

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 лазерного верстата

(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,

групи АКТАКІТ-21-2

Максим ТКАЧЕНКО

(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

(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ

(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 Ткаченка Максиму Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення програмного забезпечення на основі Klipper для лазерного верстата

затверджена наказом по університету від “ 19 ” травня 2025р. № 390 Ст.

2. Термін подання студентом роботи “ 24 ” 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 лазерних гравірувальних верстатів;

4.3 Вибір електронних компонентів для реалізації програмного модуля лазерного гравірувального верстата;

4.4 Розробка програмного забезпечення на основі Klipper для лазерного гравірувального верстата;

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) – 18 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

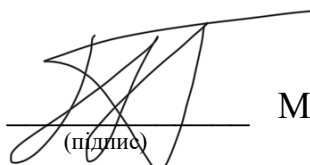
Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасних лазерних гравірувальних верстатів	28.04 – 04.05.25	виконано
2	Вибір електронних компонентів для реалізації програмного модуля лазерного гравірувального верстата	05.05 – 14.05.25	виконано
3	Розробка програмного забезпечення на основі Klipper для лазерного гравірувального верстата	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)

Максим ТКАЧЕНКО

Керівник роботи

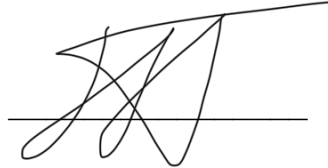
(підпис)

асистент Роман СТІЛЕЦЬ

(посада, власне ім'я прізвище)

Я, Ткаченко Максим Сергійович, 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. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«12» червня 2025 р.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke at the top, positioned above a solid horizontal line.

Максим ТКАЧЕНКО

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 60 с., 1 табл., 49 рис., 1 дод., 18 джерел.

ЛАЗЕРНИЙ ГРАВІРУВАЛЬНИЙ ВЕРСТАТ, KLIPPER, ЛАЗЕР,
ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, МІКРОКОМП'ЮТЕР, WEB-ІНТЕРФЕЙС,
ОПЕРАЦІЙНА СИСТЕМА, МЕНЮ.

Мета роботи – підвищення ефективності та гнучкості керування лазерним гравірувальним верстатом шляхом розроблення програмного забезпечення модуля керування на основі прошивки Klipper.

Об'єкт розробки – процеси автоматизованого керування роботою лазерного гравірувального верстата з використанням вбудованих систем і мікроконтролерів.

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

В роботі проведено аналіз призначення та технологічних можливостей сучасних лазерних гравірувальних верстатів. Проведено вибір електронних компонентів для реалізації програмного модуля керування лазерним гравірувальним верстатом. Побудовано загальна блок-схема лазерного гравірувального верстату. Розроблено програмне забезпечення для модулю керування лазерним гравірувальним верстатом. 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: 60 pp., 1 tab., 40 figs., 1 appendices, 18 sources.

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

The aim of the work is to develop software for the control module of a laser engraving machine based on Klipper firmware.

The object of development is to increase the efficiency of laser engraving machines.

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

The paper analyzes the purpose and technological capabilities of modern laser engraving machines. The selection of electronic components for the implementation of the software module for controlling a laser engraving machine was carried out. A general block diagram of a laser engraving machine is constructed. Software for the laser engraving machine 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 лазерних гравірувальних верстатів	11
1.1 Призначення лазерних гравірувальних верстатів	11
1.2 Технологічні можливості лазерних гравірувальних верстатів	14
2 Вибір електронних компонентів для реалізації програмного модуля лазерного гравірувального верстата	22
2.1 Електронні компоненти лазерного гравірувального верстату	22
2.2 Побудова загальної блок-схеми лазерного гравірувального верстату ..	30
3 Розробка програмного забезпечення на основі Klipper для лазерного гравірувального верстата	36
3.1 Налаштування ОС Raspbian	36
3.2 Встановлення програмного забезпечення Klipper	41
3.3 Налаштування Klipper для лазерного гравірувального верстату	43
4 Заходи і розрахунки для забезпечення безпечних умов праці	52
4.1 Аналіз умов праці на робочому місці	52
4.2 Промислова безпека на робочому місці	52
4.3 Виробнича санітарія у приміщенні	53
4.4 Пожежна безпека виробничого приміщення	55
Висновки	57
Перелік джерел посилання	58
Додаток А Демонстраційний матеріал	61

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

Верстатобудування вважається одним із основних напрямків у машинобудуванні, від технічного стану якого залежить рівень розквіту всієї економіки країни. Власне верстатобудування забезпечує устаткуванням всі підприємства машинобудівного комплексу.

У світі виробляється безліч моделей верстатів на сотнях підприємств. Останніми роками значне збільшення випуску продукції верстатобудування постежується у Німеччині, Італії, Японії, Китаї, Південній Кореї. Так, зростання конкуренції на світовому ринку металорізального обладнання спонуває компанії до впровадження інновацій, а також адаптації до новітніх технологій, ураховуючи їхні змінні стандарти.

Автоматизація процесів, підвищення продуктивності виробництва зі зниженням загальних витрат, розширення можливостей верстатів шляхом застосування сучасних пристроїв, розроблення якісного інструмента, вдосконалення довговічності та якості верстатів – усе це основні напрямки розвитку галузі на сьогодні. Власне такі тенденції реалізують зростання попиту на сучасне металорізальне обладнання з системами числового програмного керування (ЧПК).

Одним із найбільш перспективних напрямків сучасного верстатобудування окреслено лазерні гравірувальні верстати з ЧПК.

Мета роботи – підвищення ефективності та гнучкості керування лазерним гравірувальним верстатом шляхом розроблення програмного забезпечення модуля керування на основі прошивки Klipper.

Об'єктом розробки – процеси автоматизованого керування роботою лазерного гравірувального верстата з використанням вбудованих систем і мікроконтролерів.

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

Для досягнення окресленої мети доречно розв'язати такі завдання:

- дослідити сучасні лазерні гравірувальні верстати;
- вивчити призначення та технологічні можливості лазерних гравірувальних верстатів.

- розробити програмне забезпечення для модуля системи керування;

- втілити заходи і розрахунки для забезпечення умов безпечної праці.

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 СУЧАСНИХ ЛАЗЕРНИХ ГРАВІРУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

1.1 Призначення лазерних гравірувальних верстатів

Надійні та універсальні лазерні гравірувальні верстати спроможні забезпечити безмежний діапазон виробничих потреб. Вони набули активно застосування у рекламних компаніях, виробництві сувенірів, дизайні, пакуванні, продукції для штампів і печаток.

Галузь застосування лазера окреслюється ляхом визначення потужності випромінювача і габаритів робочої поверхні. Так, поверхневі роботи виконуються із меншою потужністю лазера, на противагу наскрізній порізці. Для ювелірної справи чи ручної роботи послуговуються портативними верстатами, а для розкрою габаритних виробів, роботи з тканинами, листовими матеріалами – більшими моделями, аж до масштабних розкрійних комплексів. Утім виробництво зовнішньої та інтер'єрної реклами, меблів, поліграфія, сувенірний бізнес, підприємства легкої промисловості та безліч інших галузей переважно задіюють високопродуктивні та точні лазерні гравери.

Окрім того, безконтактний спосіб нанесення зображення актуальний для роботи, як із ніжними, так і з високоміцними, твердими поверхнями. Ба більше, лазер без додаткових зусиль може відображати на заготовках будь-які тексти, зображення чи фотографії.

Лазерні гравірувальні верстати також підходять для наскрізного різання, фігурного розкрою, виконання перфорації, отворів складної конфігурації. Лазер може різати переважну більшість неметалевих матеріалів, адже його можливості обмежуються лише товщиною заготовки. Це ідеальний інструмент для різання м'яких, пористих, крихких і тонких матеріалів, на кшталт текстилю, паперової продукції, поролону.

Лазерний гравірувальний верстат реалізовано як пристрій, який

забезпечує та значно покращує процес із нанесення зображень на поверхневі вироби. Зауважимо, що такий метод декорування й ідентифікації речовин є відомим ще з давних-давен. Утім критичні та некритичні похибки як і у давнині періодично виникають навіть під час застосування техніки.

Справжній апогей у роботі лазерних гравірувальних верстатів розпочався із появою фрезерного обладнання, що підпорядковується системі числового програмного керування. Невеликі настільні верстати прийняли на себе весь обсяг роботи, до того ж, виконували її значно швидше та якісніше. Водночас кількість помилок разом із неточностями звелися до мінімуму, що, зі свого боку, посприяло можливості поставити випуск виробів на потік, оскільки фрезер із ЧПК спроможний не лише працювати швидко, але і наносити цілком ідентичне гравіювання, відповідно до закладеної в програмі траєкторії руху.

Фрезерні гравірувальні верстати з ЧПК гарантують високу якість роботи, проте поступаються лазерним верстатам за ступенем деталізації і швидкості їхнього нанесення. Втім, незважаючи на певні недоліки такого обладнання, це не заважає йому і досі бути затребуваним. Передусім, доречно зробити акцент на тому, що якою б фреза не була тонкою і гострою, вона неспроможна ідеально та чітко відтворити всі нюанси і контури складних зображень. Оскільки під час роботи фрезерного гравера похибка може становити приблизно 0,5 мм, то відтворювати з його допомогою мініатюрні малюнки або дрібні написи неможливо.

Лазерним гравірувальним верстатом називають пристрій із програмним керуванням, який й досі належить до розряду нових технологій, а період його більш-менш масового застосування нараховує буквально 5 – 10 років.

У зв'язку із появою на ринку такого обладнання, як 3D-принтери, токарнофрезерні обробні центри, лазерні гравірувальні верстати, обробні системи з числовим програмним керуванням, значно зменшили вартість розробки прототипу, а також уповільнився вихід на ринок окремих нескладних апаратних проєктів [5].

Застосування системи ЧПК підвищує ефективність лазерних гравірувальних верстатів, зокрема дозволяючи залучати прості алгоритми для вибору та (або) редагування об'єктів, які потребують оброблення. Це, зі свого боку, втілює скорочення витрат часу на оброблення [6].

Окрім того, значно популяризувались у використанні системи вимірювання на основі лазерів [7]. Такі засоби забезпечують інженера нагальною точною інформацією про геометричні розміри, форму та положення об'єктів контролю. Так, у роботі [8] розглянуті лазерні системи TL, які реалізують безконтактне вимірювання довжини та діаметра інструмента, форму окремих зубів, а також знос під час його обертання з номінальною швидкістю у двох координатах: $\pm X$, $+Z$ та $\pm Y$, $+Z$. У дослідженні [9] наведено спосіб вимірювання, а також корегування зносу інструмента. Це досягається шляхом застосування лазерного приладу, котрий функціонує на базі кіберінтегрованої інформаційно-вимірювальної системи активного контролю виробництва деталей штампів. Утім запропоноване рішення ґрунтується на застосуванні оптичного методу вимірювання разом із автоматичними керуванням щодо корегування оброблення деталей. Відмінність полягає у використанні каналу активного лазерного приладу.

Експериментальним шляхом було підтверджено, що в разі застосування волоконного лазера з варійованою тривалістю імпульсів з поверхні літальних апаратів видаляються лакофарбові покриття. Проте, змінюючи вихідну потужність лазера, цілком можливо отримати різний ступінь очищення для варійованої кількості лакофарбового покриття [10].

Зауважимо, що діаметр лазерного променя є настільки малим, що ширина прорізів між деталями чи отворами, котрі утворені ним, здебільшого не перевищує товщину людської волосини. І це тільки верхівка величезного списку переваг лазерної техніки, зокрема, одним із привілеїв можемо позначити власне відсутність недоліків. Із незначним натягуванням єдиним мінусом можна визнати не дуже бюджетну вартість цих апаратів. Однак навіть у домашніх майстернях мініатюрні лазерні верстати вже перестали

бути чимось незвичним. Якість лазерного гравірування настільки бездоганна, що ним послуговуються навіть для виготовлення штампів і печаток [10]. Хоча лазерний гравірувальний верстат і вважається універсальним, проте він призначений все ж таки для проведення вузькоспеціалізованих робіт. Передусім лазерний варіант цього інструменту безпосередньо не контактує з деталлю, а випалює матеріал високоенергетичним променем. За допомогою цього інструмента можна виконати:

- гравірування по каменю, дереву, металу і навіть склу. Подібні операції є актуальними, зокрема, під час виготовлення сувенірної продукції. У цангу затискається відповідна насадка, тому лазерним гравірувальним верстатом можна малювати на різних матеріалах;

- видалення покриттів, як-от ошкурювання фарби чи шліфування дрібних виробів, а також важкодоступних місць за допомогою насадок на кшталт повстяних кіл, наждачного паперу й абразивних кілець;

- виконання тонких пропилів, прецизійного різання по деревині і металам. Інструмент користується попитом у ювелірів, адже дозволяє виконувати точне оброблення матеріалів.

- нанесення маркувань, зокрема на металеві деталі. Крім того, лазерним гравером виготовляють печатки, ударні штампи, кліше.

1.2 Технологічні можливості лазерних гравірувальних верстатів

Гравірувальні верстати, котрі під час своєї роботи покладаються на лазерний промінь замість металевого ріжучого інструмента, за всіма параметрами тримають далеко позаду своїх конкурентів по ремеслу. Вагомими аргументами для такого твердження будуть [10]:

- висока швидкість гравірування до 700 мм/с;
- якість готового зображення в діапазоні $\pm 0,01$ мм;
- контури зображення не втрачають своєї чіткості;
- широкий асортимент матеріалів, які доступні для декорування;

- лазер не чинить фізичного впливу на матеріали, водночас існує широкий асортимент матеріалів, які доступні для декорування;
- комп'ютерне керування всім процесом заощаджує час;
- високий ступінь деталізації у разі нанесення невеликих зображень або тих, які містять велику кількість дрібних елементів;
- вироби не потребують фіксації, отже, економія коштів на придбання кріпильних пристроїв;
- високий ступінь деталізації;
- ідеально гладкі контури і стінки зображення після першого проходу променя;
- відсутність потреби щодо купівлі великої кількості інструментів;
- низький рівень шуму (35 дБА) та пилоутворення.

Лазер утворено з трьох ключових частин: джерела енергії, середовища посилення та оптичного резонатора. Джерело енергії ще йменують «насосом» або «джерелом насоса». Його місія полягає у передаванні енергії до середовища посилення задля подальшого переходу до збудженого стану. Джерело переважно буває електричне, освітлювальне, як-от спалах, або навіть інший лазер. Достатньо енергії передати до середовища, щоб досягти інверсії популяції, тобто кількість частинок у збудженому стані повинна бути більшою за кількість частинок в основному стані. Так, частинка потрапляє до збудженого стану, поглинаючи достатньо енергії, щоб один електрон спромігся перейти на вищий енергетичний рівень, який розташований далі від ядра. Коли через деякий час енергійний електрон відскакує назад, то така ж кількість енергії виділяється через некогерентне випромінювання. Це йменується спонтанним викидом.

Як правило, середовище перебуває в оптичному резонаторі, котрий, переважно, утворено з двох вигнутих дзеркал, одне з яких є частково прозорим. До того ж, випромінювання, котре виникло внаслідок спонтанного випромінювання і містить правильну довжину хвилі, фазу та напрямок, відображає між собою вперед і назад, тому при кожному переході воно

взаємодіє зі збудженими частинками середовища, змушуючи їх повернутися до початкового енергетичного рівня. Коли ж власне відбувається таке стимульоване повернення, то частинки випромінюють фотони з тією ж фазою, частотою, поляризацією та напрямком, що й фотони променя, котрий проходить, посилюючи, зі свого боку, бажане випромінювання. Частина випромінювання виходить через частково прозоре дзеркало як сфокусований лазерний промінь, а інша частина – відбиває назад з метою подальшого посилення [11].

Однак SSC (Steel Service Center) стверджує, що майбутнє ефективності використання лазерів реалізуватиметься шляхом автоматизованого зберігання матеріалів для завантаження та розвантаження, моніторингу за технологічними проривами в галузі. До того ж, прямий діодний лазер DDL (Direct Diode Laser) набуває перспективи, зважаючи на збільшення швидкості різання, що сприяє підвищеній ефективності енергоспоживання. Проте швидкості, на яких функціонують лазерні гравірувальні верстати, переважно є затребуваними для різання тонколінійних матеріалів, зокрема алюмінію [11].

Прямі діодні лазерні технології послуговуються діодами, здебільшого для процесу різання, тому DDL, ймовірно, стане майбутнім галузі лазерного різання, адже виключає середній процес всіх інших лазерних різаків. Утім донедавна DDL можна було послуговуватися лише для різання тонких металів, оскільки він характеризується низьким рівнем потужності приблизно 2 кВт, що обмежує його застосування в металургійній промисловості. Зважаючи на останні розробки DDL, наразі платформі властива потужність близько 8 кВт. Це розширює спектр її видатних можливостей, отже, дозволяє прорізати їй більш товсті матеріали.

Технологія DDL містить три ключові переваги над CO₂, волоконними та дисковими лазерами, зокрема, мова йде про ефективність, швидкість різання, а також вищу якість різання. Дослідження наочно демонструють, що DDL ріже приблизно на 15 % швидше для всіх застосувань і володіє на 30 %

більшою швидкістю різання порівняно з алюмінієвими з різанням диска або волокна. Одним із найвагоміших досягнень DDL визначимо якість різання, якої ця технологія спроможна досягти. Завдяки своїй унікальній довжині хвилі, а також формі лазерного променя він виконує надрізи вищої якості порівняно з іншими джерелами лазера.

Незважаючи на те, що DDL пропонує високі швидкості різання, зачтосування технологій для ринку лазерного різання все ще вдосконалюється, до того ж, без автоматизації, швидкість лазера стає майже несуттєвою.

Технологічний прогрес у лазерному обробленні на думку Cutting tool engineering [12].

Джерела підкреслюють, що зміни в лазерному обробленні відбуваються швидко. Показники потужності зростають, водночас ціни залишаються незмінними або навіть знижуються. Так, середня потужність системи волоконного лазерного різання кілька років тому становила 3 кВт або 4 кВт. Наразі – від 6 кВт до 8 кВт. Однак очікується, що діапазон становитиме від 10 кВт до 12 кВт через 5 років.

Потужність лазерних граверів подвоюється кожні 10 років, через це технологія стає більш надійною та багатофункціональною, тому згодом може стати доступним й оброблення міді.

Разом із тим найближчими роками передбачається безліч змін у волоконно-лазерних системах. Так, протягом перших 20 років набули значного розповсюдження лазерні системи з CO₂. Тож бурхливий розвиток, який спостерігався, наразі завершився реалізацією надійного пристрою. Волокнисті системи містять однакоvu модель зростання і розвитку.

Буде доречним окреслити чотири причини, щоб придбати новий лазерний гравірувальний верстат будь-якого виду. Зі свого боку, для систем лазерного різання такі причини набувають дедалі більш вагомого значення. Зокрема, вони мають збільшити виробничі потужності, розширити можливості, вдосконалити процес, а також не відставати від конкурентів. Ці

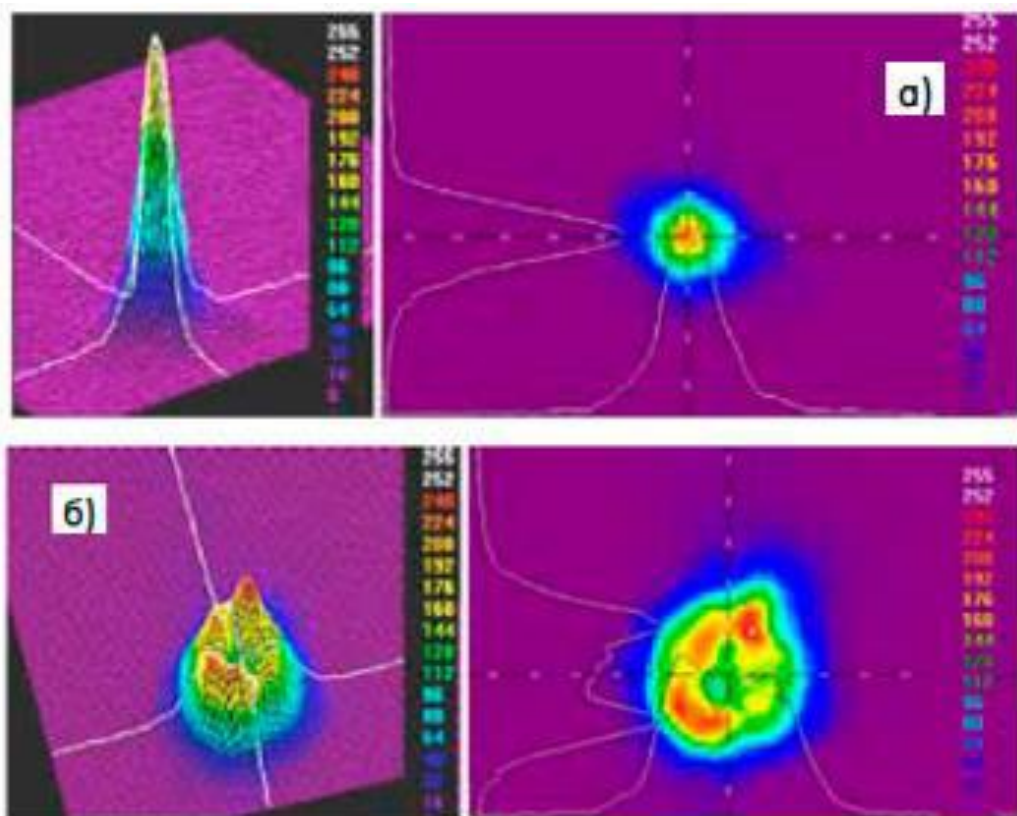
чотири чинники є наслідком того, чому компанія Cutting tool engineering продовжує оновлювати лазерні системи свого магазину.

Випромінювання лазерів, які функціонують у безперервному чи імпульсному режимах, досягаючи поверхні оброблюваного матеріалу, характеризується щільністю потужності, достатньої для його нагрівання, плавлення чи випаровування. Ці процеси є підґрунтям для більшості лазерних технологій оброблення матеріалів. З метою вибору режимів технологічних процесів доцільно дібрати оптимальне поєднання параметрів випромінювання та матеріалів (поєднання лазер-матеріал) як-от: просторову когерентність, потужність випромінювання, що генерується довжиною хвилі, поглинальну здатність оброблюваного матеріалу. Здебільшого зазначене вище стосується використання лазерів як інструмента для виведення бітової інформації, на кшталт графічних зображень на металі. Останнім часом такі операції набувають все більшого застосування, вони характеризуються специфічними особливостями, що висувають свої вимоги до обладнання, котрим користуються. На ринку маркувального лазерного обладнання запропоновані різноманітні лазерні комплекси. Проте опрацювання сучасного стану тематичної літератури виявило, що будь-яких рекомендацій щодо застосування конкретного обладнання з цією метою не розроблено. Виконано аналіз чинного лазерного обладнання з позицій його застосування в операціях виводу графічної інформації на поверхню металу.

Усі установки обладнані однаковою лазерною сканувальною голівкою, що створена на базі гальванометричних сканаторів, і однаковим об'єктивом плоского поля. Сканувальна голівка реалізує в усіх випадках переміщення променя в поле $100 \times 100 \text{ мм}^2$ із точністю (повторюваністю) контуру 2,5 мкм.

Обладнання, що представлено для експериментальних робіт, є сучасними лазерними системами. Так, одні засновані на ламповому накачуванні, інші – на новітніх розробленнях у напрямку лазерної техніки, напівпровідниковому накачуванні. Вибір обладнання було здійснено, зважаючи на його доступність для проведення експериментальних

досліджень, а також з урахуванням специфічних особливостей розподілу щільності світлового потоку по діаметру пучка випромінювання. Системи, що засновані на твердотільному Nd:YAG-лазері, реалізують розподіл енергії по площі плями з явно вираженим піком в його центрі (гаусів розподіл) і яскраво вираженим багатомодовим випромінюванням за певних потужностей. Втім опромінення матеріалу випромінюванням такого лазера є нерівномірним по площі. Таким чином, реакції матеріалу на падаюче випромінювання в різних зонах відрізняються. До того ж, певні фізичні явища простежуються лише в тих зонах, які поглинули світловий потік достатньої щільності. Ночно це відображено на рисунку 1.1.



а) потужність випромінювання – $P_{\text{вип.}} = 2$ Вт;

б) потужність випромінювання – $P_{\text{вип.}} = 10$ Вт.

Рисунок 1.1 – Просторовий розподіл енергії в лазерному пучку

Nd:YAG-лазера з ламповим накачуванням

(цифрами позначені зони різної пікової енергії)

Відповідно до аналізу виявлено, що розподіл енергії по перетину променя лазера чинить істотний вплив на характер відбитка на матеріалі. Підкреслимо, що структура розподілу енергії в пучку Yt-лазера відрізняється від розподілу в пучку Nd: YAG-лазера. Так, у пучку Yt-лазера енергія по плямі розподіляється більш рівномірно, як це продемонстровано на рисунку 1.2. Вагомою характеристикою оптичної системи, котра впливає на геометричні характеристики відбитка, визначено глибину фокусування лазерів, які застосовуються [13].

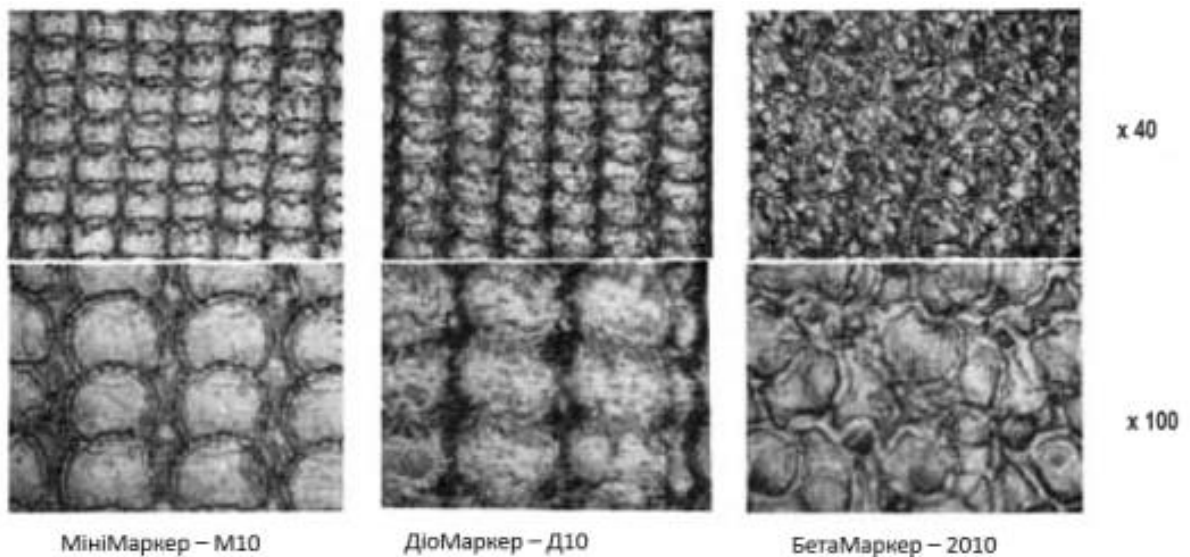
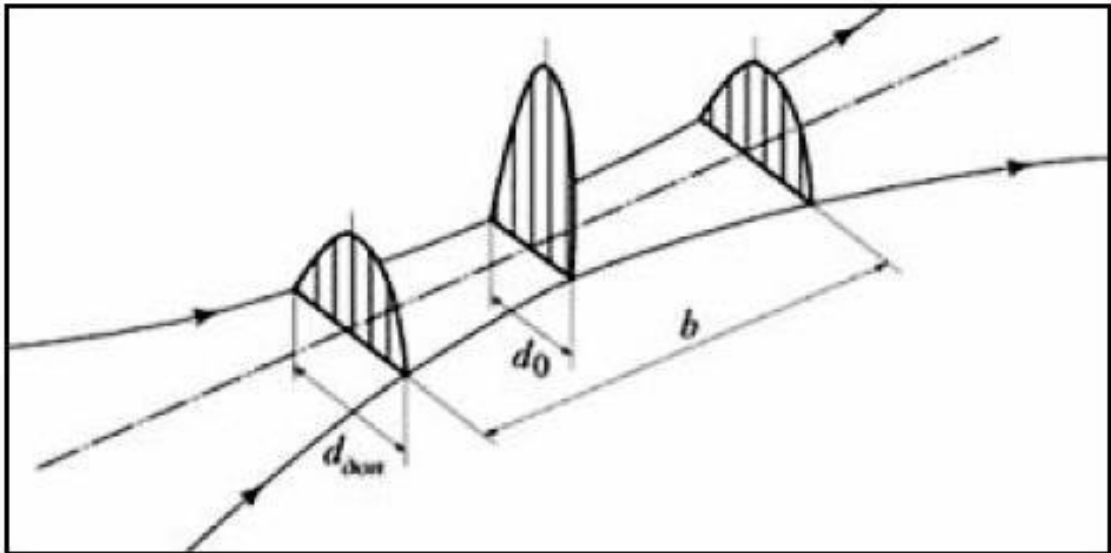


Рисунок 1.2 – Поверхнева структура металу після оброблення лазерним випромінюванням

Лазерний промінь, який перетворений оптичною системою, в області фокусування набуває вид каустики, гіперболоїда обертання з діаметром d_0 перетяжки пучка. Чим більшою буде глибина фокусування оптичної системи, тим вищою стане ймовірність додавання максимальної потужності до поверхні матеріалу, котра визначається діаметром відбитка. Форма пучка і глибина різкості b під час його фокусування розрізняються для різних типів лазерів. Приклад розподілу інтенсивності в різних перетинах каустики лазерного пучка наведено на рисунку 1.3.



b – глибина фокусування; $d_{\text{дод.}}$ – діаметр пучка на границях глибини різкості; d_0 – діаметр пучка в перетягуванні

Рисунок 1.3 – Розподіл інтенсивності в різних перетинах каустики лазерного пучка

Утім за таких умов не вдається отримати кольорові структури на поверхні матеріалів. Оброблення матеріалів, яким властива низька температура плавлення (свинець), призводить до абляції, а не до створення оксидного шару. Власне формування зразків із тестовими таблицями реалізовували з огляду на:

- певні теплофізичні властивості матеріалів;
- технологічні особливості лазерних установок; поєднання обох чинників.

Отже, відповідно до них, а також зважаючи на завдання експерименту, проводився вибір лазерного комплексу, варіювалися потужність випромінювання, частота проходження імпульсів і швидкість оброблення. Зауважимо, що потужність регулювалася шляхом зміни технологічних параметрів лазерних установок.

Сформовані програми керування з тестовими таблицями для оброблення металевої поверхні лазерним випромінюванням із заданими

параметрами впливу лазерного променя передавалися з метою виконання на лазерні комплекси.

Оброблення металевої поверхні було реалізовано в кисневому середовищі (на повітрі) за кімнатної температури. Так, за результатами експериментальних досліджень, з'явилась можливість певною мірою зрозуміти особливості впливу імпульсного лазерного випромінювання різної генерації на формування кольорових оксидно-вмістних структур на поверхні металів, а, отже, розробити рекомендації щодо застосування того чи іншого обладнання.

Визначено, що на різних лазерних комплексах можна підібрати такі технологічні параметри, згідно з якими потужність випромінювання, котра впливає на формування кольорових структур, була б однаковою. До того ж, були отримані аналітичні залежності еквівалентних технологічних параметрів установок.

2 ВИБІР ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ ЛАЗЕРНОГО ГРАВІРУВАЛЬНОГО ВЕРСТАТА

2.1 Електронні компоненти лазерного гравірувального верстата

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

Зразок лазерного гравірувального верстата продемонстровано на рисунку 2.1.

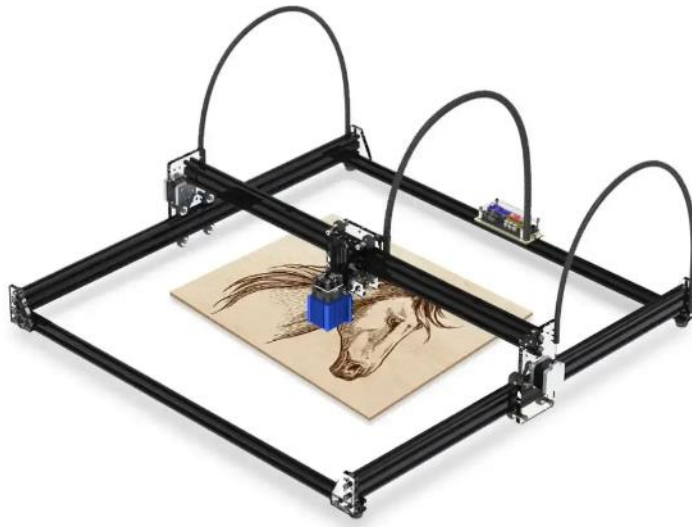


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд лазерного гравірувального верстата

Загальна будова лазерного гравірувального верстата передусім передбачає застосування двох осей переміщення X та Y. Однак вісь Z для лазерного верстата не є обов'язковою. Це пов'язано з тим, що можлива зміна фокусної відстані через оптичну систему самого лазера у вигляді лінзи, котра регулюється. Таким чином, функціонування верстата забезпечується 2 кроковими двигунами та кінцевими вимикачами, котрі, зі свого боку,

реалізують зворотній зв'язок для переміщення, а також застосовуються для визначення початкового положення лазера.

Кроковий двигун Nema 17 продемонстровано на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Кроковий двигун Nema 17

Ще одним елементом є плата системи керування, котра забезпечує керування всією периферією лазерного гравірувального верстата завдяки G-code. Він задіюється з програм для оброблення зображення, що є аналогом слайсерів для 3D-друку. До того ж, плата керування через PWM керує власне лазером. Наразі існує безліч плат керування. Різняться вони типом мікроконтролерів, які застосовуються. Найзатребуванішими з них вважаються Arduino Mega, Nano, Uno, ESP32, Raspberry RP2040, плати, створені на базі STM32. Залежно від мікроконтролерів плати можуть містити різну кількість можливих виходів для керування, різну швидкодію та різний обсяг EEPROM, який зберігає в собі можливості прошивок.

На рисунку 2.3 представлено плату керування Raspberry RP2040.



Рисунок 2.3 – Плата керування Raspberry RP2040

Для застосування плат керування послуговуються платами розширення, котрі забезпечують можливість підключення різної периферії й окремого живлення.

Наочний приклад плати розширення RAMPS продемонстровано на рисунку 2.4.

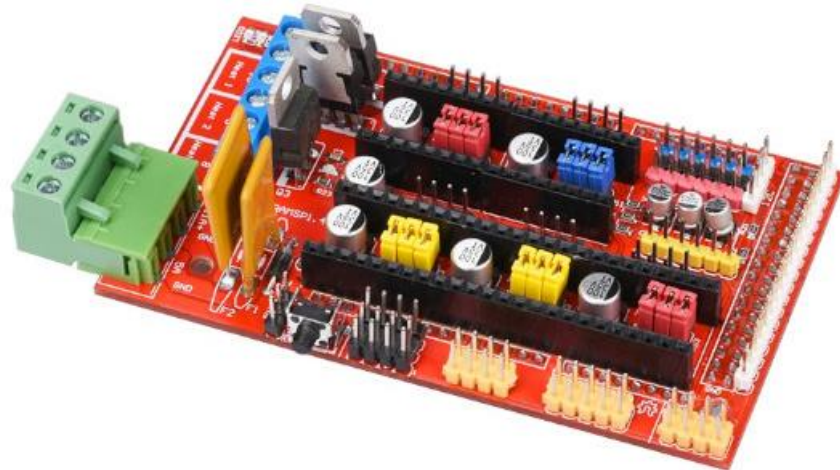


Рисунок 2.4 – Плата розширення RAMPS для Arduino Mega 2560

Щоб реалізувати керування кроковими двигунами, доцільно застосовувати драйвери, котрі забезпечують їхнє живлення, а також перетворюють сигнали з мікроконтролера на сигнали керування двигуном.

Ключовими характеристиками драйверів визначено струм, який подається на крокові двигуни, та кількість кількість мікрокроків, які спроможний зробити двигун. Зауважимо, що чим більший струм подається тим більший момент крутіння. До того ж, у цілому двигун може пройти 200 кроків для повного обертання з $1,8^\circ$ на один крок. Утім драйвер надає можливість розбити один крок на більшу кількість мікрокроків, завдяки чому збільшиться точність переміщення. Отже, драйвери можуть реалізувати від 16 до 256 мікрокроків. Наразі найбільшої популярності набули такі драйвери, як DRV8825, TMC2209 тощо.

Приклад драйвера крокового двигуна TMC2208 наведено на рисунку 2.5.

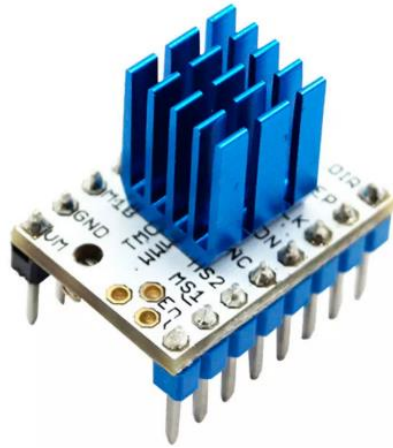


Рисунок 2.5 – Драйвер крокового двигуна TMC2208

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 лазера продемонстровано на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд діодного лазера

З метою фокусування діодний лазер застосовує лінзу, котра регулює фокусну відстань.

Загальні характеристики таких лазерів окреслюються потужністю випромінювання, вхідною потужністю, котра може відрізнитися від

потужності випромінювання завдяки ККД, яке може становити від 30 % до 70 %. У цілому потужність може варіювати від 0,5 Вт до 100 Вт, а довжина хвилі може змінюватися від 250 нм до 1550 нм залежно від матеріалу лазера, а також вхідної напруги живлення, що, зі свого боку, може становити як 12 В, так і 24 В. Зважаючи на довжину хвилі та потужність, лазер спроможний гравіювати або різати різні матеріали від деревини до металу. Проте вагомий недолік такого типу лазерів полягає в обмеженому терміні користування, а також чутливості до температури, через що виникає необхідність в охолодженні такого лазера.

Ще одним типом є газові лазери. Як активне середовище у них діє газ, в якому електричний розряд збуджує атоми газу, що призводить до виникнення еманції когерентного випромінювання.

Складовими елементами газового лазера є трубка, в якій знаходиться газ, електроди, що встановлені по краях трубки та створюють електричний розряд, система дзеркал і система охолодження. Крім того, характерною ознакою є тип газу, що застосовується, переважно це гелій, неон, диоксидвуглеця, аргон тощо. Відповідно до газу, котрий застосовують, змінюється і довжина випромінювання, як-от від 10,6 для вуглецевого лазера до 647,1 для криптона. Зауважимо, що на відміну від діодного, газовий лазер містить такі переваги, як більш тривалий термін застосування, менший вплив температури, що забезпечує довший період безперервної роботи, висока стабільність та якість пучка випромінювання. До того ж, на противагу діодним, газові лазери характеризуються більшою потужністю випромінювання, тобто можуть бути застосовані у станках для розрізання металу та зварювання.

Утім недоліком таких лазерів вважається висока складність побудови електронних компонентів і конструкції, а також непомірна ціна.

Як останній тип лазерів розглянемо твердотільні лазери, в яких за активне середовище застосовують кристал, зокрема прикладом такого кристала може бути ітрій-алюмінієвий гранат (YAG-лазер). Водночас з

метою фокусування послуговуються сканаторною системою, що за допомогою системи дзеркал реалізує переміщення плями лазера по робочій поверхні. Крім того, твердотільні лазери повинні містити систему охолодження. Довжина хвилі таких лазерів становить від 650 нм до 2940 нм. Утім до переваг такого типу лазерів належать: його висока потужність, яка може досягати 1 – 5 кВт, можливість безперервної роботи в імпульсному режимі. Недоліки ж окреслюються необхідністю охолодження, складністю побудови конструкції лазера та електронних компонентів, а також дороговартістю таких систем.

У зв'язку з тим, що метою кваліфікаційної роботи визначено розроблення ПЗ на базі прошивки Klipper, отже, виникає необхідність у застосуванні мікрокомп'ютера. Тому для власної роботи доречно обрати мікрокомп'ютер, який би підтримував це ПЗ.

Наразі реалізовано декілька видів мікрокомп'ютерів. Першими вважається лінійка одноплатних мікрокомп'ютерів Raspberry, котрі були розроблені для досліджень та навчання. Широкого розповсюдження вони набули в системах Internet of Things і 3D-друці, завдячуючи своїй багатофункціональності та мініатюрності.

Наочний приклад мікрокомп'ютерів Raspberry представлено на рисунку 2.7.



Рисунок 2.7 – Зразок одноплатного мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4

Raspberry Pi налічує декілька модифікацій, які змінювалися з часом. Різниця вони можуть процесорами, зокрема, як ARM176JZ-F у першій версії А, що характеризується частотою 700 МГц, одним ядром та 256 Мб оперативної пам'яті, так і Broadcom BCM2712 або ARM Cortex A76 із архітектурою x64, частотою 2.4 ГГц, 4 ядрами, 4 – 8 ГБ ОЗП. Окрім того, мікрокомп'ютер укомплектований 4 портами USB, а починаючи з версії 3В, нарізно від провідного Інтернету доповнений також модулем Wi-Fi разом із модулем Bluetooth. Ще одна відмінність від інших мікрокомп'ютерів полягає в застосуванні GPIO, тобто інтерфейсу введення/виведення загального призначення, що дозволяє підключати периферію напряму до мікрокомп'ютера. Так, в останніх версіях Raspberry кількість таких пінів GPIO дорівнює 40.

Ба більше, у Raspberry є два виходи HDMI та MIPI для прямого підключення спеціальних екранів. Утім внутрішня пам'ять у комплектації такого мікрокомп'ютера відсутня, тому операційна система зберігається та функціонує на SD-карті. Живлення забезпечується через вхід USB Type-C або MicroUSB у більш старіших версіях.

Для зазначеного мікрокомп'ютера було розроблено спеціальну операційну систему, що заснована на Linux і отримала назву Raspberry Pi OS. Відрізняється дана ОС тим, що в базовій версії функціонує спеціальне середовище робочого стола PIXEL, а також є ПЗ Mathematica для розрахунків. Окрім того, в описаному дистрибутиві діє спеціальна програма, котра дозволяє виконувати початкове налаштування всіма основними модулями мікрокомп'ютера rasbian-config. На рисунку 2.8. продемонстровано її вікно.

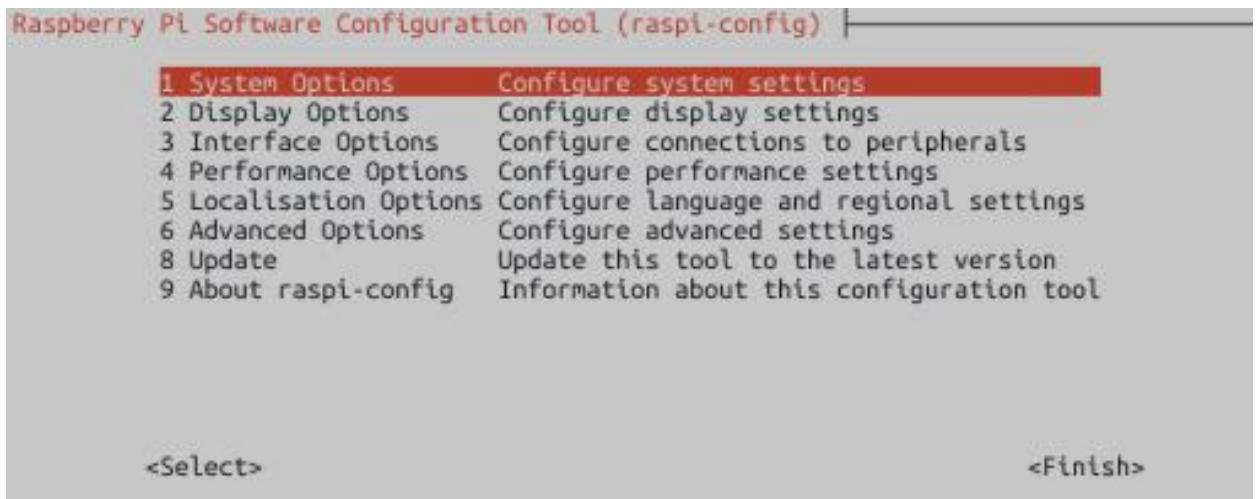


Рисунок 2.8 – Програмне забезпечення raspbian-config

Наступним одноплатним мікрокомп'ютером стає Orange Pi, котрий майже повністю копіює Raspberry Pi, проте відрізняється процесором, адже в останній версії було використано Rockchip RK3588Sx64, який має від 4 ГБ до 32 ГБ оперативної пам'яті. Також укомплектовано GPIO, декількома USB-роз'ємами, виходом HDMI, виходом для камери MIPI, та 2 MIPI для екранів. Послугується операційною системою OrangePi OS, яку було розроблено спеціально для цих мікрокомп'ютерів, утім водночас може застосовувати Android, Ubuntu, Armbian, Debian тощо. Всі ОС встановлюються на SD-карту, за аналогією до Raspberry.

Порівнюючи дві лінійки мікрокомп'ютерів, комплектації яких були проаналізовані вище, Orange Pi вважається більш дешевою альтернативою для застосування, оскільки ця модель окрім нижчої ціни характеризується і меншими можливостями на противагу Raspberry. Мова йде про меншу кількість пінів GPIO та USB-портів, а також не такий продуктивний процесор тощо.

Одноплатний мікрокомп'ютер Orange Pi представлено на рисунку 2.9.

Таким чином, можемо резюмувати, що RaspberryPi останньої версії, незважаючи на вищу ціну, вважається кращим рішенням для побудови лазерного гравірувального верстата на програмному забезпеченні Klipper.



Рисунок 2.9 – Одноплатний мікрокомп'ютер Orange Pi 4

2.2 Побудова загальної блок-схеми лазерного гравірувального верстата

Враховуючи попередній аналіз головних компонентів, якими укомплектовано лазерний гравірувальний верстат, можемо зробити висновок про те, які власне компоненти є обов'язковими для лазерного верстата:

- мікрокомп'ютер, який відповідає за керування платою керування, котра, зі свого боку, забезпечує керування периферією;
- екран, який реалізує керування ПЗ Kipper на мікрокомп'ютері;
- плата керування, що реалізує пряме керування периферією, зокрема, лазером та кроковими двигунами через драйвери крокових двигунів.
- драйвери крокових двигунів, які перетворюють сигнал з плати керування на кроки переміщення двигуна;
- кінцеві вимикачі, що застосовуються задля визначення початку координат;
- діодний лазер, який виконує операції гравіювання або різання;
- вентилятори охолодження лазера;
- блок живлення, що забезпечує живлення мікрокомп'ютера, плати керування та лазера через перетворювачі напруги;

Отже, проаналізувавши компоненти, а також утворення блок-схеми було окреслено перелік компонентів, які складають електричну частину лазерного гравірувального верстата.

Загальну блок-схему лазерного гравірувального верстата продемонстровано на рисунку 2.10.

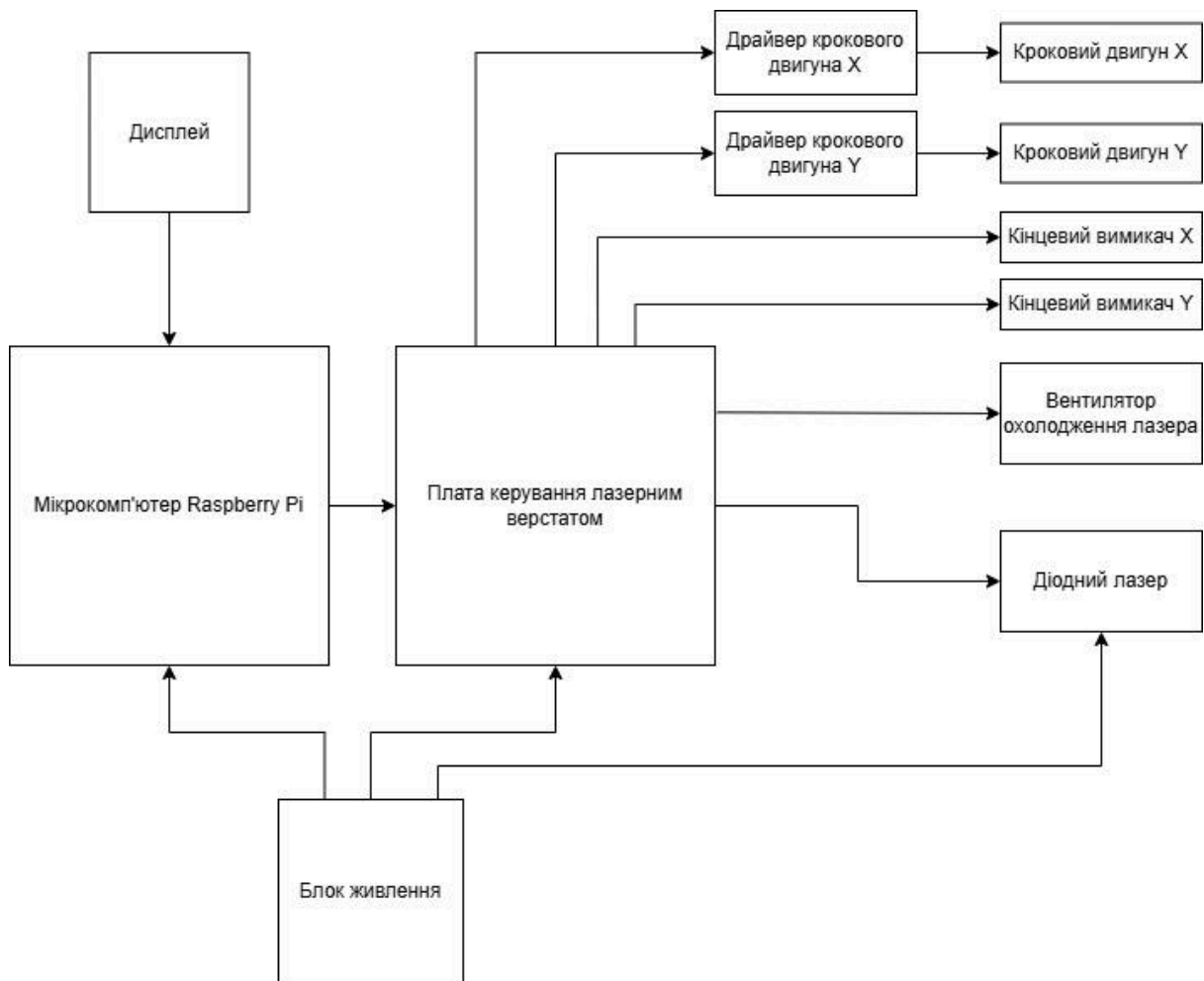


Рисунок 2.10 – Загальна блок-схема лазерного гравірувального верстата

З метою побудови лазерного гравірувального верстата 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 Fritzing.

На рисунку 2.11 відображено схему підключення.

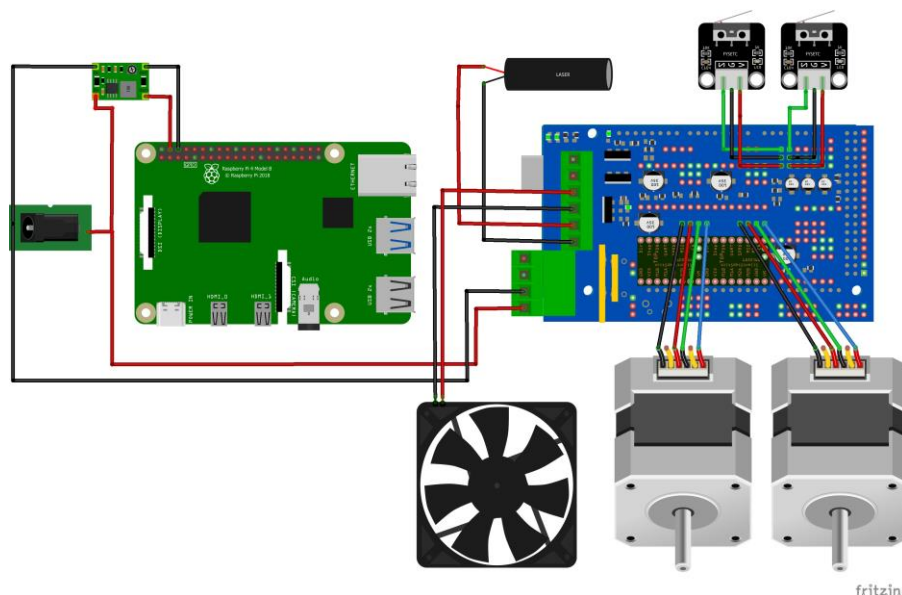


Рисунок 2.11 – Схема підключення електричних компонентів лазерного гравірувального верстата

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 2.12.



Рисунок 2.12 – Блок живлення Mean Well

Живлення Raspberгу реалізується через піни GPIO, зокрема, 5V Power та GND, оскільки через них виконується живлення власне RaspberryPi 4. Схему пінів GPIO продемонстровано на рисунку 2.13.

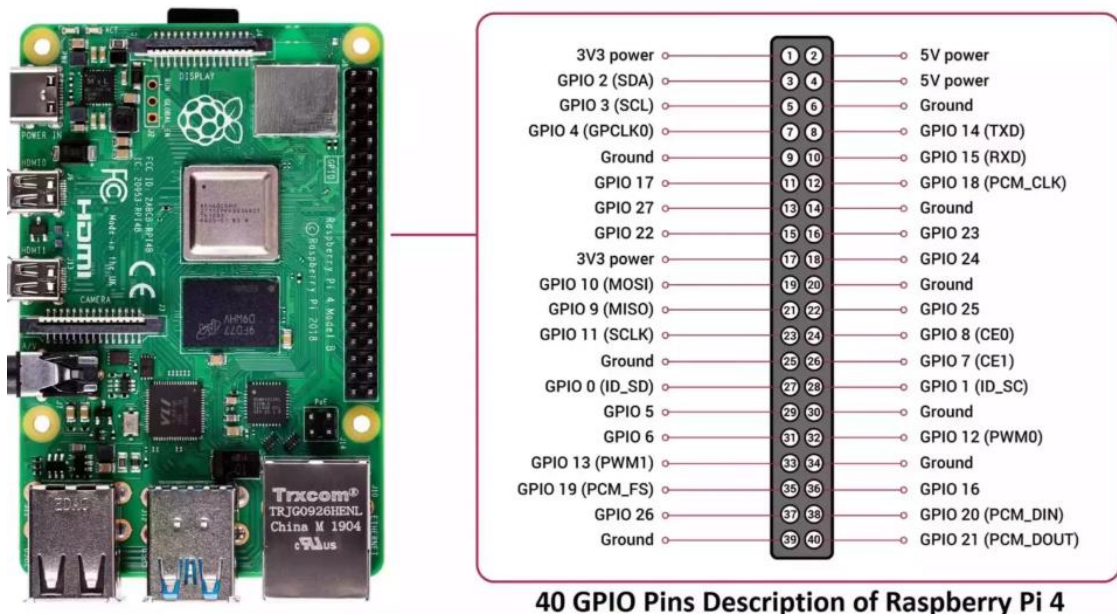


Рисунок 2.13 – Pin out Raspberry Pi 4

Для живлення Raspberгу 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 2.14.



Рисунок 2.14 – 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 2.15.

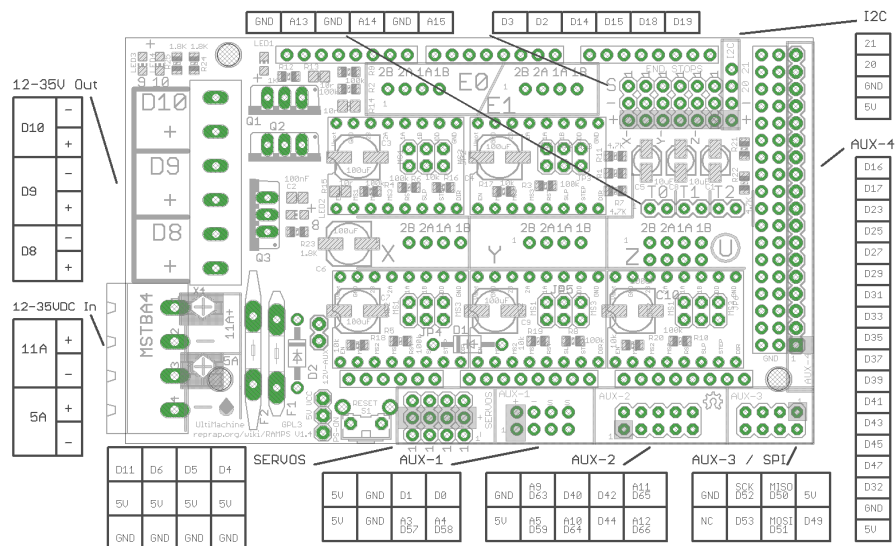


Рисунок 2.15 – Pinout RAMPS

Так, підключення лазера було виконано на керувальний вихід D8, який дозволяє жити та керувати потужністю випромінювання лазера одночасно.

Якщо лазер володіє трьома дротами, як-от «+», «-» і PWM із

додатковою платою PWM, підключення реалізується за таким принципом: живлення «+» та «-» підключається до блока живлення, а PWM – до керованого цифрового піна, котрий може бути D40. Приклад зазначного лазера з платою наведено на рисунку 2.16



Рисунок 2.16 – Лазер NEJE A40640 (а) з платою PWM (б)

Власне для керування лазерним гравірувальним верстатом доречно послуговуватися екраном RaspberryPi480×320, 3,5”, який представлено на рисунку 2.17.



Рисунок 2.17 – 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.

3 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ КЛІРПЕР ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ГРАВІРУВАЛЬНОГО ВЕРСТАТА

3.1 Налаштування ОС Raspbian

З метою налаштування ПЗ для лазерного гравірувального верстата передусім доцільно встановити та налаштувати ОС Raspbian. Для цього спершу необхідно завантажити образ операційної системи з офіційного сайту Raspberry, а потім створити образ завантажувального диска на SD-карті за допомогою ПЗ Balena Etcher, з яким у подальшому буде функціонувати ОС власне на Raspberry. Процес формування завантажувального образу продемонстровано на рисунку 3.1.

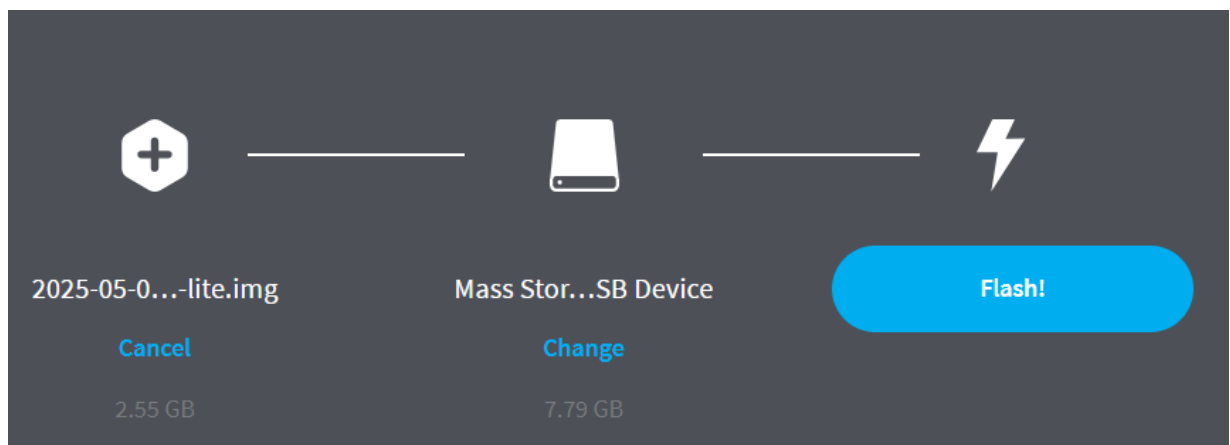


Рисунок 3.1 – Створення завантажувального образу на SD-карті

Після встановлення операційної системи було виконано початкові налаштування через локальну мережу шляхом застосування ПЗ raspbian-config.

Окрім того, було налаштовано Wi-Fi разом із інтерфейсом SSH, виконано оновлення програмного забезпечення та ядра ОС.

Процес налаштування raspbian-config наведено на рисунку 3.2.

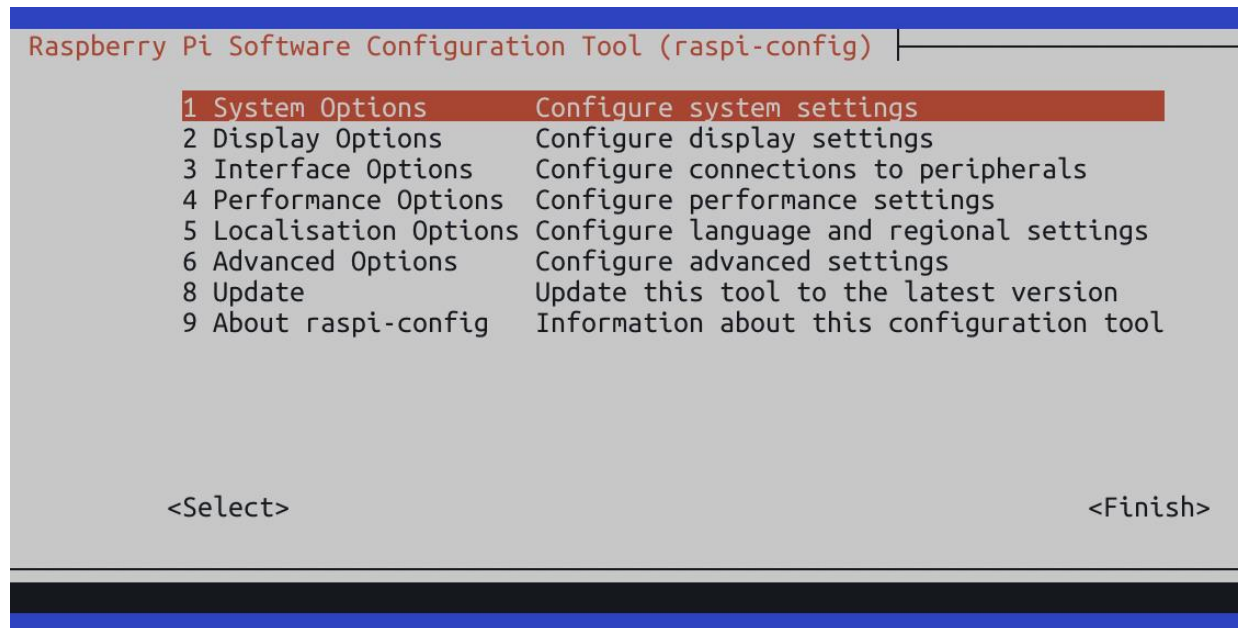


Рисунок 3.2 – Налаштування raspbian-config

Після під'єднання мережі Wi-Fi всі інші налаштування виконуються на віддаленому комп'ютері через SSH.

Після початкового налаштування Raspberry OS необхідно встановити Klipper. Для цього потрібно інстальювати декілька програм, першою з яких буде Git, а вона вже завантажуватиме з репозиторія файли Klipper.

Наступний крок полягає у завантаженні ПЗ KIAUH, яке в автоматизованому режимі інстальюватиме ПЗ Klipper. Отже, були залучені такі команди:

- `sudo apt-get install git` (команда встановлює ПЗ Git);
- `cd ~` (команда виконує перехід до загальної дерикторії ~);
- `git clone https://github.com/th33xitus/kiauh.git` (команда виконує копіювання з репозиторію в теку ~ пакет із ПЗ KIAUH, яке в подальшому реалізуватиме встановлення Klipper);
- `./kiauh/kiauh.sh` (команда відкріє вікно з початковими налаштуваннями модулів системи Klipper

Приклад вікна вибору KIAUH продемонстровано на рисунку 3.3.

```

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

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

0) [Log-Upload]      Klipper: Not installed
                    Owner: -
                    Repo: -
1) [Install]
2) [Update]
3) [Remove]         Moonraker: Not installed
                    Owner: -
                    Repo: -
4) [Advanced]
5) [Backup]

S) [Settings]
Community:
E) [Extensions]

                    Mainsail: Not installed
                    Fluidd: Not installed
                    Client-Config: -
                    KlipperScreen: Not installed
                    Crowsnest: Not installed

v6.0.0-beta.3      Changelog: https://git.io/Jnm1X

Q) Quit

##### Perform action: █

```

Рисунок 3.3 – Вікно вибору KIAUH

Продемонстроване вікно містить такі опції:

- вивантаження лог файлів з метою подальшого аналізу;
- встановлення. Так, після переходу пропонується встановлення модулів, власне Klipper, moonraker, тобто пакетів, які відповідають за базову версію klipperтаmoonraker, що, зі свого боку, відповідає за налаштування серверу для віддаленого доступу. Далі пропонується встановлення модулів, на кшталт web-інтерфейсу, яких у Klipper функціонує декілька, втім першим із них буде Mainsail та Fluidd. Окрім того, пропонуються додаткові опції, зокрема, стандартні налаштування для fluiddта mainsail, встановлення інтерфейсу сенсорного екрану, а також налаштування камери. На рисунку 3.4 наведено приклад меню налаштувань;

```

~::~::~ [ Installation Menu ] ~::~::~
Firmware & API:
 1) [Klipper]
 2) [Moonraker]
Webinterface:
 3) [Mainsail]
 4) [Fluidd]
Client-Config:
 5) [Mainsail-Config]
 6) [Fluidd-Config]
Touchscreen GUI:
 7) [KlipperScreen]
Webcam Streamer:
 8) [Crowsnest]
B) « Back
##### Perform action: █

```

Рисунок 3.4 – Меню налаштування

– оновлення всіх пакетів, тобто виконується оновлення як системи програми, так і окремих компонентів Klipper, як це продемонстровано на рисунку 3.5;

```

~::~::~ [ Update Menu ] ~::~::~
a) Update all
Klipper & API:
 1) Klipper
 2) Moonraker
Webinterface:
 3) Mainsail
 4) Fluidd
Client-Config:
 5) Mainsail-Config
 6) Fluidd-Config
Other:
 7) KlipperScreen
 8) Crowsnest
 9) System
Current: Latest:
- -
- -
- v2.14.0
- v1.34.2
- -
- -
- -
- -
107 upgrades available!
B) « Back

```

Рисунок 3.5 – Меню оновлення KIAUH

– меню remove дозволяє видаляти окремі елементи системи Klipper.

Приклад меню відображено на рисунку 3.6.

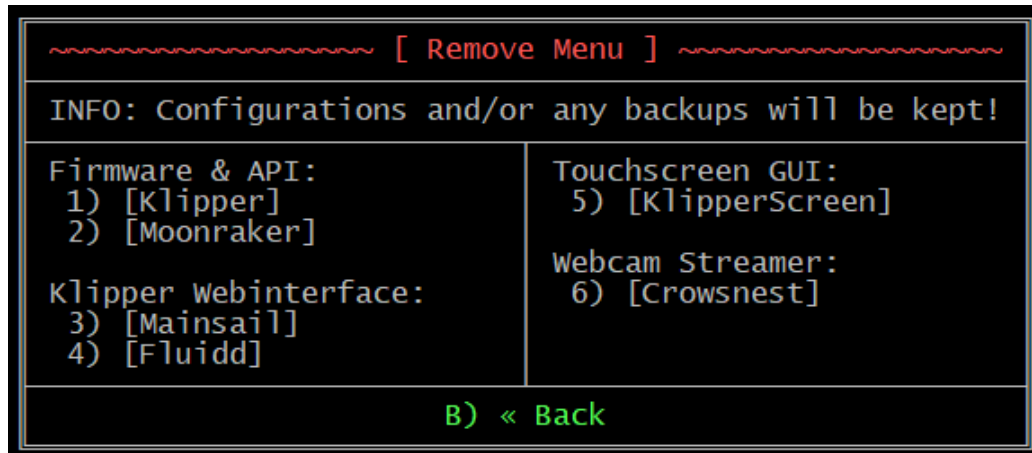


Рисунок 3.6 – Меню видалення KIAUH

– меню Advanced дозволяє здійснювати маніпуляції з платою керування лазерного гравірувального верстата, зокрема, утворювати файл прошивки для плати, окремо вносити прошивку на плату чи все разом. Це дозволяє ПЗ реалізовувати всеосяжне керування платою керування лазерним верстатом. До інших можливостей, які допомагають виконувати це меню, належить налаштування Input Shaper, яке сприяє збільшенню прискорення руху лазерного верстата, зміна репозиторіїв для оновлення Klipper а також зміна імені hostname, за яким виконується вхід до web-інтерфейсу (рис. 3.7);

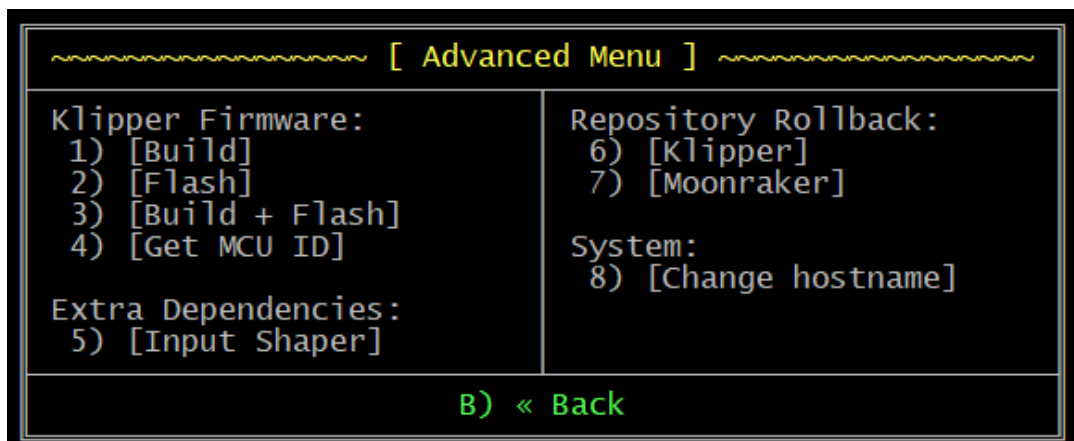


Рисунок 3.7 – Меню Advanced

- меню Backup дозволяє виконати резервну копію налаштувань;
- меню Setup дозволяє вибирати 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.

```
##### Installing Klipper ...  
  
Please select the number of Klipper instances to set  
up. The number of Klipper instances will determine  
the amount of printers you can run from this host.  
  
WARNING:  
Setting up too many instances may crash your system.  
  
B) « Back  
  
##### Number of Klipper instances to set up (default=1): █
```

Рисунок 3.8 – Вибір кількості модулів Klipper

Наступний крок полягає у створенні базового файлу налаштування printer.cfg, яким у подальшому послуговуватимуться для конфігурування налаштувань лазерного гравірувального верстата.

Після встановлення Klipper необхідно виконати встановлення Moonraker. Тож після вибору відповідного меню пропонується створити ще конфігураційний файл moonraker.conf

Ще одним кроком буде встановлення Mainsail або Fluidd. Оскільки різниці між Web-інтерфейсами майже немає, то відмінності між ними можуть проявлятися через зміну розташування окремих елементів. Окрім того, у Klipper наявна можливість щодо одночасного застосування двох web-інтерфейсів, які будуть функціонувати на різних портах.

Приклад Web-інтерфейсу Fluidd продемонстровано на рисунку 3.9.

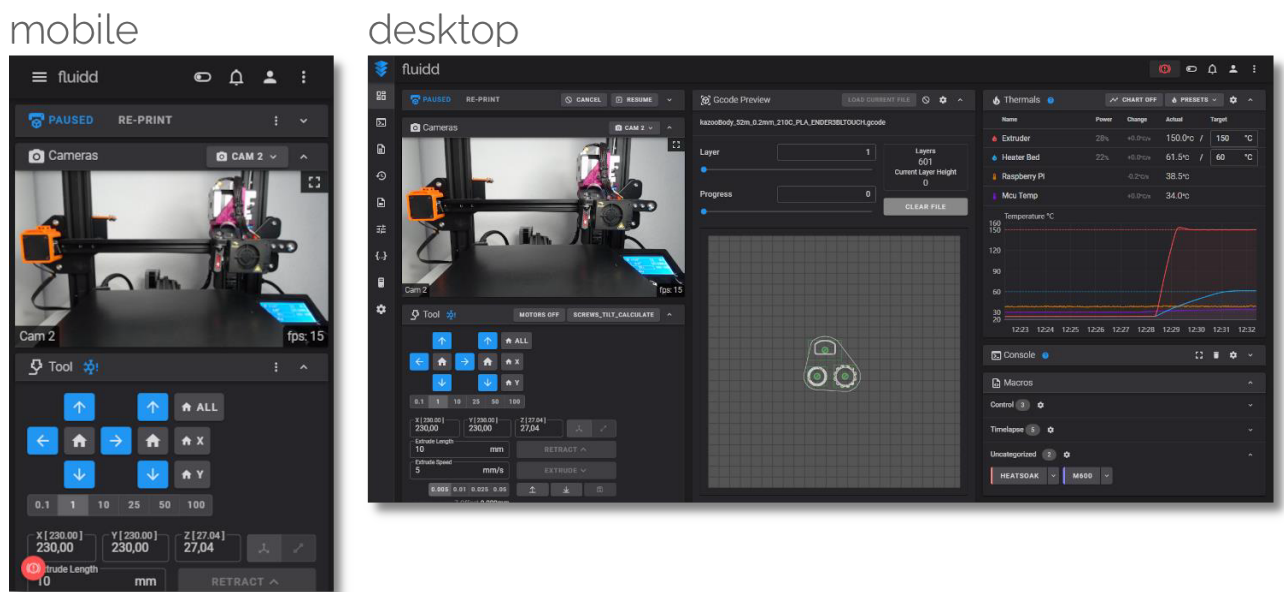


Рисунок 3.9 – Web-інтерфейс Fluidd

Web-інтерфейс Mainsail наведено на рисунку 3.10.

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.

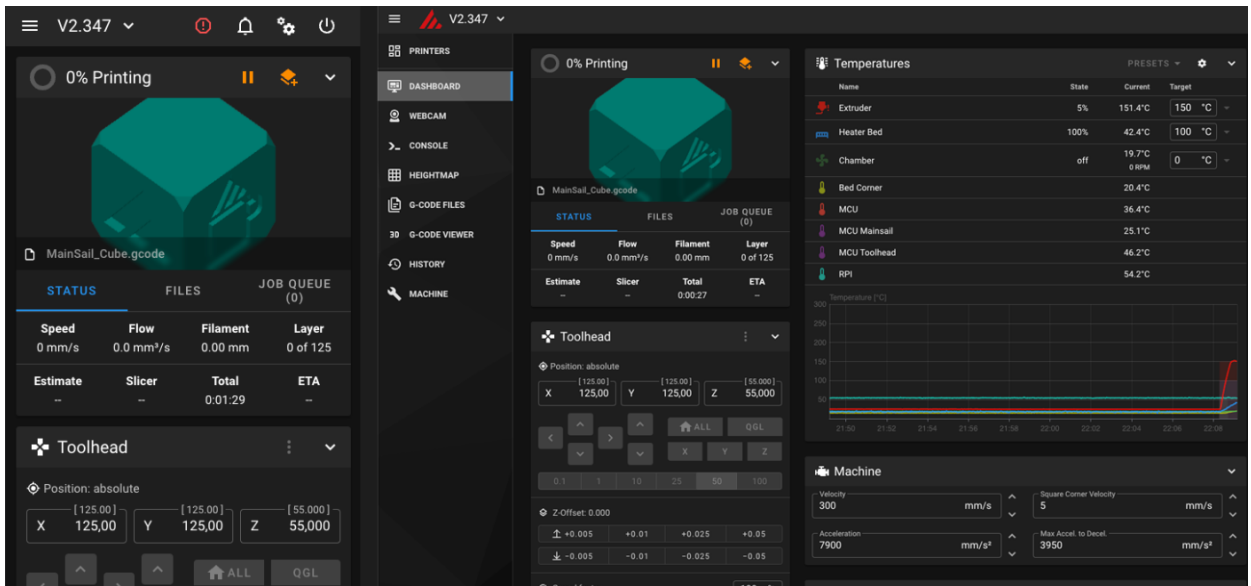


Рисунок 3.10 – Web-інтерфейс Mainsail

Отже, після встановлення Fluidd ключові етапи встановлення – завершені. Утім додатково можна встановити Klipper Screen з метою керування лазерним гравірувальним верстатом через сенсорний екран.

3.3 Налаштування Klipper для лазерного гравірувального верстата

Після завершення процесу встановлення доцільно виконати налаштування Klipper, зокрема, для лазерного гравірувального верстата, адже головним призначенням стають 3D-принтери.

Для цього за допомогою web-браузера необхідно перейти до web-інтерфейсу Fluidd. З метою визначення локальної IP-адреси можливо послугоуватися спеціальними програмами, котрі реалізують відстеження всіх пристроїв в мережі Wi-Fi.

Наочний приклад із визначення IP-адреси наведено на рисунку 3.11.

Так, перейшовши за адресою 192.168.0.103:80, було виведено вікно керування Klipper, яке продемонстроване на рисунку 3.12.

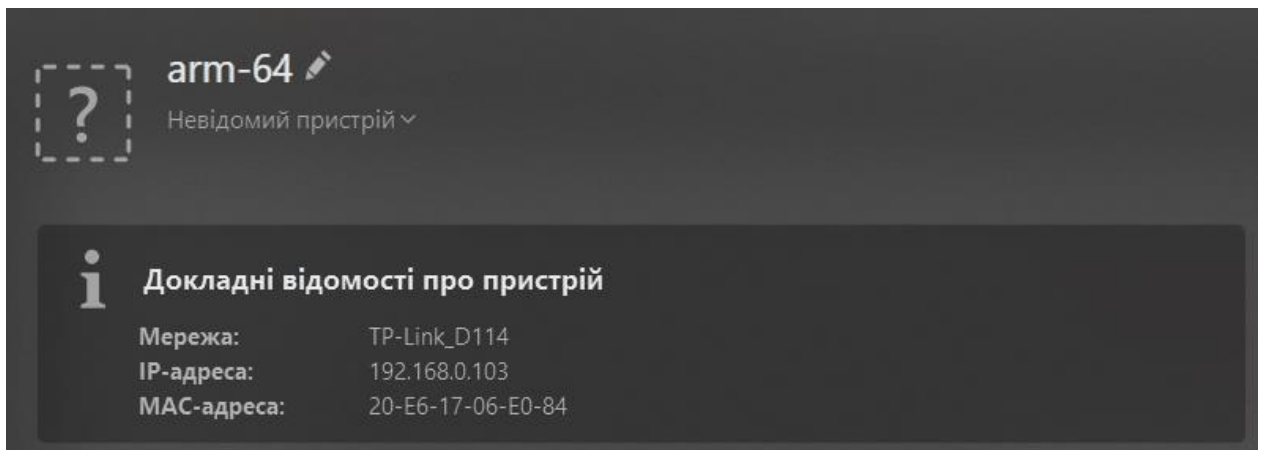


Рисунок 3.11 – Визначення IP-адреси Klipper

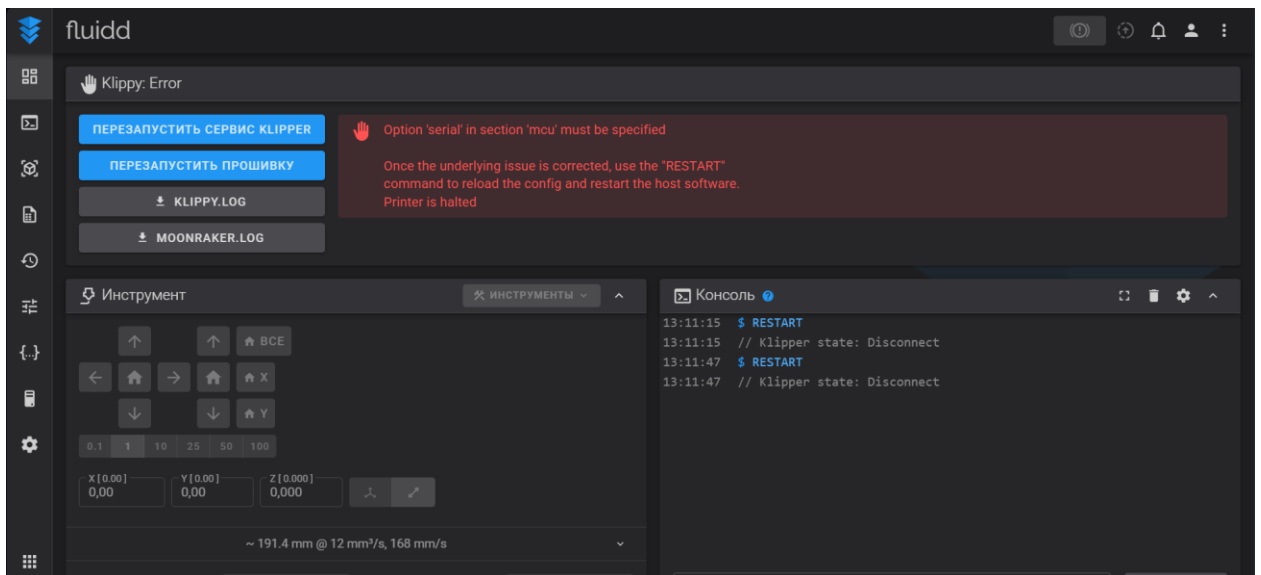


Рисунок 3.12 – Вікно Klipper

У даному вікні реалізується можливість щодо переміщення лазера за осями XY, відправляти команди G-code, а також надсилати файли на друк.

Для того, щоб налаштувати керування лазерним гравірувальним верстатом, спершу потрібно відредагувати файл `printer.cfg`.

Цей файл містить структуру, що складається з підсекцій, серед яких головними є:

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

```
[mcu]
serial: /dev/ttyACM0
```

Рисунок 3.13 – Секція [mcu]

– [printer] є підсекцією, що відповідає за кінематику лазерного гравірувального верстата. 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: cartesian
max_velocity: 500
max_accel: 3000
max_z_velocity: 25
max_z_accel: 30
```

Рисунок 3.14 – Секція [printer]

– [stepper_x] позначає підсекцію, що налаштовує переміщення віссю X, ідентична підсекція застосовується і для інших осей. Окрім того, ці секції реалізують налаштування пінів крокового двигуна, котрі залежать від використаної плати, кількість мікрокроків, а твкож 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.

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

```
[stepper_x]
step_pin: PF0
dir_pin: PF1
enable_pin: !PD7
microsteps: 16
rotation_distance: 40
endstop_pin: ^PE5
position_endstop: 0
position_max: 200
```

Рисунок 3.15 – Секція [stepper_x]

```
[fan]
pin: PH6
```

Рисунок 3.16 – Секція [fan]

Усі секції, котрі були розглянуті вище, послуговуються пінами, що належать до RAMPS з Arduino Mega. Задля керування власне лазером доречним 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.

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

```
[pwm_tool TOOL]
pin: !ar9      # use your fan's pin number
hardware_pwm: True
cycle_time: 0.001
shutdown_value: 0
maximum_mcu_duration: 5
# Default: 0 (disabled)
# Amount of time in which the host has to acknowledge
# a non-shutdown output value.
# Suggested value is around 5 seconds.
# Use a value that does not burn up your stock.
# Please note that during homing, your tool
# needs to be in default speed.
```

Рисунок 3.17 – Секція [pwm_tool TOOL]

Зазначені макроси продемонстровано на рисунку 3.18.

```
[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
```

Рисунок 3.18 – Макроси для використання лазеру

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

```

[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: Tool speed: {'%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)}

```

Рисунок 3.19 – Макроси для керування лазером через екран

Отже, файл printer.cfg набуде такого відображення:

```

[mcu]
serial: /dev/ttyACM0

[printer]
kinematics: cartesian
max_velocity: 500
max_accel: 3000

[stepper_x]
...

[stepper_y]
...

[pwm_tool TOOL]

```

```

pin: !ar9    # useyourfan'spinnumber
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' inprinter}
name: Fan: {'ON ' ifmenu.inputelse 'OFF'}
input: {printer['pwm_tool TOOL'].value}
input_min: 0
input_max: 1
input_step: 1
gcode:
    M3 S{255 ifmenu.inputelse 0}
[menu __main __control __toolspeed]
type: input
enable: {'pwm_tool TOOL' inprinter}
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 визначитися із платою для прошивки. Приклад дій наведено на рисунку 3.20.



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. Отже, завдяки послідовності перелічених дій було встановлено Klipper для лазерного гравірувального верстата.

4 ЗАХОДИ І РОЗРАХУНКИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНИХ УМОВ ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці на робочому

На робочому місці оператора ПК згідно виникають небезпечні та шкідливі фактори: підвищений рівень шуму, несприятливі мікрокліматичні умови, недостатній рівень освітленості, шкідливі речовини, підвищений рівень електромагнітних випромінювань радіочастот, висока напруга електричної мережі, статична електрика та інші. Робота з ПК супроводжується також підвищеним ступенем напруженості трудового процесу. При систематичному впливі виробничих факторів, які не відповідають нормативним показникам, зростає рівень професійно зумовленої захворюваності працюючих та можуть виникнути професійні захворювання органів зору, руху, нервової системи. Таким чином, вивчення умов праці на робочому місці оператора ПК є необхідною умовою запобігання негативних наслідків впливу небезпечних та шкідливих факторів.

Організація робочого місця. Приміщення, в якому знаходиться робоче місце оператора ПК, загальною площею 48 м², і висотою стелі 3,5 м. У приміщенні знаходиться 6 робочих місць з ПК. Кожне робоче місце обладнане робочим столом, стільцем та персональним комп'ютером, що складається з монітора, системного блоку, клавіатури та миші.

4.2 Промислова безпека на робочому

Живлення ПК здійснюється від трифазної чотирьох електричної мережі змінного струму з глухо-заземленою нейтраллю і напругою 220 В, частотою 50 Гц. Згідно НПАОП 40.1-1.21-98 приміщення можна віднести до

категорії без підвищеної небезпеки, так як в приміщенні відсутні чинники, які викликають підвищену або особливу небезпеку.

Для створення безпечних умов праці необхідно провести ряд організаційних і технічних заходів. Згідно НПАОП 40.1-1.32-01 для запобігання ураження людини електричним струмом в приміщенні застосовується система занулення.

4.3 Виробнича санітарія у приміщенні

Робота оператора ПК за енерговитратами відноситься до категорії легких робіт. В таблиці 4.1 наведені оптимальні параметри мікроклімату в приміщеннях, де виконуються роботи операторського типу [18].

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 м² (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 м² площі та 20 м³ обсягу на одне окреме робоче місце з ПК [18]. Площа приміщення 48 м² та об'єм 168 м³, на кожне робоче місце приходиться 8 м² площі і об'єм 28 м³, 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 [18].

Розрахункова формула методу:

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

де W – питома потужність, Вт/м²;

S – площа приміщення, м²;

W_{Σ} – загальна потужність освітлювальної установки Вт, яка розраховується за формулою:

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

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

n_{ce} – кількість світильників в приміщенні.

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

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

Питомої потужності 8,33 Вт/м² 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 – стан об'єкта, при яким виключається можливість пожежі, а у випадку його виникнення запобігає вплив на людей небезпечних факторів пожежі й забезпечується захист матеріальних цінностей.

Пожежна безпека забезпечується системою запобігання пожежі й системою пожежного захисту. У всіх службових приміщеннях обов'язково повинен бути «План евакуації людей при пожежі», що регламентує дії персоналу у випадку виникнення вогнища загоряння, що й указує місця розташування пожежної техніки.

Горючими компонентами у виробничому приміщенні є: перегородки, двері, підлоги, ізоляція кабелів і ін.

Протипожежний захист – це комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, на запобігання пожежі, обмеження його поширення, а також на створення умов для успішного гасіння пожежі.

Джерелами запалювання у виробничому приміщенні можуть бути електронні схеми від ПК, прилади, застосовувані для технічного обслуговування, пристрою електроживлення, кондиціонування повітря, де в

результаті різних порушень утворюються перегріті елементи, електричні іскри й дуги, здатні викликати загоряння горючих матеріалів.

У сучасних ПК дуже висока щільність розміщення елементів електронних схем. У безпосередній близькості друг від друга розташовуються сполучні проведення, кабелі. При протіканні по них електричного струму виділяється значна кількість теплоти. При цьому можливо оплавлення ізоляції.

Для відводу надлишкової теплоти від ПК служать системи вентиляції й кондиціонування повітря. При постійній дії ці системи являють собою додаткову пожежну небезпеку.

Енергопостачання виробничого приміщення здійснюється за допомогою трансформаторної станції та за допомогою двигун-генераторних агрегатів. На трансформаторних підстанціях особливу небезпеку представляють трансформатори які мають масляне охолодження. У зв'язку із цим перевагу слід віддавати сухим трансформаторам.

ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи були розв'язані всі поставлені завдання, а також досягнуто основної мети, тобто розроблено програмне забезпечення для модуля керування лазерним гравірувальним верстатом на основі прошивки Klipper.

У першому розділі були проаналізовані вихідні дані технічного завдання, до того ж, були розглянуті сучасні лазерні гравірувальні верстати. Крім того, були вивчені призначення та технологічні можливості лазерних гравірувальних верстатів.

У другому розділі з метою розроблення програмного забезпечення на основі прошивки Klipper для лазерного гравірувального верстата було здійснено вибір електронних компонентів. Ба більше, побудовано загальну схему лазерного гравірувального верстата, а також визначено електронні компоненти, що необхідні для його функціонування.

У третьому розділі задля налаштування програмного забезпечення для лазерного гравірувального верстата передусім було встановлено та налаштовано ОС Raspbian. Після чого налаштування проводилися для Wi-Fi та інтерфейсу SSH. Разом з тим було реалізовано оновлення програмного забезпечення та ядра ОС. Виконавши початкове налаштування Raspberry OS, наступний крок полягав у встановленні та налаштуванні прошивки Klipper власне для лазерного гравірувального верстата, оскільки його головним призначенням є 3D-принтери. Крім того, було розроблено програмне забезпечення для модуля керування лазерним гравірувальним верстатом на основі прошивки Klipper.

У розділі «Заходи і розрахунки для забезпечення безпечних умов праці» було визначено штучне освітлення в дослідницькій лабораторії для розроблення ПЗ на основі Klipper для лазерного верстата.

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_zabezpечennia_186-188.pdf](http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/53675/2/2019_Holik_TRozrobka_prohramnoho_zabezpечennia_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 – 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. Kleschev G. Реалізація методології метрологічних методів в кіберінтегрованої інформаційно-вимірювальної системі [Електронний ресурс] / G. Kleschev – Режим доступу до ресурсу: [988-Текст%20статті-2290-1-1020200803.pdf](https://doi.org/10.20200803) – 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.