

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА
Навчально-науковий Інститут енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

РОЗРАХУНКОВО-ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА

на тему: Фрезерний верстат з комп'ютерноінтегрованою системою керування
на основі ПЗ CyclMotion

Виконав: здобувач вищої освіти
4 курсу, групи Сінж-2022-1
курс, група

151 «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»
напряму підготовки (спеціальність)

Онщенко Олексій Петрович
(прізвище та ініціали)

Керівник Піддубна Л.В., доц. каф. АКІТ
(прізвище та ініціали, наук. ступ., вч. звання)

Рецензент Ківіренко О.Б., начальник
виробництва ТОВ «Альфа-Композіт»
(прізвище та ініціали, наук. ступ., вч. звання)

Харків – 2026

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ О. М. БЕКЕТОВА**

**Навчально-науковий Інститут енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури**

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр
Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ



БАРАНОВ О.О.

« 19 » червня 2026 року









З А В Д А Н Н Я

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА


Оніщенко Олексій Петрович

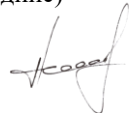
1. Тема роботи: Фрезерний верстат з комп'ютерноінтегрованою системою керування на основі ПЗ CyclMotion
Затверджена наказом університету від « 22 » травня 2026 року №440-03
Керівник роботи Піддубна Л.В., кандидат філософських наук, доцент, доцент кафедри АКІТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
2. Строк подання роботи здобувачем вищої освіти «15» червня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи Фрезерний верстат з комп'ютерноінтегрованою системою керування на основі ПЗ CyclMotion
4. Зміст розрахунково пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. Аналіз стану проблеми та розробка вимог до системи керування. Апаратно-технічне забезпечення верстата з ЧПК. Розробка та інтеграція комп'ютерно-інтегрованої системи. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях. Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Презентація.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)





Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналіз проблеми	Піддубна Л.В.	11.05.2026 	21.05.2026 
Основна частина	Піддубна Л.В.	22.05.2026 	31.05.2026 
Спеціальний розділ	Піддубна Л.В.	01.06.2026 	17.06.2026 
Охорона праці	Малишева В.В.	08.06.2026 	15.06.2026 

7. Дата видачі завдання « 11 » травня 2026 р.


Керівник  Піддубна Л.В.
(підпис)

Завдання прийняв до виконання  Оніщенко О. П.
(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання розділів	Примітка
1	Розробка 1 го розділу бакалаврської роботи	11.05.2026 - 21.05.2026	
2	Розробка 2 го розділу бакалаврської роботи	22.05.2026 - 31.05.2026	
3	Розробка 3 го розділу бакалаврської роботи	01.06.2026 - 17.06.2026	
4	Розробка 4 го розділу з охорони праці	08.06.2026 - 15.06.2026	
5	Рецензування бакалаврської роботи	15.06.2026	Ківіренко О.Б
6	Захист на ДЕК	25.06.2026	

Здобувача вищої освіти  Оніщенко О. П.
(підпис)

Керівник  Піддубна Л.В.
(підпис)

РЕФЕРАТ

Фрезерний верстат з комп'ютерноінтегрованою системою керування на основі ПЗ CyclMotion – Оніщенко Олексій Петрович дипломна робота бакалавра, Харків, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, кількість сторінок 93, кількість таблиць 5, кількість рисунків 21, кількість джерел літератури 30.

Актуальність дослідження. Сучасне виробництво потребує точного та продуктивного обладнання для механічної обробки матеріалів. Фрезерні верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК) забезпечують автоматизацію процесів, а комп'ютерно-інтегровані системи керування підвищують точність, продуктивність і надійність обробки. Тому розробка системи керування на базі програмного забезпечення CyclMotion є актуальним завданням.

Об'єктом дослідження є процес керування багатокоординатним рухом виконавчих механізмів фрезерного верстата з ЧПК.

Предметом дослідження є апаратно-програмні засоби комп'ютерно-інтегрованої системи керування фрезерним верстатом на основі програмного забезпечення CyclMotion, мережевого контролера руху та промислових сервоприводів змінного струму.

Метою роботи є розробка та налаштування комп'ютерно-інтегрованої системи керування трикоординатним фрезерним верстатом на основі програмного забезпечення CyclMotion для підвищення точності, продуктивності та надійності механічної обробки.

У роботі використовуються методи аналізу та синтезу автоматизованих систем керування, комп'ютерного моделювання, проєктування електротехнічних систем, експериментальні методи дослідження роботи обладнання з ЧПК, а також методи технічного аналізу та налаштування сервоприводів і мережевих систем керування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: фрезерний верстат, ЧПК, комп'ютерно-інтегрована система керування, CyclMotion.

ABSTRACT

CNC Milling Machine with a Computer Integrated Control System Based on CyclMotion Software – Onishchenko Oleksii Petrovych, bachelor's thesis, Kharkiv, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, number of pages 93, number of tables 5, number of figures 21, number of literature sources 30.

Relevance of the research. Modern manufacturing requires precise and high-performance equipment for mechanical material processing. CNC milling machines provide process automation, while computer-integrated control systems enhance the accuracy, productivity, and reliability of machining. Therefore, the development of a control system based on CyclMotion software is a relevant task.

The object of the research is the process of controlling the multi-axis motion of the actuating mechanisms of a CNC milling machine.

The subject of the research is the hardware and software components of a computer-integrated control system for a milling machine based on CyclMotion software, a network motion controller, and industrial AC servo drives.

The aim of the work is to develop and configure a computer-integrated control system for a three-axis CNC milling machine based on CyclMotion software in order to improve the accuracy, productivity, and reliability of mechanical machining.

The work employs methods of analysis and synthesis of automated control systems, computer simulation, electrotechnical system design, experimental methods for studying CNC equipment operation, as well as methods of technical analysis and tuning of servo drives and network control systems.

KEYWORDS: milling machine, CNC, computer-integrated control system, CyclMotion.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА РОЗРОБКА ВИМОГ ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ 10	
1.1 Опис предметної області: сучасні фрезерні верстати з ЧПК	10
1.2 Огляд систем керування фрезерним обладнанням та протоколів зв'язку.....	13
1.3 Аналіз програмного забезпечення для комп'ютерно-інтегрованих систем	17
1.4 Постановка задачі на розробку комп'ютерно-інтегрованої системи керування верстатом.....	23
Висновок до розділу 1.....	25
РОЗДІЛ 2 АПАРАТНО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВЕРСТАТА З ЧПК.....	26
2.1 Обґрунтування кінематичної схеми та базового механічного обладнання	26
2.2 Аналіз та вибір виконавчих механізмів: сервоприводи змінного струму (на прикладі SD100)	36
2.3 Характеристика контролера керування рухом (CM400V2) та його інтерфейсів	40
2.4 Проектування підсистеми живлення, частотного керування шпинделем та захисту від завад.	45
Висновок до розділу 2.....	48
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТА ІНТЕГРАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ.....	49
3.1 Розробка принципової схеми комутації електроавтоматики в шафі керування	49
3.2 Параметризація серводрайверів та налаштування частотного перетворювача.....	53
3.3 Інтеграція та конфігурування програмного забезпечення CyclMotion по інтерфейсу Ethernet	54
3.4 Експериментальні дослідження роботи верстата.....	57
Висновок до розділу 3.....	67
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	68
4.1. Організаційно-правові основи забезпечення безпеки праці	68
4.2 Характеристика об'єкта та виявлення потенційних небезпек	72
4.3 Дослідження ризику реалізації потенційних небезпек на об'єкті проектування та розробка заходів щодо їх попередження.....	76
Висновок до розділу 4.....	79
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	83
Додаток А.....	87

Перелік умовних позначень, скорочень і термінів

ЧПК – Числове Програмне Керування

CNC – Computer Numerical Control

STEP/DIR – Крок/Напрямок

НМІ – Людино-машинна взаємодія

КГП – Кульково-гвинтова передача

Electronic Gear Ratio – Електронне редуктування

Notch filters – Фільтрація резонансів

ЕМІ – Electromagnetic Interference, електромагнітні завади/перешкоди

САМ – Система автоматизованого проектування

НШВФ – Небезпечних та шкідливих виробничих факторів

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасне промислове виробництво потребує високопродуктивного та точного обладнання для механічної обробки матеріалів. Фрезерні верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК) портального типу є одним із найпоширеніших рішень завдяки їхній жорсткості та універсальності. Останнім часом спостерігається стійка тенденція до заміни традиційних закритих систем ЧПК на гнучкі комп'ютерно-інтегровані комплекси (PC-based CNC). Використання сучасного спеціалізованого програмного забезпечення, такого як SinclMotion, дозволяє реалізувати складні алгоритми інтерполяції та керування рухом у реальному часі. Інтеграція такого ПЗ з високошвидкісними мережевими контролерами (через інтерфейс Ethernet) та сучасними сервоприводами змінного струму забезпечує виняткову динаміку, точність і надійність обробки. Тому розробка, налаштування та дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи керування для трикоординатного фрезерного верстата є актуальною науково-практичною задачею.

Мета роботи. Метою дипломної роботи є розробка та практичне налаштування комп'ютерно-інтегрованої системи керування 3-координатним фрезерним верстатом на основі програмного забезпечення SinclMotion та промислових сервоприводів, спрямована на підвищення продуктивності та точності механічної обробки.

Завдання роботи. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан предметної області, зробити огляд існуючих систем керування фрезерним обладнанням та обґрунтувати вибір апаратно-програмної платформи.
2. Розробити та проаналізувати апаратно-технічне забезпечення верстата: кінематичну схему, сервоприводи, мережевий контролер руху та системи життєзабезпечення (охолодження, змащення).

3. Розробити принципову схему комутації електроавтоматики в шафі керування, забезпечивши правильну організацію підсистеми живлення, заземлення та захисту від електромагнітних завад.
4. Здійснити інтеграцію та конфігурування програмного забезпечення SinMotion по інтерфейсу Ethernet, а також виконати параметризацію серводрайверів.
5. Провести експериментальні дослідження роботи комп'ютерно-інтегрованої системи на реальному фрезерному верстаті.
6. Розробити заходи з охорони праці та безпеки під час експлуатації та обслуговування верстата.

Об'єкт дослідження. Процес керування багатокоординатним рухом виконавчих механізмів фрезерного верстата з ЧПК.

Предмет дослідження. Апаратно-програмні засоби комп'ютерно-інтегрованої системи керування на основі програмного забезпечення SinMotion, мережевого контролера SM400 та промислових сервоприводів змінного струму.

Практичне значення отриманих результатів. Спроектована та сконфігурована система керування успішно впроваджена на діючому промисловому фрезерному верстаті. Отримані результати, зокрема схеми комутації, алгоритми налаштування ПЗ SinMotion та параметризації сервоприводів, можуть бути використані підприємствами як практичний посібник для проектування, модернізації та введення в експлуатацію аналогічного обладнання з ЧПК.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА РОЗРОБКА ВИМОГ ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

1.1 Опис предметної області: сучасні фрезерні верстати з ЧПК

Сучасне промислове виробництво характеризується неухильним зростанням вимог до точності, продуктивності та гнучкості процесів механічної обробки матеріалів. Ключовим елементом автоматизації цих процесів є використання верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК). Серед широкої номенклатури метало- та деревообробного обладнання особливе місце посідають трикоординатні фрезерні верстати порталного типу.

Конструкція порталного верстата передбачає наявність жорсткої рами, над якою по напрямних переміщується балка (портал) з кареткою шпинделя. Така просторова конфігурація забезпечує високу механічну жорсткість системи, мінімізацію вібрацій під час силового різання та дозволяє обробляти великогабаритні деталі з дерева, пластику, композитів та м'яких металів. Сучасні порталні верстати часто оснащуються системами рідинного охолодження шпинделя та вакуумними столами, що забезпечують швидку та надійну фіксацію заготовок по всій площі обробки.

На Рисунку 1.1 представлена конструктивна схема трикоординатного фрезерного верстата порталного типу з позначенням основних вузлів, де:

- 1 – рухомий портал (балка);
- 2 – шпиндельний вузол;
- 3 – робочий стіл верстата;
- 4 – лінійні напрямні;
5. – станина (основа).

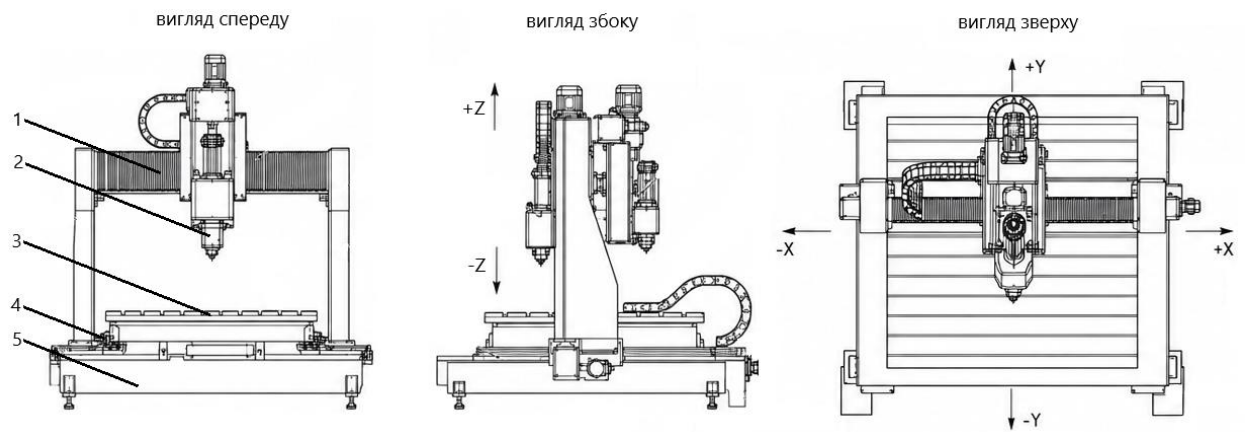


Рисунок 1.1 – Конструктивна схема три координатного фрезерного верстата портального типу з позначенням основних вузлів

Однією з головних тенденцій розвитку предметної області є еволюція систем керування. Традиційні закриті апаратні стійки ЧПК (CNC), які історично домінували на виробництвах, сьогодні активно витісняються гнучкими комп'ютерно-інтегрованими системами – PC-based CNC. Цей підхід передбачає розділення функцій керування на два рівні:

1. Верхній рівень (програмний): базується на персональному комп'ютері зі спеціалізованим програмним забезпеченням (наприклад, CyclMotion). Комп'ютер бере на себе завдання читання G-кодів, розрахунку траєкторій, інтерполяції (лінійної, кругової) та забезпечення людино-машинного інтерфейсу (НМІ).
2. Нижній рівень (апаратний): реалізується за допомогою мережевих контролерів керування рухом (Motion Controllers). Оскільки операційні системи загального призначення (Windows) не є системами реального часу, пряме генерування керуючих імпульсів з ПК є нестабільним. Сучасні контролери отримують попередньо розраховані пакети даних від комп'ютера і генерують високоточні апаратні сигнали для виконавчих механізмів.

Надзвичайно важливою характеристикою сучасних верстатів є використання промислового мережевого інтерфейсу Ethernet (TCP/IP або

UDP) для зв'язку між ПК та контролером руху. На відміну від застарілих портів LPT чи вразливого до перешкод USB, протокол Ethernet забезпечує стабільну передачу даних на великі відстані та має абсолютну стійкість до електромагнітних завад, що генеруються потужними частотними перетворювачами шпинделя та силовими кабелями в шафі керування.

Ще однією ключовою відмінністю високопродуктивних систем є перехід від крокових двигунів до *промислових сервоприводів змінного струму (AC Servo)*. У розроблюваній комп'ютерно-інтегрованій системі використовуються саме сервоприводи. На відміну від крокових двигунів, які працюють у розімкненому контурі і втрачають крутний момент на високих швидкостях, сервосистеми мають вбудовані енкодери високої роздільної здатності для постійного контролю позиції валу (замкнений контур керування).

Використання потужних сервоприводів (наприклад, потужністю 1000 Вт) дозволяє:

- Розвивати високу швидкість обертання (до 2500 об/хв і більше) без втрати крутного моменту.
- Забезпечувати високі динамічні характеристики під час розгону та гальмування рухомих вузлів верстата
- Суттєво зменшити ймовірність виникнення похибок позиціонування під час зміни навантаження.

Предметна область дослідження охоплює розробку та інтеграцію сучасного багаторівневого мехатронного комплексу. Поєднання надійної механіки порталного типу, високодинамічних сервоприводів, завадостійкого мережевого контролера та гнучкого комп'ютерного програмного забезпечення формує основу для створення високоефективного фрезерного обладнання, що задовольняє найсуворіші промислові вимоги.

1.2 Огляд систем керування фрезерним обладнанням та протоколів зв'язку

Розвиток систем числового програмного керування (ЧПК) призвів до формування кількох базових архітектур побудови керуючих комплексів. Історично першими були автономні апаратні стійки ЧПК (Stand-alone CNC), які об'єднували обчислювальне ядро, панель оператора та контролер руху в єдиному закритому блоці. Попри високу надійність, такі системи є дорогими, важко піддаються модернізації та мають закриту архітектуру програмного забезпечення.

Альтернативою, що домінує в сучасних верстатобудівних рішеннях середнього та високого класу, є системи керування на базі персонального комп'ютера (PC-based CNC). Ця архітектура розділяє систему на обчислювальний (програмний) та виконавчий (апаратний) рівні.

Програмне забезпечення (наприклад, CyclMotion, Mach4, LinuxCNC) функціонує на звичайному або промисловому ПК, забезпечуючи зручний графічний інтерфейс, читання G-кодів та розрахунок складних траєкторій. Однак операційні системи загального призначення не здатні генерувати апаратні імпульси з жорсткими мілісекундними таймінгами (Real-Time Control), тому безпосередня генерація сигналів делегується зовнішньому автономному модулю — мережевому контролеру руху.

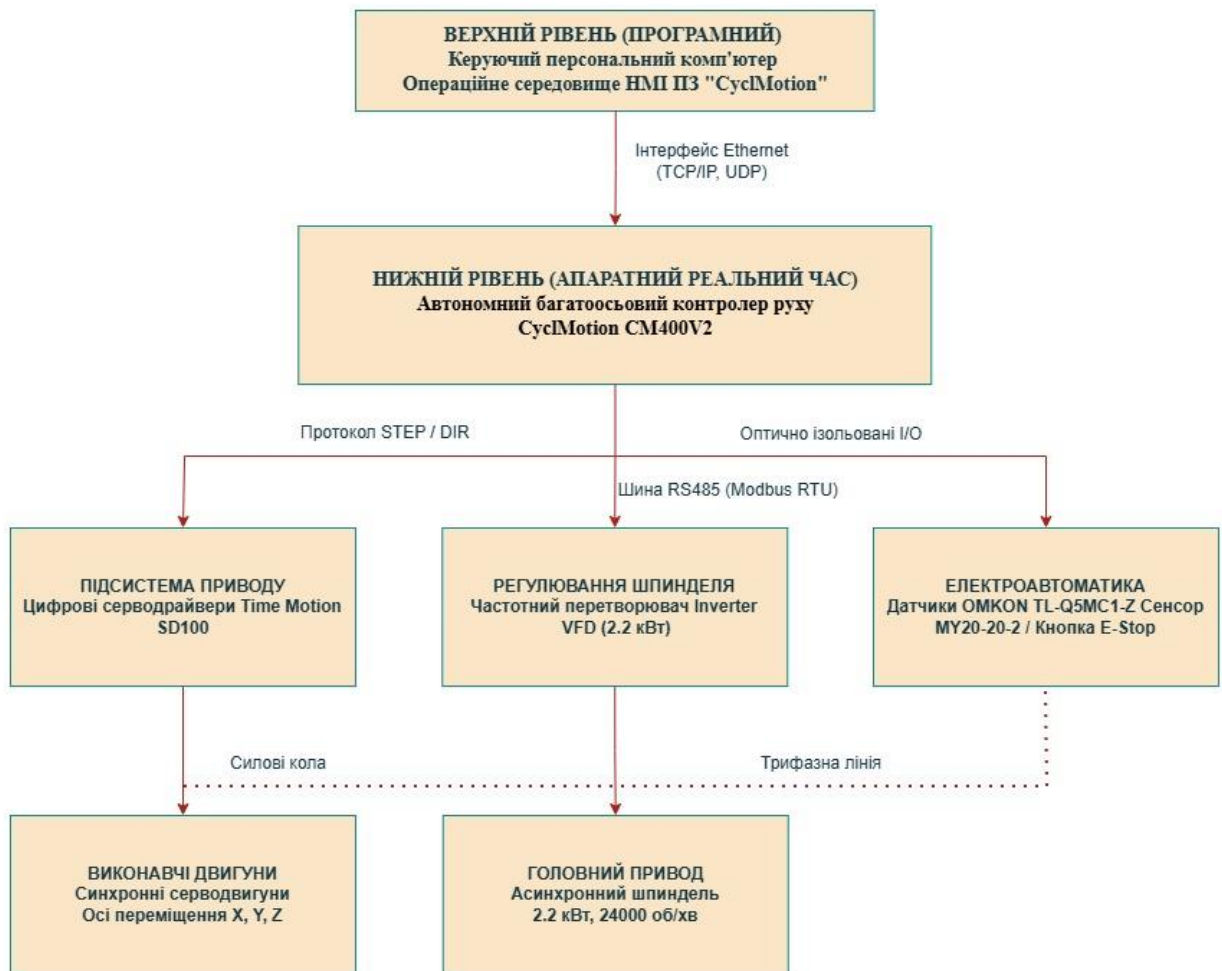


Рисунок 1.2 – Функціонально-структурна схема комп'ютерно-інтегрованої системи керування

Надійність роботи PC-based системи критично залежить від протоколу зв'язку між комп'ютером та контролером руху. У сучасній практиці застосовуються три основні інтерфейси:

1. LPT (Parallel Port): Застарілий інтерфейс, що генерує сигнали безпосередньо з материнської плати ПК. Має низьку частоту (до 100 кГц) та дуже чутливий до електричних завад.
2. USB: Забезпечує високу швидкість передачі даних, проте промислові стандарти визнають його вразливим до електромагнітних імпульсів (EMI). У цехових умовах, де працюють потужні частотні перетворювачі

та сервомотори, з'єднання по USB часто розривається, що призводить до аварійної зупинки верстата.

3. Ethernet (TCP/IP або UDP): Сучасний промисловий стандарт зв'язку. Даний інтерфейс широко використовується в промислових системах завдяки високій надійності передачі даних. Завдяки вбудованій в роз'єми RJ-45 гальванічній розв'язці (трансформаторам) та використанню екранованої витої пари (STP), Ethernet характеризується високою заводостійкістю в умовах промислового середовища. Він здатний передавати великі масиви даних про траєкторії на високій швидкості, забезпечуючи контролер безперервним потоком інформації для плавної інтерполяції.

На нижньому апаратному рівні – між мережевим контролером та силовими драйверами серводвигунів – використовується інший тип протоколу. Стандартом де-факто для такого класу обладнання є інтерфейс STEP/DIR (Крок/Напрямок) або його диференційна модифікація (CW/CCW). Принцип його дії полягає в передачі високочастотних імпульсів: сигнал STEP вказує драйверу виконати один мікрокрок валу двигуна, а сигнал DIR визначає напрямок обертання (за годинниковою стрілкою чи проти). Сучасні контролери здатні генерувати імпульси STEP з частотою до кількох мегагерц (МГц) на кожен вісь, що забезпечує роботу сервоприводів на високих швидкостях із збереженням необхідної точності позиціонування. Передача сигналів STEP/DIR реалізується через оптопари всередині серводрайверів, що створює додатковий рівень захисту керівної електроніки від силових струмів.

Крім того, сучасна шафа керування фрезерним верстатом інтегрує значну кількість допоміжного обладнання: частотні перетворювачі шпинделя (VFD), модулі збору даних з кінцевих вимикачів, реле керування насосами охолоджуючої рідини (ЗОР) тощо. Для комунікації з цією периферією система керування часто використовує промисловий протокол Modbus (послідовний Modbus RTU через RS-485 або мережевий Modbus TCP). Використання Modbus дозволяє ПЗ зчитувати струм навантаження шпинделя, гнучко

керувати обертами або розширювати кількість входів/виходів без фізичного прокладання десятків окремих проводів до контролера.

Архітектура сучасної системи керування фрезерним верстатом є комплексною: зв'язок верхнього рівня реалізується по заводській протоколу Ethernet, швидкодіюче керування приводами відбувається через апаратні сигнали STEP/DIR, а допоміжна периферія може контролюватися за допомогою протоколів сімейства Modbus. Саме така конфігурація дозволяє максимально розкрити потенціал потужних сервоприводів та механіки верстата.

1.3 Аналіз програмного забезпечення для комп'ютерно-інтегрованих систем

Ефективність, точність та динамічні характеристики комп'ютерно-інтегрованої системи керування фрезерним верстатом із ЧПК безпосередньо залежать від архітектури та функціональних можливостей керівного програмного забезпечення (ПК-рівня). У концепції PC-based CNC програмний комплекс відповідає за інтерпретацію керівних програм (G-кодів), розрахунок траєкторій, візуалізацію процесу обробки та координацію взаємодії з апаратним рівнем контролера руху. Для автоматизації сучасного фрезерного обладнання найчастіше застосовуються такі програмні платформи, як Mach3/Mach4, LinuxCNC та CyclMotion. Проведення їх порівняльного аналізу дозволяє визначити оптимальне рішення для побудови високоефективної системи керування.

Програмний комплекс Mach3 (та його сучасна версія Mach4) є однією з найпоширеніших систем у сегменті малогабаритного та середнього фрезерного обладнання.

- *Переваги:* гнучкість налаштування, величезна спільнота користувачів, підтримка написання складних макросів на мовах розробки (особливо в Mach4), можливість повної кастомізації графічного інтерфейсу людино-машинної взаємодії (НМІ).

- *Недоліки:* Mach3 є морально застарілим продуктом, який розроблявся під операційні системи сімейства Windows x32 і критично залежав від паралельного порту LPT. Сучасна версія Mach4 позбавлена цього недоліку, проте вона потребує придбання дорогих ліцензій та спеціалізованих плагінів під конкретні плати управління. Крім того, робота в середовищі Windows загального призначення створює ризики збоїв через фонові процеси ОС.

Програмна платформа LinuxCNC є потужним інструментом з відкритим вихідним кодом (Open Source), який функціонує на базі операційної системи Linux із ядром реального часу (Real-Time Kernel / RT-PREEMPT).

- *Переваги:* абсолютна стабільність і надійність, що забезпечується роботою в реальному часі на рівні самої ОС; висока гнучкість конфігурування завдяки системі HAL (Hardware Abstraction Layer); відсутність ліцензійних витрат; можливість керування складними кінематичними схемами.

- *Недоліки:* дуже високий поріг входження та складність налаштування. Робота з LinuxCNC вимагає від інженера глибоких знань адміністрування ОС Linux, навичок програмування та ручного редагування конфігураційних файлів, що суттєво збільшує час введення обладнання в експлуатацію.

Програмне забезпечення CyclMotion є представником сучасного покоління спеціалізованих комерційних систем ЧПК, орієнтованих на роботу у зв'язці з високошвидкісними автономними мережевими контролерами руху.

Переваги:

1. *Глибока апаратна інтеграція:* ПЗ розроблене спеціально для взаємодії з сучасними багатокординатними Ethernet-контролерами. Протокол передачі даних оптимізований для оперативного обміну інформацією між програмним забезпеченням і контролером руху, що виключає ризик затримок у русі осей.

2. *Висока завадостійкість:* завдяки орієнтації на мережевий інтерфейс Ethernet, Система забезпечує стабільний зв'язок між комп'ютером та шафою керування за умов високого рівня ЕМІ від промислових сервоприводів та частотних перетворювачів шпинделя.

3. *Промисловий інтерфейс HMI:* графічна оболонка оптимізована під реальні виробничі задачі (моніторинг координат у реальному часі, швидке налаштування зміщення нуля, візуалізація 3D-траєкторії, вбудовані сервісні вкладки конфігурування Modbus для периферії).

4. *Простота параметризації*: на відміну від LinuxCNC, налаштування коефіцієнтів імпульсів, прискорень та калібрування осей здійснюється через інтуїтивно зрозумілі внутрішні меню без необхідності низькорівневого програмування.

Недоліки: менш поширена спільнота користувачів порівняно зі застарілим Mach3, а також пропрієтарна екосистема (орієнтація на роботу зі сумісними апаратними контролерами руху).

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз програмного забезпечення для систем ЧПК

Критерій	Mach4	LinuxCNC	CyclMotion
Тип ліцензії	Комерційна	Відкрите ПЗ	Комерційна
Підтримка Ethernet-контролерів	Так	Так	Так
Підтримка Modbus	Часткова	Так	Так
Простота налаштування	Середня	Низька	Висока
Необхідність програмування	Бажана	Висока	Мінімальна
Робота в режимі реального часу	Через зовнішній контролер	Вбудована підтримка RT	Через зовнішній контролер
Зручність інтерфейсу оператора	Висока	Середня	Висока

Критерій	Mach4	LinuxCNC	CyclMotion
Підтримка промислових сервоприводів	Так	Так	Так
Складність впровадження	Середня	Висока	Низька
Доцільність використання в даному проєкті	Середня	Середня	Висока

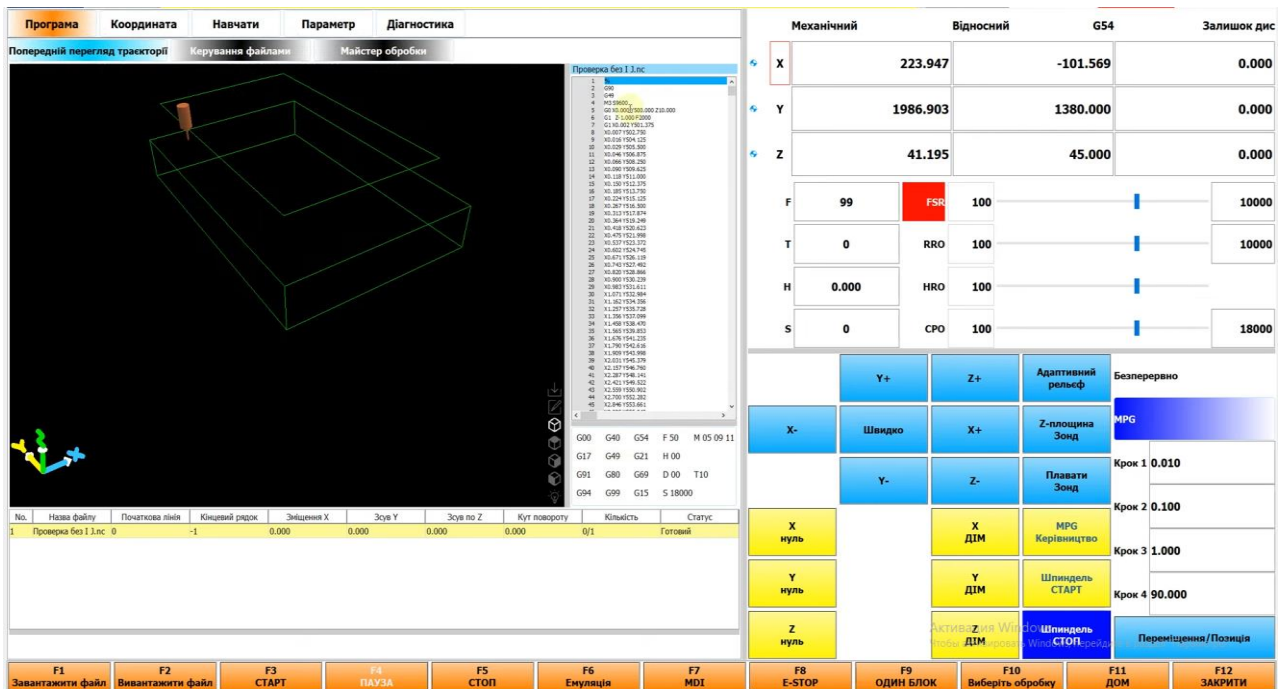
Аналіз даних таблиці 1.1 показує, що програмний комплекс CyclMotion найбільшою мірою відповідає вимогам проєктованої комп'ютерно-інтегрованої системи керування. Його перевагами є простота налаштування, підтримка сучасних мережевих протоколів, інтеграція з Ethernet-контролерами руху та наявність зручного промислового інтерфейсу користувача.

Обґрунтування вибору програмного забезпечення. Для побудови системи керування промисловим трикоординатним фрезерним верстатом портального типу вибір ПЗ CyclMotion є найбільш раціональним та технічно виправданим рішенням. Оскільки виконавчими механізмами верстата є високодинамічні промислові сервоприводи змінного струму, система потребує стабільного, швидкісного та завадостійкого каналу передачі даних.

Поєднання ПЗ CyclMotion із зовнішнім автономним контролером руху, підключеним по інтерфейсу Ethernet, дозволяє повністю нівелювати недоліки операційної системи Windows (відсутність реального часу), оскільки генерація імпульсів STEP/DIR переноситься на апаратне ядро контролера. Водночас наявність розвинутого інтерфейсу Modbus у меню CyclMotion спрощує інтеграцію з силовою автоматикою та частотним перетворювачем шпинделя. Такий підхід поєднує переваги спеціалізованих систем керування рухом із зручністю використання персонального комп'ютера, що мінімізує час на

пусконаладжувальні роботи та гарантує максимальну точність фрезерування.

Графічне середовище обраного програмного комплексу зображено на рисунку 1.3.



- інформаційні блоки індикації координат (вгорі праворуч): відображають поточне положення робочих органів за осями X, Y, Z у механічній системі координат верстата та у вибраній робочій системі координат деталі (G54);
- віртуальну панель ручного керування (внизу праворуч): інтегрує органи керування («пульт») для позиціонування осей, вибору кроку переміщення (включаючи режим MPG), запуску/зупинки шпинделя та контролю контурів автоматики;
- рядок функціональних клавіш швидкого доступу (F1–F12): винесений у найнижчу частину екрана для оперативного керування базовими циклами (завантаження файлів, пуск, пауза, стоп, увімкнення емуляції).

1.4 Постановка задачі на розробку комп'ютерно-інтегрованої системи керування верстатом

На основі проведеного аналізу предметної області та огляду існуючих рішень у сфері автоматизації фрезерного обладнання, було визначено, що для забезпечення високої продуктивності та точності механічної обробки доцільно використовувати архітектуру PC-based CNC із зовнішнім мережевим контролером руху.

Головною задачею даної кваліфікаційної роботи є розробка, апаратна інтеграція та програмне конфігурування комп'ютерно-інтегрованої системи керування для трикоординатного фрезерного верстата портального типу на основі спеціалізованого програмного забезпечення CyclMotion та промислових сервоприводів змінного струму (AC Servo).

Для успішного виконання поставленої мети необхідно вирішити наступний комплекс взаємопов'язаних технічних та інженерних задач:

1. Обґрунтування апаратної бази: здійснити вибір та аналіз технічних характеристик виконавчих механізмів (сервоприводів та серводрайверів) і автономного мережевого контролера руху, сумісного з екосистемою CyclMotion.
2. Проектування підсистеми електроавтоматики: розробити принципову схему комутації шафи керування, яка повинна включати силові ланцюги живлення, ланцюги керування приводами (за інтерфейсом STEP/DIR), систему керування шпинделем через частотний перетворювач (VFD) та підключення кінцевих датчиків.
3. Забезпечення завадостійкості: розробити заходи щодо мінімізації впливу електромагнітних завад на роботу мікропроцесорної техніки шляхом правильної організації заземлення та використання екранованих кабелів і мережевих фільтрів.

4. Програмне конфігурування мережевого рівня: налаштувати стабільний канал передачі даних між керівним ПК та контролером руху за промисловим протоколом Ethernet.
5. Параметризація виконавчих механізмів: виконати розрахунок "електронного редуктора" та налаштування внутрішніх параметрів серводрайверів для забезпечення точного позиціонування.
6. Налаштування програмного комплексу: здійснити конфігурування ПЗ СуclMotion, що включає калібрування осей, налаштування лімітів переміщень, параметрів розгону/гальмування та інтеграцію периферійних пристроїв через протокол Modbus.

Експериментальне дослідження: провести тестові випробування розробленої системи на реальному фізичному обладнанні для підтвердження її працездатності, плавності ходу та точності відпрацювання G-кодів.

Висновок до розділу 1.

У розділі 1 було проведено комплексний аналіз стану проблеми керування сучасним фрезерним обладнанням. Визначено, що еволюція верстатобудування спрямована на впровадження гнучких комп'ютерно-інтегрованих систем із завадостійкими мережевими інтерфейсами (Ethernet) та високодинамічними сервоприводами змінного струму.

Проведений порівняльний аналіз популярних програмних комплексів (Mach3, LinuxCNC, CyclMotion) дозволив обґрунтувати вибір ПЗ CyclMotion як оптимальної платформи для реалізації поставленої задачі. Завдяки глибокій апаратній інтеграції з автономними контролерами руху, ця система здатна генерувати високочастотні сигнали керування без ризику збоїв з боку операційної системи комп'ютера. На основі цих висновків було сформульовано розгорнуту постановку задачі, яка визначає напрямки подальшого апаратного та програмного проектування у наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2 АПАРАТНО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВЕРСТАТА З ЧПК

2.1 Обґрунтування кінематичної схеми та базового механічного обладнання

Розробка комп'ютерно-інтегрованої системи керування вимагає чіткого розуміння кінематики, жорсткості та механічних характеристик об'єкта автоматизації. Досліджуваний фрезерний верстат з ЧПК побудований за класичною схемою з рухомим порталом. Зварена сталева станина забезпечує необхідну жорсткість конструкції та гасіння вібрацій, що виникають під час фрезерування. Робоче поле верстата становить 900x1200x200 мм (осі X, Y, Z відповідно), що є оптимальним форматом для обробки як дрібних деталей, так і габаритних листових матеріалів.

Основні технічні характеристики досліджуваного фрезерного верстата наведено в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики фрезерного верстата

Параметр	Значення
Тип верстата	Портальний фрезерний верстат з ЧПК
Робоче поле по осі X	1200 мм
Робоче поле по осі Y	900 мм
Робоче поле по осі Z	200 мм
Тип напрямних	Профільні лінійні напрямні Hiwin HGR25

Параметр	Значення
Тип механізму переміщення	Кульково-гвинтова передача (КГП 2510)
Крок КГП	10 мм
Тип приводів координатних осей	АС Servo
Потужність сервоприводу	1,0 кВт
Потужність шпинделя	2,2 кВт
Максимальна швидкість обертання шпинделя	24000 об/хв
Тип охолодження шпинделя	Рідинне
Система фіксації заготовок	Вакуумний стіл
Тип датчиків базування	Індуктивні безконтактні
Інтерфейс зв'язку системи керування	Ethernet

Лінійні напрямні та система переміщення. Для забезпечення плавності ходу та стійкості до високих динамічних навантажень, у якості напрямних елементів по всіх трьох осях застосовано прецизійні профільні рейки серії Hiwin HGR25 із відповідними каретками фланцевого типу. Вибір 25-го типорозміру обумовлений масою рухомого порталу та необхідністю

сприймати значні багатонаправлені зусилля різання без виникнення пружних деформацій.

Конструкція такої напрямної (див. рис. 2.1) базується на використанні чотирьох замкнених рядів кульок, що переміщуються по прецизійно шліфованих доріжках кочення рейки. Наявність вбудованих прес-маслянок на торцях кареток дозволяє здійснювати оперативне подання індустріального мастила від централізованої системи верстата безпосередньо в контури кочення, що суттєво знижує коефіцієнт тертя та запобігає зносу механізму під навантаженням.

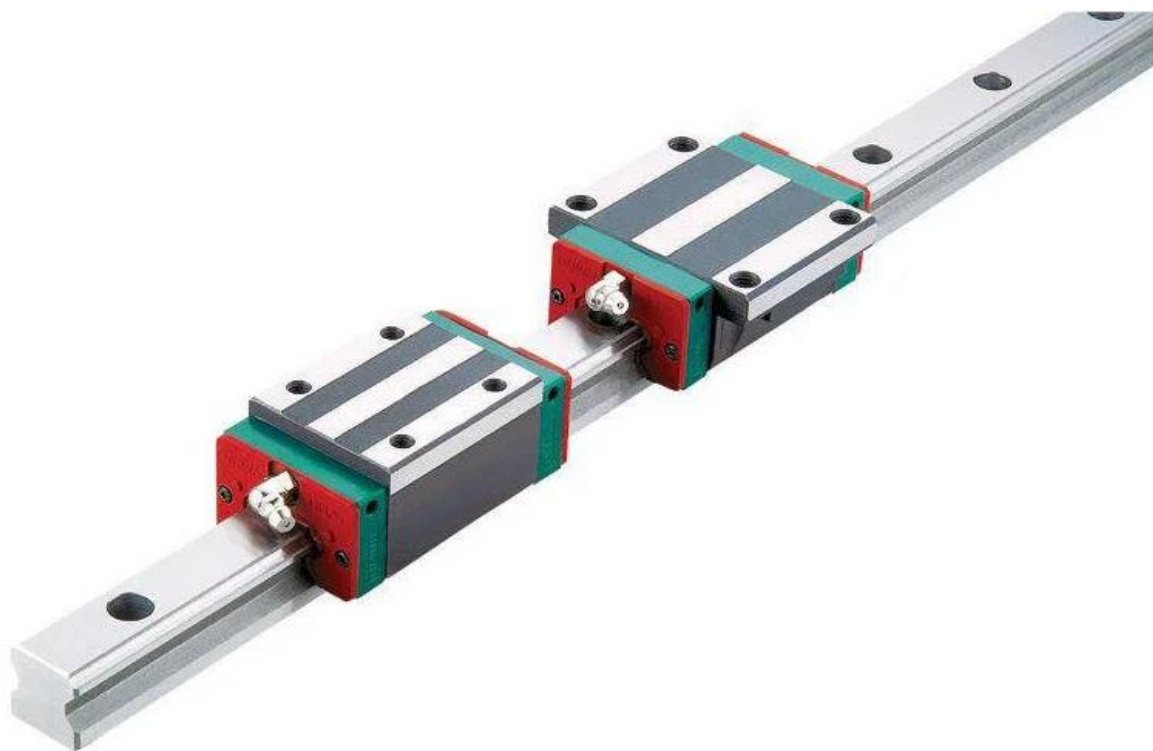


Рисунок 2.1 – Профільна лінійна напрямна серії Hiwin HGR з каретками

Кінематика передачі. Трансформація обертального руху серводвигунів у поступальне переміщення виконавчих органів здійснюється виключно за допомогою кульково-гвинтових передач (КГП). На верстаті встановлено масивні гвинти типорозміру 2510 (діаметр гвинта 25 мм, крок різьби 10 мм).

Відмова від зубчасто-рейкової передачі на користь КГП є принциповим інженерним рішенням для даного проєкту.

Вона гарантує:

1. Повну відсутність механічного люфту під час реверсу напрямку руху.
2. Мікронну точність позиціонування інструменту.
3. Високий ККД та плавність ходу завдяки коченню кульок у гайці.

Крок гвинта 10 мм у поєднанні з номінальною частотою обертання серводвигуна (2500 об/хв) дозволяє досягти оптимального балансу: максимальна швидкість холостих переміщень сягає 25 м/хв при збереженні високого тягового зусилля під час силового фрезерування.

Наочна реалізація кінематичного вузла (див. рис. 2.2) демонструє інтеграцію прецизійного гвинта КГП та фланцевої гайки, що жорстко зафіксована на рухомій конструкції порталу за допомогою гвинтів із внутрішнім шестигранником. До корпусу гайки через кутовий штуцер підведено гнучку поліуретанову трубку централізованої системи змащування для порційної подачі мастила в зону кочення кульок. У лівій нижній частині знімка також візуалізується каретка лінійного переміщення, що забезпечує жорстке базування та плавність ходу координатної осі в умовах реального виробничого процесу.

Система змащування механіки. Для підтримки працездатності та подовження ресурсу кулькових підшипників у каретках Hiwin та гайках КГП, верстат обладнано централізованою механічною системою змащування. Подача індустріального мастила здійснюється оператором за допомогою ручного плунжерного насоса об'ємом резервуара 0.5 л.



Рисунок 2.2 – Вузол КГП та лінійних напрямних реального верстата



Рисунок 2.3 – Ручний плунжерний насос централізованої системи змащування об'ємом 0.5 л

Апаратна реалізація блоку нагнітання тиску (див. рис. 2.3) є механічним лубрикатором плунжерного типу, змонтованим безпосередньо на станині верстата. Конструкція оснащена прозорим вікном (індикатором) для візуального контролю рівня індустріального масла в резервуарі та механічним важелем, за допомогою якого оператор вручну створює необхідний тиск у магістралі перед початком робочої зміни.

Через систему гнучких трубок та латунних розподільчих колекторів мастило під тиском дозовано подається безпосередньо до кожного вузла тертя на порталі.

Для точного дозування та розгалуження мастильних потоків у системі застосовано анодований розподільчий блок (див. рис. 2.4) що відповідає за подачу масла на каретки напрямних та гайки КГП. Регулювання витрати по кожному каналу здійснюється за допомогою дросельних гвинтів, що гарантує рівномірне надходження мастила до всіх вузлів тертя незалежно від довжини підведеної поліуретанової трубки.

Головний привод (Шпindel) У якості головного приводу верстата застосовано високошвидкісний трифазний асинхронний шпindel потужністю 2.2 кВт. Його максимальна частота обертання становить 24000 об/хв при номінальному струмі 8 А. Шпindel оснащено системою примусового охолодження та цанговим патроном типу ER20, що дозволяє затискати фрези з діаметром хвостовика до 13 мм. Високі оберти шпинделя є критично важливими для забезпечення належної швидкості різання під час обробки дерева, МДФ, пластиків та композитних матеріалів.

Базування заготовок (Вакуумний стіл) Робочий стіл верстата має комбіновану конструкцію: поверхня з МДФ (жертвний шар) інтегрована з системою Т-подібних пазів та вакуумних зон. Фіксація габаритних листових заготовок здійснюється за допомогою системи вакуумного прижиму, яка генерується вихровою повітродувкою (вакуумним насосом) потужністю 3 кВт.



Рисунок 2.4 – Розподільчий блок змащування координатних осей

Наочна реалізація робочої зони верстата (див. рис. 2.5) демонструє комбінований тип столу. На базовій основі з вакуумними каналами закріплено

плити «жертвовного» шару з МДФ, які забезпечують рівномірний розподіл негативного тиску для фіксації деталей.

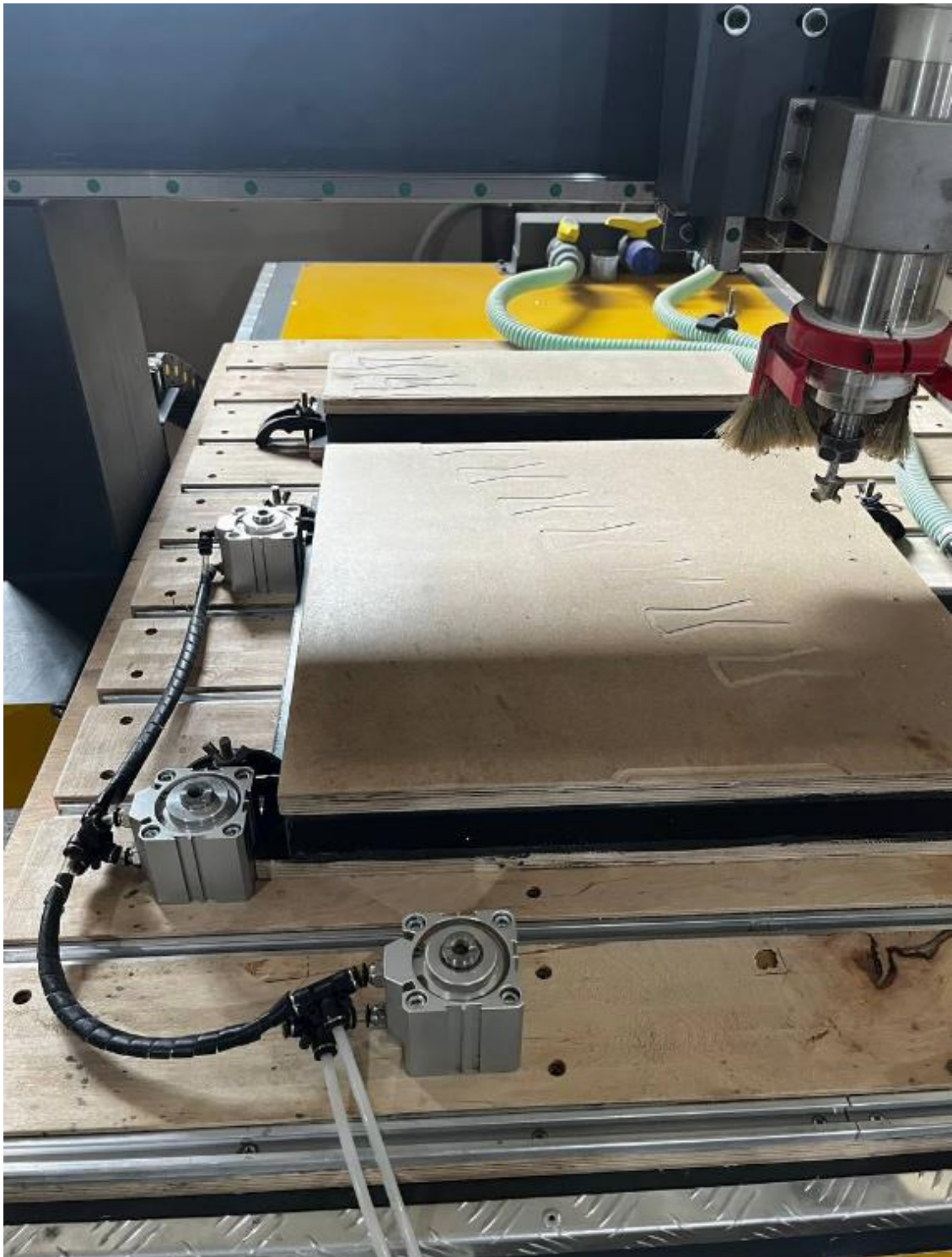


Рисунок 2.5 – Конструкція комбінованого робочого столу верстата з елементами пневматичного базування

Додатково, для швидкого кутового вирівнювання заготовок на гранях столу змонтовано систему пневматичних упорів на базі короткохідних циліндрів. Вони виступають фізичними обмежувачами для точного позиціонування торців матеріалу паралельно робочим осям верстата перед активацією вакууму. Дана підсистема працює повністю в автономному пневматичному режимі, керується оператором за допомогою механічної ножної педалі розподільника і не інтегрується в загальну електричну схему керування ЧПК, що підвищує загальну надійність та спрощує кабельну архітектуру обладнання.

Такий підхід унеможливорює зсув деталі під час агресивної обробки та звільняє всю верхню площину заготовки від механічних струбцин, що дозволяє фрезі безперешкодно проходити по всьому контуру.

Сенсорна інфраструктура механіки. Точне базування порталу та обмеження виходу за межі робочої зони забезпечується безконтактними індуктивними датчиками наближення моделі OMKON TL-Q5MC1-Z (NPN логіка). Для автоматичного визначення вильоту різального інструменту на робочому столі передбачено прецизійний датчик виміру MY20-20-2, що нівелює людський фактор під час зміни фрез.

Обрана кінематична схема та базове механічне обладнання створюють надійну, жорстку та високоточну платформу. Це дозволяє повною мірою реалізувати потенціал інтелектуальної системи керування на базі контролера CncMotion та сервоприводів змінного струму.

2.2 Аналіз та вибір виконавчих механізмів: сервоприводи змінного струму (на прикладі SD100)

Для забезпечення заданих динамічних характеристик, високої швидкості холостих переміщень (до 25 м/хв) та мікронної точності позиціонування фрезерного порталу, вибір виконавчих двигунів є одним із найвідповідальніших етапів проектування комп'ютерно-інтегрованої системи.

Враховуючи масивну конструкцію рухомого порталу верстата та значний крок кульково-гвинтової передачі, використання класичних крокових двигунів визнано недоцільним. Крокові приводи працюють у розімкненому контурі керування, що за умов різких змін сил різання або швидкого гальмування створює високий ризик пропуску кроків, а їхній крутний момент стрімко падає зі зростанням швидкості обертання валу.

Вибір та характеристика сервосистеми. Для кожної з трьох незалежних осей верстата було обрано промислові високодинамічні синхронні сервоприводи змінного струму компанії Time Motion. Комплекс електроприводу кожної координати складається з узгодженої пари: двигуна SD80AEA10025-SC3-AP-CB та цифрового мікропроцесорного серводрайвера SD100-20AL-GBN-S.

Обраний двигун має номінальну електричну потужність 1.0 кВт та забезпечує номінальний крутний момент 3.8 Н·м, що створює надійний запас жорсткості механічної характеристики під час агресивної обробки. Головна перевага такої системи полягає в роботі у повністю замкненому контурі керування: інтегрований у задню частину двигуна оптичний енкодер безперервно передає дані про фактичний кут повороту валу назад на серводрайвер, що дозволяє миттєво компенсувати динамічну помилку роззгодження.

Для наочності технічні характеристики обраного сервоприводу наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики сервоприводу

Параметр	Значення
Модель серводвигуна	SD80AEA10025-SC3-AP-CB
Модель серводрайвера	SD100-20AL-GBN-S
Тип двигуна	Синхронний серводвигун змінного струму
Номінальна потужність	1,0 кВт
Номінальний крутний момент	3,8 Н·м
Максимальний крутний момент	до 11,4 Н·м
Номінальна швидкість обертання	2500 об/хв
Максимальна швидкість обертання	3000 об/хв
Система зворотного зв'язку	Оптичний енкодер
Тип керування	Замкнений контур позиціювання
Номінальний вихідний струм драйвера	10 А
Піковий вихідний струм драйвера	20 А
Інтерфейс керування	STEP/DIR

Параметр	Значення
Функція електронного редуктора	Підтримується
Функція придушення резонансів	Підтримується
Функції захисту	Від перевантаження, перенапруги, перегріву та обриву енкодера

Наведені характеристики підтверджують, що сервосистема серії SD100 забезпечує достатній запас потужності та динамічних параметрів для роботи трикоординатного фрезерного верстата портального типу.

Наочна апаратна реалізація комплекту електроприводу (див. рис. 2.6) демонструє конструктивне виконання та архітектуру основних компонентів сервосистеми серії SD100. Ліворуч представлено синхронний серводвигун змінного струму у захищеному промисловому корпусі, який оснащений вихідними силовими та сигнальними кабелями підключення. Праворуч розташовано інтелектуальний цифровий серводрайвер у модульному корпусі для монтажу в електрошкафу керування верстата. На лицьовій панелі драйвера чітко видно цифрову світлодіодну панель налаштування та інтерфейсні роз'єми CN1 і CN2, що відповідають за з'єднання з центральним контролером ЧПК та отримання сигналів зворотного зв'язку з енкодера двигуна відповідно.

Цифровий серводрайвер моделі SD100-20AL виступає в ролі інтелектуального перетворювача. Він розрахований на номінальний вихідний струм 10 А (із піковим значенням до 20 А для швидкого старту).



Рисунок 2.6 – Компоненти промислового сервоприводу серії SD100: синхронний серводвигун змінного струму та цифровий серводрайвер

Отримуючи від мережевого контролера верстата керівні імпульсні сигнали позиціонування, драйвер самостійно замикає внутрішні високошвидкісні контури керування та реалізує такі функції:

- Електронне редукування (Electronic Gear Ratio): апаратне налаштування коефіцієнта співвідношення імпульсів у пам'яті драйвера для узгодження з фізичним кроком гвинта КГП.
- Фільтрація резонансів (Notch filters): алгоритми цифрової фільтрації математично пригнічують механічні вібрації верстата на певних резонансних частотах.
- Комплексний захист: драйвер безперервно моніторить стан системи. У випадку перевантаження, перенапруги чи обриву кабелю енкодера, він миттєво знеструмлює мотор і видає сигнал ALARM на головний контролер верстата.

2.3 Характеристика контролера керування рухом (CM400V2) та його інтерфейсів

Центральним інтегруючим елементом апаратної архітектури верстата є багатоосьовий автономний контролер (див. рисунок 2.7 та рисунок 2.8) керування рухом серії CyclMotion CM400V2.



Рисунок 2.7 – Центральний обчислювальний модуль ЧПК CyclMotion CM400V2 з підключеними інтерфейсами

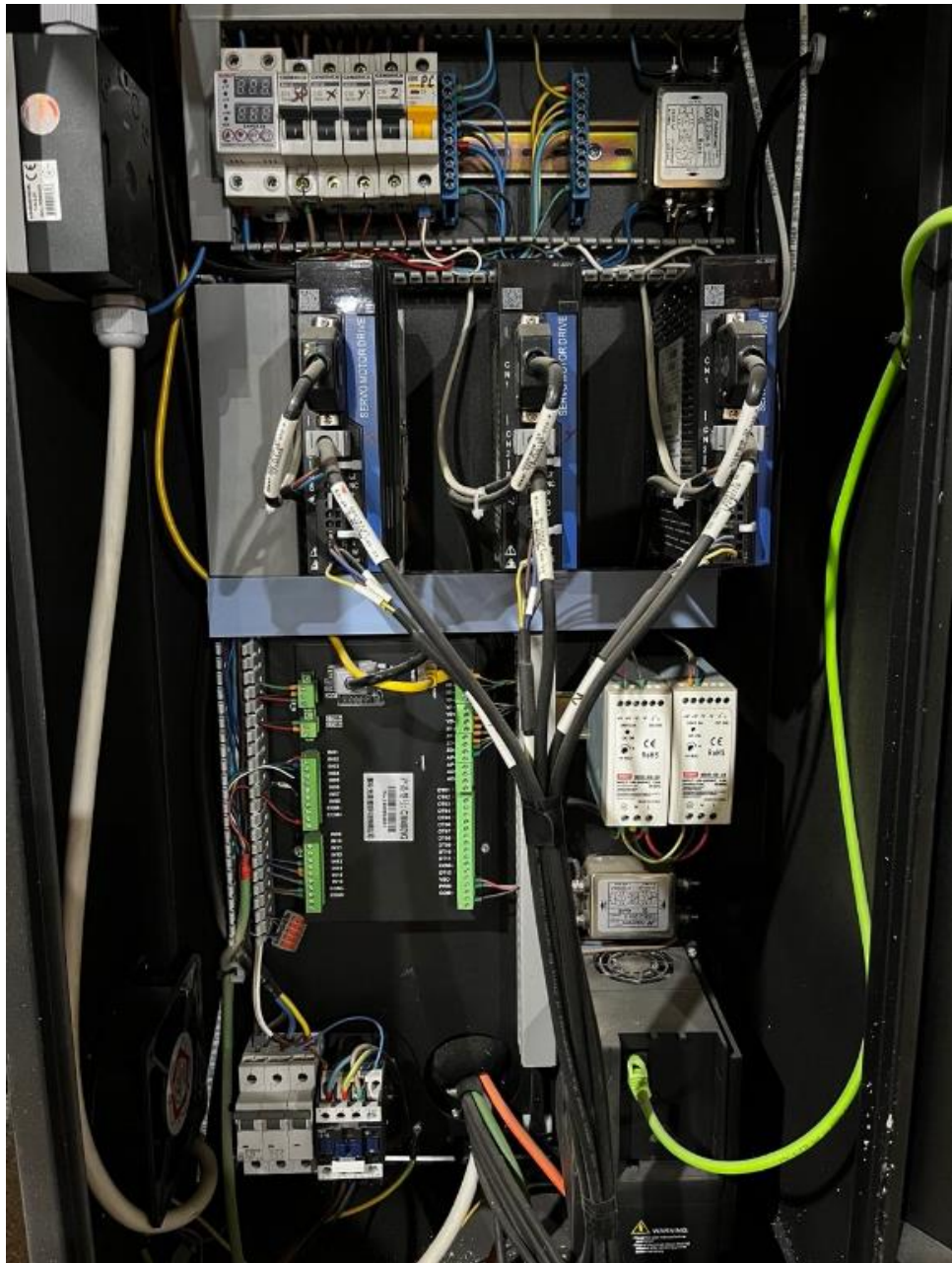


Рисунок 2.8 – Загальна апаратна компоновка та розміщення блоків у силовій шафі верстата

Його головне призначення в структурі комп'ютерно-інтегрованої системи – децентралізація обчислювальних процесів. Контролер повністю звільняє керуючий комп'ютер від критичних за часом задач генерації імпульсних послідовностей високої частоти та опитування дискретних датчиків у реальному часі.

Апаратна структура контролера CM400V2 дозволяє реалізувати багатоканальне керування через наступні групи інтерфейсів:

1. Мережевий інтерфейс зв'язку (Ethernet). Для обміну даними з керуючим комп'ютером стійки ЧПК (де розгорнуто програмне забезпечення CyclMotion) контролер використовує промисловий порт RJ45 (Ethernet). Цей стандарт забезпечує високу пропускну здатність для передачі пакетів координат траєкторії та повну гальванічну ізоляцію обчислювальної техніки від електромагнітних шумів силової шафи.

2. Інтерфейси керування сервоприводами (PULSE/DIR). Контролер генерує високочастотні диференційні сигнали для трьох незалежних цифрових серводрайверів. Сигнальні лінії складаються з пар PULSE (тактові імпульси, що задають швидкість) та DIRECTION (потенціал рівня, що визначає напрямок руху). Висока тактова частота виходів контролера дозволяє повною мірою реалізувати динаміку 1000-ватних двигунів без втрати мікронної точності при виконанні складних 3D-інтерполяцій.

3. Інтерфейс промислової шини (RS485 Modbus). Керування високошвидкісним шпинделем верстата (2.2 кВт, 24000 об/хв) здійснюється не через застарілий аналоговий сигнал напруги, а за допомогою цифрового інтерфейсу RS485. Контролер CM400V2 за протоколом Modbus RTU передає на частотний перетворювач команди "Пуск/Стоп" та точні цифрові значення обертів, що гарантує високу стабільність підтримки швидкості різання під навантаженням.

4. Дискретні інтерфейси вводу/виводу (I/O). Усі дискретні канали контролера мають оптичну ізоляцію (Optocoupler), що захищає мікропроцесорне ядро від перенапруг. До них підключена ключова сенсорна інфраструктура верстата:

- Ручне керування: До виділеного порту підключено виносний пульт (MPG) із вбудованим штурвалом-енкодером для апаратного переміщення осей без затримок.



Рисунок 2.9 – Виносний ручний пульт керування верстатом (генератор імпульсів MPG)

Наочна апаратна реалізація пульта (див. рис. 2.9) показує провідний пульт оператора. На лицьовій панелі розташовано велику червону кнопку

аварійної зупинки та скидання (RESET), поворотний перемикач вибору активної координатної осі (X, Y, Z) та перемикач множника кроку переміщення (x1, x10, x100). Нижня частина обладнана поворотним маховиком (оптичним енкودером) із градуйованою шкалою для точного ручного підведення фрези до заготовки.

- Датчики базування: Безконтактні індуктивні датчики наближення (NPN) виконують функцію визначення машинного нуля та апаратного захисту механіки.
- Вимірювання інструменту: Контактний датчик MY20-20-2 на ізолюваному вході дозволяє контролеру в автоматичному циклі розраховувати компенсацію довжини фрези.

2.4 Проектування підсистеми живлення, частотного керування шпинделем та захисту від завад

Надійність роботи комп'ютерно-інтегрованої системи ЧПК критично залежить від якості електроживлення та стійкості мікропроцесорної техніки до електромагнітних завад (ЕМІ). Усі вузли системи керування змонтовані в єдиній металевій шафі електроавтоматики, яка виконує роль захисного екрана.

Організація підсистеми живлення. Первинне живлення здійснюється від мережі змінного струму 220 В через головний ввідний автоматичний вимикач. Внутрішня архітектура живлення розділена на слабкоструміву логіку та силову частину:

- Для забезпечення стабільним живленням 24 В постійного струму (DC) контролера SM400V2, індуктивних кінцевих вимикачів та модулів реле застосовано промисловий імпульсний блок живлення Mean Well HDR-60-24. Він має вбудований захист від короткого замикання та перевантаження, що гарантує стабільну роботу цифрової логіки.
- Силові кола серводрайверів SD100 та частотного перетворювача шпинделя живляться через індивідуальні автоматичні вимикачі, що дозволяє локалізувати струмові перевантаження.

Частотне керування шпинделем та захист від завад. Частотний перетворювач (інвертор), який керує шпинделем потужністю 2.2 кВт, є найбільшим джерелом високочастотних гармонік та електромагнітного шуму у системі. Для захисту чутливої електроніки контролера руху від цих завад перед інвертором у розрив фазного дроту встановлено спеціалізований мережевий ЕМІ-фільтр моделі CW4L2-20A-S. Цей фільтр ефективно пригнічує перешкоди, не дозволяючи їм поширюватися по загальній мережі живлення шафи.

Наочна апаратна реалізація блоку фільтрації (див. рис. 2.10) представлена двоступеневим ЕМІ-фільтром.

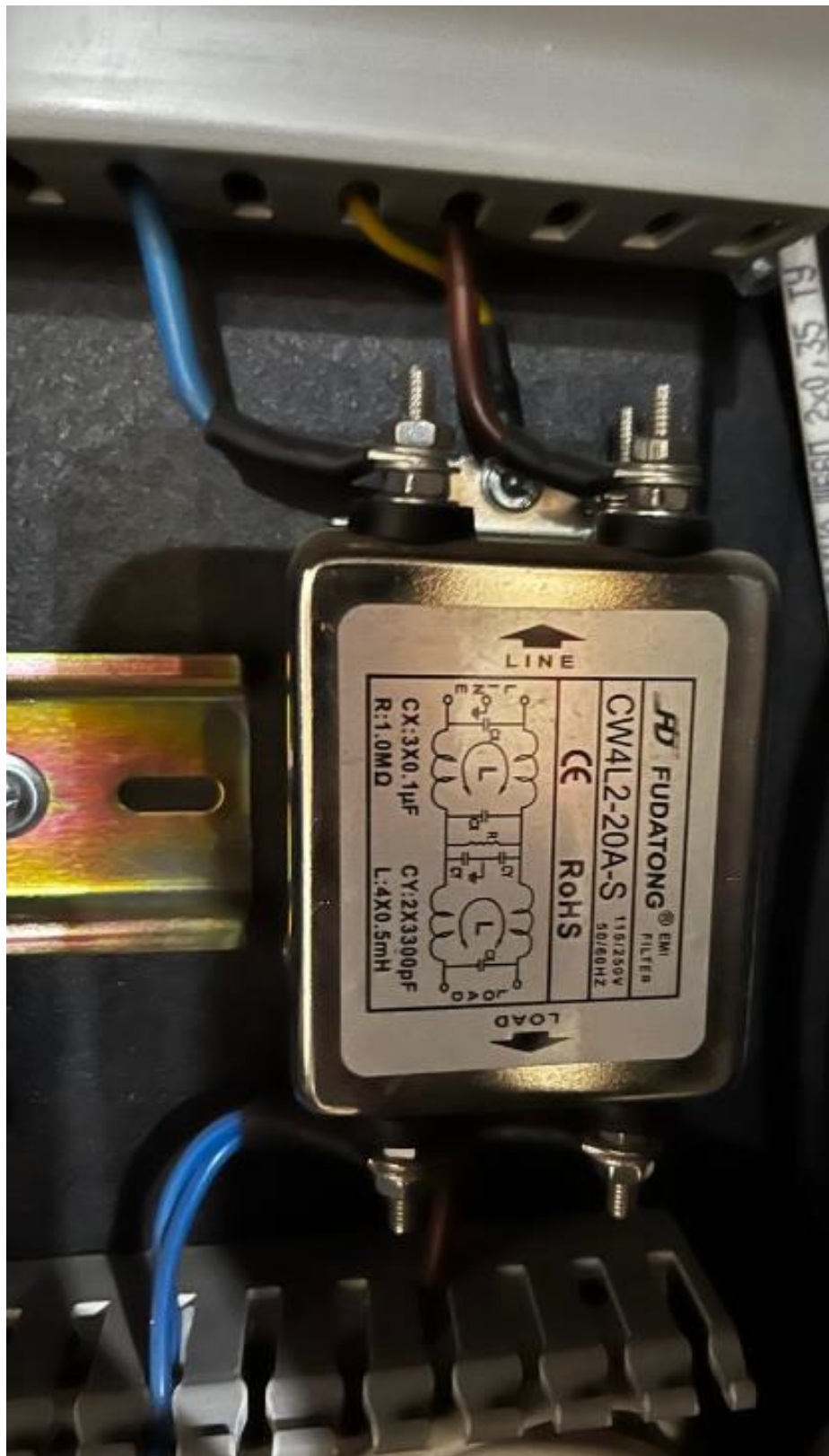


Рисунок 2.10 – Промисловий магістральний фільтр електромагнітних завад Fudatong CW4L2-20A-S

Додатково, для унеможливлення наведення паразитних струмів на лінії зв'язку, підключення енкодерів серводвигунів та передача імпульсів STEP/DIR реалізована виключно екранованою витою парою (STP). Екрани всіх сигнальних кабелів та корпус шпинделя об'єднані на єдину мідну шину заземлення за топологією «зірка», що виключає появу земляних петель (Ground Loops) та забезпечує безперебійну роботу верстата.

Висновок до розділу 2.

У розділі 2 бакалаврської роботи було розроблено та обґрунтовано апаратно-механічну архітектуру комп'ютерно-інтегрованої системи керування фрезерним верстатом. На основі аналізу масо-габаритних показників рухомого порталу та високих вимог до динаміки обладнання було обґрунтовано відмову від традиційних крокових двигунів. Для забезпечення надійної роботи без ризику пропуску кроків обрано промислові сервоприводи змінного струму (потужністю 1.0 кВт), які працюють у повністю замкненому контурі керування на базі серводрайверів SD100.

Центральним елементом апаратного рівня обрано автономний мережевий контролер руху CyclMotion CM400V2, який дозволив децентралізувати обчислювальні процеси та зняти критичне навантаження з керівного комп'ютера. Розроблена структурна схема довела раціональність використання цифрової шини RS485 (протокол Modbus RTU) для керування високошвидкісним шпинделем, а також доцільність застосування прецизійних індуктивних і контактних датчиків для автоматизації процесів вимірювання інструменту та безпечного базування осей.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТА ІНТЕГРАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Розробка принципової схеми комутації електроавтоматики в шафі керування

Етап розробки принципової електричної схеми та фізичної комутації елементів у силовій шафі керування є критично важливим для забезпечення безперебійної роботи верстата та його захисту від електромагнітних завад (ЕМІ). Усі електронні та силові компоненти комп'ютерно-інтегрованої системи змонтовано в єдиній металевій шафі, що виключає потрапляння стружки та пилу на друковані плати.

На розробленій електричній структурній схемі (див. рис. 3.1) відображено взаємозв'язок та архітектуру підключення всіх функціональних підсистем обладнання. Центральним комутаційним вузлом виступає промисловий контролер руху A1 (CyclMotion CM400V2), що взаємодіє з керуючою ЕОМ оператора (PC) через завадостійкий інтерфейс Ethernet (RJ45). Схеми наочно фіксує організацію підсистеми живлення через автоматичний вимикач контуру QF1, імпульсне джерело постійного струму PS1 та магістральний ЕМІ-фільтр FM1. Керування виконавчими осями здійснюється через цифрові серводрайвери A2, A3, A4 (Time Motion SD100), кожний з яких захищено індивідуальними автоматами QF3, QF4, QF5 та узгоджено з відповідними синхронними серводвигунами M1, M2, M3 (потужністю 1.0 кВт) з енкодерами зворотного зв'язку. Окремо на схемі деталізовано контур частотного перетворювача шпинделя A5 (VFD) для привода M4 (2.2 кВт) з керуванням по цифровій шині RS485 (Modbus RTU), підключення ручного пульта керування A6 (MPG), а також сенсорну інфраструктуру безпеки та позиціонування: індуктивні датчики SQ1–SQ3 (HOME X, Y, Z), прецизійний датчик вимірювання інструменту SQ4 (MY20-20-2) та кнопку аварійної зупинки SA1 (E-STOP).

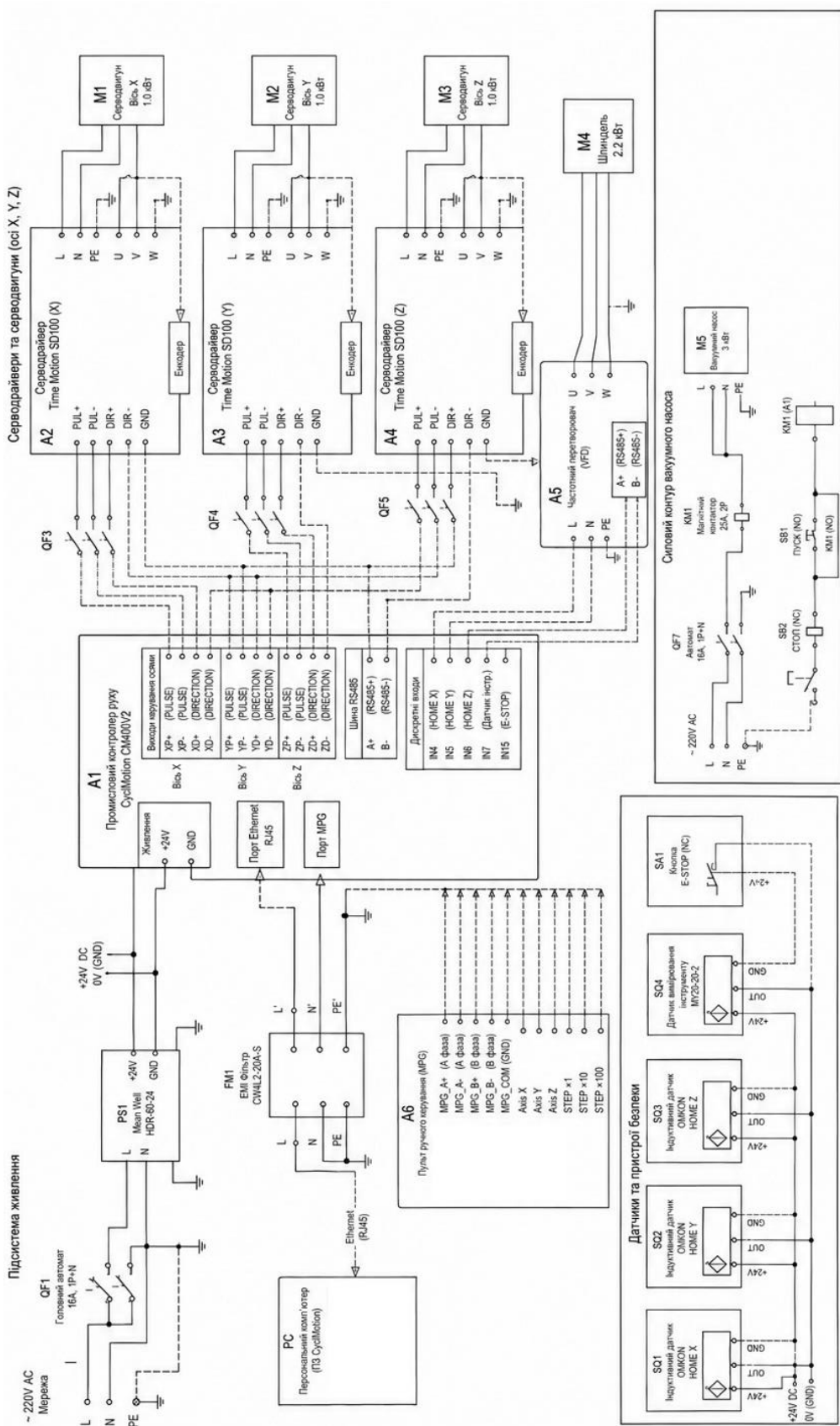


Рисунок 3.1 – Електрична схема системи керування фрезерним верстатом з ЧПК

Силу підсистему живлення та запуск електродвигуна вакуумного насоса М5 (3 кВт) реалізовано через захисний автомат QF7 та магнітний контактор КМ1 із кнопковим постом керування «ПУСК» / «СТОП».

Організація живлення та захисту. Первинне електроживлення комп'ютерно-інтегрованої системи має комбіновану структуру для раціонального розподілу навантаження та забезпечення вимог електромагнітної сумісності. Живлення основних вузлів шафи електроавтоматики здійснюється від однофазної промислової мережі 220 В. Ввідний контур захищено двополюсним автоматичним вимикачем QF1 із розрахованим номіналом 32 А, що гарантує надійну роботу системи при максимальному піковому споживанні струму двигунами. Далі однофазна лінія розгалужується на кілька незалежних цільових контурів:

1. Контур слабкострумової логіки: через імпульсний блок живлення Mean Well HDR-60-24 формується стабільна напруга 24 В (DC) для живлення промислового контролера SM400V2, індуктивних датчиків OMKON та релейних модулів.
2. Контур сервоприводів: кожен з трьох цифрових драйверів Time Motion SD100 (для осей X, Y, Z) живиться через індивідуальні автоматичні вимикачі QF3, QF4 та QF5 від лінії 220 В. Це дозволяє локалізувати струмові перевантаження та безпечно проводити пусконаладжувальні роботи поосьово.
3. Контур головного приводу: живлення на частотний перетворювач (інвертор) шпинделя потужністю 2.2 кВт подається через окремий автомат та обов'язковий ЕМІ-фільтр моделі CW4L2-20A-S від лінії 220 В. Це рішення ефективно придушує високочастотні гармоніки, які генерує інвертор під час ШІМ-регулювання, захищаючи чутливу мікропроцесорну електроніку контролера руху.

Окремо від однофазної мережі шафи керування реалізовано силовий контур підсистеми вакуумного базування заготовок. Оскільки вихрова повітродувка (вакуумний насос М5) має високу електричну потужність 3 кВт,

для забезпечення її стабільної роботи та високого ККД підключення виконано до промислової трифазної мережі напругою 380 В. Цей трифазний контур захищено індивідуальним автоматичним вимикачем QF7 (16 А), а оперативне керування та пуск асинхронного двигуна здійснюються через магнітний контактор КМ1 з кнопковим постом «ПУСК / СТОП». Таке розділення ланцюгів дозволяє повністю уникнути критичних пускових просідань напруги в однофазній мережі, що захищає контролер від випадкових перезавантажень та збоїв під час фрезерування.

Комутація сигнальних кіл та боротьба із завадами. Враховуючи високу щільність компонентів у шафі, особливу увагу приділено трасуванню кабельних ліній. Силові кабелі (живлення серводвигунів та шпинделя) прокладено в ізольованих кабельних каналах окремо від слабкострумівих ліній керування. Передача високочастотних сигналів позиціонування (PULSE/DIR) від контролера CM400V2 до серводрайверів, а також ліній зворотного зв'язку від енкодерів, реалізована виключно екранованою витою парою. Екрани всіх сигнальних кабелів заземлені суворо з одного боку (з боку шафи керування) на єдину мідну шину за топологією «зірка». Це запобігає утворенню паразитних земляних контурів (Ground Loops) та гарантує відсутність пропуску кроків через наведені електромагнітні шуми.

3.2 Параметризація серводрайверів та налаштування частотного перетворювача

Після завершення фізичної комутації виконується внутрішня параметризація виконавчих пристроїв. Серводрайвери SD100 та частотний перетворювач є складними мікропроцесорними пристроями, які потребують узгодження з механікою верстата до моменту підключення до центрального контролера.

Налаштування контурів регулювання серводрайверів SD100. Оскільки серводвигуни працюють у повністю замкненому контурі, у пам'ять кожного драйвера SD100 внесено наступні базові параметри:

Електронна редукція: Апаратно налаштовано співвідношення вхідних імпульсів до фізичного кута повороту валу. Враховуючи крок кульково-гвинтової передачі (КГП 2510 – 10 мм/оберт), коефіцієнт розраховано таким чином, щоб один імпульс від контролера відповідав лінійному переміщенню механіки рівно на 0.001 мм.

ПД-регулювання: Для забезпечення високої жорсткості утримання траєкторії та мінімізації помилки слідування було оптимізовано пропорційно-інтегральні коефіцієнти внутрішніх контурів струму та швидкості. Задіяно цифрові режекторні фільтри для пригнічення механічного резонансу масивного порталу під час різких розгонів (з прискоренням до 400 мм/с²).

Конфігурація цифрового зв'язку частотного перетворювача. Відповідно до концепції комп'ютерно-інтегрованої системи, керування шпинделем реалізовано не аналоговим сигналом напруги 0-10 В, а через промислову цифрову шину RS485. Для цього у регістрах параметрів частотного перетворювача було задано протокол зв'язку Modbus RTU із наступними комунікаційними налаштуваннями: швидкість передачі – 9600 бод, біти даних – 8, стоп-біти – 1, перевірка парності – відсутня. Адреса пристрою в мережі встановлена як "1". Це дозволяє контролеру руху напряму записувати точні значення частоти (до 24000 об/хв) безпосередньо у процесор інвертора.

3.3 Інтеграція та конфігурування програмного забезпечення CyclMotion по інтерфейсу Ethernet

Завершальним етапом створення комп'ютерно-інтегрованої системи є об'єднання апаратної периферії з інтерфейсом оператора (HMI) за допомогою програмного забезпечення CyclMotion.



Рисунок 3.2 – Загальний вигляд промислової консолі оператора з інтерфейсом CyclMotion

Наочна практична реалізація робочого місця оператора (див. рис. 3.2) представлена підлоговою металевою стійкою-консоллю, на верхній похилій панелі якої закріплено РК-монітор АОС. На екрані відображається активоване головне вікно керуючої програми CncMotion з тривимірною моделлю траєкторії фрезерування (ліворуч) та цифровими індикаторами поточного положення виконавчих органів верстата (вгорі праворуч). Консоль обладнана полицею для клавіатури та миші, а також боковим лотком для слюсарного інструменту. На лицьову панель стійки виведено блок оперативного керування частотним перетворювачем шпинделя з цифровим РК-дисплеєм для моніторингу частоти обертання, поворотний вимикач живлення та червону кнопку аварійної зупинки E-STOP для забезпечення безпеки праці.

Мережева інтеграція. Обмін даними між керуючим ПК стійки ЧПК та контролером CM400V2 здійснюється через заводський порт Ethernet (RJ45), що забезпечує повну гальванічну ізоляцію. Контролеру програмно присвоєно статичну IP-адресу 192.168.1.100. Успішна ініціалізація дозволяє програмному забезпеченню генерувати та передавати пакети траєкторій без затримок реального часу.

Програмна маршрутизація сигналів (I/O Mapping). У вкладці налаштувань контролера була виконана логічна прив'язка фізичних датчиків верстата до внутрішніх змінних системи:

- Кнопка аварійної зупинки E-Stop прив'язана до порту IN15 з нормально-замкненою (NC) логікою безпеки.
- Індуктивні кінцеві вимикачі OMKON, встановлені на осях X, Y, Z, маршрутизовано на порти IN4, IN5 та IN6 відповідно. Вони виконують подвійну функцію: пошук машинного нуля (Homing) та апаратний захист від виходу за межі робочого поля (Hardware Limits).
- Прецизійний контактний датчик виміру інструменту MY20-20-2 прив'язано до порту IN7. При активації макросу G31 контролер опускає вісь Z до моменту спрацювання датчика і автоматично розраховує зміщення довжини фрези (Tool Length Offset). Це значно підвищує

точність і швидкість переналагодження під час ручної зміни інструменту в цанговому патроні ER20.

Кінематичні ліміти та ручне позиціонування. Зважаючи на потужність 1-кіловатних сервоприводів та масивність станини, максимальну швидкість холостого ходу (Rapid Feedrate / G0) в системі CyclMotion обмежено на рівні 10 000 мм/хв. Для ручного підведення інструменту до заготовки (завдання локальної робочої координати G54) сконфігуровано зовнішній апаратний пульт MPG. Дискретність кроку штурвала налаштовано на множники x1 (0.001 мм), x10 (0.01 мм) та x100 (0.1 мм).

3.4 Експериментальні дослідження роботи верстата

Для підтвердження правильності обраних апаратних рішень та коректності програмних налаштувань системи SyslMotion було проведено комплекс експериментальних досліджень на діючому фрезерному верстаті. Програма випробувань включала перевірку точності позиціонування, калібрування робочих органів та виконання тестової механічної обробки заготовок.

Калібрування осей та оцінка точності позиціонування. На першому етапі перевірялася відповідність заданих програмних переміщень фактичному руху порталу. Для цього використовувався прецизійний індикатор годинникового типу з ціною поділки 0.01 мм, закріплений на магнітній стійці до станини верстата. Алгоритм перевірки полягав у програмному завданні переміщення осі на фіксовану відстань (наприклад, 100 мм) із наступним вимірюванням фактичного відхилення. Завдяки використанню кульково-гвинтової передачі (КГП 2510) та налаштуванню правильного електронного редуктора в серводрайверах SD100, похибка позиціонування склала не більше 0.02 мм на 100 мм ходу. Механічний люфт під час реверсу напрямку руху виявився практично відсутнім, що підтверджує високу жорсткість обраної кінематичної схеми.

Тестове фрезерування деталей. Другим етапом стала перевірка системи в умовах реального динамічного навантаження та верифікація точності відпрацювання траєкторій за допомогою керуючої програми. Для проведення експерименту в САМ-системі було підготовлено керуючу програму (див. рис. 3.3).

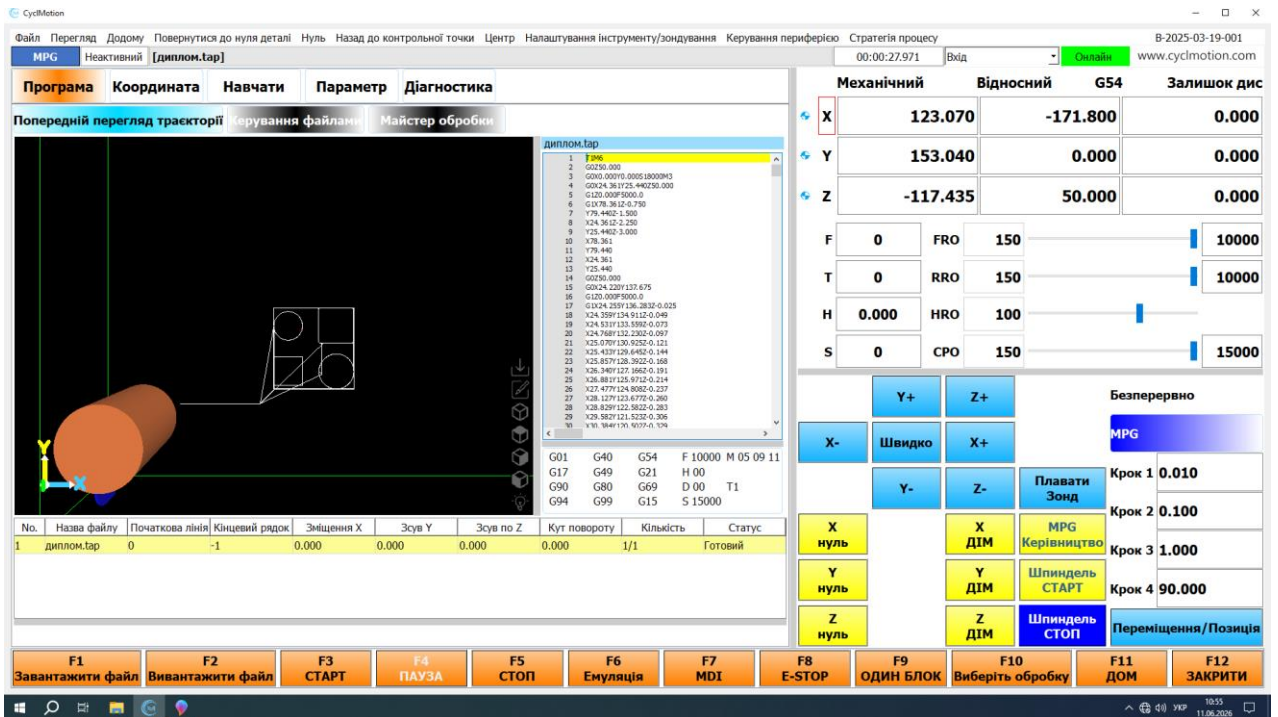


Рисунок 3.3 – Вікно візуалізації траєкторії тестової керуючої програми в НМІ CyclMotion

Як об'єкт обробки було використано листовий композитний матеріал товщиною 3 мм. Керуюча програма передбачала контурне фрезерування еталонних геометричних фігур із заданим номінальним розміром 60 мм, а саме: одного квадрата та одного кола за зовнішнім контуром (на проріз), а також вифрезерування внутрішнього вікна у формі квадрата та кола (пази) для оцінки точності внутрішнього контуру.

Режими різання були встановлені наступні:

- Частота обертання шпинделя: 15 000 об/хв.
- Робоча подача: 10 000 мм/хв.
- Глибина різання за один прохід: 3 мм.

Під час виконання керуючої програми мережевий контролер CM400V2 забезпечив плавну інтерполяцію без ривків, а серводвигуни успішно долали зусилля різання без виникнення помилок. Вакуумний насос надійно утримував композитну пластину на жертвовому столі з МДФ, повністю виключаючи її

зсув під впливом вібрацій та сил різання. Загальний вигляд отриманих тестових взірців безпосередньо на робочому столі верстата наведено на рисунку 3.4.

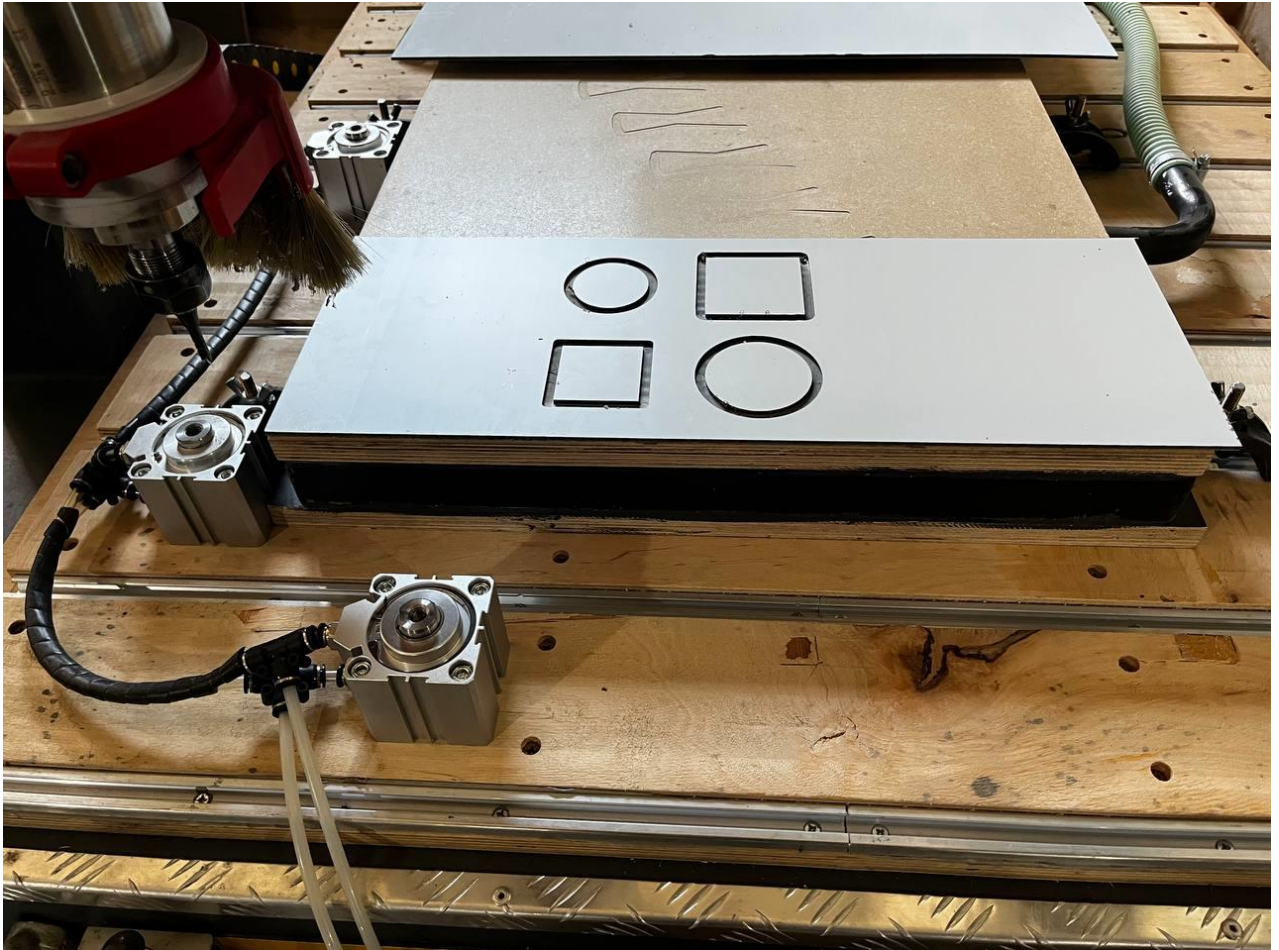


Рисунок 3.4 – Загальний вигляд відфрезерованих тестових взірців із композитного матеріалу на столі верстата

Оцінка геометричної точності. Після завершення повного циклу обробки отримані еталонні деталі були зняті з верстата та піддані метрологічному контролю на вимірювальному столі. Вимірювання лінійних розмірів геометричних елементів виконувалося за допомогою електронного цифрового штангенциркуля Mitutoyo CD-S15C з ціною поділки 0.01 мм та діапазоном вимірювань 0–150 мм. Перед початком вимірювань інструмент пройшов

нульове калібрування відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 13225 та витримувався разом із деталями за кімнатної температури 20°C не менше 30 хвилин для усунення теплових похибок, пов'язаних з нагрівом матеріалу під час різання. Кожен лінійний розмір вимірювався не менше трьох разів у різних перетинах, а до звіту заносилося середнє значення. Така методика забезпечує репрезентативну вибірку та мінімізує вплив випадкових похибок вимірювання. Програма вимірювань охоплювала чотири ключові геометричні елементи тестових деталей: зовнішній контур квадрата (номінальна довжина сторони 60.00 мм), зовнішній контур кола (номінальний діаметр 60.00 мм), внутрішній паз у формі квадрата (номінальний розмір паза 60.00 мм) та внутрішній контур кола (номінальний внутрішній діаметр 60.00 мм).

Вибір саме цих елементів обумовлений їхньою чутливістю до різних видів похибок: зовнішні контури відображають точність лінійного позиціонування та компенсацію радіуса фрези у керуючій програмі, тоді як внутрішні контури демонструють здатність системи виконувати точну еквідистантну обробку з урахуванням пружних деформацій кінематичного ланцюга. Результати вимірювань наведено на рисунках 3.5 –3.8.

При вимірюванні внутрішнього квадратного пазу штангенциркуль встановлювався в губки внутрішніх вимірювань по діагоналі та вздовж осей X і Y. Отримане середнє значення 60,07 мм фіксує стабільне систематичне відхилення, обумовлене залишковою компенсацією радіуса кінцевої фрези (\varnothing 3 мм) у керуючій програмі. Відхилення $\Delta = +0,07$ мм перебуває в межах допуску IT9 для розмірів до 80 мм відповідно до ДСТУ ISO 286-1.

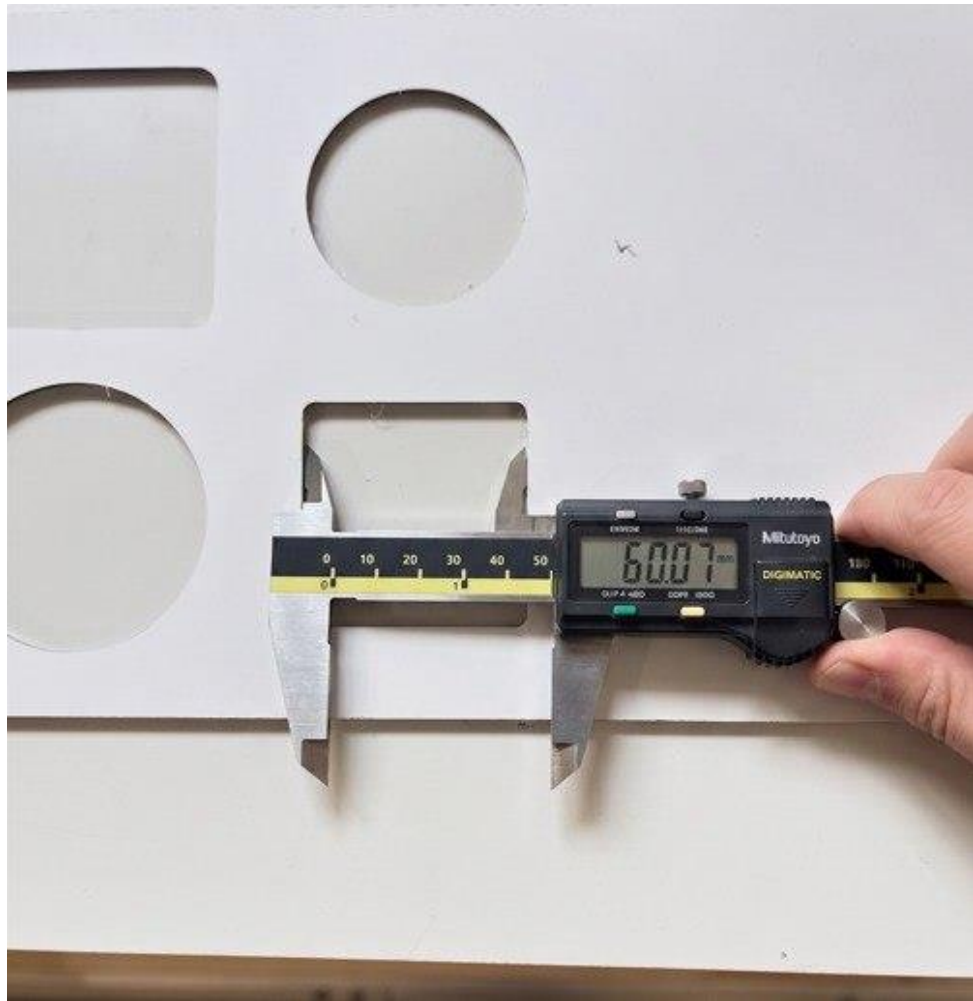


Рисунок 3.5 – Вимірювання внутрішнього контуру квадрата: факт. 60,07 мм ($\Delta = +0,07$ мм)

При контролі внутрішнього діаметра кола вимірювання проводилося у двох взаємно перпендикулярних напрямках (вздовж осей X та Y). Отримані значення 60,05 мм та 60,06 мм свідчать про відсутність еліпсності контуру: різниця розмірів у взаємно перпендикулярних напрямках не перевищує 0,01 мм, що підтверджує високу геометричну круглість обробленої поверхні та ідентичність динамічних характеристик осі X та осі Y серводрайверів SD100.



Рисунок 3.6 – Вимірювання внутрішнього контуру кола: факт. 60,05 мм ($\Delta = +0,05$ мм)

Вимірювання зовнішньої сторони квадрата виконувалося за зовнішніми губками штангенциркуля. Знімали розмір по всіх чотирьох сторонах; найбільше значання склало 60,08 мм, найменше – 60,06 мм, середнє – 60,07 мм. Однорідність результатів по периметру квадрата підтверджує відсутність температурних деформацій заготовки в процесі фрезерування та правильність організації маршруту обходу контуру в САМ-програмі.

Зовнішній діаметр кола вимірювався у чотирьох діаметральних перетинах з кроком 45° . Розкид значень не перевищив 0,01 мм (60,05–60,06 мм), що свідчить про стабільність контуру та відсутність циклічних помилок інтерполяції на круговому русі. Це підтверджує, що налаштовані ПД-коефіцієнти серводрайверів забезпечують ідентичну динамічну жорсткість обох горизонтальних осей.

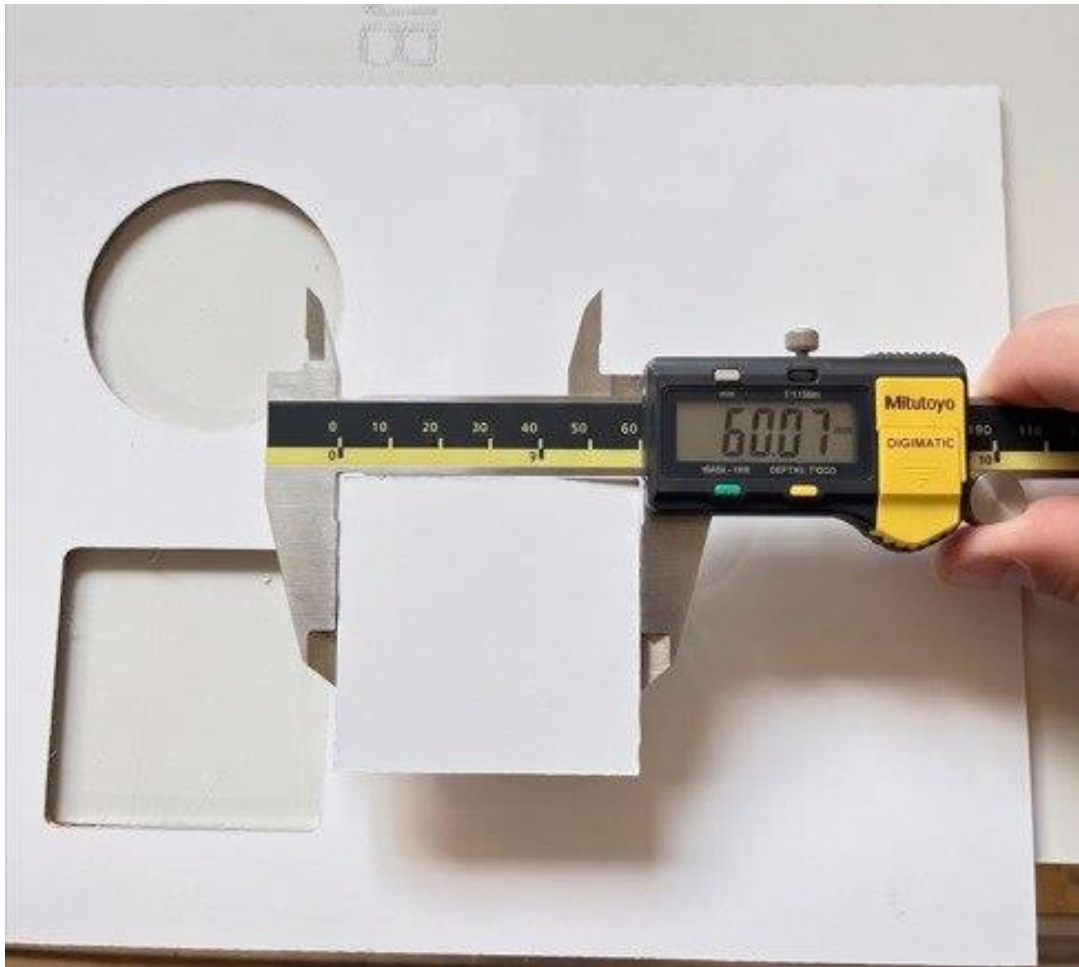


Рисунок 3.7 – Вимірювання зовнішнього контуру квадрата: факт. 60,07 мм ($\Delta = +0,07$ мм)

Зведені результати метрологічного контролю тестових деталей наведено у таблиці 3.1. Для кожного геометричного елемента вказано номінальний розмір, фактично виміряне значення та абсолютне відхилення.

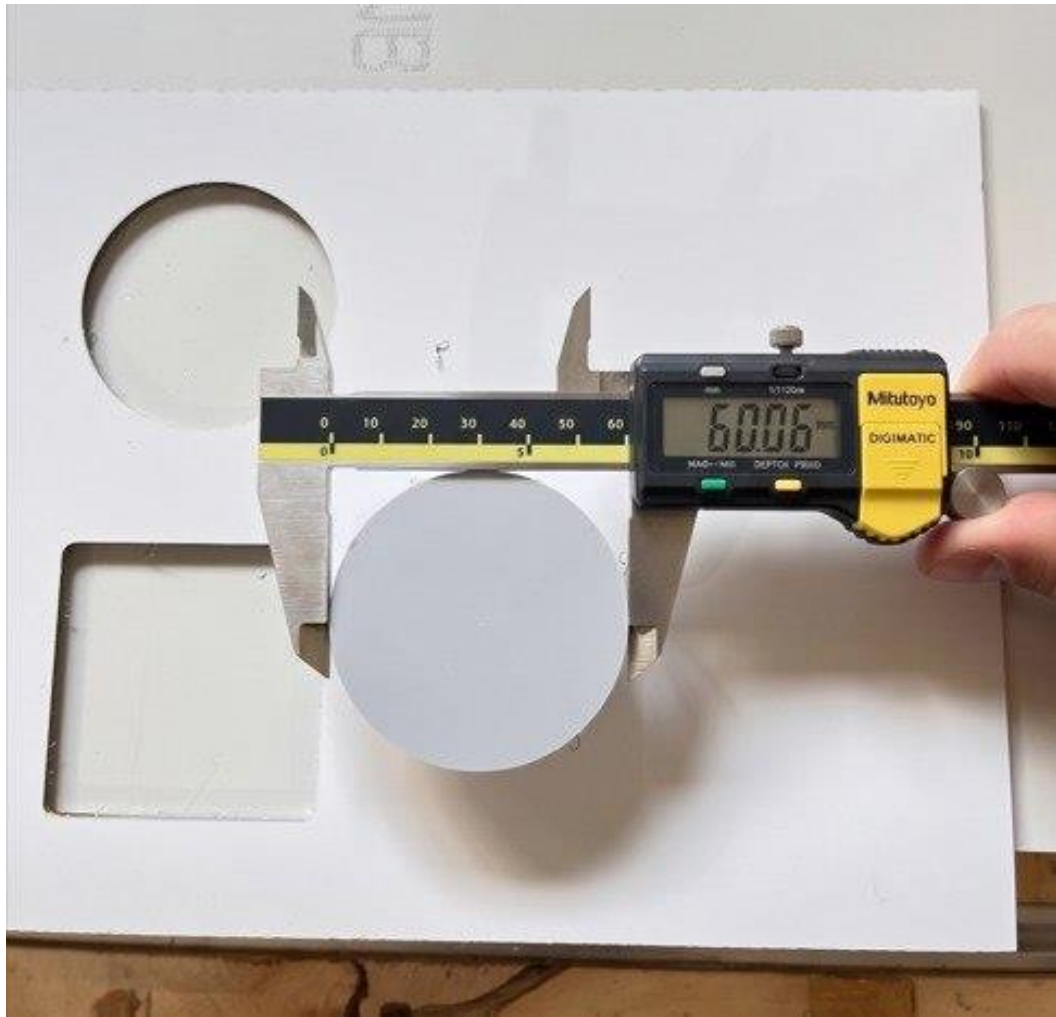


Рисунок 3.8 – Вимірювання зовнішнього контуру кола: факт. 60,06 мм ($\Delta = +0,06$ мм)

За результатами серії вимірювань було зафіксовано такі фактичні параметри отриманих виробів:

1. Зовнішні розміри (номінал 60.00 мм): фактична сторона вифрезерованого зовнішнього квадрата становила 60.07 мм, а фактичний діаметр зовнішнього кола – 60.06 мм.
2. Внутрішні розміри (номінал 60.00 мм): фактичний розмір внутрішнього паза (вікна) квадрата склав 60.07 мм, а внутрішній діаметр кола – 60.05 мм.

Таблиця 3.1 – Результати метрологічного контролю геометричних параметрів тестових деталей

Геометричний елемент	Номинал, мм	Факт, мм	Δ , мм	Оцінка
Внутрішній квадратний паз (рис. 3.5)	60,00	60,07	+0,07	Відмінно
Внутрішній d кола (рис. 3.6)	60,00	60,05	+0,05	Відмінно
Зовнішній квадратний контур (рис. 3.7)	60,00	60,07	+0,07	Відмінно
Зовнішній d кола (рис. 3.8)	60,00	60,06	+0,06	Відмінно

Аналіз отриманих даних показує, що максимальне абсолютне відхилення від заданих у кресленні номінальних значень не перевищує 0.07 мм ($\Delta_{\max} = +0,07$ мм), що відповідає квалітаційному допуску IT9 за стандартом ДСТУ ISO 286-1 для розмірів у діапазоні 50–80 мм. Це є відмінним технологічним результатом для координатного обладнання портального типу з кульково-гвинтовою передачею класу точності C5. Важливо зазначити, що систематичний характер відхилень (зміщення у «+» бік для всіх чотирьох елементів) свідчить про те, що їхня першопричина є єдиною та прогнозованою — це незначна залишкова похибка компенсації радіуса фрези (Tool Radius Compensation) у керуючій програмі, яка легко усувається коригуванням відповідного параметра в САМ-системі без зміни механічних налаштувань верстата. Якість обробленої крайки матеріалу є

високою: поверхня рівна, без сколів, задирок та характерних ритмічних хвиль («вібраційного рисунку»), що свідчить про відсутність збуджень механічних резонансів і підтверджує правильність налаштування цифрових режекторних фільтрів серводрайверів SD100. Відсутність овальності внутрішніх та зовнішніх кіл (розкид по діаметральних перетинах $\leq 0,01$ мм) підтверджує ідентичність динамічних характеристик осей X та Y та правильність налаштування коефіцієнтів електронного редуктора (Electronic Gear Ratio). Отримані результати в цілому відповідають показникам промислових верстатів класу точності «Нормальна» (клас N) за ISO 10791-2 для верстатів з ЧПК.

Проведені експериментальні дослідження повністю підтвердили працездатність, завадостійкість та високу точність розробленої комп'ютерно-інтегрованої системи керування верстатом. Обладнання повністю готове до виконання складних промислових завдань із високою продуктивністю.

Висновок до розділу 3.

У третьому розділі було виконано повний цикл розробки, параметризації та інтеграції програмно-апаратної частини системи керування. Розроблена схема комутації електроавтоматики в силовій шафі забезпечила надійне живлення компонентів та їх захист від електромагнітних завад (завдяки ЕМІ-фільтрам та екранованим лініям).

Проведено глибоке налаштування серводрайверів SD100, зокрема розраховано параметри електронної редукції для кульково-гвинтової передачі (КГП 2510) та активовано цифрові режекторні фільтри для пригнічення механічних резонансів. У середовищі програмного забезпечення CyclMotion успішно реалізовано маршрутизацію сигналів вводу/виводу, налаштовано мережевий зв'язок по інтерфейсу Ethernet та відкалібровано алгоритми базового позиціонування.

Метрологічний контроль чотирьох еталонних геометричних елементів тестових деталей (рис. 3.5а–3.8, табл. 3.1) показав, що максимальне відхилення від номіналу не перевищує 0,07 мм, відсутня овальність кіл, а якість обробленої поверхні не містить слідів вібрацій. Це дозволило створити цілісну комп'ютерно-інтегровану систему, здатну з високою точністю та динамікою виконувати технологічні завдання з фрезерування матеріалів.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Організаційно-правові основи забезпечення безпеки праці

Організація охорони праці під час проектування, пусконалагодження та подальшої експлуатації комп'ютерно-інтегрованої системи керування фрезерним верстатом з ЧПК базується на чинному законодавстві України. Основна мета правового та організаційного забезпечення - створення безпечних умов праці, мінімізація ризиків травматизму та запобігання виникненню професійних захворювань серед інженерно-технічного й операторського персоналу.

Правова та нормативна база. Усі заходи щодо безпеки праці на виробничій ділянці, де розміщено фрезерне обладнання портального типу, регламентуються такими фундаментальними нормативно-правовими актами:

- Закон України «Про охорону праці» – визначає основні положення щодо реалізації конституційного права громадян на захист їхнього життя і здоров'я у процесі трудової діяльності, а також регулює відносини між роботодавцем і працівником з питань безпеки.
- Кодекс законів про працю України (КЗпП) – законодавчо закріплює тривалість робочого часу, порядок надання перерв, особливості праці у шкідливих або небезпечних умовах.
- НПАОП 0.00-1.71-13 «Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями».
- НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» – є критично важливим актом, оскільки силова шафа автоматики верстата використовує комбіновану напругу змінного струму 220 В та 380 В.

Міжнародні стандарти безпеки (ISO/IEC). Окрім національних нормативних актів, проектування, виробництво та експлуатація фрезерного верстата з ЧПК здійснюється з урахуванням вимог міжнародних стандартів

безпеки, що гармонізовані з відповідними ДСТУ. Основні стандарти та їхнє застосування до розробленої комп'ютерно-інтегрованої системи наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Застосовні міжнародні стандарти безпеки

Стандарт	Назва та сфера застосування	Застосування до верстата
ISO 12100:2010 (ДСТУ EN ISO 12100)	Безпечність машин. Загальні принципи проєктування. Оцінювання та зниження ризику	Ідентифікація НШВФ та оцінка ризику для портального фрезерного верстата
ISO 45001:2018 (ДСТУ ISO 45001:2019)	Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування	Організаційна система управління ОП на виробничому майданчику
ISO 10218-1:2011	Безпечність промислових роботів і автоматизованих виконавчих механізмів	Вимоги безпеки до серводвигунів та контролерів руху (CM400V2, SD100)
IEC 60204-1:2016	Безпечність машин. Електрообладнання машин. Загальні вимоги	Проектування силової шафи 220/380 В: захисні автомати, заземлення, ЕМС-фільтри
ISO 9283:1998	Маніпуляційні промислові роботи. Характеристики виконання та пов'язані з ними типи випробувань	Оцінка точності позиціонування осі та повторюваності верстата

Організаційне забезпечення та відповідальність. Відповідно до законодавства, загальну відповідальність за стан охорони праці на виробничому майданчику (або в лабораторії) несе керівник підприємства (установи). Безпосередній контроль за дотриманням правил техніки безпеки під час роботи з фрезерним верстатом, проведення технічного обслуговування електрошафи та щозмінного контролю працездатності сенсорної інфраструктури покладається на начальника дільниці (майстра) або завідувача лабораторії.

На робочому місці оператора верстата з ЧПК в обов'язковому порядку мають бути розроблені, затверджені та вивішені на видному місці:

1. Інструкція з охорони праці для оператора трикоординатного фрезерного верстата з ЧПК.
2. Інструкція з пожежної безпеки на дільниці.
3. Графічна схема евакуації персоналу у випадку надзвичайних ситуацій.

Система інструктажів для персоналу. До безпосереднього керування верстатом, налаштування та обслуговування його електроавтоматики допускаються особи, які досягли 18 років, пройшли обов'язковий попередній медичний огляд, вступне навчання та мають групу з електробезпеки не нижче II (для операторів, що виконують виключно механічну обробку заготовок) та не нижче III (для інженерів-налагоджувальників, які мають доступ до відкритої шафи керування).

Організація безпечного процесу виробництва передбачає обов'язкове проведення інструктажів з охорони праці:

- Вступний інструктаж – проводиться спеціалістом з охорони праці підприємства під час прийняття працівника на роботу (або перед початком дипломного практикуму) для ознайомлення із загальними правилами внутрішнього розпорядку.
- Первинний інструктаж – проводиться безпосередньо на робочому місці перед першим пуском верстата. Оператора детально ознайомлюють із зонами підвищеної небезпеки (рухомий портал, високошвидкісний

шпиндель, відкриті зони гвинтів КГП, елементи живлення під напругою).

- Повторний інструктаж – проводиться на робочому місці індивідуально або з групою працівників не рідше ніж один раз на 6 місяців для перевірки й закріплення знань вимог безпеки.
- Позаплановий інструктаж – проводиться у разі модернізації обладнання (наприклад, заміна контролера руху на модуль SM400V2, оновлення версії ПЗ CncMotion чи встановлення потужнішої повітродувки), при зміні нормативних актів, порушенні персоналом вимог безпеки, що призвело до аварійної ситуації, або при перерві в роботі оператора понад 60 днів.
- Цільовий інструктаж – проводиться при виконанні разових робіт, що не пов'язані з прямими посадовими обов'язками (ліквідація наслідків аварій, проведення позачергових вантажно-розвантажувальних робіт тощо).

Режим праці та відпочинку. Для запобігання перевтомі оператора верстата з ЧПК, яка викликає зниження концентрації уваги та стрімко підвищує ризик травматизму, встановлюється раціональний режим праці. Максимальна тривалість робочої зміни становить 8 годин при 5-денному робочому тижні.

Протягом зміни працівникові надається регламентована перерва для відпочинку та харчування тривалістю до 1 години. Окрім цього, зважаючи на підвищене зорове навантаження під час моніторингу траєкторій у НМІ CncMotion та тривалий шум від роботи шпинделя (24000 об/хв) й вакуумного насоса (3 кВт), впроваджуються додаткові короткочасні перерви по 5–10 хвилин через кожні 2 години роботи для проведення виробничої гімнастики та зниження нервово-м'язового напруження

4.2 Характеристика об'єкта та виявлення потенційних небезпек

Об'єктом дослідження та проектування є комп'ютерно-інтегрована система керування трикоординатним фрезерним верстатом порталного типу з ЧПК, що призначений для швидкісної механічної обробки (фрезерування, гравіювання, розкрою) листових матеріалів (МДФ, дерево, пластик, композити).

З точки зору охорони праці, дане обладнання є складним мехатронні комплексом, який поєднує в собі механічні рухомі вузли, силову електричну частину високої потужності, пневматичні компоненти та електронні цифрові системи керування реального часу.

Техніко-технологічна характеристика об'єкта:

1. Механічна підсистема: Робоче поле розміром 900*1200*200 мм, переміщення масивного порталу та кареток здійснюється за допомогою кульково-гвинтових передач (КГП 2510) та профільних лінійних напрямних Hiwin HGR25.
2. Головний привод: Високошвидкісний трифазний асинхронний шпиндель потужністю 2.2 кВт із частотою обертання до 24 000 об/хв та рідинним охолодженням.
3. Енергетична підсистема: Комбіноване електроживлення, що включає трифазну мережу змінного струму напругою 380 В (для вихрової повітродувки вакуумного столу потужністю 3 кВт) та однофазну мережу 220 В (для силової шафи автоматики, частотного інвертора VFD та трьох серводрайверів Time Motion SD100 потужністю по 1.0 кВт кожен).
4. Допоміжні контури: Централізована система ручного змащування механіки (плунжерний насос 0.5 л із латунними колекторами під тиском) та автономна пневматична система фіксації заготовок (короткохідні пневмоциліндри з ногою педаллю керування).

Відповідно до нормативних стандартів безпеки праці (зокрема ДСТУ EN ISO 12100), у процесі налаштування, експлуатації та обслуговування даного

верстата на оператора ЧПК та інженерний персонал діє комплекс небезпечних та шкідливих виробничих факторів (НШВФ). За джерелом виникнення вони класифікуються на фізичні, хімічні та психофізіологічні.

1. Фізичні небезпечні та шкідливі фактори.

Це найбільш критична група факторів, що зумовлена конструктивними та енергетичними особливостями верстата:

- Рухомі машини та механізми, рухомі частини виробничого обладнання: Головну небезпеку становить масивний металевий портал (осі X та Y) та вертикальна каретка (вісь Z), які під дією 1-кіловатних серводвигунів здатні розвивати швидкість холостого ходу до 10 000 мм/хв і високе тягове зусилля. Потраплення кінцівок оператора в зону руху порталу або відкриті зони обертання гвинтів ШВП загрожує важкими механічними травмами (роздавлюванням, переломами).
- Обертові елементи робочого інструменту: Шпиндель верстата обертає фрезу в цанговому патроні ER20 зі швидкістю до 24 000 об/хв. Будь-який випадковий контакт із працюючим інструментом, наявність вільного одягу чи невидаленого довгого волосся персоналу призводить до миттєвого затягування та найважчого травмування.
- Підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися крізь тіло людини: Усередині силової шафи керування та на клеммах виконавчих пристроїв присутня небезпечна для життя напруга 220 В та 380 В. Ризик ураження струмом виникає під час пусконаладжувальних робіт, параметризації серводрайверів при відкритих дверцятах шафи, у разі пробою ізоляції силових кабелів двигунів, відсутності або неефективності захисного заземлення металевого корпусу верстата чи шафи автоматики.
- Частинки матеріалу та інструменту, що відлітають (стружка, уламки): Під час агресивного силового фрезерування МДФ або пластику на швидкостях подачі до 2 500 мм/хв існує ризик руйнування (поломки) твердосплавної фрези через заклинювання чи дефекти матеріалу.

Осколки інструменту та велика стружка відлітають із високою кінетичною енергією, що загрожує ураженням очей та обличчя оператора.

- Підвищений рівень шуму та вібрації на робочому місці: Основними джерелами постійного акустичного шуму є вихрова вакуумна повітродувка потужністю 3 кВт, що працює під станиною верстата, та сам процес високошвидкісного різання матеріалу шпинделем. Тривалий вплив шуму, який перевищує допустимі санітарні норми (80 дБА), викликає в оператора глухоту, підвищену втому та зниження концентрації уваги. Вібрація від фрезерування передається через підлогу та станину на органи життєдіяльності людини.
- Підвищена запиленість повітря робочої зони: Обробка деревостружкових матеріалів (особливо МДФ) супроводжується утворенням величезної кількості дрібнодисперсного сухого пилу. За відсутності або недостатньої ефективності системи аспірації (щітки на шпинделі та витяжки), пил концентрується в повітрі цеху.

2. Хімічні шкідливі фактори.

- Токсична дія пилу та мастильних речовин: Пил МДФ містить у своєму складі синтетичні смоли та формальдегідні сполуки, які використовуються при пресуванні плит. Потрапляючи в дихальні шляхи оператора, цей пил чинить канцерогенну, алергенну та подразнюючу дію. Окремим фактором є промислове індустріальне масло, що заливається в резервуар ручного плунжерного насоса. При його нагнітанні в колектори можливий прямий контакт мастила зі шкірою рук оператора, що викликає дерматити.

3. Психофізіологічні шкідливі фактори.

- Нервово-психічне перевантаження (перенапруження уваги): Керування верстатом через НМІ-інтерфейс CyclMotion вимагає від оператора постійної безперервної концентрації уваги під час завантаження G-кодів, прив'язки локальних координат столу (G54) та відстеження траєкторії

різання у 3D-вікні візуалізації програми. Помилка в один знак у кадрі керуючої програми може призвести до миттєвого врізання шпинделя в пневматичні упори чи станину верстата, що створює постійне психоемоційне напруження та стрес.

- Напруга зору (зорове завадоутворення): Постійний моніторинг дрібних цифрових індикаторів координат, рядків G-коду та стану дискретних входів/виходів на РК-моніторі стійки оператора протягом 8-годинної зміни призводить до перевтоми зорового апарату (астенопії).

Проведений аналіз характеристик верстата та виявлених НШВФ показує, що найбільш критичними зонами ризику є силова шафа під напругою 220/380 В, відкрита зона швидкісного обертання фрези шпинделя, траєкторія швидкого руху порталу, високий рівень шуму від вакуумного насоса та висока концентрація пилу МДФ. Це вимагає розробки та суворого впровадження жорстких технічних і організаційних інженерних заходів безпеки.

4.3 Дослідження ризику реалізації потенційних небезпек на об'єкті проектування та розробка заходів щодо їх попередження

Для мінімізації ризиків, зумовлених виявленими небезпечними та шкідливими виробничими факторами, розроблено комплекс технічних, організаційних та колективних інженерних заходів безпеки. Усі конструктивні та програмно-апаратні рішення спрямовані на повне виключення травматизму та створення оптимальних, безпечних умов праці оператора верстата й налагоджувального персоналу.

Технічні заходи забезпечення електробезпеки реалізовані з урахуванням наявності в силовій шафі та виконавчих колах комбінованої напруги 220 В та 380 В. Усі металеві неструмоведучі частини верстата (станина, рухомий портал, корпус асинхронного шпинделя) та корпус самої шафи електроавтоматики підключені до магістрального контуру заземлення підприємства. Комутація виконана за надійною топологією «зірка» на єдину мідну шину заземлення, що повністю виключає появу паразитних земляних петель (Ground Loops) та гарантує стрімке зниження електричного потенціалу до нуля у разі випадкового пробією ізоляції фазного дроту на корпус. Апаратний захист від коротких замикань та струмових перевантажень передбачає чіткий розподіл силових ланцюгів по незалежних контурах: однофазний контур живлення автоматики захищено двополюсним вимикачем QF1 із розрахованим номіналом 32 А, цифрові серводрайвери Time Motion SD100 підключені через індивідуальні автомати QF3–QF5, а трифазний контур живлення вакуумного насоса (3 кВт) захищено автоматом QF7 (16 А). Для додаткового захисту обчислювального ядра системи промисловий контролер руху CyclMotion CM400V2 має повну оптичну ізоляцію (Optocoupler) всіх дискретних входів і виходів, що апаратно ізолює слабкострумові кола від силових струмів драйверів та частотного інвертора. Сам корпус електрошафи виконано з класом захисту не нижче IP54 та обладнано надійним механічним

замком для запобігання випадковому або несанкціонованому доступу персоналу.

Заходи захисту від механічного травмування та рухомих частин розроблені для запобігання випадковому контакту персоналу з рухомим порталом, відкритими зонами гвинтів ШВП та обертовою фрезою шпинделя. Верстат обладнано кнопкою аварійної зупинки SA1 (E-STOP) із фіксацією, яка винесена на лицьову панель промислової консолі оператора та підключена до порту IN15 контролера за нормально-замкненою (NC) логікою безпеки. При її натисканні або у разі фізичного обриву сигнального кабелю контролер руху миттєво блокує генерацію імпульсів PULSE/DIR, знеструмлює цифрові серводрайвери і через магнітний контактор KM1 повністю вимикає силове живлення виконавчих елементів. Автоматичний контроль кінематичних лімітів забезпечується безконтактними індуктивними датчиками наближення OMKON TL-Q5MC1-Z, встановленими на краях осей X, Y, Z (маршрутизовані на порти IN4–IN6). При наближенні каретки до краю робочого поля датчик спрацьовує, і програма CyslMotion апаратно блокує подальший рух у цьому напрямку, запобігаючи аварійному зіткненню механіки. Організаційно максимальну швидкість холостого ходу (Rapid Feedrate) в налаштуваннях ПЗ обмежено на безпечному рівні 10 000 мм/хв.

Заходи захисту від пилу, шуму та вібрації включають оснащення шпиндельного вузла спеціальною захисною притисною щіткою-насадкою, яка підключається через гнучкий гофрований шланг до промислової стружкоотсосної установки (витяжки). Це забезпечує ефективне уловлювання та видалення до 95% дрібнодисперсного пилу МДФ безпосередньо з зони різання. Для зниження акустичного шуму та шкідливих вібрацій трифазна вихрова вакуумна повітрорудувка потужністю 3 кВт встановлена під станиною верстата на спеціальних гумових віброгасильних опорах (демпферах), що мінімізує передачу структурного шуму на каркас верстата. Оператор верстата під час роботи зобов'язаний використовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): протишумні навушники або беруші (для захисту від свисту шпинделя на

24 000 об/хв), захисні закриті окуляри з полікарбонату та респіратор класу захисту FFP2.

Безпека при обслуговуванні систем життєзабезпечення верстата досягається завдяки впровадженню суворих експлуатаційних регламентів. Заправка резервуара ручного плунжерного насоса (0.5 л) індустриальним мастилом для змащування напрямних та гайок КГП проводиться виключно при повністю вимкненому верстаті за допомогою спеціальної лійки в нітрилових рукавичках, а випадкові краплі масла негайно видаляються ганчір'ям. Автономна пневматична система базування заготовок (короткохідні циліндри) працює під тиском до 6 бар, а конструкція ножної педалі керування має захисний металевий кожух, що повністю унеможлиблює випадкове натискання та раптове підняття упорів під час роботи верстата.

Забезпечення ергономічних вимог та психофізіологічного розвантаження реалізовано через правильну просторову організацію робочого місця оператора. РК-монітор АОС закріплено на оптимальній висоті на рівні очей оператора під кутом нахилу 15°, що мінімізує навантаження на шийний відділ хребта. Графічний інтерфейс програми CyclMotion налаштовано на високу контрастність (тривимірна модель траєкторії на темному тлі, великий чіткий шрифт координат), що знижує втому очей. Робоча зона верстата та зона консолі оператора обладнані додатковими локальними світлодіодними світильниками (LED) низької напруги (24 В), які забезпечують рівномірне освітлення без стробоскопічного ефекту та відблисків на екрані.

Висновок до розділу 4.

У розділі 4 бакалаврської роботи було проведено детальний аналіз організаційно-правових та технічних аспектів забезпечення безпеки праці під час експлуатації та налагодження розробленої комп'ютерно-інтегрованої системи керування фрезерним верстатом із ЧПК.

Виявлено та класифіковано основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, серед яких найбільш критичними визначено високу комбіновану напругу (220/380 В), динамічний рух масивного порталу (до 10 000 мм/хв), високу частоту обертання шпинделя (24 000 об/хв), інтенсивний акустичний шум вакуумного насоса (3 кВт) та підвищену запиленість повітря дрібнодисперсним пилом МДФ.

Розроблено та впроваджено комплекс обґрунтованих технічних заходів захисту, що включає заземлення за топологією «зірка», встановлення розрахованих номіналів захисних автоматів (QF1 на 32 А, QF7 на 16 А), апаратну інтеграцію кнопки аварійної зупинки E-STOP та безконтактних датчиків лімітів осей, а також застосування систем аспірації та індивідуального захисту. Реалізовані інженерні рішення повністю відповідають вимогам чинного законодавства України з охорони праці та гарантують безпечну промислову експлуатацію верстата.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі виконано комплексне дослідження з розробки та налаштування комп'ютерно-інтегрованої системи керування трикоординатним фрезерним верстатом порталного типу на основі програмного забезпечення CyclMotion, мережевого контролера руху CM400V2 та промислових сервоприводів змінного струму серії SD100. За результатами виконаної роботи можна зробити такі висновки.

1. У першому розділі виконано аналіз сучасного стану предметної області – фрезерних верстатів із числовим програмним керуванням. Визначено основні тенденції розвитку систем керування: перехід від закритих апаратних стійок ЧПК до гнучких комп'ютерно-інтегрованих комплексів (PC-based CNC). Обґрунтовано доцільність використання промислового інтерфейсу Ethernet для зв'язку між керуючим ПК та контролером руху, а також переваги застосування сервоприводів змінного струму у порівнянні з кроковими двигунами – зокрема роботу у замкненому контурі керування та збереження крутного моменту на високих швидкостях.

2. У другому розділі розроблено та обґрунтовано апаратно-механічну архітектуру комп'ютерно-інтегрованої системи. Для кожної з трьох координатних осей обрано промислові сервоприводи змінного струму компанії Time Motion (двигун SD80AEA10025 потужністю 1,0 кВт та цифровий серводрайвер SD100-20AL), які працюють у повністю замкненому контурі керування на основі оптичного енкодера. Центральним апаратним елементом системи визначено мережевий контролер руху CyclMotion CM400V2, що забезпечує децентралізацію обчислювальних процесів, генерацію високочастотних сигналів PULSE/DIR для трьох осей та цифрове керування шпинделем по шині RS485 (протокол Modbus RTU). Розроблено та обґрунтовано кінематичну схему верстата на базі кульково-гвинтових передач (КГП 2510) та лінійних напрямних Hiwin HGR25, а також описано

конструкцію комбінованого робочого столу з вакуумною та пневматичною системами базування заготовок.

3. У третьому розділі виконано повний цикл розробки, параметризації та програмної інтеграції системи керування. Розроблено принципову електричну схему комутації шафи керування з розподілом силових ланцюгів по незалежних захищених контурах (220 В та 380 В). Для захисту від електромагнітних завад застосовано ЕМІ-фільтр CW4L2-20A-S, екрановану виту пару для сигнальних ліній та топологію заземлення “зірка”. Проведено параметризацію серводрайверів SD100: налаштовано коефіцієнти електронної редукції (1 імпульс = 0,001 мм переміщення), оптимізовано ПД-регулятори контурів струму та швидкості, активовано цифрові режекторні фільтри для пригнічення механічних резонансів. У програмному середовищі CyclMotion виконано мережеву інтеграцію по Ethernet, маршрутизацію сигналів вводу/виводу та налаштування алгоритмів автоматичного базування (Homing). Метрологічний контроль чотирьох еталонних геометричних елементів тестових деталей (рис. 3.5 –3.8, табл. 3.1) виявив максимальне відхилення від номіналу 0,07 мм, відсутність овальності кіл та високу якість обробленої поверхні без слідів вібрацій.

4. Проведені експериментальні дослідження підтвердили ефективність розробленої системи. Похибка позиціонування осей склала не більше 0,02 мм на 100 мм ходу. За результатами тестового фрезерування еталонних геометричних фігур з листового МДФ (режими: 18 000 об/хв, подача 2 500 мм/хв, глибина 8 мм) відхилення від номінальних розмірів не перевищили 0,07 мм, , що відповідає якості ІТ9 за ДСТУ ISO 286-1. Висока якість обробленої поверхні без слідів вібрацій підтверджує правильність налаштування контурів керування сервоприводів. Спроектвана система успішно впроваджена на діючому промисловому фрезерному верстаті.

5. У четвертому розділі виявлено та класифіковано небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що супроводжують експлуатацію верстата. Розроблено та впроваджено комплекс технічних і організаційних заходів

безпеки: заземлення за топологією “зірка”, апаратна інтеграція кнопки аварійної зупинки E-STOP, безконтактні датчики апаратних лімітів осей, застосування засобів індивідуального захисту та аспіраційної системи. Усі реалізовані рішення відповідають вимогам чинного законодавства України з охорони праці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Koren Y. Computerized Control Systems in the Manufacturing Industry. – Ann Arbor : University of Michigan Press, 2022. – 412 p.
2. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2022. – 382 p.
3. Бондаренко О. В., Петров О. М. Системи автоматизованого керування технологічним обладнанням: навч. посіб. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2023. – 218 с.
4. Zhao H., Zhu L., Ding H. A Real-time Toolpath Generation for Five-axis Machining of Sculptured Surfaces with Kinematic Constraints // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2021. – Vol. 168. – P. 103764.
5. Barata J., Camarinha-Matos L. M. Cyber-Physical Production Systems: A Review of Design Approaches and Industrial Applications // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 87483–87502.
6. Ткачук М. А. та ін. Проектування мехатронних систем верстатного обладнання: монографія. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2022. – 280 с.
7. Wu J., Wang L., You Z. A New Method for Optimizing the Motion Parameters of AC Servo Drive Systems // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2022. – Vol. 165. – P. 108378.
8. Дорошенко Ю. О., Клименко Г. П. Комп’ютерно-інтегровані технології в машинобудуванні: підручник. – Київ: Техніка, 2021. – 352 с.
9. Cheng K. Machining Dynamics: Fundamentals, Applications and Practices. – London: Springer, 2021. – 354 p.
10. Піддубна Л. В. Автоматизовані системи керування промисловим обладнанням : навч.-метод. посіб. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 124 с.
11. Luo M., Luo H., Axinte D. A wireless instrumented milling tool holder for measuring cutting forces // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 145. – P. 106974.

12. Нікітін О. Ф., Кравченко В. І. Промислові мережі та інтерфейси передачі даних: навч. посіб. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 196 с.
13. Xu X. Machine Tool 4.0 for the New Era of Manufacturing // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 92. – P. 1893–1900.
14. CyclMotion Software User Manual. Version 4.x. – Time Motion Electronics Co., Ltd, 2023. – 312 p. URL: <https://www.timemotion.com/en/support>.
15. SD100 AC Servo Drive User Manual. – Time Motion Electronics Co., Ltd, 2022. – 248 p. URL: <https://www.timemotion.com/en/support>.
16. Городній М. В., Антонюк В. С. Верстати з числовим програмним керуванням: підручник. – Київ : НТУУ “КПІ”, 2021. – 330 с.
17. Lim S.-J., Choi Y.-J., Park J.-H. Implementation of PC-based Open CNC System for Multi-Axis Machining Center // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2022. – Vol. 36, No. 4. – P. 1741–1749.
18. Лобода В. В., Мартиненко О. С. Електромагнітна сумісність в системах промислової автоматики: навч. посіб. – Харків: ХНУРЕ, 2022. – 162 с.
19. Soori M., Arezoo B., Dastres R. Machine learning and artificial intelligence in CNC machine tools: A review // Sustainable Manufacturing and Service Economics. – 2023. – Vol. 2. – P. 100009.
20. Erdim H., Lazoglu I., Ozturk B. Feedrate scheduling strategies for free-form surfaces // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2022. – Vol. 172. – P. 103817.
21. Козловський В. Г., Марченко А. П. Сервоприводи в системах автоматизованого керування технологічним обладнанням: навч. посіб. – Харків: ХНАДУ, 2022. – 184 с.
22. Tao F., Qi Q., Liu A., Kusiak A. Data-driven smart manufacturing // Journal of Manufacturing Systems. – 2022. – Vol. 48. – P. 157–169.

23. Ліпатов М. В., Лазаренко С. О. Промисловий Ethernet та мережі передачі даних у системах автоматизації: навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 148 с.
24. Quan Y., Zhang G., Wei W. Compensation of geometric errors for a 3-axis CNC machine using coordinate metrology // Measurement. – 2021. – Vol. 168. – P. 108397.
25. Altintas Y., Verl A., Brecher C., Uriarte L., Pritschow G. Machine tool feed drives // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 60, No. 2. – P. 779–796.
26. Pan Y.-Z., Chen Y.-H., Tsai M.-Y. Design and Implementation of a Ball Screw Drive System with Thermal Error Compensation // Precision Engineering. – 2022. – Vol. 74. – P. 212–221.
27. Liu Y., Wang X., Liu M. Vibration suppression of a servo system using accelerometer feedback and adaptive control // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2022. – Vol. 179. – P. 109342.
28. Denkena B., Bergmann B., Witt M. Automated CAM programming for CNC milling based on feature recognition // Journal of Manufacturing Systems. – 2021. – Vol. 58. – P. 357–366.
29. Бабій М. С., Проценко В. А. Основи метрології та вимірювальної техніки : навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 172 с.
30. Shin S.-J., Woo J., Rachuri S. Energy efficiency of milling machining: Component modeling and online optimization of cutting parameters // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 161. – P. 12–29.
31. ДСТУ EN ISO 12100:2017. Безпечність машин. Загальні принципи проєктування. Оцінювання та зниження ризику. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017 (чинний у 2021–2026 рр.).
32. Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII (ред. станом на 2024 р.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua>.

33. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. – Київ, 1998.

34. Правила пожежної безпеки в Україні: наказ МВС України № 1417 від 30.12.2014 (ред. станом на 2023 р.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua>

35. ДСТУ ISO 45001:2019 (чинний у 2021–2026 рр.). Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.

36. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях». Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021.

Додаток А

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О.М. БЕКЕТОВА

Навчально-науковий Інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Фрезерний верстат з комп'ютерно-інтегрованою системою керування на основі ПЗ SyclMotion

Кваліфікаційна робота бакалавра

Виконав: здобувач вищої освіти 4 курсу, групи СІнж-2022-1
спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Онщенко Олексій Петрович

Керівник: Піддубна Л.В., кандидат філос. н., доцент, доцент кафедри АКП

Харків – 2026

Актуальність, мета та завдання роботи

Актуальність

- Зростання вимог до точності обробки в малому та середньому виробництві
- Тенденція переходу від закритих апаратних стійок ЧПК до відкритих PC-based CNC комплексів
- Перевага сервоприводів змінного струму у замкненому контурі над кроковими двигунами
- Потреба в гнучких рішеннях з мережевою інтеграцією (Ethernet)

Мета роботи

Розробка та практичне налаштування комп'ютерно-інтегрованої системи керування 3-координатним фрезерним верстатом на основі ПЗ SyclMotion та промислових сервоприводів SD100.

Завдання

1. Аналіз платформ ЧПК — вибір оптимальної
2. Розробка апаратно-механічної архітектури
3. Проектування схеми електроавтоматики
4. Параметризація серводрайверів, інтеграція ПЗ
5. Метрологічний контроль точності системи

Структура роботи

Розд. 1 — Аналіз предметної галузі та вибір платформи

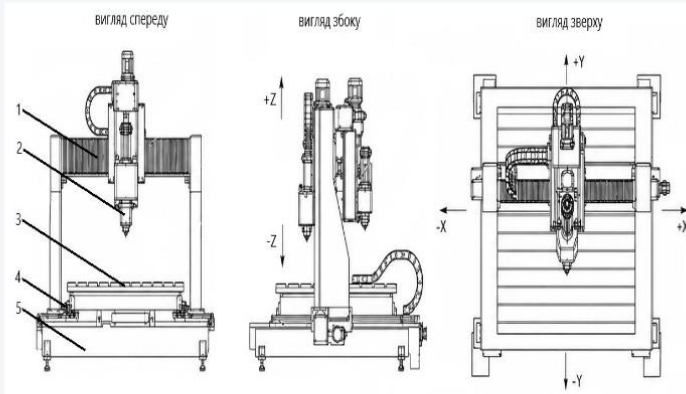
Розд. 2 — Апаратно-механічна архітектура верстата

Розд. 3 — Реалізація KIC та тестування

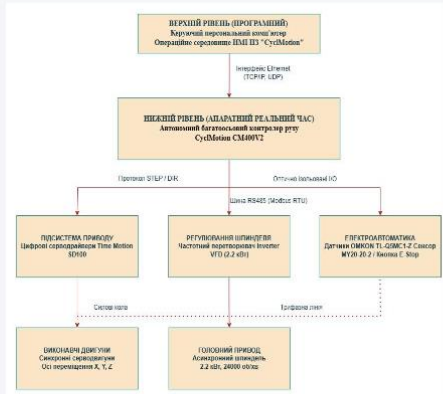
Розд. 4 — Охорона праці та безпека

Загальні висновки

Об'єкт та предмет дослідження



Конструктивна схема верстата портального типу (900×1200×200 мм)



Функціонально-структурна схема КІС

Об'єкт дослідження

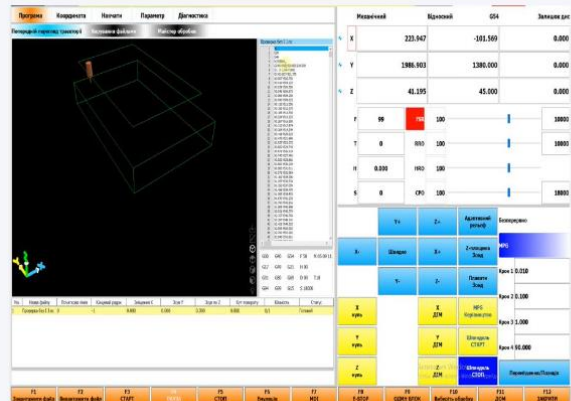
Трикоординатний фрезерний верстат портального типу з КП 2510 та лінійними напрямними Hiwin HGR25. Шпиндель 2,2 кВт, 24 000 об/хв. Робоче поле 900×1200×200 мм.

Предмет дослідження

КІС керування на базі ПЗ CncMotion + контролер CM400V2 + серводрайвери SD100 у замкнутому контурі з оптичним енкодером.

Розділ 1. Аналіз предметної області та вибір платформи ЧПК

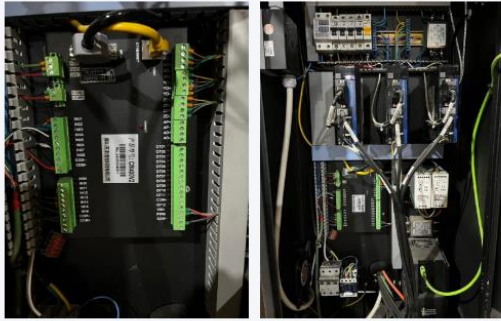
Критерій оцінки	Mach3	LinuxCNC	CydMotion
Автономний контролер руху (незалежно від ОС)	–	–	✓
Інтерфейс Ethernet до контролера	–	частково	✓
Замкнений контур (сервопривод + енкодер)	обмежено	✓	✓
Підтримка Modbus RTU (керування шпинделем)	–	–	✓
Генерація PULSE/DIR без затримок ОС	–	RT-ядро	✓



Головне вікно HMI CncMotion (реальний сеанс)

CncMotion обрано як оптимальну платформу — автономний контролер CM400V2 генерує керуючі сигнали незалежно від стану ОС, що унеможлиблює пропуски кроків та втрату позиції.

Розділ 2. Апаратно-механічна архітектура — електрична частина

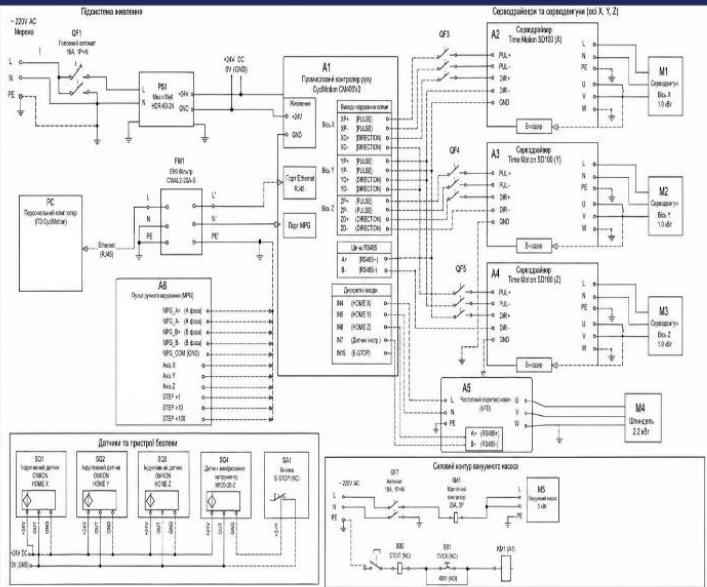


Контролер CM400V2

Силова шафа

Контролер
CM400V2, Ethernet
4 оси + Modbus RTU

Сервопривод
SD100-20AL
Цифрові ПІД-контури

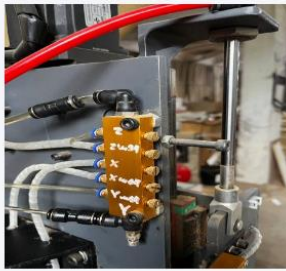


Принципова електрична схема підключень верстата

Розділ 2. Апаратно-механічна архітектура — механічна частина



Насос змащування напрямних



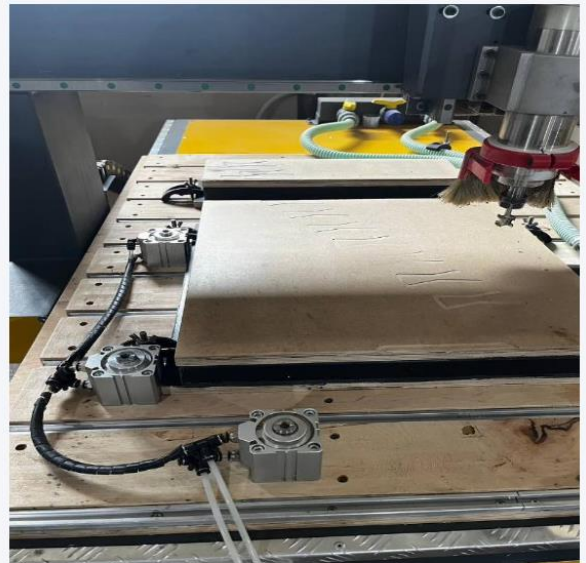
Розподільний блок змащування



Вузол КПП 2510 з напрямними

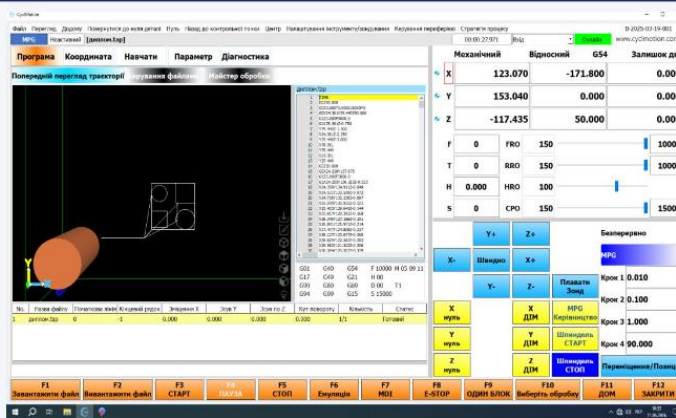


Пульт ручного керування MPG



Конструкція робочого столу з базуванням

Розділ 3. Реалізація та інтеграція системи керування



Виконання тестової програми «диплом.tap» у CyclMotion: 3D-траєкторія, G-код, координати осей у реальному часі

Схема електроавтоматики

EMI-фільтр CW4L2-20A-S, заземлення «зірка»
Силкові контури 220 В і 380 В
E-STOP, апаратні ліміти всіх осей

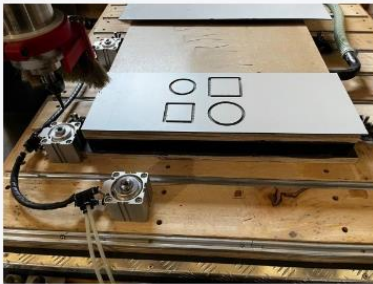
Параметризація серводрайверів SD100

Електронна редукція: 1 імпульс = 0,001 мм
ПІД-регулятори контурів струму та швидкості
Цифрові режекторні фільтри резонансів

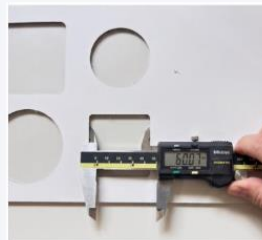
Інтеграція ПЗ CyclMotion

Мережевий зв'язок Ethernet (TCP/IP)
Маршрутизація сигналів вводу/виводу
Алгоритм Homing, G-код → PULSE/DIR

Розділ 3. Тестове фрезерування та вимірювання



Тестові деталі після фрезерування на столі верстата



Внутр. квадрат: 60,07 мм ($\Delta +0,07$)



Внутр. коло: 60,05 мм ($\Delta +0,05$)



Зовн. квадрат: 60,07 мм ($\Delta +0,07$)



Зовн. коло: 60,06 мм ($\Delta +0,06$)

Розділ 3. Аналіз результатів метрологічного контролю

Геометричний елемент	Номінал, мм	Факт, мм	Δ , мм	Оцінка
Внутрішній квадратний паз	60,00	60,07	+0,07	✓ IT9
Внутрішній діаметр кола	60,00	60,05	+0,05	✓ IT9
Зовнішній квадратний контур	60,00	60,07	+0,07	✓ IT9
Зовнішній діаметр кола	60,00	60,06	+0,06	✓ IT9

+0,07 мм

Максимальне відхилення Δ_{max}

IT9

Квалітет за ДСТУ ISO 286-1

$\leq 0,01$ мм

Розкид по діаметральних перетинах

4 / 4

Елементів у межах допуску

Систематичний характер відхилень (усі у бік «+») вказує на єдину прогнозовану причину — незначну залишкову похибку компенсації радіуса фрези (Tool Radius Compensation) у керуючій програмі. Це усувається коригуванням одного параметра в САМ-системі без зміни механічних налаштувань верстата. Відсутність овальності кіл та однорідність розмірів по периметру квадратів підтверджують ідентичність динамічних характеристик осей X і Y.

Розділ 4. Охорона праці та безпека при експлуатації верстата

Ідентифіковані небезпечні та шкідливі виробничі фактори

- Електробезпека: силова шафа 220 В / 380 В
- Механічна небезпека: портал до 10 000 мм/хв
- Шпиндель 24 000 об/хв — відлітання стружки
- Акустичний шум вакуумного насоса (> 80 дБ)
- Дрібнодисперсний пил МДФ (ДСТУ EN ISO 11148)

Заходи захисту

- Заземлення «зірка» + QF1/32A, QF7/16A
- Апаратний E-STOP + ліміти всіх осей
- Аспіраційна система збору пилу і стружки
- ЗІЗ: захисні окуляри, навушники, респіратор FFP2

Нормативна база

Стандарт	Застосування до верстата
ISO 12100 / ДСТУ EN ISO 12100	Оцінка ризику, безпека машин
IEC 60204-1:2016	Електрообладнання, захист 220/380 В
ISO 45001:2018 / ДСТУ ISO 45001	Система управління охороною праці
ISO 10218-1:2011	Безпека сервоприводів і контролерів
ISO 9283:1998	Оцінка точності позиціонування осей

Загальні висновки

1 / 2



РОЗДІЛ 1

Обґрунтований вибір платформи PC-based CNC

Проаналізовано тенденцію переходу від закритих стійок ЧПК до гнучких комплексів. Доведено перевагу Ethernet-інтерфейсу та сервоприводів змінного струму над кроковими двигунами у замкненому контурі.



РОЗДІЛ 2

Апаратна архітектура на промислових сервоприводах

Для трьох осей обрано сервоприводи SD80AEA10025 із драйверами SD100-20AL у замкненому контурі на енкодері. Контролер CM400V2 генерує PULSE/DIR та керує шпинделем по Modbus RTU. Кінематика — КТП 2510 + Hiwin HGR25.



РОЗДІЛ 3

Повний цикл реалізації та параметризації КІС

Розроблено схему шафи з захистом EMI-фільтром та заземленням «зірка». Параметризовано SD100: редукція 1 імп. = 0,001 мм, ПІД-регулятори, режекторні фільтри. У CyclMotion виконано інтеграцію Ethernet і Homing.

Загальні висновки

2 / 2



РЕЗУЛЬТАТ

Експериментально підтверджена точність системи

Похибка позиціонування осей — не більше 0,02 мм на 100 мм ходу. Тестове фрезерування еталонних фігур з МДФ (18 000 об/хв, подача 2 500 мм/хв) показало відхилення розмірів не більше 0,07 мм — квалітет IT9 за ДСТУ ISO 286-1. Якість поверхні без слідів вібрацій. Система впроваджена на діючому верстаті.



РОЗДІЛ 4

Безпечна експлуатація відповідно до стандартів

Виявлено та класифіковано НШВФ; впроваджено заземлення «зірка», апаратний E-STOP, безконтактні датчики лімітів осей, ЗІЗ та аспіраційну систему. Рішення відповідають законодавству України та ISO 12100, IEC 60204-1, ISO 45001.



Практична цінність роботи

Функціонуюча комп'ютерно-інтегрована система впроваджена на реальному промисловому верстаті та готова до серійної обробки деревинних матеріалів, композитів і кольорових металів.

Дякую за увагу!

Оніщенко Олексій Петрович

Кваліфікаційна робота бакалавра • Кафедра АКІТ • ХНУМГ ім. О.М. Бекетова • 2026