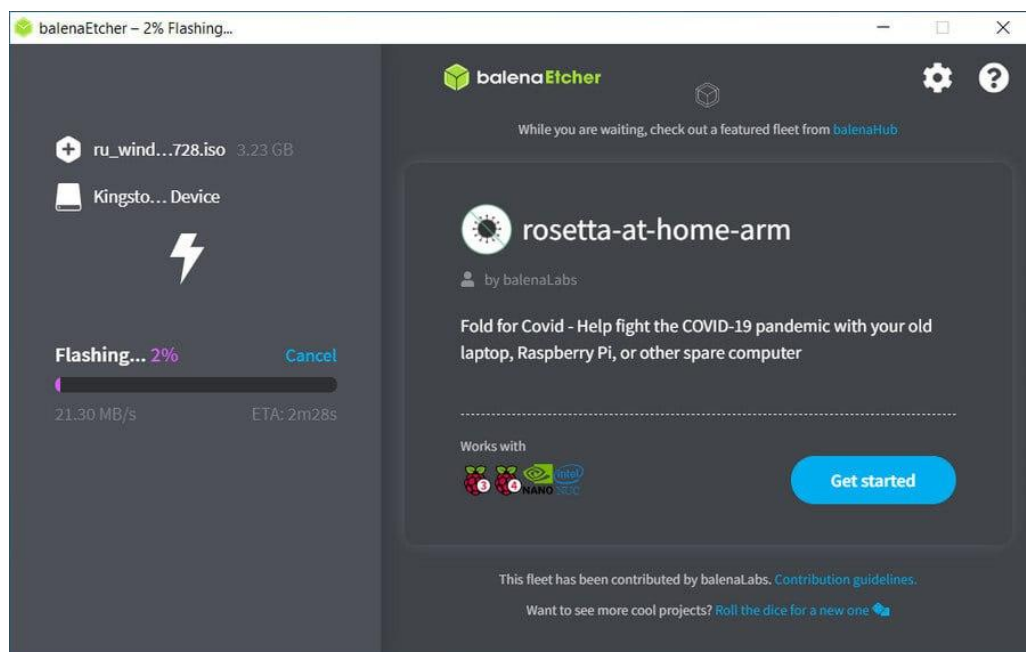


Рисунок 3.1 – Створення завантажувального образу на SD-карті

Після встановлення операційної системи було виконано початкове налаштування через локальну мережу за допомогою утиліти `raspi-config`. Зокрема, після налаштування потрібно:

- 1) підключитися до Wi-Fi;
- 2) активувати SSH-доступ;
- 3) оновити системне програмне забезпечення та ядра операційної системи.

Процес налаштування `raspi-config` наведено на рисунку 3.2.

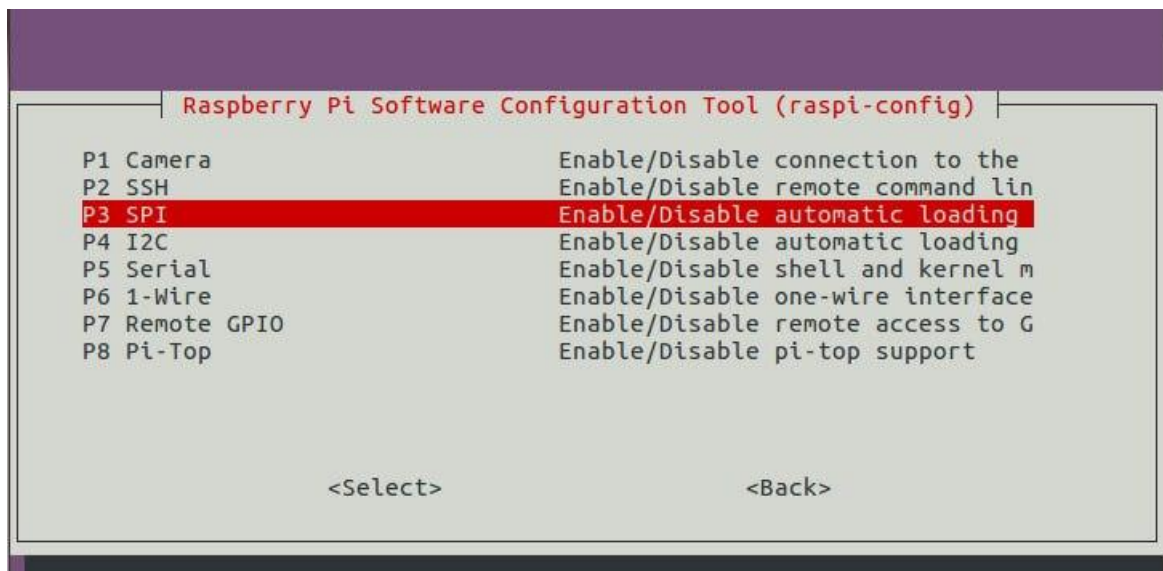


Рисунок 3.2 – Налаштування `raspbian-config`

Після підключення Raspberry Pi до мережі Wi-Fi всі подальші дії з налаштування системи виконуються з віддаленого комп'ютера за допомогою SSH-доступу.

Наступним етапом є встановлення прошивки Klipper. Для цього необхідно попередньо інсталювати деякі додаткові інструменти, зокрема Git, який дозволить завантажити необхідні файли з репозиторію.

Далі виконується інсталяція інструмента KIAUH - автоматизованої системи встановлення Klipper та супутніх компонентів. Послідовність команд для інсталяції наступна:

```
sudo apt-get install git -y # Встановлення Git
cd ~ # Перехід до домашньої директорії
git clone https://github.com/th33xitus/kliauh.git # Завантаження скрипту
КІАУН з репозиторію
```

```
./kliauh/kliauh.sh # Запуск графічного інтерфейсу КІАУН
```

КІАУН забезпечує простий вибір модулів системи Klipper (наприклад, Moonraker, Mainsail або Fluidd) та автоматизує процес їх встановлення.

Приклад вікна вибору КІАУН продемонстровано на рисунку 3.3.

```

~~~~~ [ KIAUH ] ~~~~~
Klipper Installation And Update Helper
~~~~~

~~~~~ [ Main Menu ] ~~~~~

0) [Upload Log] | Klipper: Installed: 1
                | Branch: master
1) [Install]    |
2) [Update]    | Moonraker: Installed: 1
3) [Remove]    |
4) [Advanced]  | Mainsail: Installed!
5) [Backup]    | Fluidd: Not installed!
                | KlipperScreen: Incomplete!
6) [Settings]  |
                | DWC2: Not installed!
v3.0-25        | Octoprint: Not installed!

                | Q) Quit

Perform action: █

```

Рисунок 3.3 – Вікно вибору КІАУН

На зображенні продемонстровано вікно налаштувань, яке містить такі основні опції:

Вивантаження лог-файлів – ця функція дозволяє експортувати журнали для подальшого аналізу, що корисно у разі виникнення помилок або збоїв у системі.

Встановлення основних компонентів:

1. Klipper – прошивка для 3D-принтерів, яка забезпечує високу швидкодію та точність;
2. Moonraker – API-сервер, який надає інтерфейс для віддаленої

взаємодії з прошивкою.

3. Mainsail та Fluidd – зручні інтерфейси для взаємодії з принтером через веб-браузер. Можна обрати один з них або встановити обидва.

Додаткові опції:

- встановлення стандартних конфігурацій для Fluidd і Mainsail;
- інсталяція інтерфейсу для сенсорного екрана, при умові що він використовується;
- налаштування підключеної камери для моніторингу друку в реальному часі (рис. 3.4);

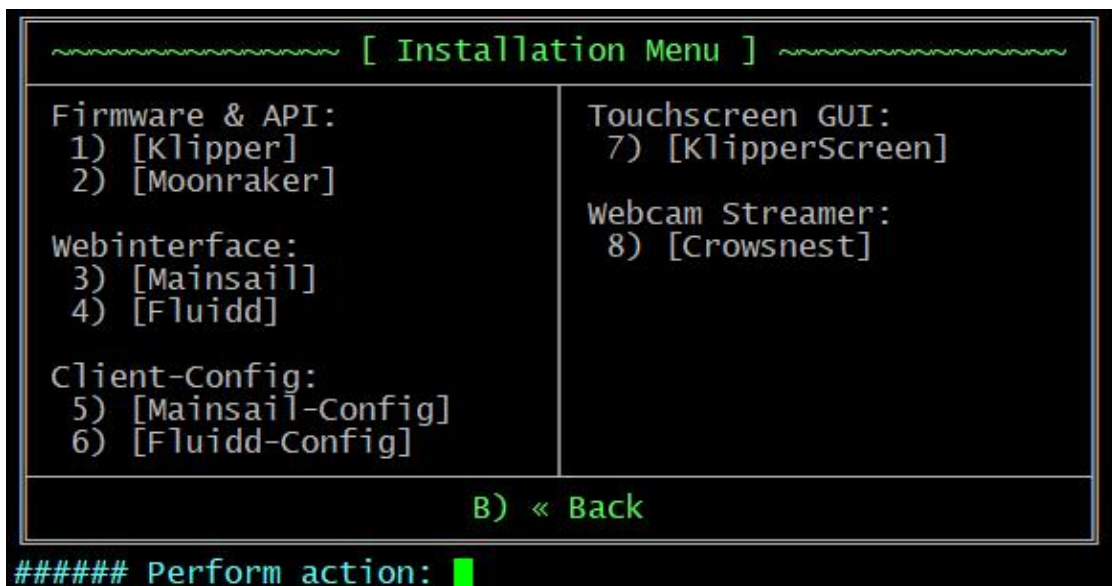


Рисунок 3.4 – Меню налаштування

– оновлення всіх пакетів, тобто виконується оновлення як системи програми, так і окремих компонентів Klipper (рис. 3.5);

```

pi@mainsailos: ~
HEAD is now at 44f5609 script: remove deprecated moonraker.conf entries
Updating 44f5609..991dd79
Fast-forward
 README.md | 18 +----
 docs/changelog.md | 29 ++++++
 resources/kiauh_macros.cfg | 51 ++++++-----
 resources/moonraker.conf | 1 +
 scripts/functions.sh | 107 +++++-----
 scripts/install_klipper.sh | 70 ++++++-----
 scripts/install_klipper_webui.sh | 22 +++++-
 scripts/install_klipperscreen.sh | 52 +-----
 scripts/install_mjpg-streamer.sh | 13 ++-
 scripts/install_moonraker.sh | 34 ++++++--
 scripts/ms_theme_installer.sh | 17 +++++
 scripts/remove.sh | 82 ++++++-----
 scripts/ui/advanced_menu.sh | 51 ++++++-----
 scripts/ui/general_ui.sh | 2 +
 scripts/ui/main_menu.sh | 60 +++++-----
 scripts/ui/ms_theme_menu.sh | 14 ++-
 scripts/update.sh | 183 ++++++-----
 scripts/upload_log.sh | 11 ++-
 18 files changed, 502 insertions(+), 315 deletions(-)
>>>>> Update complete! Please restart KIAUH.
pi@mainsailos:~ $

```

Рисунок 3.5 – Меню оновлення KIAUH

– меню remove дозволяє видаляти окремі елементи системи Klipper (рис. 3.6);

```

~::~:~::~: [ Remove Menu ] ~::~:~::~:
INFO: Configurations and/or any backups will be kept!
Firmware & API:
 1) [Klipper]
 2) [Moonraker]
Klipper Webinterface:
 3) [Mainsail]
 4) [Fluid]
Touchscreen GUI:
 5) [KlipperScreen]
Webcam Streamer:
 6) [Crowsnest]
B) « Back

```

Рисунок 3.6 – Меню видалення KIAUH

– меню Advanced дозволяє здійснювати маніпуляції з платою керування Delta-принтеру (це дозволяє ПЗ реалізовувати всеосяжне керування платою керування Delta-принтером. До інших можливостей, які

допомагають виконувати це меню, належить налаштування Input Shaper, яке сприяє збільшенню прискорення руху Delta-принтеру, зміна репозиторіїв для оновлення Klipper а також зміна імені hostname, за яким виконується вхід до web-інтерфейсу), зокрема, утворювати файл прошивки для плати, окремо вносити прошивку на плату чи все разом (рис. 3.7);

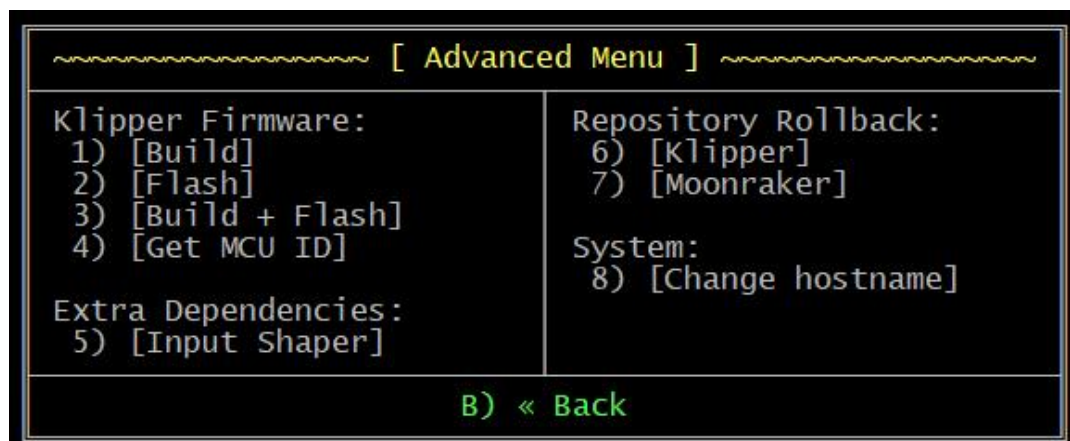


Рисунок 3.7 – Меню Advanced

- меню Backup дозволяє виконати резервну копію налаштувань;
- меню Setup дозволяє вибрати між репозиторіями стабільних версій та Beta для Klipper та Moonraker, тобто надає вибір між стабільними та нестабільними версіями Mainsail та Fluidd, а також налаштовує резервне копіювання перед оновленням;
- меню Extensions надає можливість, у разі додаткового встановлення до стандартних засобів, встановлювати й розширення.

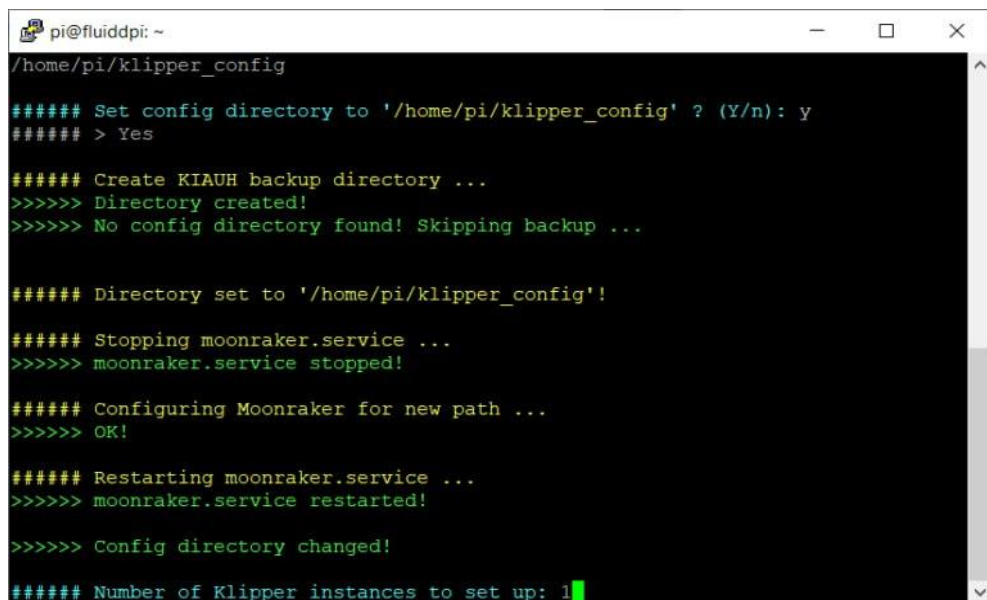
Прикладами таких розширень можуть бути теми для Web-інтерфейсу, бот для Telegram, який може надсилати прості команди на старт або закінчення гравіювання, а також подає сигнали про успішне завершення гравіювання.

### 3.2 Встановлення програмного забезпечення Klipper

З метою встановлення ПЗ Klipper доцільно в KIAUH вибрати перше меню, котре дозволяє встановлювати окремі компоненти.

Після чого встановити власне Klipper. Зауважимо, що перед встановленням буде доречним визначити кількість модулів Klipper, число яких залежатиме від кількості верстатів, які могли б функціонувати на одному мікрокомп'ютері.

Меню щодо вибору кількості модулів Klipper наведено на рисунку 3.8.



```

pi@fluiddpi: ~
/home/pi/klipper_config
##### Set config directory to '/home/pi/klipper_config' ? (Y/n): y
##### > Yes

##### Create KIAUH backup directory ...
>>>>> Directory created!
>>>>> No config directory found! Skipping backup ...

##### Directory set to '/home/pi/klipper_config'!

##### Stopping moonraker.service ...
>>>>> moonraker.service stopped!

##### Configuring Moonraker for new path ...
>>>>> OK!

##### Restarting moonraker.service ...
>>>>> moonraker.service restarted!

>>>>> Config directory changed!

##### Number of Klipper instances to set up: 1

```

Рисунок 3.8 – Вибір кількості модулів Klipper

Наступним кроком є створення базового конфігураційного файлу printer.cfg, який у подальшому буде використовуватись для налаштування параметрів Delta-принтеру.

Після встановлення Klipper необхідно здійснити інсталяцію Moonraker. Під час вибору відповідного пункту меню система пропонує створити ще один конфігураційний файл - moonraker.conf.

Далі слід перейти до встановлення одного з web-інтерфейсів - Mainsail або Fluidd. Оскільки функціональність обох інтерфейсів майже однакова,

основні відмінності між ними полягають у візуальному розміщенні окремих елементів.

Слід зазначити, що в Klipper передбачена можливість одночасного використання двох web-інтерфейсів, які працюють на різних портах, що дозволяє користувачеві обирати найбільш зручний варіант взаємодії.

На рисунку 3.9 наведено приклад інтерфейсу Fluidd.

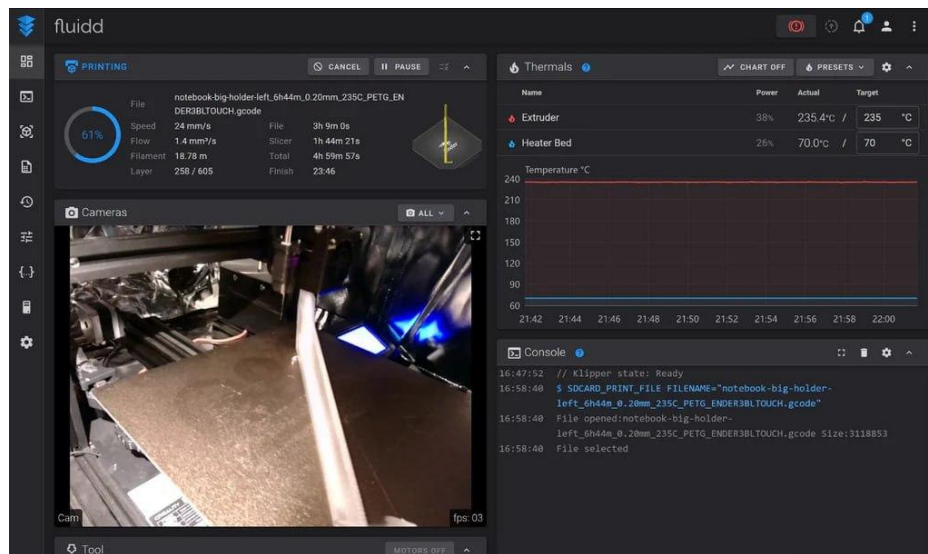


Рисунок 3.9 – Web-інтерфейс Fluidd

Web-інтерфейс Mainsail наведено на рисунку 3.10.

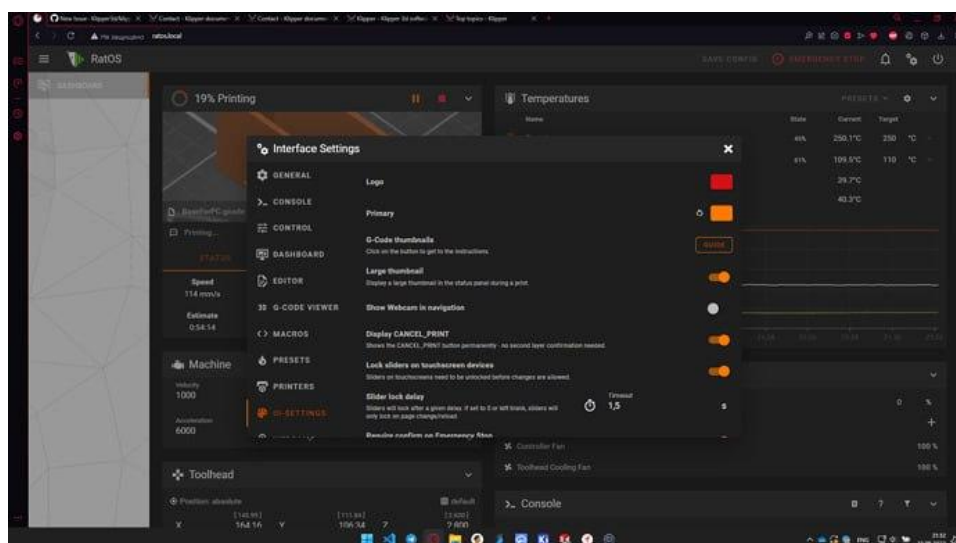


Рисунок 3.10 – Web-інтерфейс Mainsail

Було вирішено під час встановленні послуговуватись власне Fluidd. Водночас пропонується додаткове встановлення Fluidd-config, разом із вибором порту для доступу через web-браузер, за замовчуванням використовується порт №80.

Отже, після встановлення Fluidd ключові етапи встановлення – завершені. Утім додатково можна встановити Klipper Screen з метою керування Delta-принтером через сенсорний екран.

### 3.3 Налаштування Klipper для Delta-принтеру

Після завершення процесу встановлення доцільно виконати налаштування Klipper, зокрема - для Delta-принтеру, оскільки основним призначенням даної прошивки є 3D-принтери.

Для цього за допомогою web-браузера необхідно перейти до web-інтерфейсу Fluidd. Щоб визначити локальну IP-адресу пристрою, можна скористатися спеціальними програмами, які дозволяють відслідковувати всі пристрої у Wi-Fi мережі.

На рисунку 3.11 наведено приклад визначення IP-адреси пристрою.

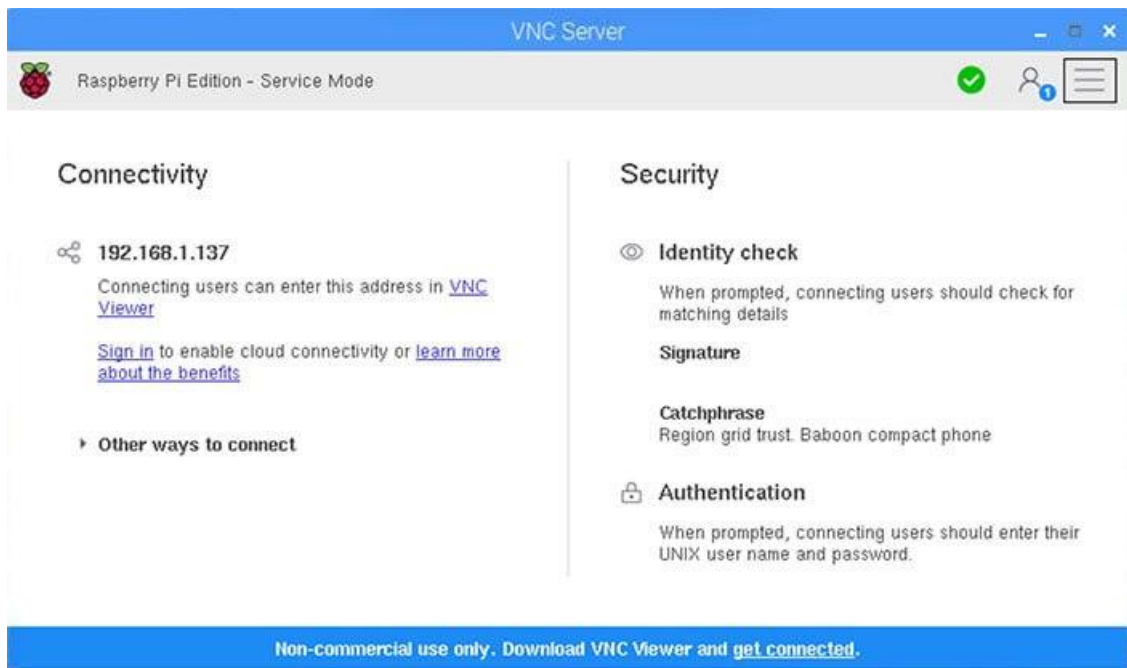


Рисунок 3.11 – Визначення IP-адреси Клірпер

Після переходу за адресою <https://127.0.0.1/8> було відкрито вікно керування прошивкою Клірпер, яке продемонстроване на рисунку 3.12.

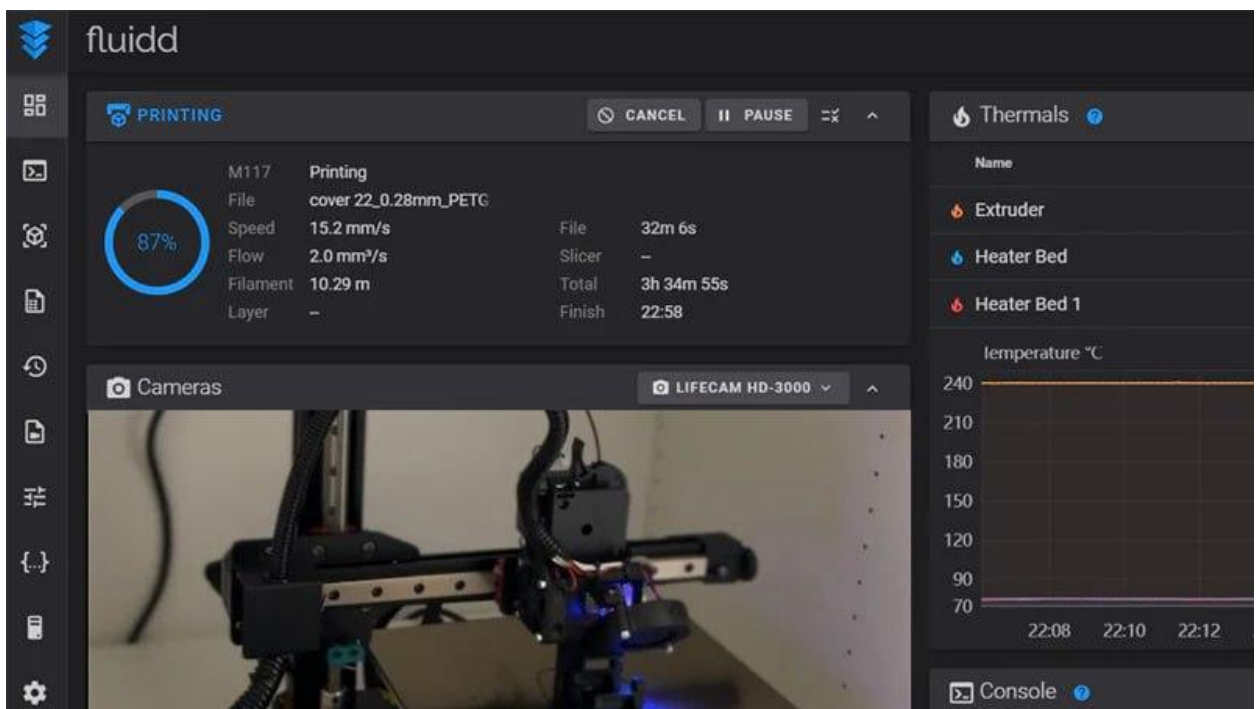


Рисунок 3.12 – Вікно Клірпер

У даному вікні реалізується можливість щодо переміщення принтера за

осями XY, відправляти команди G-code, а також надсилати файли на друк.

Для того, щоб налаштувати керування Delta-принтером, спершу потрібно відредагувати файл `printer.cfg`.

Цей файл містить структуру, що складається з підсекцій.

`[mcu]` – це підсекція, що відповідає за підключення до плати керування Delta-принтером. Зразок секції наведено на рисунку 3.13;

```
View mcu documentation
[mcu]
serial: /dev/serial/by-id/usb-FTDI_FT232R_USB_UART_AI0666FC-if00-port0
```

Рисунок 3.13 – Секція `[mcu]`

`[printer]` є підсекцією, що відповідає за кінематику Delta-принтеру. Так, Klipper підтримує всі основні кінематики, зокрема, Cartesian, CoreXY, CoreXZ, Delta, Polar тощо. До того ж, у цій секції задаються швидкості та прискорення. Зразок секції наведено на рисунку 3.14;

```
[printer]
kinematics: delta
max_velocity: 300
max_accel: 2000
square_corner_velocity: 5.0
```

Рисунок 3.14 – Секція `[printer]`

`[stepper_a]` позначає підсекцію, що налаштовує переміщення віссю A, ідентична підсекція застосовується і для інших осей. Окрім того, ці секції реалізують налаштування пінів крокового двигуна, котрі залежать від використаної плати, кількість мікрокроків, а також містять параметр `rotation_distance`, який потребує обчислення для точного переміщення, піни кінцевих вимикачів, як-от мінімального та максимального, разом із мінімальною та максимальною відстанню переміщення. Приклад секції

продемонстровано на рисунку 3.15.

```
[stepper_a]
step_pin: PF0
dir_pin: PF1
enable_pin: !PD7
microsteps: 16
rotation_distance: 40
endstop_pin: ^PE5
position_endstop: 0.0
position_min: 0
position_max: 250
homing_speed: 50
```

Рисунок 3.15 – Секція [stepper\_a]

З метою охолодження залучається спеціальна секція [fan], в якій задаються використовувані вентилятори, що підпадають під керування, з визначенням їхніх пінів. Зразок цієї секції наведено на рисунку 3.16.

```
[fan]
pin: PD2

[fan]
pin: PD3
```

Рисунок 3.16 – Секція [fan]

Усі секції, котрі були розглянуті вище, послуговуються пінами, що належать до RAMPS з Arduino Mega. Задля керування принтером буде застосування PWM. Для цього реалізації процесу в Klipper містяться стандартні налаштування. Передусім вони задають пін керування PWM, тип

керування, що відповідає за активацію за допомогою високого або низького сигналу, мінімальний час увімкнення.

Повний код цієї секції представлено на рисунку 3.17.

```
[extruder]
max_extrude_only_distance: 1000.0
step_pin: PB4
dir_pin: PB3
enable_pin: !PC3
rotation_distance: 7.48
microsteps: 16
nozzle_diameter: 0.400
filament_diameter: 1.750
heater_pin: PA1
sensor_type: EPCOS 100K B57560G104F
sensor_pin: PC5
#control: pid
# tuned for stock hardware with 200 degree
#pid_kp = 19.780
#pid_ki = 1.090
#pid_kd = 89.752
min_temp: 0
max_temp: 305
pressure_advance = 0.006
```

Рисунок 3.17 – Секція [pwm\_tool TOOL]

Окрім того, з метою функціонування принтера доцільно використовувати спеціальні макроси, котрі спроможні регулювати потужність принтера відповідно до стандартних команд M3, M5, M4. Це надає можливість застосовувати стандартні слайсери для гравіювання.

Зазначені макроси продемонстровано на рисунку 3.18.

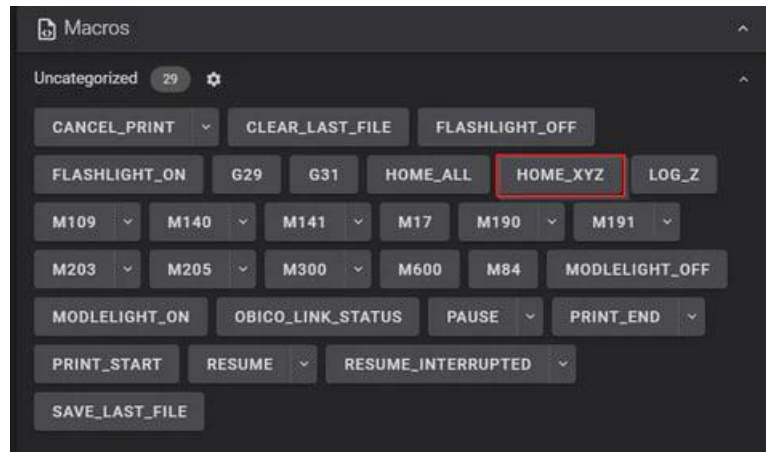


Рисунок 3.18 – Макроси для використання лазеру

У разі керування принтером за допомогою екрану доцільно послуговуватися додатковими макросами, приклади яких продемонстровано на рисунку 3.19.

```
#####
# EXP1 (display) pins
#####

[board_pins]
aliases:
  # EXP1 header
  EXP1_1=PA15, EXP1_3=PA9, EXP1_5=PA10, EXP1_7=PB8, EXP1_9=<GND>,
  EXP1_2=PB6, EXP1_4=<RST>, EXP1_6=PB9, EXP1_8=PB7, EXP1_10=<5V>

# See the sample-lcd.cfg file for definitions of common LCD displays.
#####
# "RepRapDiscount 128x64 Full Graphic Smart Controller" type displays
#####

[display]
lcd_type: st7920
cs_pin: EXP1_6
sclk_pin: EXP1_5
sid_pin: EXP1_1
#encoder_pins: ^EXP2_3, ^EXP2_5 # this is default streeng
encoder_pins: ^EXP1_8, ^EXP1_7
click_pin: ^!EXP1_2
#kill_pin: ^!EXP2_8

[output_pin BEEPER_pin]
pin: EXP1_3
```

Рисунок 3.19 – Макроси для керування принтером через екран

Отже, файл printer.cfg набуде такого відображення:

[mcu]

serial: /dev/ttyACM0

[printer]

kinematics: delta

max\_velocity: 300

max\_accel: 2000

square\_corner\_velocity: 5.0

[stepper\_a]

step\_pin: PF0

dir\_pin: PF1

enable\_pin: !PD7

microsteps: 16

rotation\_distance: 40

endstop\_pin: ^PE5

position\_endstop: 0.0

position\_min: 0

position\_max: 250

homing\_speed: 50

[stepper\_b]

step\_pin: PF6

dir\_pin: !PF7

enable\_pin: !PF2

microsteps: 16

rotation\_distance: 40

endstop\_pin: ^PJ1

position\_endstop: 0.0

position\_min: 0

position\_max: 250

homing\_speed: 50

[stepper\_c]

step\_pin: PE2

```
dir_pin: !PB4
enable_pin: !PD2
microsteps: 16
rotation_distance: 40
endstop_pin: ^PC2
position_endstop: 0.0
position_min: 0
position_max: 250
homing_speed: 50
[delta_calibrate]
radius: 100.0
[delta_tilt_adjust]
horizontal_move_z: 10.0
z_adjust: 0.0
[pwm_tool TOOL]
pin: !ar9
hardware_pwm: True
cycle_time: 0.001
shutdown_value: 0
maximum_mcu_duration: 3
[gcode_macro M3]
gcode:
    {% set S = params.S|default(0.0)|float %}
    SET_PIN PIN=TOOL VALUE={S / 255.0}
[gcode_macro M4]
gcode:
    {% set S = params.S|default(0.0)|float %}
    SET_PIN PIN=TOOL VALUE={S / 255.0}
[gcode_macro M5]
gcode:
```

```

    SET_PIN PIN=TOOL VALUE=0
[menu __main __control __toolonoff]
type: input
enable: {'pwm_tool TOOL' in printer}
name: Fan: {'ON ' if menu.input else 'OFF'}
input: {printer['pwm_tool TOOL'].value}
input_min: 0
input_max: 1
input_step: 1
gcode:

```

```

    M3 S{255 if menu.input else 0}

```

```

[menu __main __control __toolspeed]
type: input
enable: {'pwm_tool TOOL' in printer}
name: Toolspeed: {'%3d' % (menu.input * 100)}%
input: {printer['pwm_tool TOOL'].value}
input_min: 0
input_max: 1
input_step: 0.01
gcode:

```

```

    M3 S{'%d' % (menu.input * 255)}

```

На останньому кроці реалізується встановлення прошивки на принтер. Такими чином, необхідно знову перейти до KIAUH, власне до секції Advanced, і вибрати build для початку. Після вибору даного меню, необхідно визнатитися із платою для прошивки. Приклад дій наведено на рисунку 3.20.

```

khdas@Khdas:~/klipper$ python3 ~/katapult/scripts/flashtool.py -i can0 -u 11d11eb5b129 -f ~/klipper/out/klipper.bin
Sending bootloader jump command...
Resetting all bootloader node IDs...
Attempting to connect to bootloader
Katapult Connected
Protocol Version: 1.0.0
Block Size: 64 bytes
Application Start: 0x8002000
MCU type: stm32g0b1xx
Verifying canbus connection
Flashing '/home/khdas/klipper/out/klipper.bin'...

[#####]

Write complete: 15 pages
Verifying (block count = 450)...

[#####]

Verification Complete: SHA = 2186328F8B5A91B01A437DC73F9E1FC7621F6B3D
Flash Success
khdas@Khdas:~/klipper$

```

Рисунок 3.20 – Побудова прошивки

Після чого до мікрокомп'ютера необхідно підключити плату керування, а також визначити її MCU ID за допомогою наступного меню GET MCU ID у KIAUH. А далі виконати прошивку плати шляхом застосування команди Flash.

### 3.4 Експериментальна частина

Оскільки на даний момент тестування відсутній принтер із кінематикою «Delta», у якості експерименту даний код конфігурації був перероблений під симуляцію всередині терміналу Linux. Основні зміни – це заміна реальних пінів на візуалізовані та додання секції [mcu host].

Відтепер код набув наступного вигляду:

```

[mcu]
serial: /tmp/klipper_host_mcu

[mcu host]
serial: /tmp/klipper_host_mcu

[printer]
kinematics: delta

```

max\_velocity: 300  
max\_accel: 2000  
square\_corner\_velocity: 5.0  
[stepper\_a]  
step\_pin: PF0  
dir\_pin: PF1  
enable\_pin: !PD7  
microsteps: 16  
rotation\_distance: 40  
endstop\_pin: ^PE5  
position\_endstop: 0.0  
position\_min: 0  
position\_max: 250  
homing\_speed: 50  
[stepper\_b]  
step\_pin: PF6  
dir\_pin: !PF7  
enable\_pin: !PF2  
microsteps: 16  
rotation\_distance: 40  
endstop\_pin: ^PJ1  
position\_endstop: 0.0  
position\_min: 0  
position\_max: 250  
homing\_speed: 50  
[stepper\_c]  
step\_pin: PE2  
dir\_pin: !PB4  
enable\_pin: !PD2  
microsteps: 16

```

rotation_distance: 40
endstop_pin: ^PC2
position_endstop: 0.0
position_min: 0
position_max: 250
homing_speed: 50
[delta_calibrate]
radius: 100.0
[delta_tilt_adjust]
horizontal_move_z: 10.0
z_adjust: 0.0
[output_pin virtual_pin_TOOL]
pin: host:gpio25
pwm: True
cycle_time: 0.001
hardware_pwm: False
shutdown_value: 0
[gcode_macro M3]
gcode:
    {% set S = params.S|default(0.0)|float %}
    SET_PIN PIN=virtual_pin_TOOL VALUE={S / 255.0}
[gcode_macro M4]
gcode:
    {% set S = params.S|default(0.0)|float %}
    SET_PIN PIN=virtual_pin_TOOL VALUE={S / 255.0}
[gcode_macro M5]
gcode:
    SET_PIN PIN=virtual_pin_TOOL VALUE=0

```

На рисунках 3.21-3.22 наведено результат запуску програмного забезпечення.

```

klippervm@raspberrypi: ~/klipper
Configuration saved to '/home/klippervm/klipper/.config'
klippervm@raspberrypi:~/klipper $ make
./out/klipper.elf -I /tmp/klipper_host_mcu
Creating symbolic link out/board
Building out/autoconf.h
Compiling out/src/sched.o
Compiling out/src/command.o
Compiling out/src/basecmd.o
Compiling out/src/debugcmds.o
Compiling out/src/initial_pins.o
Compiling out/src/gpiocmds.o
Compiling out/src/stepper.o
Compiling out/src/endstop.o
Compiling out/src/trsync.o
Compiling out/src/adccmds.o
Compiling out/src/spicmds.o
Compiling out/src/i2ccmds.o
Compiling out/src/pwmcmds.o
Compiling out/src/buttons.o
Compiling out/src/tmcuart.o
Compiling out/src/neopixel.o
Compiling out/src/pulse_counter.o
Compiling out/src/lcd_st7920.o
Compiling out/src/lcd_hd44780.o
Compiling out/src/spi_software.o
Compiling out/src/i2c_software.o
Compiling out/src/thermocouple.o
Compiling out/src/sensor_adxl345.o
Compiling out/src/sensor_lis2dw.o
Compiling out/src/sensor_mpu9250.o
Compiling out/src/sensor_icm20948.o

```

Рисунок 3.21 – Запуск програми

```

klippervm@raspberrypi: ~/klipper
config, and restart the host software.
Printer is shutdown

AZ
[2]+ Зупинено python klippy/klippy.py config/printer.cfg
(klippy-env) klippervm@raspberrypi:~/klipper $ python klippy/klippy.py config/printer.cfg
INFO:root:Starting Klippy...
WARNING:root:No log file specified! Severe timing issues may result!
INFO:root:Start printer at Mon Jun 16 15:18:24 2025 (1750076304.2 14576.1)
INFO:root:mcu 'mcu': Starting connect
INFO:root:Loaded MCU 'mcu' 138 commands (v0.13.0-152-gf54b7b937-dirty-20250616_150240-raspberrypi /
gcc: mixed binutils: (GNU Binutils for Debian) 2.35.2)
MCU 'mcu' config: ADC_MAX=4095 CLOCK_FREQ=50000000 MCU=linux PCA9685_MAX=4096 PWM_MAX=32768 STATS_
SUMSQ_BASE=256 STEPPER_STEP_BOTH_EDGE=1
INFO:root:mcu 'host': Starting connect
ERROR:root:b'Got EOF when reading from device'
ERROR:root:mcu 'host': Wait for identify_response
Traceback (most recent call last):
  File "/home/klippervm/klipper/klippy/serialhdl.py", line 68, in _get_identify_data
    params = self.send_with_response(msg, 'identify_response')
  File "/home/klippervm/klipper/klippy/serialhdl.py", line 202, in send_with_response
    return src.get_response([cmd], self.default_cmd_queue)
  File "/home/klippervm/klipper/klippy/serialhdl.py", line 327, in get_response
    raise error("Unable to obtain '%s' response" % (self.name,))
serialhdl.error: Unable to obtain 'identify_response' response
INFO:root:mcu 'host': Timeout on connect
INFO:root:Loaded MCU 'host' 138 commands (v0.13.0-152-gf54b7b937-dirty-20250616_150240-raspberrypi /
gcc: mixed binutils: (GNU Binutils for Debian) 2.35.2)
MCU 'host' config: ADC_MAX=4095 CLOCK_FREQ=50000000 MCU=linux PCA9685_MAX=4096 PWM_MAX=32768 STATS_
SUMSQ_BASE=256 STEPPER_STEP_BOTH_EDGE=1

```

Рисунок 3.22 – Результат роботи програми

Такі повідомлення нормальні на старті або під час простою. Вони не критичні й не заважають, оскільки далі йде наступне повідомлення:

INFO:root:Loaded MCU 'host' ...

Це повідомлення свідчить про успішне завантаження програмного забезпечення, яке працює справно та стабільно.

## 4 ЗАХОДИ І РОЗРАХУНКИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНИХ УМОВ ПРАЦІ

### 4.1 Аналіз умов праці на робочому місці

На робочому місці оператора персонального комп'ютера (ПК) можуть виникати низка небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Серед них: підвищений рівень шуму, несприятливі мікрокліматичні умови, недостатній рівень освітлення, наявність шкідливих речовин у повітрі, електромагнітні випромінювання радіочастотного діапазону, висока напруга електромережі, статична електрика тощо. Крім цього, робота з ПК супроводжується високим рівнем психоемоційного та зорового навантаження.

За систематичної дії виробничих чинників, що не відповідають нормативним значенням, підвищується ризик виникнення професійно обумовлених захворювань, зокрема органів зору, опорно-рухового апарату та нервової системи. Тому аналіз умов праці є важливим для своєчасного виявлення та усунення шкідливих впливів.

Робоче приміщення оператора ПК має площу 48 м<sup>2</sup> та висоту стелі 3,5 м. У ньому розміщено шість робочих місць, кожне з яких обладнане письмовим столом, ергономічним стільцем та персональним комп'ютером (монітор, системний блок, клавіатура, миша).

### 4.2 Промислова безпека на робочому місці

Живлення обладнання здійснюється від трифазної чотирипровідної електромережі змінного струму з глухозаземленою нейтраллю, напругою 220 В та частотою 50 Гц. Згідно з вимогами НПАОП 40.1-1.21-98, приміщення належить до категорії без підвищеної небезпеки, оскільки в ньому відсутні фактори, що створюють підвищений або особливо небезпечний ризик.

Для забезпечення безпечних умов праці необхідно вживати відповідних організаційних і технічних заходів. Зокрема, згідно з НПАОП 40.1-1.32-01, у приміщенні застосовується система занулення для запобігання ураженню електричним струмом.

### 4.3 Виробнича санітарія в приміщенні

Робота оператора ПК класифікується як легка за рівнем енерговитрат. У таблиці 4.1 наведено оптимальні параметри мікроклімату для приміщень, у яких виконуються роботи операторського типу [15].

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату для приміщень з ПК

Період року	Параметр мікроклімату	Величина
Холодний	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	22 – 24 °С; 40 – 60 %; до 0,1 м/с
Теплий	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	23 – 25 °С; 40 – 60 %; 0,1 – 0,2 м/с

Виміряні за допомогою приладів температура та вологість у лабораторії відповідають вказаним у таблиці для теплого періоду року. Слід зазначити, що для нормалізації параметрів мікроклімату слід використовувати у приміщеннях кондиціонування повітря, або забезпечити подачу свіжого повітря системами вентиляції.

Лабораторія, де виконується розробка конструкції модуля, має наступні характеристики:

- площа приміщення 48 м<sup>2</sup> (8×6 м);
- висота – 3,5 м;
- кількість робочих місць – 6 шт.;

– обладнання – стіл з ПК і периферією – 6 шт.

Приміщення, відповідно до ДНАОП 0.00-1.31-99, має забезпечувати 6 м<sup>2</sup> площі та 20 м<sup>3</sup> обсягу на одне окреме робоче місце з ПК [16]. Площа приміщення 48 м<sup>2</sup> та об'єм 168 м<sup>3</sup>, на кожне робоче місце приходиться 8 м<sup>2</sup> площі і об'єм 28 м<sup>3</sup>, тобто вимога виконана.

Приміщення з ПК повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5 %.

Рівень загального штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності, викладеної в [17].

Розрахункова формула методу:

$$W = \frac{W}{S}, \quad (4.1)$$

де  $W$  – питома потужність, Вт/м<sup>2</sup>;

$S$  – площа приміщення, м<sup>2</sup>;

$W$  – загальна потужність освітлювальної установки Вт, яка розраховується за формулою:

$$W = W_{ce} n_{ce}, \quad (4.2)$$

де  $W_{ce}$  – потужність одного світильника, Вт;

$n_{ce}$  – кількість світильників в приміщенні.

$$W = 100 \cdot 4 = 400 \text{ Вт}, \quad (4.3)$$

$$W = \frac{400}{48} = 8,33 \text{ Вт/м}^2. \quad (4.4)$$

Питомої потужності 8,33 Вт/м<sup>2</sup> по таблиці Б.3 із [18] відповідає освітленість в 250 лк при мінімальній допустимій освітленості 300 лк.

Отже, для створення сприятливих зорових умов в лабораторії необхідно збільшити кількість світильників або замінити лампи в світильниках на більш потужні.

#### 4.4 Пожежна безпека виробничого приміщення

Пожежна безпека - це стан об'єкта, за якого виключається можливість виникнення пожежі, а у разі її виникнення - запобігається вплив на людей небезпечних факторів та забезпечується збереження матеріальних цінностей.

Пожежна безпека досягається шляхом дії двох систем:

- системи запобігання пожежі;
- системи протипожежного захисту.

Усі службові та виробничі приміщення мають бути обладнані планом евакуації у разі пожежі, який містить вказівки щодо дій персоналу, розташування шляхів евакуації, первинних засобів пожежогасіння та місць розміщення пожежної сигналізації.

До горючих матеріалів, що потенційно можуть сприяти розвитку пожежі у приміщенні, належать: меблі, перегородки, двері, облицювання підлоги, ізоляційні матеріали кабелів тощо.

Протипожежний захист - це сукупність організаційних і технічних заходів, спрямованих на:

- запобігання виникненню пожежі;
- забезпечення безпечної евакуації людей;
- обмеження поширення вогню;
- створення умов для ефективного гасіння.

Потенційними джерелами займання в офісному чи виробничому середовищі є:

- електронні компоненти персональних комп'ютерів;
- обладнання для технічного обслуговування;
- системи електроживлення;
- кондиціонери й системи вентиляції, які за наявності несправностей можуть стати джерелом перегріву, іскріння або електричної дуги.

Висока щільність монтажу електронних компонентів у ПК створює додаткові ризики: при інтенсивному навантаженні можливе локальне перегрівання провідників і кабелів, що у разі пошкодження ізоляції може стати причиною загоряння.

Для відведення надлишкового тепла застосовуються системи активного охолодження (вентиляція, кондиціонування), які самі по собі також є джерелом потенційної небезпеки у разі короткого замикання або засмічення.

Енергопостачання робочих місць забезпечується через трансформаторну підстанцію або за допомогою двигун-генераторних агрегатів. Особливу увагу слід приділяти вибору типу трансформаторів - трансформатори з масляним охолодженням є вибухопожежонебезпечними, тому для безпечного використання в офісних приміщеннях рекомендовано використовувати сухі трансформатори.

## ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи були успішно реалізовані всі поставлені завдання та досягнуто основної мети - створено програмне забезпечення для модуля керування принтером із кінематикою «Delta» на базі прошивки Klipper.

У першому розділі проаналізовано вихідні дані технічного завдання та сучасні моделі Delta-принтерів, а також досліджено їхнє призначення та технологічні можливості.

Другий розділ присвячено вибору електронних компонентів, необхідних для розробки системи керування. Було складено загальну схему Delta-принтера та визначено ключові елементи апаратної частини.

У третьому розділі проведено налаштування програмного забезпечення: встановлено операційну систему Raspbian, виконано конфігурацію Wi-Fi і SSH, оновлено систему. Далі реалізовано встановлення та налаштування прошивки Klipper з урахуванням специфіки кінематики «Delta», після чого було розроблено і впроваджено відповідне програмне забезпечення для модуля керування.

У розділі щодо заходів безпеки виконано розрахунок штучного освітлення в дослідницькій лабораторії, де здійснювалася розробка ПЗ для Delta-принтера на основі Klipper.

## 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» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, В.А. Андрусевич, О. В. Токарева, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2022. – 151 с.

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

4. Принцип роботи лазерного гравірувального верстата [Електронний ресурс] // Веб-сайт компанії INFOLASER. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://infolaser.eu/stati/princip-raboty-lazernogo-gravirovalnogo-stanka/> – 09.04.2025р. – Загол. з екрану.

5. Можливості лазерного гравера [Електронний ресурс] // MIRSTANKOV.COM – Режим доступу до ресурсу: <https://mirstankov.com/uk/mozhливosti-lazernogo-so2-gravera/> – 10.04.2025р. – Загол. з екрану.

6. Laser cutting / Technologies [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.microstep.eu/technologies/laser-cutting/> – 11.04.2025р. – Загол. з екрану.

7. Артеменко О. Р. Конструктивні особливості систем вимірювання інструментів на верстатах з ЧПК [Електронний ресурс] / О. Р. Артеменко, Я. М. Колода, В. К. Андрійович. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <http://immmi.kpi.ua/imm2019/paper/viewPaper/17650> – 12.04.2025р. – Загол. з екрану.

8. Technological advances make laser machining more practical [Електронний ресурс] // cutting tool engineering. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ctemag.com/news/articles/technological-advances-makelaser-machining-more-practical> – 13.04.2025р. – Загол. з екрану.

9. Мироненко А. А. Сучасна інтеграція інформаційних технологій [Електронний ресурс] / А. А. Мироненко – Режим доступу до ресурсу: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/11911/1/Мироненко.pdf> – 14.04.2025р. – Загол. з екрану.

10. Мосянович О. Розробка програмного забезпечення сервера лазерного гравера з числовим програмним керуванням [Електронний ресурс] / О. Мосянович – Режим доступу [до ресурсу: http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/53675/2/2019\\_Holik\\_TRozrobka\\_prohramnoho\\_zabezpachennia\\_186-188.pdf](http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/53675/2/2019_Holik_TRozrobka_prohramnoho_zabezpachennia_186-188.pdf) – 15.04.2025р. – Загол. з екрану..

11. Григоренко І. В. Лазерний контроль якості виготовлення багатомірних об'єктів складної форми [Електронний ресурс] / І. В. Григоренко. – 2018. – ресурсу: Режим доступу до [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPIPress/38768/1/MicroCAD\\_2018\\_Nryhorenko\\_Lazernyi\\_kontrol.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPIPress/38768/1/MicroCAD_2018_Nryhorenko_Lazernyi_kontrol.pdf) – 16.04.2025р. – Загол. з екрану.

12. The future of laser cutting technology [Електронний ресурс] // 2020 – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ssclaser.co.uk/future-laser-cuttingtechnology/> – 17.04.2025р. – Загол. з екрану.

13. Kleshev G. Реалізація методології метрологічних методів в кіберінтегрованої інформаційно-вимірювальної системі [Електронний ресурс] / G. Kleshev – Режим доступу до ресурсу: [988-Текст%20статті-2290-1-1020200803.pdf](https://doi.org/10.202000803) – 18.04.2025р. – Загол. з екрану.

14. Вибір джерела лазерного випромінювання для цілей промислового очищення деталей авіаційної техніки [Електронний ресурс] / С. І. Планковський, Є. В. Цегельник, І. І. Головін, П. І. Мельничук. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: Nt\_2014\_4\_21.pdf – 19.04.2025р. – Загол. з екрану.

15. Діагностика та контроль робочих процесів: навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної та дистанційної форм навчання / В. М. Доля – Харків: НТУ «ХП», 2019. – 129 с.

16. Невлюдов І.Ш. Людино-машинний інтерфейс в технічних засобах автоматизації: Навчальний посібник / І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипченко, Б.О. Шостак. – Харків : «ХТМТ», 2019. – 244 с.

17. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, О. І. Филипченко, Н. П. Демська, С. П. Новоселов. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. – 366 с.

18. 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.