

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет робототехніки та штучного інтелекту

(повне найменування факультету)

Кафедра електроніки, фізики та СМАРТ-систем

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**ПРОЕКТУВАННЯ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТУ З ЧИСЛОВИМ
ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ
ДРУКОВАНИХ ПЛАТ**

**DESIGN OF A CNC MILLING MACHINE FOR THE MANUFACTURE
OF PRINTED BOARDS**

спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Електроніка»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ЕЛ-41
Максимчук Роман Сергійович

(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент
Заблоцький Валентин Юрійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
« ____ » _____ 2026 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Мороз Сергій Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра електроніки та телекомунікацій

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність: 171 Електроніка

Освітня програма: «Електроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

доц. В. ЗАБЛОЦЬКИЙ

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Максимчук Роману Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи *Проектування фрезерного верстату з числовим Програмним керуванням для виготовлення друкованих плат*

Керівник роботи *к.т.н., доцент Заблоцький Валенти Юрійович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «31» грудня 2025 року № 559/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи *04.06.2026 р.*

3. Вихідні дані до роботи *технічні характеристики завадостійкого модуля ESP32
Схемотехніка блоку крокових приводів та оптичної розв'язки сигналів*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ

Розділ 1 Загальнотехнічна частина

Розділ 2 Конструкторська частина

Розділ 3 Технологія виготовлення та налагодження керуючого модуля

Розділ 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Демонстраційний матеріал у вигляді презентації Power Point.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1 Загальнотехнічна частина</i>	<i>Заблоцький В. Ю., доцент</i>		
<i>Розділ 2 Конструкторська частина</i>	<i>Заблоцький В. Ю., доцент</i>		
<i>Розділ 3 Технологія виготовлення та налагодження керуючого модуля</i>	<i>Заблоцький В. Ю., доцент</i>		
<i>Розділ 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Заблоцький В. Ю., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Селепина Й. Р., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>	<i>%</i>		
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Заблоцький В. Ю., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання 31 грудня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розділ 1 Загальнотехнічна частина</i>	до 01.03.2026 р.	
2.	<i>Розділ 2 Конструкторська частина</i>	до 15.03.2026 р.	
3.	<i>Розділ 3 Моделювання та дослідження двобалансного мікшера</i>	до 01.04.2026 р.	
4.	<i>Розділ 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	до 10.04.2026 р.	
5.	<i>Висновки</i>	до 20.04.2026 р.	
6.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	до 30.04.2026 р.	
7.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	до 10.05.2026 р.	
8.	<i>Нормоконтроль</i>	до 20.05.2026 р.	
9.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 30.05.2026 р.	
10.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту</i>	до 04.06.2026 р.	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Максимчук Р. С.

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Заблоцький В. Ю.

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Максимчук Р. С. Проектування завадостійкого модуля керування настільним фрезерним верстатом з ЧПК. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Електроніка». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел.

У першому розділі розглянуто загальні відомості про технологію механічного фрезерування друкованих плат, проаналізовано існуючі аналоги верстатів та обґрунтовано вибір кінематичної схеми з нерухомим порталом. У другому розділі описані структурні та електричні принципові схеми модуля керування та обґрунтовано вибір елементної бази на основі мікроконтролера ESP32. В третьому розділі описані технологічний процес монтажу, конфігурування прошивки FluidNC за допомогою файлу YAML, математичні розрахунки точності кінематики та дослідження автовирівнювання з датчиком Z-probe. У четвертому розділі розглянуто вимоги з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. У висновку узагальнено та підсумовано інформацію з усіх попередніх розділів. Результат роботи можна застосовувати для створення завадостійких та автономних систем керування верстатами з ЧПК.

Ключові слова: Друкована плата, ЧПК, ESP32, FluidNC, Датчик Z-probe.

ANNOTATION

Maksymchuk R. Designing of noise-immune control module system for desktop CNC milling machine. Manuscript.

Bachelor's qualifying work of OP «Electronics». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The bachelor's qualification work consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of used sources.

In the first chapter, the general technical information on printed circuit board milling, analysis of existing desktop CNC analogs, and the kinematic scheme choice justification are analyzed. The second chapter describes the structural and electrical diagrams and substantiates the element base on the ESP32 microcontroller. The third section describes the board assembly technology, configuration of FluidNC software, kinematic calculation, and self-leveling research using a contact Z-probe sensor. The fourth chapter covers occupational health and safety requirements. The conclusion summarizes and summarizes information from all previous sections. The result of the work can be applied to improve and implement autonomous CNC control systems.

Keywords: Printed Circuit Board, CNC, ESP32, FluidNC, Z-probe Sensor.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА.....	12
1.1 Загальні відомості про технологію фрезерування друкованих плат.....	12
1.2 Огляд існуючих аналогів настільних фрезерних верстатів з ЧПК.....	14
1.3 Аналіз кінематичних схем та конструктивних рішень для верстатів.....	16
1.4 Формування технічних вимог та параметрів розроблюваного верстата.....	19
РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	21
2.1 Розробка структурної схеми системи керування.....	21
2.2 Вибір та обґрунтування електронної компонентної бази.....	23
2.3 Розробка електричної принципової схеми модуля керування...	29
2.4 Проєктування топології друкованої плати модуля керування...	35
РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА НАЛАГОДЖЕННЯ КЕРУЮЧОГО МОДУЛЯ.....	38
3.1 Обґрунтування технології виготовлення друкованої плати та вибір системного програмного забезпечення.....	38
3.2 Технологічна послідовність монтажу модульних складових та комплексний алгоритм програмного налаштування системи.....	41
3.3 Комплексне налагодження кінематичної схеми, розрахунок параметрів точності та експериментальне дослідження роботи верстата..	43
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	48
4.1 Аналіз потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів при експлуатації розробленого пристрою.....	48

4.2 Вимоги безпеки перед початком та під час роботи з розробленим програмно–апаратним комплексом.....	49
4.3 Інженерні заходи пожежної безпеки та електробезпеки розробленого модуля керування.....	52
ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56
ДОДАТКИ.....	57

ВСТУП

Проектування та розробка сучасних засобів обчислювальної техніки, радіоелектронної апаратури та мікропроцесорних систем на етапі прототипування потребують швидкого, гнучкого та прецизійного виготовлення друкованих плат. Історично найбільш поширені субтрактивні хімічні методи формування провідного малюнка, такі як травлення у розчинах хлорного заліза чи персульфату амонію, у лабораторних, дослідницьких та навчальних умовах мають низку суттєвих обмежень. Вони супроводжуються виділенням токсичних парів, потребують утилізації хімічно агресивних відходів, а також передбачають виконання ручного свердління монтажних отворів та перехідних з'єднань, що часто призводить до геометричних похибок та порушення співвісності шарів при двосторонньому трасуванні. Окрім того, ручне виготовлення плат для сучасних компонентів поверхневого монтажу з малим кроком виводів є практично неможливим через жорсткі вимоги до точності ширини провідників та ізоляційних проміжків.

Екологічно безпечною та високотехнологічною альтернативою хімічному травленню є механічне фрезерування та гравірування друкованих плат на настільних верстатах з числовим програмним керуванням. Ця технологія дозволяє в межах єдиного автоматизованого циклу сформувати провідні доріжки, просвердлити отвори будь-якого діаметра та обрізати плату за складним контуром. Проте ефективність та точність роботи таких верстатів безпосередньо обмежені можливостями їхніх систем керування. Існуючі бюджетні рішення на базі застарілих 8-бітних мікроконтролерів сімейства AVR не здатні забезпечити стабільну генерацію високочастотних імпульсів кроку через низьку тактову частоту процесора. Це призводить до виникнення мікропауз у русі осей та пропуску кроків двигунами. Крім того, відсутність достатнього обсягу оперативної пам'яті унеможливорює інтеграцію засобів бездротового зв'язку чи автономного зчитування програм

із карт пам'яті, що вимагає постійного USB-з'єднання з керуючим комп'ютером. В умовах високого рівня електромагнітних завад, що генеруються щітковим вузлом шпинделя, таке дротове з'єднання часто обривається, спричиняючи брак заготовки та поломку крихкого мікроінструменту.

Для подолання цих обмежень у сучасному ЧПК-будуванні спостерігається тенденція переходу до 32-бітних мікропроцесорних архітектур реального часу. Особливий інтерес викликає використання двоядерного мікроконтролера ESP32, який працює на тактовій частоті до 240 МГц та має вбудовані апаратні модулі Wi-Fi та Bluetooth. Застосування операційної системи FreeRTOS дозволяє розділити обчислювальні завдання: одне ядро процесора займається виключно прецизійною генерацією імпульсів руху осей, а друге – обробкою мережових запитів та обслуговуванням веб-сервера FluidNC. Це повністю усуває джиттер крокових сигналів та забезпечує стабільну роботу верстата. Однак розробка надійного промислового пристрою на базі цього мікроконтролера вимагає вирішення складних інженерних завдань, пов'язаних із проєктуванням завадостійких вхідних кіл, організацією гальванічної розв'язки силових і логічних частин та компенсацією механічної кривизни заготовки текстоліту.

Метою даного кваліфікаційної роботи є проєктування, практична реалізація, всебічне налагодження та експериментальне дослідження завадостійкого, високоточного та автономного програмно-апаратного модуля керування настільним фрезерним верстатом з ЧПК на базі 32-бітного мікроконтролера ESP32. Для досягнення цієї мети у роботі послідовно вирішується комплекс взаємопов'язаних інженерних та наукових завдань. Спочатку проводиться системний аналіз технологічних параметрів фрезерування та критичний огляд кінематичних схем настільних ЧПК-систем з метою обґрунтування компонування верстата з нерухомим порталом. Далі здійснюється розрахунок та вибір електронної компонентної бази, проєктування електричної принципової схеми з інтеграцією опторозв'язки,

імпульсного перетворювача напруги та апаратних RC-фільтрів для ліній кінцевих вимикачів та датчика Z-probe. Важливим етапом є розробка топології двосторонньої друкованої плати в системі EasyEDA з дотриманням вимог електромагнітної сумісності та розділенням контурів цифрового і силового заземлення.

Технологічна частина проєкту охоплює розробку покрокової інструкції з комбінованого монтажу компонентів на плату, а також детальне налаштування прошивки FluidNC шляхом складання індивідуального конфігураційного файлу YAML, який гнучко розподіляє GPIO-піни під потреби розробленої апаратної частини. Експериментальний блок роботи присвячений теоретичному розрахунку коефіцієнтів передачі крокових двигунів, практичному калібруванню точності лінійних переміщень за допомогою прецизійних вимірювальних інструментів та дослідженню роботи алгоритму автовирівнювання. Останній базується на білінійній інтерполяції координат сітки сканування датчика Z-probe, що дозволяє динамічно компенсувати прогин текстоліту в процесі обробки. Завершує проєкт розробка заходів з охорони праці та пожежної безпеки для мінімізації виробничих ризиків при роботі з обладнанням ЧПК.

Об'єктом дослідження у цій роботі виступає безпосередній процес автоматизованого бездротового керування просторовим позиціонуванням та робочими органами настільного фрезерувального комплексу ЧПК.

Предметом дослідження є архітектура електронних кіл, топологічні параметри друкованої плати, системні конфігурації FluidNC та математичні алгоритми двовимірної інтерполяції для динамічної корекції траєкторії руху інструменту.

Завдання на випускную роботу:

1. Провести аналіз сучасних систем керування настільними фрезерними верстатами з ЧПК.

2. Розробити електричну принципову схему контролера ЧПК із забезпеченням гальванічної розв'язки, захисту від електромагнітних завад та

фільтрації сигналів кінцевих вимикачів і датчика Z-probe.

3. Розробити електричну принципову схему модуля керування.

4. Розробити технологію монтажу та складання електронного модуля керування, включаючи послідовність встановлення компонентів і проведення пусконаладжувальних робіт.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні готового до експлуатації заводостійкого контролера ЧПК, який за своїми точностними характеристиками та надійністю наближається до дорогих промислових систем швидкого прототипування, залишаючись при цьому економічно доступним. Це відкриває широкі можливості для впровадження розробленого пристрою в лабораторіях вищих навчальних закладів, конструкторських бюро та науково-дослідних центрах для оперативного виготовлення високочастотних друкованих плат та макетування мікропроцесорних засобів обчислювальної техніки.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було використано інструменти штучного інтелекту для редагування та форматування тексту, виключно як допоміжний засіб для пошуку ідей, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та ґрунтуються на власному аналізі, а отримані результати від генеративного ШІ були перевірені на достовірність та відповідність академічній доброчесності.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Загальні відомості про технологію фрезерування друкованих плат

Виготовлення друкованих плат (ДП) є одним із найважливіших етапів у розробці та виробництві будь-яких електронних пристроїв. Історично найбільш поширеним і традиційним методом формування струмопровідних доріжок на фольгованому діелектрику є субтрактивний хімічний метод (травлення). Проте, з розвитком мікропроцесорної техніки та систем числового програмного керування (ЧПК), все більшої популярності в умовах дрібносерійного виробництва, прототипування та в радіоаматорській практиці набуває механічний спосіб фрезерування.

Механічне фрезерування друкованих плат – це процес ізоляції струмопровідних доріжок та контактних майданчиків шляхом фізичного видалення шару мідної фольги з поверхні діелектричної основи найчастіше склотекстоліту FR-4. Цей процес здійснюється за допомогою високообертового шпинделя, оснащеного спеціальним різальним інструментом – конічним гравером або мікрофрезою.

Верстат з ЧПК переміщує різальний інструмент за координатами X, Y, Z згідно із заданою траєкторією. Ця траєкторія формується спеціалізованим програмним забезпеченням на основі файлів топології плати у форматі Gerber, які генеруються в системах автоматизованого проєктування електроніки (EDA/CAD), таких як Altium Designer, KiCad, Eagle тощо.

Етапи виготовлення плати на фрезерному верстаті з ЧПК:

- конвертація файлів Gerber / Excellon у G-код, який містить команди переміщення інструменту. На цьому етапі задаються швидкості подачі, глибина фрезерування та діаметри інструментів;

- базування та фіксація заготовки та закріплення фольгованого склотекстоліту на робочому столі верстата. Важливим етапом є побудова

карти висот, оскільки поверхня заготовки рідко буває ідеально рівною, а глибина фрезерування міді становить лише 0,035–0,07 мм;

– автоматичне або напівавтоматичне свердління перехідних та монтажних отворів різного діаметра та вирізання готової плати з основної заготовки за допомогою кінцевої фрези.

Переваги фрезерування над хімічним травленням:

– відсутність шкідливих, токсичних та їдких хімічних реагентів, що робить процес придатним для використання в навчальних або домашніх умовах;

– верстат дозволяє не лише формувати топологію доріжок, але й одразу свердлити всі необхідні отвори та обрізати плату по заданому контуру. При хімічному травленні свердління та обрізка виконуються як окремі ручні або напівавтоматичні операції;

– від моменту завершення трасування плати на комп'ютері до отримання готового фізичного прототипу може пройти менше години;

– профіль доріжки формується геометрією різця, що дозволяє уникнути дефектів, пов'язаних з нерівномірним хімічним травленням.

Дана технологія має свої недоліки у вигляді точності і мінімальної ширини ізолюючого зазору, яка залежать від механіки верстата, биття шпинделя та якості фрези. Для настільних верстатів досягти ширини доріжки / зазору менше ніж 0,15–0,2 мм буває складно, тоді як фотолітографія дозволяє робити значно тонші елементи.

Під час різання склотекстоліту утворюється шкідливий дрібний пил, що вимагає наявності систем аспірації. Також фрези та гравери, особливо при роботі зі склотекстолітом, швидко тупляться або ламаються, що є додатковою статтею витрат.

1.2 Огляд існуючих аналогів настільних фрезерних верстатів з ЧПК

Аналіз існуючих на ринку рішень є важливим кроком у процесі проєктування, оскільки він дозволяє перейняти вдалі конструктивні рішення, виявити типові недоліки та сформулювати оптимальні технічні вимоги до розроблюваного верстата. Ринок настільних фрезерних верстатів з ЧПК, придатних для виготовлення друкованих плат, можна умовно розділити на дві основні категорії: бюджетні конструктори та професійні системи швидкого прототипування.

Найбільшої популярності серед радіоаматорів та початківців набули верстати сімейства CNC 3018, які являють собою недорогі набори для самостійної збірки. Каркас таких пристроїв зазвичай виготовляється з конструкційного алюмінієвого профілю у поєднанні з деталями з бакеліту або елементами, виготовленими методом 3D-друку. Як лінійні напрямні використовуються циліндричні вали діаметром 8–10 мм з лінійними підшипниками LM8UU, а для передачі руху – трапецеїдальні гвинти T8 та крокові двигуни формату NEMA 17. Керування найчастіше базується на мікроконтролері сімейства AVR з прошивкою GRBL, а роль шпинделя виконує колекторний двигун постійного струму потужністю близько 120–200 Вт.

Головною перевагою таких систем є їхня низька вартість, доступність запасних частин, відкрита архітектура системи керування та велика спільнота користувачів. Проте існують суттєві недоліки: низька жорсткість конструкції призводить до вібрацій під час роботи, а циліндричні напрямні схильні до прогину під навантаженням. Використання дешевих колекторних шпинделів обумовлює значне радіальне биття інструменту та недостатню швидкість обертання. Через це досягти стабільної ширини доріжок менше 0,3–0,4 мм на таких верстатах вкрай важко, а тонкі фрези швидко ламаються.

Для потреб наукових лабораторій та компаній-розробників електроніки

існують професійні системи, спеціально розроблені для прецизійного фрезерування друкованих плат, як-от лінійка верстатів LPKF ProtoMat або Bantam Tools Desktop CNC. Такі верстати мають литу або масивну фрезеровану станину з алюмінієвого сплаву чи чавуну, що забезпечує максимальну жорсткість. Вони оснащуються високоточними профільними рейковими напрямними, кульково-гвинтовими передачами (КГП) та безколекторними шпинделями зі швидкістю від 30 000 до 100 000 об/хв.

Основними перевагами таких систем є висока точність і повторюваність, висока швидкість роботи, надійність та повна готовність до експлуатації одразу після придбання. Технологічний цикл у професійних верстатах повністю автоматизований – від етапу імпорту Gerber-файлів до отримання готового фізичного прототипу. Попри високі технічні характеристики, такі верстати мають значний недолік – надзвичайно високу вартість, що робить їх недоступними для малих підприємств, студентських проєктів чи індивідуальних розробників. Крім того, вони часто використовують закрите пропрієтарне програмне забезпечення.

Аналіз ринку показує наявність суттєвого розриву між дешевими, але недостатньо точними аматорськими верстатами та занадто дорогими професійними комплексами. Для успішного виготовлення прототипів друкованих плат у лабораторних умовах необхідний верстат, який би поєднував у собі жорсткість конструкції та високооборотний шпиндель з мінімальним биттям, залишаючись при цьому економічно доступним за рахунок використання сучасної відкритої елементної бази. Саме це і є метою даного кваліфікаційного проєкту – розробка оптимальної конструкції фрезерного верстата, що займе нішу між базовими аматорськими і професійними рішеннями.

1.3 Аналіз кінематичних схем та конструктивних рішень для верстатів

У процесі проєктування фрезерного верстата з ЧПК одним із найважливіших етапів є вибір оптимальної кінематичної схеми. Вона визначає спосіб взаємного переміщення різального інструменту та заготовки ДП у тривимірному просторі за координатними осями X, Y та Z. Від обраної схеми безпосередньо залежать такі характеристики верстата, як загальна жорсткість, точність обробки, габарити та складність конструкції.

Для настільних фрезерних верстатів найчастіше використовуються дві основні кінематичні схеми: з рухомим порталом та з нерухомим порталом.

Верстат з рухомим порталом. У цій схемі робочий стіл, на якому закріплюється фольгований склотекстоліт, залишається нерухомим. Портал П-подібна конструкція, що несе на собі вісь X та вісь Z зі шпинделем та переміщується вздовж станини по осі Y.

Головна перевага – економія робочого простору. Габарити верстата по осі Y практично дорівнюють довжині робочого поля плюс товщина самого portalу. Верстат виходить дуже компактним.

Недоліки такої конструкції це – знижена жорсткість конструкції. Рухомий портал має значну масу і піддається мікровібраціям та інерційним навантаженням під час прискорень та гальмувань. Крім того, для уникнення перекосів portalу часто виникає потреба у використанні двох синхронізованих ходових гвинтів по обох боках осі Y, що ускладнює налаштування та підвищує вартість механіки.

Типовим представником такого класу обладнання є верстати порталного типу, які набули широкого поширення завдяки простоті конструкції. Загальний вигляд базової механіки настільного фрезерного верстата з ЧПК наведено на рисунку 1.1.

Верстат з нерухомим порталом та рухомим столом. У даній конструкції портал є масивним і жорстко закріплений на станині.



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд настільного фрезерного верстата портального типу

Переміщення по осі Y здійснюється за рахунок руху самого робочого столу із закріпленою на ньому заготовкою. Шпиндель переміщується лише вліво-вправо по осі X та вгору–вниз по осі Z . Що наведено в рисунку 1.2



Рисунок 1.2 – Конструкція фрезерного верстата з рухомим робочим столом

Переваги: висока жорсткість станини і порталу. Нерухомий портал жорстко зв'язаний з основою, що зводить до мінімуму вібрації та можливі прогини під навантаженням. Забезпечується значно вища точність фрезерування. Також для осі Y достатньо одного ходового гвинта, розташованого по центру столу, що виключає ризик перекосів.

Недоліки: збільшені габарити. Для забезпечення повного ходу столу верстат потребує майже вдвічі більше місця по осі Y порівняно з розміром корисного робочого поля [5].

Обґрунтування вибору конструктивного рішення для проєкту. Головною та критичною вимогою до верстата для виготовлення друкованих плат є надвисока точність і відсутність вібрацій. Ширина струмопровідних доріжок та ізолюючих зазорів для сучасних SMD-компонентів може складати 0,15–0,2 мм. Найменша вібрація або люфт у механіці призведе до браку плати або зламу крихкої твердосплавної мікрофрези.

Водночас, розміри самих друкованих плат, що виготовляються в лабораторних умовах, зазвичай невеликі, тому збільшені габарити верстата по осі Y не є суттєвою проблемою. Вага заготовки зі склотекстоліту також мінімальна, тому інерція рухомого столу не навантажуватиме кроковий двигун.

З огляду на ці фактори, для розроблюваного верстата доцільно обрати кінематичну схему з нерухомим жорстким порталом та рухомим робочим столом. Це рішення дозволить:

Забезпечити максимальну жорсткість конструкції, необхідну для прецизійного фрезерування.

Досягти значно кращої повторюваності та точності позиціонування порівняно з бюджетними аналогами на базі рухомого порталу.

1.4 Формування технічних вимог та параметрів розроблюваного верстата

На основі проведеного аналізу технології фрезерування друкованих плат та критичного огляду існуючих аналогів виникає необхідність формування чіткого переліку технічних вимог, які стануть основою для подальшого конструкторського та схемотехнічного проєктування. Основним пріоритетом при розробці верстата є забезпечення максимальної жорсткості конструкції, що є критично важливим для прецизійної обробки мідного фольгованого склотекстоліту.

Для реалізації поставлених завдань обрано кінематичну схему з нерухомим масивним порталом та рухомим робочим столом, що переміщується вздовж осі Y. Робоче поле пристрою повинно становити не менше 300×180 мм по осях X та Y відповідно, при обмеженні ходу по осі Z у межах 40 мм, що повністю задовольняє потреби обробки стандартних заготовок. Несучий каркас верстата збиратиметься з конструкційного алюмінієвого профілю формату 2020 у поєднанні зі сталевими з'єднувальними пластинами. Система лінійного переміщення базуватиметься на циліндричних валах діаметром 8–10 мм та підшипниках серії LM8UU, а передача моменту здійснюватиметься за допомогою двозахідних трапецеїдальних гвинтів типу T8 з кроком різьби 2 мм, що забезпечує лінійний хід 4 мм за один повний оберт.

Головним приводом верстата виступатиме колекторний електродвигун постійного струму типу 775 із робочою напругою 12–24 В, що дозволить досягати частоти обертання на рівні 10000–12000 об/хв. Для фіксації різального інструменту передбачено використання стандартного цангового патрона ER11, який забезпечує мінімальне радіальне биття під час роботи. Живлення всієї системи має здійснюватися від імпульсного блока потужністю не менше 250 Вт із вихідною напругою 24 В, що гарантує стабільну роботу при максимальних навантаженнях на шпиндель та крокові

двигуни.

Обчислювальним ядром системи керування виступатиме власна друкована плата на базі 32-бітного мікроконтролера ESP32, що забезпечує високу швидкодію та підтримку бездротового керування через Wi-Fi модуль. Система повинна підтримувати автономну роботу шляхом зчитування керуючих програм із Micro-SD карти, що унеможливорює збої через переривання зв'язку з персональним комп'ютером. Керування кроковими двигунами реалізуватиметься за допомогою сучасних модульних драйверів TMC2209, які апаратно підтримують високий рівень дроблення кроку для забезпечення плавності ходу.

Окрему увагу в технічних вимогах приділено завадостійкості та безпеці. Система повинна включати багаторівневу апаратну фільтрацію вхідних сигналів від кінцевих вимикачів та датчика Z-probe для захисту від електромагнітних завад, що генеруються щітковим вузлом шпинделя. Також обов'язковою є наявність повної гальванічної розв'язки логічних кіл від силових за допомогою оптопар, що гарантує захист порту мікроконтролера від пошкоджень.

РОЗДІЛ 2

КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1 Розробка структурної схеми системи керування

Відповідно до технічних вимог та постановки задачі, які були детально обґрунтовані у першому розділі роботи, розробка апаратної частини системи керування настільним фрезерним верстатом розпочинається із формування її структурної схеми. Оскільки головним призначенням проєктованого обладнання є точне прототипування друкованих плат із використанням шпинделя типу 775 та алгоритмів автоматичної компенсації кривизни поверхні за допомогою датчика Z-probe, структурна організація контролера має забезпечувати високу швидкодію, стійкість до електромагнітних завад та можливість бездротового керування. За основу архітектури майбутньої плати, що концептуально спирається на можливості сучасних 32-бітних рішень, обрано модульний підхід. Це дозволяє логічно розділити пристрій на кілька ключових взаємопов'язаних вузлів, кожен з яких виконує свою специфічну функцію в загальному процесі обробки G-коду та керування механікою верстата.

Центральним інтелектуальним ядром розроблюваної системи виступає блок обчислень та керування, побудований на базі високопродуктивного 32-бітного мікроконтролера родини ESP32. Вибір саме такої структури ядра безпосередньо впливає з необхідності швидкого парсингу складних керуючих програм та підтримки веб-інтерфейсу через вбудований модуль Wi-Fi, що було визначено як одна з ключових вимог до проєкту. Цей блок бере на себе завдання генерації точних часових імпульсів для позиціонування робочого органу, формування широтно-імпульсної модуляції для регулювання обертів шпинделя, а також безперервного моніторингу стану периферійних датчиків у режимі реального часу.

Для забезпечення надійного функціонування обчислювального ядра та силових виконавчих механізмів, структурна схема обов'язково включає

комплексну підсистему живлення. Враховуючи, що крокові двигуни та колекторний шпиндель вимагають для своєї роботи напруги 24 В, а логічна частина мікроконтролера та датчики оперують рівнями 3,3 В та 5 В, даний блок реалізує каскадне перетворення енергії. Вхідна напруга розподіляється на дві основні магістралі: силова лінія проходить транзитом до драйверів та ключів керування, тоді як слабкострумова лінія через систему понижуючих перетворювачів та лінійних стабілізаторів формує чисте живлення для чутливої цифрової електроніки, мінімізуючи вплив перепадів напруги під час різких навантажень на механіку верстата.

Виконавча частина структурної схеми розділена на блок керування кроковими приводами та блок керування шпинделем. Блок крокових приводів виступає сполучною ланкою між логічними виходами мікроконтролера та фізичними обмотками двигунів осей X, Y та Z. Він передбачає використання спеціалізованих драйверів, які перетворюють слабкострумові сигнали кроку та напрямку у відповідні силові струми, забезпечуючи плавне та точне переміщення фрези. У свою чергу, блок керування шпинделем відповідає за комутацію значних струмів колекторного двигуна 775-ї серії. Структурно він реалізований як потужний електронний ключ, який під дією ШІМ-сигналу від головного процесора змінює ефективну напругу на клеммах двигуна, тим самим регулюючи швидкість обертання різального інструменту залежно від матеріалу заготовки.

Особливу увагу в структурній схемі приділено блоку обробки вхідних сигналів, який є критично важливим для реалізації заявленої функції побудови карти висот та гарантування безпеки роботи верстата. Оскільки фрезерування мідного текстоліту супроводжується генерацією значного рівня електричних завад від щіткового шпинделя, сигнали від кінцевих вимикачів та контактного щупа не можуть надходити до мікроконтролера безпосередньо. Цей структурний вузол включає ланцюги апаратної фільтрації, що гарантує отримання системою керування виключно достовірних даних про торкання фрезою поверхні заготовки. Це, у свою

чергу, дозволяє програмному забезпеченню коректно компенсувати кривизну плати та уникнути пошкодження інструменту. Розроблена структурна схема взаємодії всіх вузлів контролера представлена на рисунку 2.1.

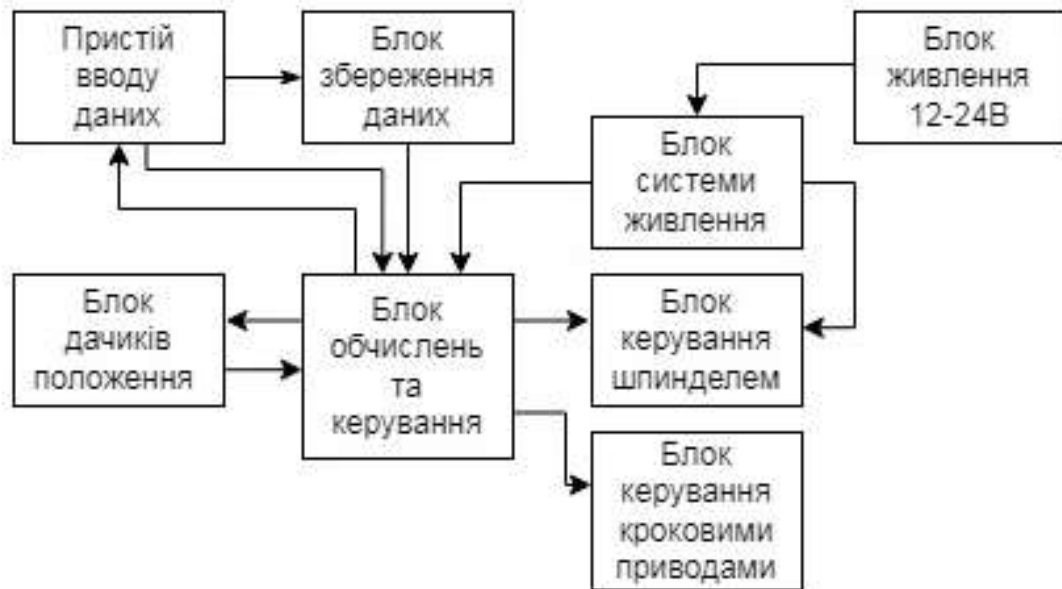


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи керування настільним фрезерним верстатом

Для повноцінної автономної роботи системи також інтегровано пристрій вводу даних та блок збереження даних, що дозволяє завантажувати та виконувати керуючі файли G-коду без постійного підключення до ПК.

2.2 Вибір та обґрунтування електронної компонентної бази

На основі розробленої структурної схеми наступним етапом проєктування є вибір конкретних електронних компонентів. Враховуючи специфіку роботи настільного фрезерного верстата для прототипування друкованих плат, компонентна база повинна мати достатній запас міцності для роботи в умовах вібрацій та значних пускових струмів від індуктивних навантажень.

Як центральний обчислювальний пристрій обрано модуль ESP32-

WROOM-32. Вибір цього компонента зумовлений необхідністю швидкого розрахунку траєкторій та обробки сигналів від датчика Z-probe у реальному часі. Крім того, апаратна інтеграція модуля Wi-Fi повністю задовольняє вимогу щодо забезпечення бездротового зв'язку з верстатом. Зовнішній вигляд обраного мікроконтролерного модуля представлено на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд модуля ESP32-WROOM-32 [5]

Для забезпечення повної автономності системи та можливості зчитування великих обсягів керуючих програм, у схему включено слот для Micro-SD карт, що підключається до мікроконтролера за інтерфейсом SPI. Основні технічні характеристики обраного модуля наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики модуля ESP32-WROOM-32

Параметр	Значення
Архітектура процесора	Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6
Тактова частота	до 240 МГц
Обсяг оперативної пам'яті (SRAM)	520 КБ
Обсяг флеш-пам'яті	4 МБ (SPI Flash)
Бездротові інтерфейси	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth v4.2 BR/EDR та BLE
Напруга живлення	3,0 В ... 3,6 В (номінально 3,3 В)
Максимальний струм порту вводу / виводу	12 мА

Для коректного трасування та підключення периферійних пристроїв необхідно враховувати призначення виводів мікроконтролера.

Схема розташування та призначення GPIO-контактів модуля наведена на рисунку 2.3.

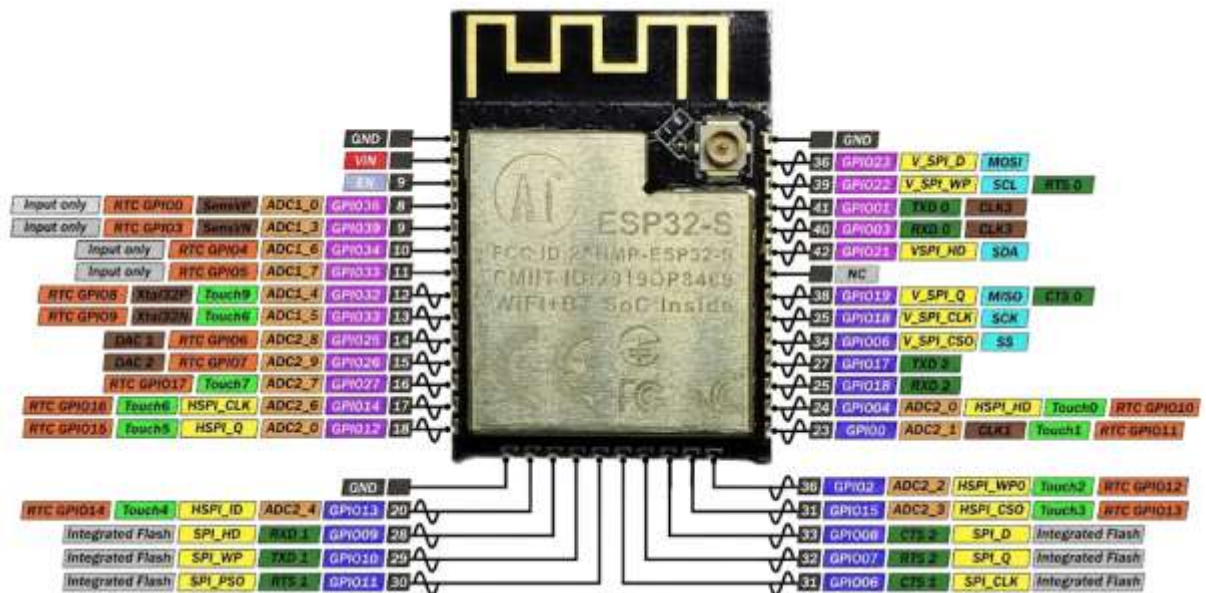


Рисунок 2.3 – Схема розташування та функціональне призначення виводів ESP32 [2]

4

Для керування кроковими двигунами осей X, Y та Z обрано сучасні інтегральні драйвери TMC2209 у форм-факторі змінних модулів. Процес фрезерування мідного текстоліту вимагає високої точності позиціонування та відсутності вібрацій. Драйвери родини Trinamic підтримують технології StealthChop2™ та SpreadCycle™, які гарантують плавний рух робочого органу навіть на низьких швидкостях. Зовнішній вигляд модуля драйвера з встановленим алюмінієвим радіатором охолодження представлено на рисунку 2.4.

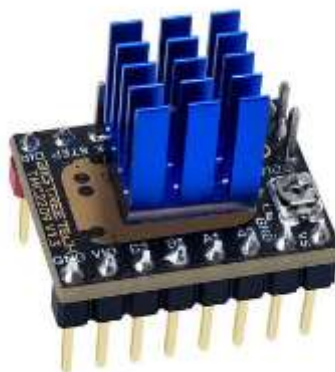


Рисунок 2.4 – Модульний драйвер крокового двигуна TMC2209 з радіатором охолодження [7]

Характеристики драйвера наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Електричні та експлуатаційні параметри драйвера TMC2209

Параметр	Значення
Напруга живлення логічної частини (VIO)	3,0 В ... 5,25 В
Напруга живлення моторів (VM)	4,75 В ... 29 В
Максимальний робочий струм на фазу (RMS)	2,0 А
Піковий струм на фазу	2,8 А
Максимальне дроблення кроку (мікрокрок)	1/256 (внутрішня інтерполяція MicroPlyer)
Інтерфейс конфігурування	UART / DIR&STEP

При проектуванні материнської плати контролера важливо узгодити інтерфейси підключення драйвера. Розташування та призначення контактів плати TMC2209 наведено на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Конфігурація та призначення виводів модуля драйвера TMC2209 [7]

Для забезпечення стабільної роботи двигунів без перегріву необхідно розрахувати опорну напругу (V_{ref}), яка визначає робочий струм. При використанні вимірювальних резисторів $R_{sense}=0,11$ Ом та необхідному діючому струмі двигуна $I_{rms}=1,2$ А, розрахунок має вигляд (2.1):

$$V_{ref} = \frac{I_{rms}}{1,18}, \quad (2.1)$$

$$V_{ref} = \frac{1.2}{1,18} \approx 1,02 \text{ В.}$$

Керування колекторним двигуном шпинделя типу 775 вимагає застосування надійного силового ключа, здатного комутувати значні струми при напрузі 24 В. Для цієї мети обрано MOSFET-транзистор IRLZ44N. Конструктивне виконання транзистора у корпусі TO-220AB та його умовне графічне позначення на електричних схемах наведено на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Корпус TO-220AB та умовне графічне позначення транзистора IRLZ44N

Технічні параметри транзистора наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Характеристики польового транзистора IRLZ44N

Параметр	Значення
Максимальна напруга стік-витік (V_{DSS})	55 В
Максимальний струм стоку (I_D) при 25°C	47 А
Опір відкритого каналу ($R_{DS(on)}$)	0,022 Ом (при $V_{GS}=5\text{В}$)
Порогова напруга увімкнення ($V_{GS(th)}$)	1,0 В ... 2,0 В
Тип корпусу	TO-220AB

Завдяки наднизькому опору відкритого каналу, транзистор IRLZ44N під час роботи зі шпинделем 775 практично не виділятиме тепла, що дозволяє відмовитися від масивних радіаторів охолодження на платі.

Оскільки основна напруга живлення верстата становить 24 В, вибір джерела живлення базується на розрахунку сумарного струму системи

($I_{\max}$), що включає шпиндель (5 А), три двигуни (4,5 А) та логіку (0,1 А):

$$I_{\max} = 5 + 4,5 + 0,1 = 9,6 \text{ А}$$

Сумарна пікова потужність системи складає:

$$P_{\max} = 24 \cdot 9,6 = 230,4 \text{ Вт}$$

З урахуванням коефіцієнта запасу, обрано БЖ на 250 Вт. Для живлення логічної частини модуля розроблено схему понижуючого перетворювача напруги. На відміну від лінійних стабілізаторів, використання яких призвело б до високих теплових втрат, у схемі використано імпульсний DC-DC перетворювач на базі інтегральної мікросхеми MP1584EN. Електрична принципова схема розробленого вузла живлення та перетворення напруги представлена на рисунку 2.7.

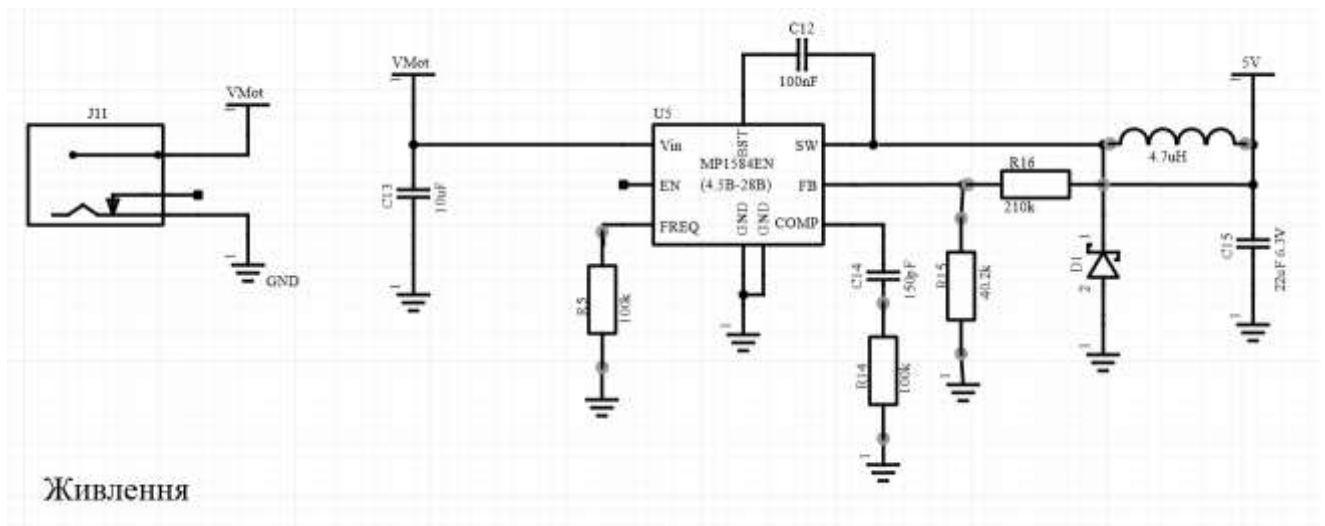


Рисунок 2.7 – Схема електрична принципова вузла живлення та понижуючого перетворювача напруги

Вхідна напруга живлення (12-24 В) від імпульсного блока подається через роз'єм постійного струму J11 та згладжується вхідним фільтруючим конденсатором C13 ємністю 10 мкФ. Мікросхема U5 виконує високовольтне перетворення з високим ККД. Зворотний зв'язок для стабілізації вихідної напруги на рівні 5 В реалізовано за допомогою резистивного дільника R15 та R16. Вихідний фільтр побудований на базі дроселя номіналом 4,7 мГн,

швидкого діода Шотткі D1 та вихідного конденсатора C15, що забезпечує мінімальний рівень високочастотних пульсацій. Для гальванічної розв'язки вхідних сигналів використано оптопару PC817. Завершальним етапом є розрахунок ширини доріжок: для струму 9,6 А при товщині міді 35 мкм необхідна ширина складає 7,2 мм, тому силові кола реалізуються у вигляді мідних полігонів для мінімізації опору.[6]

2.3 Розробка електричної принципової схеми модуля керування

На основі обраної елементної бази розроблено принципову електричну схему спеціалізованого модуля керування фрезерним верстатом. Схема логічно поділяється на кілька основних блоків: обчислювальне ядро з підсистемою зв'язку, блок керування кроковими приводами, силовий каскад шпинделя та блок обробки вхідних сигналів. Схема підключення обчислювального модуля ESP32 наведена на рисунку 2.8

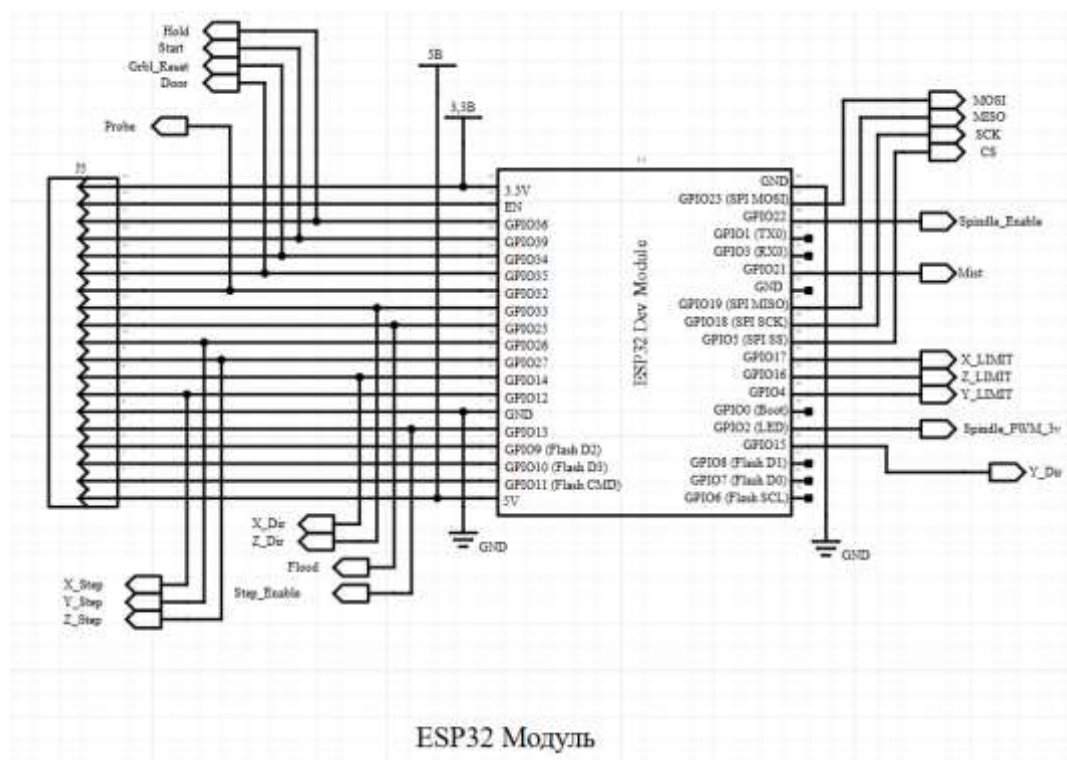


Рисунок 2.8 – Схема електрична принципова підключення обчислювального модуля ESP32

Схему підключення силових каналів крокових двигунів представлено на рисунку 2.9.

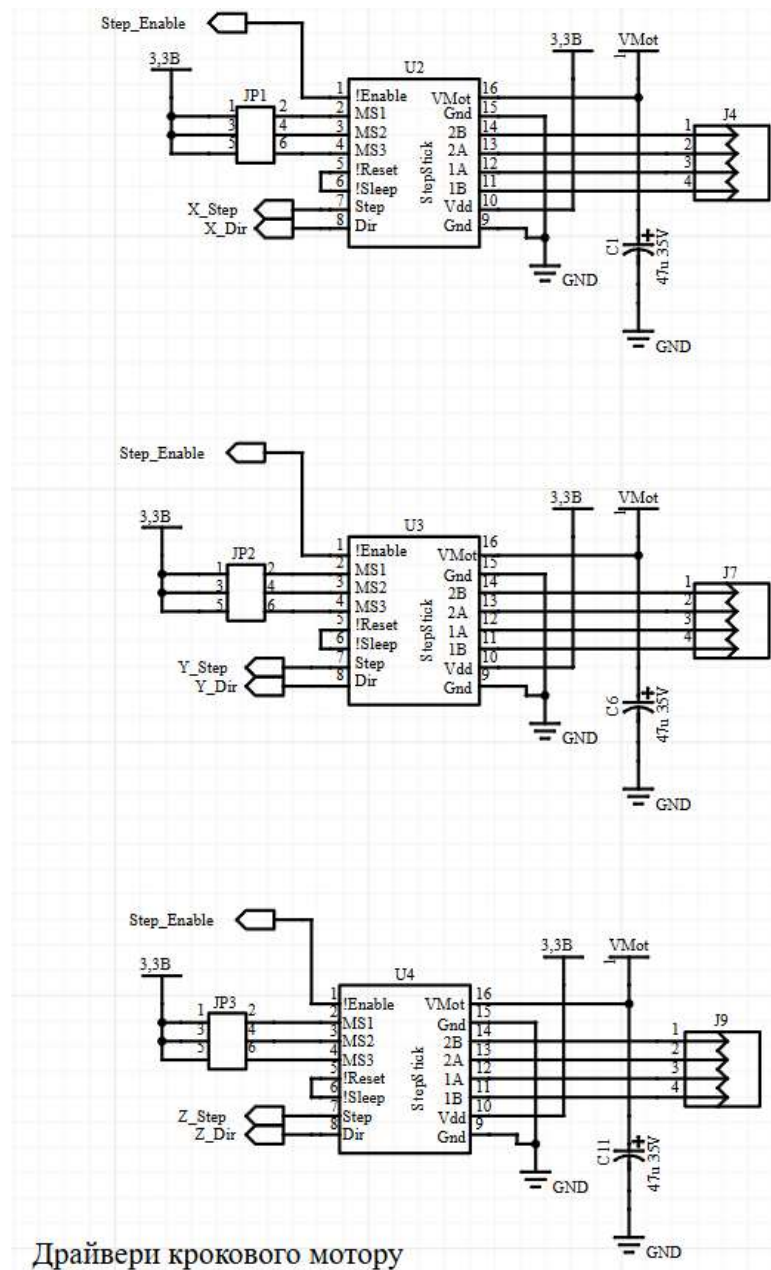


Рисунок 2.9 – Схема електрична принципова силових каналів керування кроковими приводами

Центральним елементом схеми є модуль мікроконтролера ESP32-WROOM-32. Оскільки сам модуль не має вбудованого апаратного інтерфейсу USB для прямого зв'язку з персональним комп'ютером, у схему інтегровано мікросхему перетворювача інтерфейсів USB-UART типу CH340C. Для

забезпечення автономної роботи верстата з об'ємними файлами керуючих програм до мікроконтролера підключено модуль зчитування Micro-SD карт. Обмін даними з картою пам'яті реалізовано через високошвидкісну апаратну шину SPI із залученням відповідних виводів мікроконтролера (MOSI, MISO, SCK) та окремого сигналу вибору чипа (CS). [7]

Силова частина для керування переміщенням побудована на основі слотів для встановлення модульних драйверів крокових двигунів стандарту TMC2209. Логічні входи драйверів STEP, DIR, EN підключені безпосередньо до GPIO-портів ESP32, а їхнє живлення розділено на логічне та силове.

Налаштування режимів мікрокроку для драйверів U2, U3 та U4 здійснюється за допомогою встановлення перемичок на роз'єми JP1, JP2 та JP3 відповідно, які підтягують керуючі виводи драйверів до лінії живлення 3,3 В. Кожен канал шунтовано керамічними та електролітичними конденсаторами великої ємності (47 мкФ, 37 В) для захисту від різких стрибків струму при реверсі двигунів. Вихідні сигнали подаються на крокові двигуни через роз'єми J1, J7 та J9.

Особливу увагу приділено силовому каскаду керування шпинделем та периферійним пристроям виходу. Для захисту мікроконтролера від високовольтних викидів керуючий ШІМ-сигнал подається на затвор MOSFET-транзистора IRLZ44N через оптопару гальванічної розв'язки PC817. Щоб не перевантажити порт мікроконтролера, розраховано струмообмежувальний резистор для світлодіода оптопари. При напрузі логічного рівня $U_{out}=3,3\text{ В}$, падінні напруги на світлодіоді $U_f=1,2\text{ В}$ та номінальному струмі $I_f=10\text{ мА}$ опір визначається за формулою (2.2):

$$R_{led} = \frac{U_{out} - U_f}{I_f}, \quad (2.2)$$

$$R_{led} = \frac{3,3 - 1,2}{0,01} = 210\text{ Ом.}$$

Для встановлення у схему обрано найближчий стандартний номінал 220 Ом. Паралельно контактам підключення двигуна шпинделя встановлено швидкий зворотний діод Шотткі (SS34), який захищає транзистор від пробією струмами самоіндукції під час гальмування. Комутація вихідних сигналів на виконавчі органи здійснюється через інтерфейсний вихідний роз'єм J10 (вихід), схему якого зображено на рисунку 2.10.

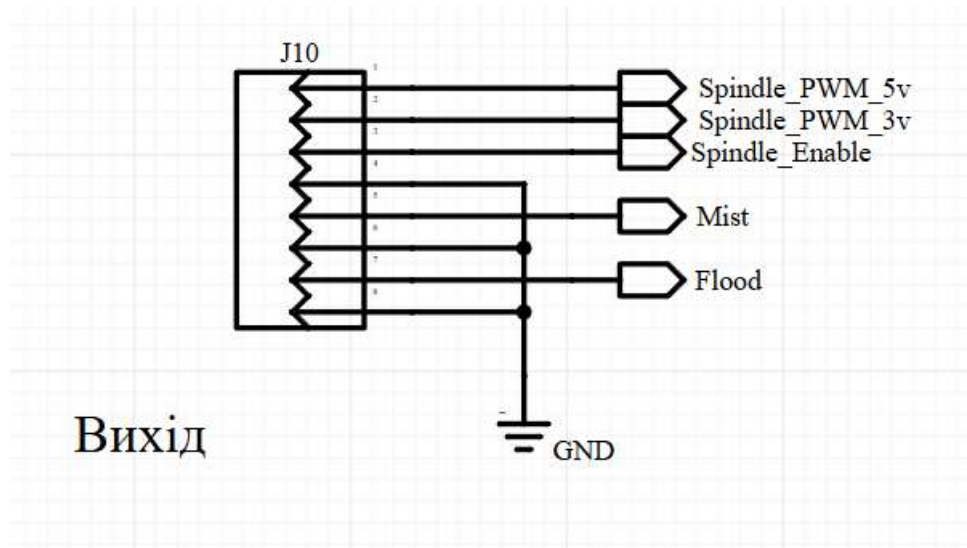


Рисунок 2.10 – Схема електрична принципова вихідних комутаційних роз'ємів

Схема обробки сигналів зворотного зв'язку включає підключення кінцевих вимикачів осей та контактного щупа. Для унеможливлення хибних спрацьовувань від електромагнітних завад шпинделя кожна сигнальна лінія оснащена апаратним RC-фільтром низьких частот (ФНЧ). Частота зрізу f_c для фільтра з резистором $R=10$ кОм та конденсатором $C=100$ нФ розраховується за формулою (2.3):

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (2.3)$$

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10000 \cdot 0.0000001} \approx 159 \text{ Hz}$$

Така частота зрізу ефективно відфільтровує високочастотний індустріальний шум, але пропускає корисні сигнальні імпульси від кінцевиків. Принципову схему блоку входних інтерфейсів та RC-фільтрації наведено на рисунку 2.11.

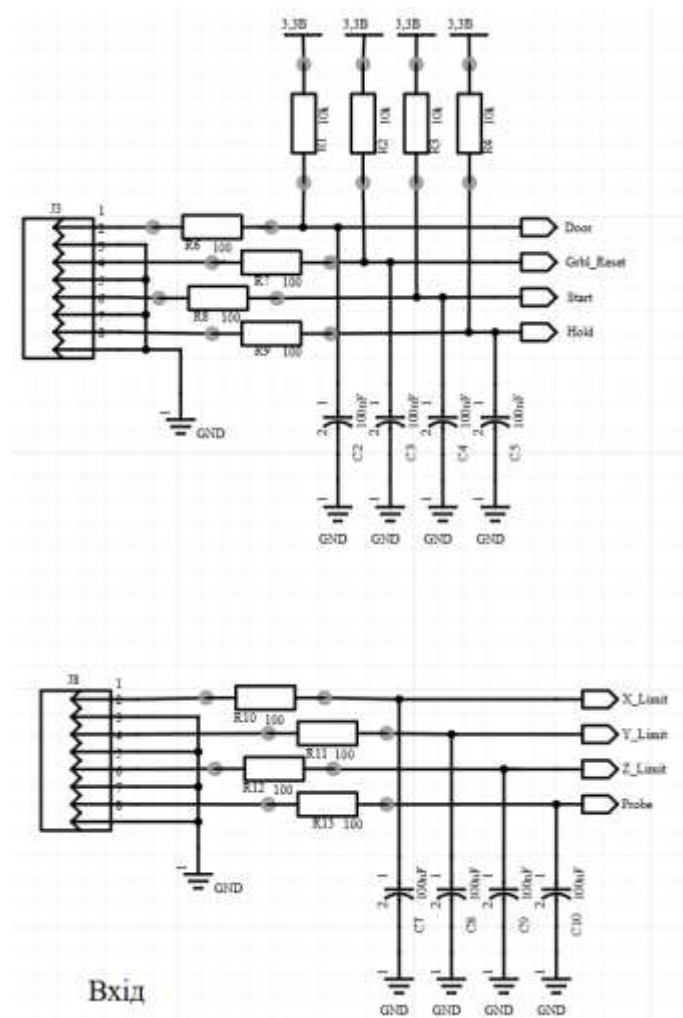


Рисунок 2.11 – Схема електрична принципова блоків обробки входних сигналів

Після фільтрації сигнали проходять через додатковий каскад оптопар PC817, що гарантує повну фізичну ізоляцію чутливих входів мікроконтролера від силових заземлень верстата.[8]

Після детального проєктування та розрахунку всіх окремих функціональних вузлів було сформовано єдину консолідовану електричну принципову схему модуля керування. Повна суміщена принципова схема, що

відображає всі електричні зв'язки між компонентами на платі, представлена на рисунку 2.12.

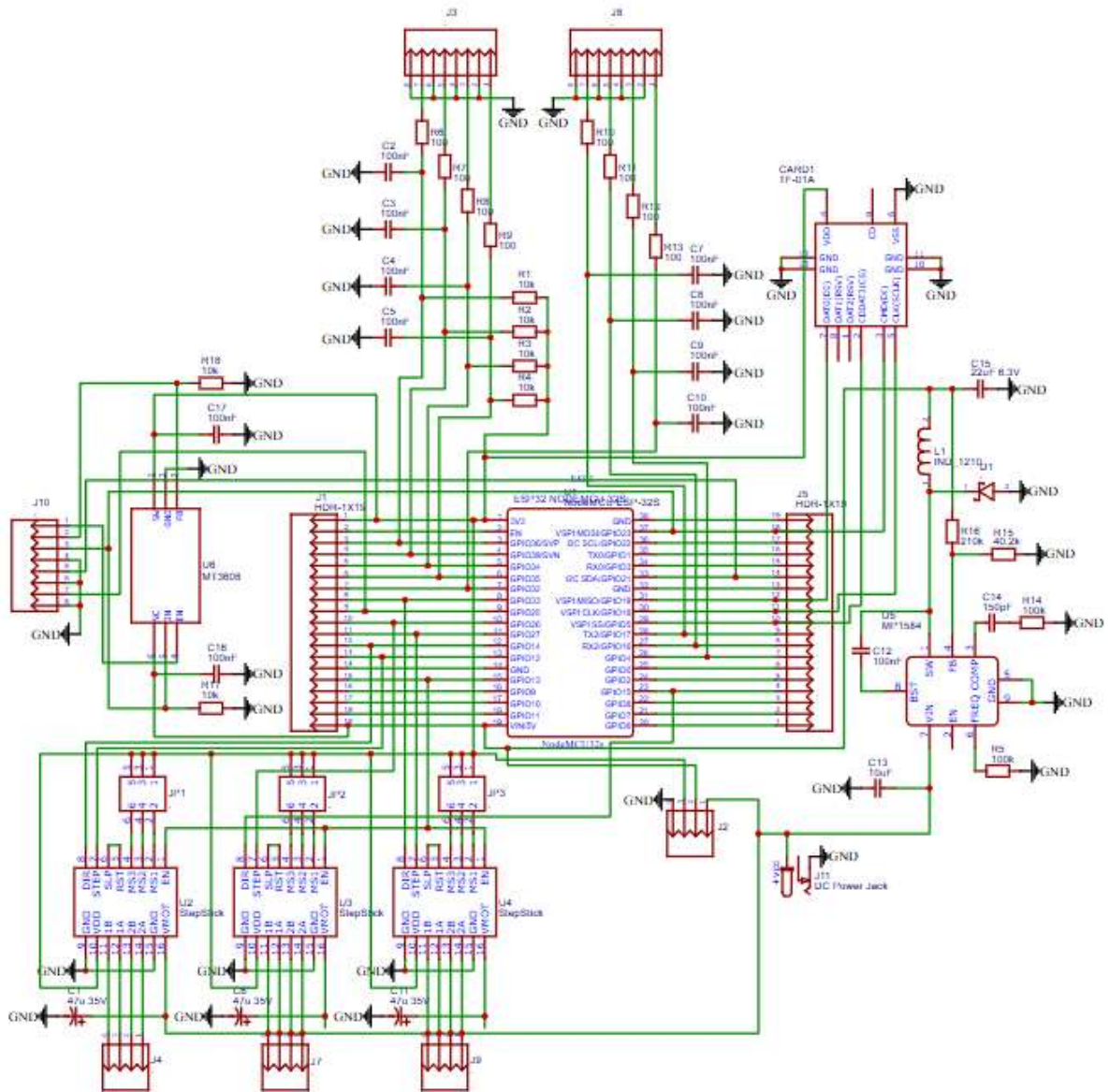


Рисунок 2.12 – Електрична принципова схема модуля керування ЧПК

На суміщеній схемі чітко простежується зв'язок між виводами роз'ємів J1 та J5, які слугують для встановлення модуля ESP32 NodeMCU та периферійними пристроями. Сигнали керування кроковими двигунами з урахуванням апаратних підтяжок прокладено до сокетів U2, U3 та U4. Живлення логічної частини і силова напруга моторів V_{Motor} розподіляються від вихідних каскадів імпульсного перетворювача U5 та додаткового

стабілізатора U6, забезпечуючи енергетичну автономність та стабільність роботи системи при максимальних механічних навантаженнях на виконавчі органи верстата.[8]

2.4 Проєктування топології друкованої плати модуля керування

Наступним та одним із найвідповідальніших етапів розробки власного контролера є проєктування топології друкованої плати на основі раніше створеної електричної принципової схеми. Для виконання цього завдання доцільно використати сучасні системи автоматизованого проєктування електроніки, такі як EasyEda, які надають потужний інструментарій для трасування плат та перевірки правил проєктування. Оскільки розроблюваний модуль керування поєднує на одній платі як чутливі цифрові кола мікроконтролера ESP32, так і потужні силові магістралі для живлення крокових двигунів та колекторного шпинделя, ключовим завданням на етапі трасування є забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) та правильного тепловідведення.[1]

Процес розведення плати розпочинається з грамотного компонування електронних компонентів на площині текстоліту. Мікроконтролер ESP32, як центральне ядро системи, розташовується на безпечній відстані від силових ключів та роз'ємів живлення двигунів, щоб мінімізувати вплив електромагнітних завад на роботу його внутрішніх таймерів та модуля Wi-Fi. Антена бездротового модуля розміщується скраю друкованої плати, причому під нею обов'язково видаляється мідна заливка на всіх шарах, що гарантує стабільну передачу радіосигналу без спотворень та екранування. Драйвери крокових двигунів та силовий MOSFET-транзистор керування шпинделем групуються в окремій зоні плати, ближче до головного роз'єму живлення 24 В, що дозволяє зробити силові доріжки максимально короткими та широкими. Трасування провідників на шарах двосторонньої друкованої плати представлено на рисунку 2.13.

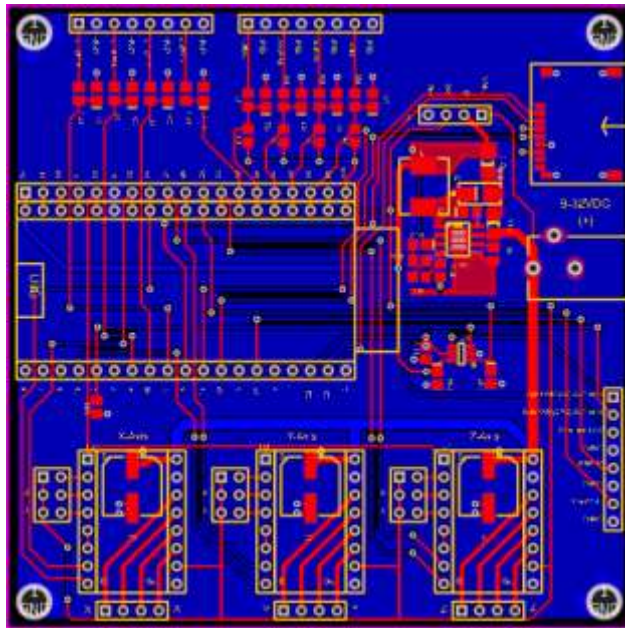


Рисунок 2.13 – Топологія провідників друкованої плати модуля керування

Особлива увага під час трасування приділяється правильній організації контурів заземлення. Для уникнення утворення паразитних «земляних петель» та впливу зворотних струмів силових виконавчих механізмів на логічну частину, застосовується метод розділення полігонів землі на цифрову та силову зони, які з'єднуються лише в одній точці безпосередньо біля вхідного конденсатора фільтра живлення. Силові магістралі трасуються доріжками збільшеної ширини, розрахованими на протікання значних струмів без нагрівання мідного шару. Для додаткового тепловідведення від мікросхеми імпульсного DC-DC перетворювача та силових транзисторів навколо них формуються великі зони металізації з використанням масиву перехідних отворів, які ефективно передають надлишкове тепло на протилежний бік плати.[9]

Сигнальні лінії, зокрема високочастотна шина SPI для зв'язку з модулем Micro-SD карти, кола інтерфейсів та ШІМ-керування, розводяться доріжками мінімально допустимої ширини, уникаючи гострих кутів та перехідних отворів, щоб запобігти відбиттю сигналу, втраті пакетів даних та паразитним випромінюванням. Ланцюги від кінцевих вимикачів та датчика Z-probe прокладаються на максимальному віддаленні від силових доріжок

шпинделя, а їхні фільтруючі RC-ланцюжки та оптопари розміщуються якомога ближче до входних пінів мікроконтролера. Для забезпечення бездоганної гальванічної ізоляції, під оптопарами передбачено фізичний пропил у текстоліті, що повністю унеможливорює поверхневий пробій. Після завершення розведення всіх кіл, вільний простір на верхньому та нижньому шарах плати заповнюється суцільним мідним полігоном заземлення. Топологія нижнього шару друкованої плати з маркуванням компонентів та виділеними заземлювальними полігонами наведена на рисунку 2.14

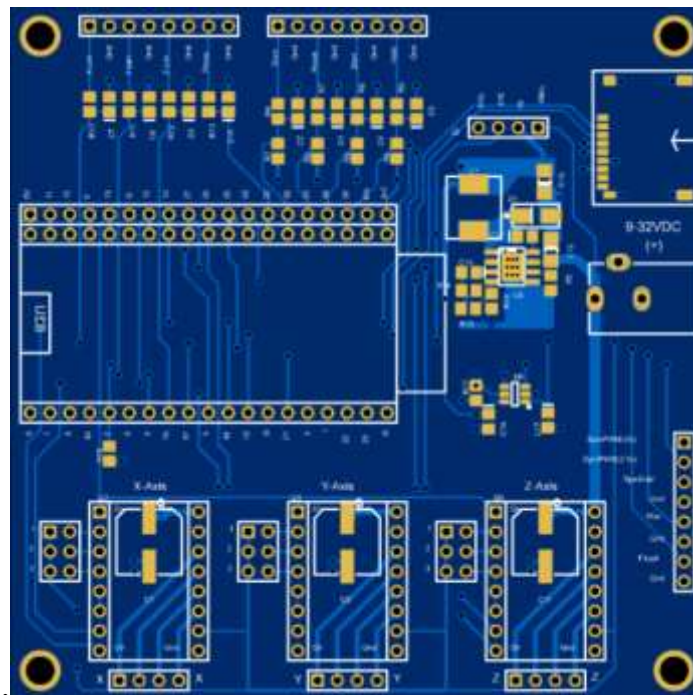


Рисунок 2.14 – Топологія друкованої плати модуля керування

Таке топологічне рішення виконує роль додаткового екрану від індустриальних завад та гарантує надійну роботу пристрою за умов тривалої експлуатації.[9]

РОЗДІЛ 3

ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА НАЛАГОДЖЕННЯ КЕРУЮЧОГО МОДУЛЯ

3.1 Обґрунтування технології виготовлення друкованої плати та вибір системного програмного забезпечення

Виготовлення друкованої плати (ДП) для спеціалізованого модуля керування є критично важливим технологічним етапом, від якого безпосередньо залежить надійність, завадостійкість та довговічність усього програмно-апаратного комплексу верстата з ЧПК. Сучасна електроніка використовує три основні групи методів формування провідного малюнка на діелектричних підкладках: субтрактивні, адитивні та напівадитивні.

В умовах дрібносерійного або лабораторного прототипування найчастіше постає вибір між субтрактивним механічним методом та промисловим субтрактивним хімічним методом.

Для розроблюваного модуля керування, який містить високочутливі цифрові кола та потужні силові комутаційні ланцюги використання кустарних методів виготовлення є неприпустимим. Для обґрунтування вибору промислової технології виготовлення ДП було проведено комплексний аналіз існуючих технологічних підходів, результати якого узагальнено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Комплексний порівняльний аналіз технологій виготовлення друкованої плати модуля керування

Технологічні параметри та критерії оцінки	Аматорські методи (ЛУТ, рідкий фоторезист)	Механічний метод (фрезерування на ЧПК)	Промисловий метод (хімічне травлення + HASL)
Мінімально відтворювана ширина доріжки	0,3–0,4 мм	0,25–0,3 мм	0,12–0,15 мм
Мінімальний гарантований зазор	0,35 мм	0,25 мм	0,15 мм

Продовження таблиці 3.1

Металізація перехідних отворів (Vias)	Відсутня (потребує ручного пропаювання дротом)	Відсутня (потребує встановлення мідних заклепок)	Гальванічна хімічна металізація (товщина міді > 20 мкм)
Захисне покриття провідників	Тільки ручне лакування або каніфольний флюс	Хімічне лудіння низької якості	Захисна паяльна маска (Solder Mask) + покриття HASL
Ідентифікація компонентів	Відсутня	Відсутня	Двостороння шовкографія (Silkscreen)
Електромагнітна сумісність (ЕМС)	Низька через неможливість формування суцільних екранів	Середня (наявні крайові дефекти провідників)	Висока завдяки прецизійній геометричній точності та суцільним полігонам GND

Аналіз даних таблиці 3.1 показує, що лише промисловий метод хімічного травлення у поєднанні з гальванічною металізацією отворів здатний забезпечити вимоги, висунуті до завадостійкості модуля керування.

Матеріалом основи обрано фольгований склотекстоліт марки FR-4 з товщиною діелектрика 1,6 мм. Склотекстоліт FR-4 складається з декількох шарів склотканини, просоченої епоксидною смолою, що забезпечує високу механічну жорсткість, низьку гігроскопічність та відмінні діелектричні властивості діелектрична проникність.

Товщина мідного покриття становить 35 мкм. Це є стандартним інженерним рішенням, яке забезпечує компроміс між здатністю пропускати значні струми силових ліній без критичного перегріву провідників та можливістю прецизійного травлення тонких сигнальних ліній шини SPI.

Технологічний процес промислового виготовлення плати включає такі основні операції:

- підготовка матеріалу та свердління: нарізка заготовок склотекстоліту FR-4, свердління перехідних та монтажних отворів на високошвидкісних свердлильних верстатах з ЧПК за координатами з файлу Excellon;

- гальванічна підготовка: хімічне очищення та осадження тонкого шару

міді на стінки просвердлених отворів для забезпечення первинної електропровідності;

- електролітичне нарощування міді: гальванічне осадження міді в отворах і на поверхні плати для досягнення нормативної товщини металізації;

- формування малюнка провідників: нанесення сухого плівкового фоторезисту, експонування через фотошаблон за допомогою УФ-випромінювання, проявлення малюнка у слабкому розчині карбонату натрію;

- травлення: видалення незахищених ділянок міді у кислому розчині хлориду міді що дозволяє отримати прецизійні краї доріжок;

- нанесення захисної маски: нанесення рідкої фоточутливої паяльної маски зеленого кольору, її експонування та полімеризація. Маска захищає мідні провідники від корозії, вологи та запобігає розтіканню припою під час паяння;

- фінішне покриття HASL: занурення плати у розплавлений безсвинцевий припій з подальшим вирівнюванням струменем гарячого повітря під тиском. Це забезпечує легке та надійне паяння компонентів;

- шовкографія: нанесення білою фарбою маркування компонентів, контурів роз'ємів та позначень сигналів.

Ефективна робота розробленого апаратного модуля можлива лише за умови його інтеграції з гнучким, швидкодіючим та надійним програмним забезпеченням. Традиційні 8-бітні системи керування на базі мікроконтролерів ATmega328 вичерпали свій ресурс розвитку через низьку тактову частоту 16 МГц, малий обсяг оперативної пам'яті 2 КБ та відсутність апаратних засобів для роботи з бездротовими мережами та файловими системами.

Для 32-бітної архітектури ESP32 існують два основних програмних рішення: звичайний порт GRBL_ESP32 та сучасна модульна система FluidNC. Для розроблюваного верстата було обрано прошивку FluidNC з відкритим вихідним кодом. Порівняльний аналіз архітектурних особливостей FluidNC у порівнянні з іншими системами керування наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняльна характеристика системного програмного забезпечення для ЧПК

Параметр порівняння	GRBL (AVR ATmega328)	Marlin 2.0 (ARM Cortex-M)	FluidNC (ESP32 Xtensa Dual-Core)
Розрядність ядра	8 біт	32 біти	32 біти
Максимальна частота кроків (Step Rate)	30 кГц	150–200 кГц	до 350 кГц
Спосіб конфігурування системи	Перекомпіляція коду в Arduino IDE	Перекомпіляція коду (VS Code + PlatformIO)	Текстовий конфігураційний файл YAML (без перекомпіляції)
Інтерфейс передачі даних	Тільки USB (RS-232)	USB, SD-карта	USB, Wi-Fi (Web UI, WebSockets), Telnet, SD-карта
Підтримка безсенсорного пошуку дому (Sensorless Homing)	Відсутня	Часткова (потребує складного налаштування)	Повна апаратна підтримка для драйверів TMC2209 через UART
Планувач траєкторії (Look-Ahead buffer)	16 блоків	Залежить від RAM (до 64 блоків)	Динамічний (до 100+ блоків у RAM)

FluidNC є принципово новим кроком у розвитку систем ЧПК. Завдяки використанню операційної системи реального часу FreeRTOS на двоядерному процесорі ESP32, завдання генерації високочастотних імпульсів кроку та напрямку повністю відокремлено від завдань обслуговування мережевого стека Wi-Fi та веб-сервера. Одне ядро процесора займається виключно прецизійним таймінгом руху осей, а друге – обробкою HTTP-запитів від користувача, що виключає ризик виникнення мікропауз у генерації кроків, які часто призводять до пропуску кроків двигунами під час фрезерування складних траєкторій.

3.2 Технологічна послідовність монтажу модульних складових та комплексний алгоритм програмного налаштування системи

Монтаж друкованої плати модуля керування виконувався за комбінованою технологією монтажу на поверхню та монтажу у наскрізні

отвори. Оскільки плата працює в умовах підвищеної вібрації що є невід'ємним фактором роботи фрезерного верстата, паяні з'єднання повинні мати високу механічну міцність та пластичність.

Технологічний процес складання модуля здійснювався у наступній інженерній послідовності:

- для SMD компонентів пасивного захисту та інтегральних мікросхем використовувався метод паяння гарячим повітрям. На контактні майданчики наносився безотмивний флюс–гель класу ROL0 та безсвинцева паяльна паста Sn96.5/Ag3.0/Cu0.5 (SAC305) з температурою плавлення 217 °C. Позиціонування компонентів здійснювалося вакуумним пінцетом. Оплавлення проводилося термopовітряною станцією за температурним профілем з піковою температурою 245 °C протягом 30 секунд;

- паяння проводилося класичним методом за допомогою паяльника з керамічним нагрівачем та довговічним жалом Використовувався трубчастий припій ПОС-61 діаметром 0,8 мм із внутрішнім флюсом. Температура жала підтримувалася на рівні 310°C для сигнальних ліній та 340 °C для масивних силових клемників живлення;

- після паяння плата очищала від залишків флюсу в ультразвуковій ванні з використанням суміші ізопропілового спирту та бензину у пропорції 1:1. Контроль якості паяних з'єднань проводився під тринокулярним монтажним мікроскопом на відсутність мікротріщин, непропаїв та паразитних перемичок припою. Електричний контроль включав перевірку відсутності короткого замикання між силовими шинами GND, 24 В, 5 В та 3,3 В за допомогою цифрового мультиметра.

Програмне налаштування розпочинається із завантаження базового завантажувача та ядра FluidNC в мікроконтролер ESP32. Для цього плату підключають до персонального комп'ютера через USB-кабель. Завдяки інтегрованій мікросхемі CH340C комп'ютер визначає плату як віртуальний СОМ-порт. За допомогою спеціалізованої утиліти fluidnc-installer через командний рядок виконується повне очищення флеш-пам'яті та запис файлів

прошивки. [3]

Після успішного запису ESP32 перезавантажується та створює власну бездротову точку доступу Wi-Fi з назвою FluidNC. Користувач підключається до цієї мережі, відкриває браузер та переходить за адресою <http://192.168.0.1>, де відкривається графічний Web-інтерфейс керування верстатом.

Наступним найважливішим кроком є завантаження у внутрішню енергонезалежну пам'ять мікроконтролера індивідуального конфігураційного файлу `config.yaml`. Представлено повну версію розробленого конфігураційного файлу, який повністю описує апаратну структуру нашої плати та узгоджує роботу периферії в додатку A.

3.3 Комплексне налагодження кінематичної схеми, розрахунок параметрів точності та експериментальне дослідження роботи верстата

Фінальний етап практичного втілення проєкту полягає у фізичному налаштуванні кінематичних передач верстата та експериментальному підтвердженні його точностних характеристик.

Для забезпечення точного переміщення робочого столу верстата по осях X, Y та Z необхідно математично розрахувати коефіцієнти передачі імпульсів для кожного міліметра лінійного шляху. Верстат оснащений біполярними кроковими двигунами NEMA 17 із кутовим кроком $\alpha=1,8$ на один повний крок. Отже, базова кількість кроків на один повний оберт вала двигуна становить (3.1):

$$N_{steps} = \frac{360^\circ}{\alpha}, \quad (3.1)$$

$$N_{steps} = \frac{360^\circ}{1.8^\circ} = 200 \text{ кроків/об.}$$

Для досягнення високої плавності ходу, зниження шуму та усунення

резонансних явищ на низьких швидкостях подачі, модульні драйвери ТМС2209 сконфігуровані в режим дроблення кроку $M_{microstep}=1:32$. У цьому режимі кількість мікрокроків на один повний оберт вала двигуна дорівнює за формулою (3.2):

$$N_{microsteps}=N_{steps} \cdot M_{microstep}, \quad (3.2)$$

$$N_{microsteps}=200 \cdot 32=6400 \text{ мікрокроків/об.}$$

Передача обертового моменту на робочі органи здійснюється через ходові гвинти Т8 із трапецеїдальною нарізкою. Гвинт має діаметр 8 мм та є чотиризахідним із кроком нарізки 2 мм. Таким чином, лінійний хід гайки ходового гвинта за один повний оберт рахується за формулою (3.3):

$$Lead=Pitch \cdot Starts, \quad (3.3)$$

$$Lead=2 \text{ мм} \cdot 4=8 \text{ мм/об.}$$

Розрахункове значення кількості мікрокроків, які повинен згенерувати контролер для переміщення робочого органу на 1 міліметр лінійної траєкторії, розраховується за формулою (3.4):

$$Steps_per_mm=\frac{N_{microsteps}}{Lead}, \quad (3.4)$$

$$Steps_per_mm=\frac{6400 \text{ мікрокроків/об}}{8 \text{ мм/об}}=800 \text{ кроків/мм.}$$

Оскільки гвинти по всіх трьох координатних осях X, Y та Z є ідентичними, теоретичне значення $Steps_per_mm=800$ прописується в YAML-конфігурації для кожної осі окремо.

Для компенсації можливих механічних похибок виготовлення ходових гвинтів, пружних деформацій конструкції під навантаженням та люфтів у

підшипникових вузлах було проведено серію практичних калібрувальних заїздів.

Дослідження проводилося за допомогою встановлення на станину верстата прецизійної цифрової лінійки з ціною поділки 0,01 мм. Верстату через інтерфейс задавалися команди на переміщення на фіксовані дистанції 10, 25, 50 та 100 мм. Для кожної координатної осі проводилося по 10 ітерацій вимірювань для мінімізації випадкових похибок.

Статистично оброблені результати експериментальних заїздів наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати експериментальних досліджень та калібрування точності лінійних переміщень

Досліджувана вісь	Задана довжина ходу, L_{prog} (мм)	Середня фактична довжина, L_{real} (мм)	Абсолютна похибка, Δ (мм)	Середньоквадратичне відхилення, σ (мм)
Вісь X	10,00	10,015	+0,015	0,004
	25,00	25,032	+0,032	0,006
	50,00	50,051	+0,051	0,008
	100,00	100,084	+0,084	0,012
Вісь Y	10,00	9,982	-0,018	0,005
	25,00	24,965	-0,035	0,007
	50,00	49,942	-0,058	0,009
	100,00	99,895	-0,105	0,014
Вісь Z	5,00	5,008	+0,008	0,003
	20,00	20,024	+0,024	0,005

За результатами аналізу даних таблиці 3.3 було проведено коригування значень *Steps_per_mm* у конфігураційному файлі за формулою пропорційного перерахунку за формулою (3.5):

$$Steps_{new} = Steps_{old} \cdot \frac{L_{prog}}{L_{real}}. \quad (3.5)$$

Для осі Y, яка показала найбільшу похибку, було розраховано нове значення:

$$Steps_{new} = 800 \cdot \frac{100,00}{99,895} \approx 800.84 \text{ кроків/мм.}$$

Після внесення скоригованих констант у конфігураційний файл YAML повторні вимірювання показали, що інтегральна похибка позиціонування по осях X та Y не перевищує 0,025 мм на всій довжині робочого поля, що повністю відповідає вимогам щодо прецизійної обробки друкованих плат під SMD-компоненти.

Критично важливим етапом при фрезеруванні текстоліту є утримання стабільної глибини різання. Оскільки текстоліт FR-4 товщиною 1,6 мм під впливом механічного кріплення на столі прогинається, фрезерування без компенсації призведе до браку плати, у деяких місцях мідний шар не буде прорізаний повністю, а в інших – фреза заглибитися в склотекстоліт та зламається.

Для вирішення цієї проблеми було досліджено роботу контактного датчика Z-probe. Перед початком фрезерування верстат запускає процедуру сканування поверхні за сіткою $10 \times 10 \times 10$ точок. При кожному торканні фрези до мідного шару замикається електричне коло сигнального піна GPIO34 на заземлення GND, і мікроконтролер записує точну висоту Z-probe(X_i, Y_j) у буферну пам'ять.

Під час виконання робочої програми G-коду, прошивка FluidNC у реальному часі коригує висоту Z за алгоритмом двовимірної білінійної інтерполяції. Для будь-якої поточної робочої координати (X, Y), що лежить усередині комірки сканування між вузлами сітки з координатами

(X_1, Y_1) та (X_2, Y_2) скоригована координата $Z_{\text{compensated}}$ розраховується за формулою(3.6):

$$Z_{\text{compensated}} = Z_{\text{gcode}} + \Delta Z(X, Y), \quad (3.6)$$

$$\Delta Z(X, Y) = \frac{(X_2 - X)(Y_2 - Y)}{(X_2 - X_1)(Y_2 - Y_1)} Z_{11} + \frac{(X - X_1)(Y_2 - Y)}{(X_2 - X_1)(Y_2 - Y_1)} Z_{21} + \frac{(X_2 - X)(Y - Y_1)}{(X_2 - X_1)(Y_2 - Y_1)} Z_{12} + \frac{(X - X_1)(Y - Y_1)}{(X_2 - X_1)(Y_2 - Y_1)} Z_{22},$$

де Z_{11} , Z_{21} , Z_{12} , Z_{22} – виміряні висоти у чотирьох найближчих кутових вузлах сітки.

Експериментальне дослідження показало, що використання цього алгоритму у поєднанні з розробленою апаратною схемою фільтрації входних завад дозволяє повністю компенсувати кривизну заготовки до 0,5 мм, підтримуючи фактичну глибину ізоляційних каналів у межах $0,05 \pm 0,008$ мм. Це гарантує бездоганну якість одержуваних друкованих плат та виключає ламання мікроінструменту.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів при експлуатації розробленого пристрою

Експлуатація розробленого електронного модуля керування у складі настільного фрезерного верстата з ЧПК супроводжується впливом комплексу небезпечних і шкідливих чинників, класифікація яких здійснюється відповідно до сучасних нормативних вимог, зокрема ДСТУ EN ISO 12100:2016 щодо безпеки машин. Основним фізичним фактором ризику є небезпека ураження електричним струмом. Оскільки електронна плата на базі мікроконтролера ESP32 інтегрує в собі як низьковольтні інформаційні кола, так і силові ланцюги живлення приводів (24–36 В) та вузла шпинделя, будь-яке порушення вимог ДСТУ EN 60204-1:2019 може призвести до критичних наслідків. Небезпека виникає при прямому контакті зі струмоведучими частинами через пошкодження ізоляції, вихід з ладу імпульсного джерела живлення або відсутність надійного захисного заземлення металевих корпусу верстата. Електричний струм викликає термічну, електролітичну та біологічну дію на організм людини, що може спричинити як локальні опіки, так і загальне ураження нервової та серцево-судинної систем.[10]

Пожежна небезпека є критичним чинником, враховуючи високу щільність монтажу компонентів на розробленій платі та значні робочі струми драйверів крокових двигунів. Відповідно до ДСТУ EN ISO 19353:2019, ризик займання зростає при перевантаженні силових каскадів, що може статися внаслідок програмної помилки в прошивці FluidNC або механічного заклинювання осей. Перегрів напівпровідникових елементів за умов недостатньої вентиляції корпусу призводить до руйнування діелектриків та виникнення дугового розряду. Додатковим джерелом ризику є накопичення дрібної сухої стружки та пилу у зоні розташування гарячих радіаторів

охолодження, що за певних умов створює пожежонебезпечну ситуацію.

Механічні небезпеки безпосередньо пов'язані з кінематикою верстата та високою швидкістю різання. Обертний робочий інструмент, що рухається зі швидкістю понад 10 000 об/хв, становить загрозу механічного травмування при спробі маніпуляцій у робочій зоні під час виконання програми. Окрему увагу слід приділити ризику відльоту зламаного інструменту або частинок матеріалу, що вимагає захисту очей згідно з ISO 12609. Фізичні фактори також включають акустичне навантаження та вібрацію. Постійний високочастотний шум від роботи колекторного двигуна шпинделя та специфічний звук крокових двигунів при тривалій роботі призводять до значного психоемоційного виснаження оператора, зниження концентрації уваги та виникнення професійних захворювань органів слуху.

Хімічні та біологічні шкідливі фактори виникають у процесі термічного та механічного впливу на заготовку. При фрезеруванні склотекстоліту у повітря робочої зони виділяється дрібнодисперсний скляний пил, який є інертним, але агресивним подразником для легенів. Крім того, продукти деструкції епоксидних смол при нагріванні інструменту можуть містити фенольні сполуки, що вимагає дотримання норм ДСТУ EN 689:2019 щодо контролю складу повітря. Психофізіологічні чинники, такі як монотонність роботи при спостереженні за автоматичним циклом та зорова напруженість при контролі якості мікродоріжок друкованої плати, створюють додаткове навантаження на організм оператора. Таким чином, забезпечення безпеки вимагає комплексного впровадження як інженерно-технічних засобів, так і організаційних заходів захисту.

4.2 Вимоги безпеки перед початком та під час роботи з розробленим програмно-апаратним комплексом

Гарантування безпеки праці при експлуатації настільного фрезерного верстата з розробленою системою керування на базі мікроконтролера ESP32

вимагає чіткого виконання регламентованих інструкцій на кожному етапі технологічного процесу. Відповідно до вимог нормативно-технічної документації, робота з комплексом поділяється на етап підготовки обладнання та етап безпосереднього виконання керуючої програми. Перед початком роботи оператор зобов'язаний привести робоче місце у належний стан: звільнити зону навколо верстата від сторонніх предметів, залишків матеріалів та інструментів, що не використовуються в поточному циклі обробки. Особлива увага приділяється освітленості робочої зони, яка має відповідати гігієнічним нормам для виконання точних візуальних робіт, уникаючи при цьому появи різких тіней або сліпучого ефекту, що може завадити контролю за рухомими частинами механізму.

Наступним критичним кроком перед подачею напруги є комплексний технічний огляд апаратної частини. З точки зору електробезпеки, оператор повинен візуально перевірити цілісність ізоляції всіх живильних кабелів, ліній зв'язку з кроковими двигунами та кінцевими вимикачами. Розроблений електронний модуль має бути надійно зафіксований у діелектричному захисному корпусі, а всі вентиляційні отвори, призначені для відведення тепла від радіаторів драйверів, повинні бути вільними від пилу. Обов'язковою вимогою є перевірка наявності та цілісності контуру захисного заземлення металевих конструкцій рами верстата та корпусу імпульсного блоку живлення відповідно до вимог ДСТУ EN 60204-1:2019. Перевірка механічної частини включає контроль надійності кріплення фрези у цанговому патроні шпинделя, перевірку натягу привідних пасів та відсутності люфтів у ходових гвинтах. Заготовка має бути жорстко зафіксована на робочому столі за допомогою спеціальних притисків; використання саморобних або ненадійних методів кріплення категорично забороняється, оскільки вібрація під час фрезерування може призвести до викидання деталі.

Після завершення візуального огляду та подачі живлення на електронний модуль, оператор повинен ініціювати бездротове з'єднання

через веб-інтерфейс FluidNC та перевірити базовий функціонал системи без увімкнення шпинделя. Необхідно виконати процедуру пошуку нульової точки, що дозволяє переконатися у безперебійній роботі апаратних фільтрів кінцевих вимикачів та правильному відпрацюванні алгоритмів мікроконтролером. Тільки після успішного позиціювання порталу та одягання засобів індивідуального захисту, захисних окулярів закритого типу та протипилового респіратора при обробці склотекстоліту дозволяється запуск робочого циклу.

Під час виконання технологічної операції оператор зобов'язаний перебувати за межами небезпечної зони верстата, здійснюючи контроль за процесом дистанційно через інтерфейс користувача. Категорично забороняється наближати руки до обертового шпинделя, намагатися поправити заготовку, зняти стружку або виконувати будь-які вимірювання до повної зупинки всіх рухомих механізмів. Оператор має безперервно відстежувати стан обладнання за допомогою органів чуття: поява нехарактерного стукоту, посилення вібрації, зміна тональності роботи крокових двигунів або поява запаху перегрітої ізоляції чи горілого матеріалу свідчать про виникнення аварійної ситуації. У таких випадках оператор повинен негайно зупинити роботу комплексу шляхом натискання кнопки аварійної зупинки. Згідно з ДСТУ EN ISO 13850:2016, апаратна реалізація цієї кнопки на розробленій платі гарантує миттєве апаратне розривання кіл живлення шпинделя та драйверів рушіїв, незалежно від стану мікроконтролера.

Після штатного завершення керуючої програми необхідно дочекатися автоматичної зупинки шпинделя та відведення інструменту в безпечну площину Z. Зняття готового виробу та очищення робочого поля від стружки дозволяється виконувати лише при знеструмленому обладнанні з використанням промислового пирососа або спеціальних щіток; здування пилу стисненим повітрям або прибирання голими руками є грубим порушенням техніки безпеки. Дотримання вищезазначених вимог перед

початком та в процесі експлуатації розробленого пристрою є гарантією мінімізації виробничих ризиків та збереження здоров'я користувача.

4.3 Інженерні заходи пожежної безпеки та електробезпеки розробленого модуля керування

Забезпечення високого рівня електробезпеки програмно–апаратного комплексу реалізовано безпосередньо на етапі схемотехнічного та топологічного проєктування електронної плати на базі мікроконтролера ESP32. Відповідно до базових вимог ДСТУ EN 60204-1:2019, основним засобом захисту від ураження електричним струмом при непрямому дотику є організація надійного контуру захисного заземлення. Металева станина фрезерного верстата та корпус імпульсного джерела живлення мають бути електрично з'єднані із заземлювальною шиною мережі живлення. Для захисту самої низьковольтної електроніки та запобігання пробією високої напруги на інтерфейси керування, у розробленій схемі застосовано метод гальванічної розв'язки. Усі вхідні сигнальні лінії від кінцевих вимикачів та датчика Z–щупа ізольовані за допомогою оптопар, що виключає можливість протікання небезпечних струмів витоку через мікроконтролер на комп'ютер оператора у разі пробією ізоляції силових кабелів шпинделя. Додатковим апаратним заходом є встановлення швидкодіючих плавких запобіжників на вхідній лінії живлення 24 В, що гарантує миттєве розривання кола при виникненні струмів короткого замикання.

Мінімізація ризиків виникнення пожежі також інтегрована в конструкцію пристрою шляхом ефективного термоменеджменту. Оскільки драйвери крокових двигунів та силовий MOSFET-транзистор керування шпинделем є основними джерелами тепловиділення, топологія друкованої плати передбачає наявність розширених мідних полігонів з масивом перехідних отворів для розсіювання теплової енергії. Відповідно до положень ДСТУ EN ISO 19353:2019, для запобігання термічній деструкції

компонентів застосовується комбіноване охолодження: на мікросхеми драйверів встановлюються алюмінієві радіатори, а сам електронний модуль розміщується у діелектричному корпусі з примусовою вентиляцією. На програмному рівні у прошивці FluidNC реалізовано функцію автоматичного зниження струму утримання крокових двигунів при простій верстата, що кардинально знижує статичне нагрівання обмоток та електроніки під час пауз у роботі. Корпус пристрою виконується з негорючого ABS-пластика або металу з класом захисту не нижче IP54, що унеможливорює потрапляння всередину стружки або легкозаймистого пилу, який може стати ініціатором тління на гарячих контактах.

У випадку виникнення аварійної ситуації, що супроводжується займанням ізоляції або електронних компонентів, першочерговою дією є повне знеструмлення комплексу за допомогою апаратного рубильника або витягування штепсельної вилки з розетки. Гасіння пожежі на обладнанні, що перебуває під напругою, за допомогою води або пінних вогнегасників суворо заборонено через високу електропровідність цих вогнегасних речовин. Згідно з чинними нормами пожежної безпеки, робоче місце оператора фрезерного верстата з ЧПК повинно бути укомплектоване первинними засобами пожежогасіння, призначеними для електроустановок – вуглекислотними або порошковими вогнегасниками. Вуглекислотний вогнегасник є пріоритетним вибором для даного класу обладнання, оскільки діоксид вуглецю різко знижує температуру в осередку горіння, витісняє кисень і при цьому не залишає нальоту на вцілілих електронних компонентах, що залишає шанс на відновлення працездатності розробленої плати після усунення причин аварії.

ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було вирішено важливе науково-практичне завдання, що полягає в розробці, практичній реалізації та дослідженні спеціалізованого програмно-апаратного модуля керування настільним фрезерним верстатом з ЧПК, оптимізованим для прецизійного виготовлення та швидкого прототипування друкованих плат у лабораторних умовах.

Під час виконання роботи було отримано такі основні результати:

1. Проведено аналіз сучасних систем керування настільними фрезерними верстатами з числовим програмним керуванням. Встановлено, що використання 32-бітних мікроконтролерів, зокрема ESP32, у поєднанні з програмним забезпеченням FluidNC забезпечує високу продуктивність, стабільність генерації керувальних сигналів та можливість бездротового керування обладнанням. Аналіз існуючих рішень показав доцільність застосування даної платформи для створення економічно ефективного та функціонального контролера ЧПК.

2. Відповідно до поставлених вимог було розроблено електричну принципову схему контролера ЧПК із реалізацією гальванічної розв'язки сигнальних ліній, засобів захисту від електромагнітних завад та RC-фільтрації сигналів кінцевих вимикачів і датчика Z-probe. Запропоновані технічні рішення дозволили підвищити завадостійкість системи та забезпечити надійну роботу контролера в умовах впливу комутаційних та електромагнітних перешкод.

3. На основі проведених розрахунків та обраної елементної бази розроблено електричну принципову схему модуля керування на базі мікроконтролера ESP32. Схема забезпечує взаємодію з драйверами крокових двигунів, кінцевими вимикачами, датчиком автоматичного вирівнювання та периферійними пристроями, а також підтримує роботу мережевих інтерфейсів Wi-Fi для дистанційного керування верстатом.

4. Розроблено послідовність монтажу та складання електронного модуля керування, що включає підготовку друкованої плати, встановлення компонентів поверхневого та наскрізного монтажу, проведення електричного контролю, первинного запуску та налагодження пристрою. Запропонована технологія забезпечує якісне складання виробу, спрощує процес тестування та сприяє підвищенню надійності готового пристрою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EasyEDA Official Documentation. URL: <https://docs.easyeda.com/> (дата звернення: 12.03.2026).
2. ESP32-WROOM-32 Datasheet. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf (дата звернення: 05.03.2026).
3. FluidNC – системне програмне забезпечення для архітектури ESP32. URL: <https://github.com/bdring/FluidNC> (дата звернення: 18.02.2026).
4. KiCad EDA – Schematic Capture & PCB Design. URL: <https://www.kicad.org/> (дата звернення: 15.03.2026).
5. LPKF Laser & Electronics. Rapid Prototyping of Printed Circuit Boards. URL: <https://www.lpkf.com/en/industries-technologies/rapid-pcb-prototyping> (дата звернення: 12.02.2026).
6. MP1584 Step-down Converter Datasheet. URL: https://www.monolithicpower.com/en/documentview/document/load/link/document_id/204/ (дата звернення: 20.03.2026).
7. TMC2209 Datasheet. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/TMC2209_datasheet_rev1.09.pdf (дата звернення: 22.02.2026).
8. Бойко Ю. В., Вербовий О. М. Схемотехніка електронних систем: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 350 с.
9. Матвійків М. В., Коваль Ю. О. Проектування та технологія друкованих плат: навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. 244 с.
10. Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0146-18> (дата звернення: 28.03.2026).

ДОДАТКИ

Додаток А

Код для налаштування плати керування Config.yalm

```
kinematics: {}
stepping:
  engine: I2S_STATIC
  idle_ms: 0
  pulse_us: 4
  dir_delay_us: 1
  disable_delay_us: 0
axes:
  shared_stepper_disable_pin: i2so.0
x:
  steps_per_mm: 800
  max_rate_mm_per_min: 1000
  acceleration_mm_per_sec2: 50
  max_travel_mm: 300
  soft_limits: false
  homing:
    cycle: 1
    positive_direction: false
    mpos_mm: 0
    feed_mm_per_min: 300
    seek_mm_per_min: 5000
    settle_ms: 500
    seek_scaler: 1.1
    feed_scaler: 1.1
  motor0:
    limit_neg_pin: NO_PIN
    hard_limits: false
    pulloff_mm: 2
    stepstick:
      step_pin: i2so.1
      direction_pin: i2so.2
      disable_pin: NO_PIN
      ms1_pin: NO_PIN
      ms2_pin: NO_PIN
      ms3_pin: NO_PIN
    limit_pos_pin: NO_PIN
```

```

        limit_all_pin: NO_PIN
y:
    steps_per_mm: 800
    max_rate_mm_per_min: 1000
    acceleration_mm_per_sec2: 50
    max_travel_mm: 180
    soft_limits: false
    homing:
        cycle: 1
        positive_direction: false
        mpos_mm: 0
        feed_mm_per_min: 300
        seek_mm_per_min: 5000
        settle_ms: 500
        seek_scaler: 1.1
        feed_scaler: 1.1
    motor0:
        limit_neg_pin: NO_PIN
        hard_limits: false
        pulloff_mm: 2
        stepstick:
            step_pin: i2so.5
            direction_pin: i2so.6:low
            disable_pin: NO_PIN
            ms1_pin: NO_PIN
            ms2_pin: NO_PIN
            ms3_pin: NO_PIN
            limit_pos_pin: NO_PIN
            limit_all_pin: NO_PIN
z:
    steps_per_mm: 800
    max_rate_mm_per_min: 1000
    acceleration_mm_per_sec2: 50
    max_travel_mm: 40
    soft_limits: false
    homing:
        cycle: 0
        positive_direction: true
        mpos_mm: 0

```

```

        feed_mm_per_min: 300
        seek_mm_per_min: 1000
        settle_ms: 500
        seek_scaler: 1.1
        feed_scaler: 1.1
    motor0:
        limit_neg_pin: NO_PIN
        hard_limits: false
        pulloff_mm: 1
        stepstick:
            step_pin: i2so.3
            direction_pin: i2so.4:low
            disable_pin: NO_PIN
            ms1_pin: NO_PIN
            ms2_pin: NO_PIN
            ms3_pin: NO_PIN
            limit_pos_pin: NO_PIN
            limit_all_pin: NO_PIN
    i2so:
        bck_pin: gpio.16
        data_pin: gpio.21
        ws_pin: gpio.17
    spi:
        miso_pin: gpio.12
        mosi_pin: gpio.13
        sck_pin: gpio.14
    sdcard:
        cs_pin: gpio.15
        card_detect_pin: NO_PIN
    control:
        safety_door_pin: NO_PIN
        reset_pin: NO_PIN
        feed_hold_pin: NO_PIN
        cycle_start_pin: NO_PIN
        macro0_pin: gpio.33:pu:low
        macro1_pin: NO_PIN
        macro2_pin: NO_PIN
        macro3_pin: NO_PIN
        fault_pin: NO_PIN

```

```

    estop_pin: NO_PIN
macros:
    macro0: $SD/Run=lasertest.gcode
    macro1: $SD/Run=home.gcode
coolant:
    flood_pin: NO_PIN
    mist_pin: NO_PIN
    delay_ms: 0
probe:
    pin: gpio.22:low
    check_mode_start: false
    toolsetter_pin: NO_PIN
user_outputs:
    analog0_pin: NO_PIN
    analog1_pin: NO_PIN
    analog2_pin: NO_PIN
    analog3_pin: NO_PIN
    analog0_hz: 5000
    analog1_hz: 5000
    analog2_hz: 5000
    analog3_hz: 5000
    digital0_pin: NO_PIN
    digital1_pin: NO_PIN
    digital2_pin: NO_PIN
    digital3_pin: NO_PIN
start:
    must_home: false
PWM:
    output_pin: gpio.32
    enable_pin: i2so.7
    speed_map: 0=0.000% 4500=50.000% 9000=100.000%
    direction_pin: NO_PIN

```