

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки  
Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

## Пояснювальна записка


до кваліфікаційної роботи  
магістр

на тему Підвищення ефективності технологічних процесів фрезерування для  
верстатів з ЧПК

Виконав: студент 6 курсу, групи 601МЕ  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»

Мельник Є.О. 

Керівник Лактіонов О.І. 

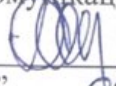
Рецензент Захарченко Р.В. 

Полтава - 2024 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і  
робототехніки  
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій  
Ступінь вищої освіти Магістр  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри  
автоматики, електроніки та  
телекомунікацій

  
О.В. Шефер  
« 02 » 09 2024 р.

## **З А В Д А Н Н Я**

### **НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

**Мельнику Євгену Олександровичу**

1. Тема проекту (роботи) **«Підвищення ефективності технологічних процесів фрезерування для верстатів з ЧПК»**  
керівник проекту (роботи) **Лактіонов Олександр Ігорович, к.т.н., доцент**  
затверджена наказом вищого навчального закладу від «09» серпня 2024 року  
№ 818-П
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 19.12.2024 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Документація верстата з числовим програмним керуванням (ЧПК).
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Огляд існуючих рішень для автоматизації верстатів ЧПК. Методи підвищення продуктивності процесу фрезерування. Розробка системи керування процесу фрезерування виробів на верстаті. Експериментальне дослідження запропонованих рішень. Висновки по роботі.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
  - 1) Порівняльний аналіз технічних характеристик аналогів
  - 2) Вид загальний верстата
  - 3) Електрична схема верстата
  - 4) Монтажна схема верстата
  - 5) Структурна схема системи керування

б) Зведені розрахункові результати

б. Дата видачі завдання 02.09.2024 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
1	Вступ	07.10.24		15%	Пл. 1
2	Розділ 1	16.10.24	I	25%	Пл. 2
3	Розділ 2	05.11.24		40%	Пл. 3
4	Розділ 3	12.11.24		50 %	Пл. 4
5	Висновки	19.11.24	II	60%	Пл. 5
6	Список використаних джерел.	26.11.24		70%	Пл. 6
7	Графічний матеріал	11.12.24		90%	Пл. 7
8	Оформлення пояснювальної записки	19.12.24	III	100%	Пл. 8, 9

Магістрант

  
( підпис )

Мельник Є.О.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

  
( підпис )

Лактіонов О.І.  
(прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ВЕРСТАТАМИ З ЧИСЛОВИМ ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ	8
1.1 Еволюція сучасних систем автоматизації виробничих процесів .....	8
1.2 Індустрія 4.0.....	9
1.3 Інтернет речей.....	10
1.4 Кіберфізичні системи.....	11
1.5 Керуючі програми.....	15
1.6 Аналіз сучасних систем фрезерувальних верстатів з ЧПК.....	17
1.7 Різновиди контролерів .....	19
1.7 Мета дослідження .....	22
2 ПРОЕКТУВАННЯ СПОСОБУ КЕРУВАННЯ ВЕРСТАТОМ З ЧПК.....	23
2.1 Способи керування верстатом з ЧПК.....	23
2.2 Огляд законів керування .....	28
2.3.1 Огляд конструкції фрезерного верстата з ЧПУ .....	31
2.3.2 Основні характеристики плати Arduino Uno .....	32
2.3.3 Переваги Arduino Uno для фрезерного верстата.....	34
2.3.4 Двигуни та їх драйвери.....	34
2.3.5 Живлення верстата ЧПК.....	39
2.4 Розрахунок системи керування .....	41
2.6 Висновки до розділу.....	53
3 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВЕРСТАТУ З ЧПК .....	54
3.1 Структурна схема системи з ПД-регулятором .....	54
3.2 Розробка програми керування.....	59
3.3 Висновок розділу.....	63
ВИСНОВКИ.....	64
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	66
Додатки.....	68

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

CAD – Computer Aided Design;

CPS – Cyber-Physical Systems;

IoT – Internet of the Things;

NCU – Numeric Control Unit;

АС – автоматизовані системи;

ЗП – задаючий пристрій;

КП – керуюча програма;

ОК – об'єкт керування;

ПІД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор;

ПК – персональний комп'ютер;

ПЧПК – пристрій числового програмного керування;

СЧПК – система числового програмного керування;

КП – керуючий пристрій;

ЧПК – числове програмне керування.

ІКТ - інформаційні та комунікаційні технології

КФС – кіберфізичні системи

## ВСТУП

У сучасних умовах розвитку машинобудівної галузі одним з найважливіших напрямів є підвищення ефективності технологічних процесів обробки металів. Особливу роль у цьому процесі відіграє фрезерування на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК), яке забезпечує високу точність, якість обробки та можливість автоматизації виробничих процесів. Однак, незважаючи на прогресивний розвиток технологій, все ще існує потреба в оптимізації процесів фрезерування для досягнення більшої продуктивності та мінімізації виробничих витрат.

Сучасний рівень виробництва у всьому світі потребує застосування автоматизованого обладнання на всіх ділянках будь-яких виробництв.

Основні технології включають використання Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (AI), машинного навчання, великих даних, хмарних та периферійних обчислень, роботів та автономних транспортних засобів. Всі ці технології дозволяють створювати "розумні фабрики", де виробничі процеси максимально автоматизовані та інтегровані, що дозволяє досягти високого рівня продуктивності та якості за нижчою собівартістю.

Також важливим є використання кіберфізичних систем (CPS), які поєднують в собі цифрові та фізичні компоненти, та цифрові двійники (Digital Twins), що дозволяють моделювати та оптимізувати виробничі процеси в реальному часі. Використання таких рішень робить виробництво більш адаптивним і гнучким, сприяючи швидшій адаптації до змінних умов ринку.

Підприємствам доводиться долати труднощі, пов'язані з нестачею знань, ресурсів, а також страхом перед масштабними змінами. Це потребує стратегічного планування на рівні держави, регіонів та самих підприємств, а також залучення кваліфікованих кадрів та постійного навчання персоналу.

Такі технології не тільки підвищують ефективність, але й створюють нові бізнес-моделі, що змінюють спосіб взаємодії у виробничих ланцюгах постачання.

Таким чином, автоматизація виробництва є важливим кроком для сучасних підприємств, оскільки дозволяє досягти високої конкурентоспроможності та забезпечує гнучкість виробничих процесів в умовах швидких змін на ринку.

Необхідність автоматизації виробничих процесів і кожного виду обладнання зумовлена тим, що вона є важливою частиною системи, що визначає ефективність і розвиток сучасних машинобудівних підприємств. Це дає змогу значно збільшити обсяг виробництва при одночасному зниженні витрат на виготовлення продукції.

Впровадження автоматизації виробництва є також актуальним тому що, без неї неможливе конкурентноспроможне існування компанії на ринку. Тому що автоматизація виробництва тягне за собою підвищення виробничості праці, ріст об'ємів випуску продукції, підвищення якості виробів, скорочення долі людської праці.

Складно уявити сучасне виробництво без обладнання з управлінням. Кожне підприємство має, для досягнення високих показників продуктивності, оснащувати свої виробничі лінії верстатами з управлінням. Прикладом такого обладнання є фрезерні верстати з ЧПУ.

І тому, виходячи із вищесказаного, можна зробити висновок, що задача автоматизації процесів управління верстатами з ЧПУ є актуальною.

Мета кваліфікаційної роботи магістра – підвищити ефективність фрезерної обробки через покращення показників часу встановлення та перерегулювання системи.

Для вирішення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати сучасний стан розвитку систем автоматизації управління верстатів з ЧПУ;
- розробити макет верстату;
- розробити спосіб підвищення якостей перехідного процесу системи; – розрахувати параметри стійкості та якості системи;

- оптимізувати отримані параметри;
- провести експериментальні дослідження.

Робота виконана згідно методичних вказівок та з використанням ДСТУ 3008:2015 [3].

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ВЕРСТАТАМИ З ЧИСЛОВИМ ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ

## 1.1 Еволюція сучасних систем автоматизації виробничих процесів

Еволюція систем автоматизації виробничих процесів стала одним із ключових чинників розвитку промисловості у різних етапах індустріальних революцій. Від впровадження парових машин до сучасних кіберфізичних систем, автоматизація безпосередньо вплинула на підвищення продуктивності, ефективність управління виробництвом та забезпечення високої якості продукції. Загалом виділяють наступні етапи:

- Індустрія 1.0: Перший етап індустріальної революції (18-19 століття) був зосереджений на механізації виробництва з використанням парових двигунів. Це дозволило значно збільшити виробничі потужності та знизити витрати на ручну працю. Автоматизація у цей період обмежувалася лише механічними пристроями та машинами.[19]

- Індустрія 2.0: Другий етап (кінець 19 – початок 20 століття) характеризувався масовим впровадженням електрики та стандартизації процесів. Електрифікація заводів та підприємств дала поштовх для розвитку автоматизованих систем на основі електромеханічних компонентів, що підвищило гнучкість і швидкість виробничих процесів. На цьому етапі з'явилися конвеєрні системи, що сприяли масовому виробництву. [19]

- Індустрія 3.0: У 20 столітті автоматизація досягла нового рівня завдяки розвитку комп'ютерних технологій та інформаційних систем. Це був початок використання програмованих логічних контролерів (ПЛК), що дозволили автоматизувати складні процеси виробництва, а також керування ними через комп'ютери. Почалася цифрова трансформація виробництва, що призвела до оптимізації управління та забезпечення високої точності виконання операцій.

- Індустрія 4.0: Сучасний етап розвитку, що почався на початку 21 століття, характеризується інтеграцією кіберфізичних систем, штучного інтелекту (ШІ),

Інтернету речей (ІоТ) та великих даних у виробничі процеси. Індустрія 4.0 орієнтована на створення "розумних фабрик", де машини та системи автоматично адаптуються до змін умов, взаємодіючи один з одним в реальному часі. Це забезпечує високу гнучкість, ефективність та продуктивність виробництва. [19]

## 1.2 Індустрія 4.0

Індустрія 4.0 — це сучасна концепція розвитку промисловості, що передбачає цифрову трансформацію виробництва через інтеграцію новітніх інформаційних та комунікаційних технологій (ІКТ). Цей підхід ґрунтується на використанні кібер-фізичних систем (КФС), інтернету речей (ІоТ), великих даних (Big Data), штучного інтелекту (ШІ) та хмарних обчислень для створення розумних підприємств. Основна мета Індустрії 4.0 — підвищення продуктивності, гнучкості виробничих процесів та ефективності управління ресурсами. [20]

Концепція була представлена в Німеччині у 2011 році на Ганноверському ярмарку, що стало початком нового етапу в розвитку світової промисловості. Індустрія 4.0 змінила підходи до організації виробництва, керування ланцюгами постачання та взаємодії між підприємствами та споживачами. [19]

ІоТ забезпечує обмін даними між фізичними об'єктами через мережі. Завдяки сенсорам та пристроям, підключеним до інтернету, підприємства можуть автоматизувати процеси, контролювати роботу обладнання та прогнозувати технічні несправності. [20]

КФС об'єднують фізичні об'єкти та їхні цифрові двійники, що дозволяє інтегрувати виробничі процеси у цифрове середовище. Ці системи забезпечують взаємодію між фізичними і www компонентами виробництва в реальному часі.

ШІ та алгоритми машинного навчання дозволяють аналізувати великі обсяги даних та оптимізувати виробничі процеси. Це включає автоматичну діагностику, прогнозування збоїв і оптимізацію використання ресурсів.

Хмарні платформи надають можливість централізованого зберігання та обробки даних, що спрощує управління підприємством. Водночас технології Edge

Computing дозволяють обробляти дані на периферії мережі, що зменшує затримки та підвищує продуктивність.[20]

Також використовуються такі технології як цифрові двійники (Digital Twins), доповнена та віртуальна реальність (AR/VR), інтегровані системи управління виробництвом (MES, ERP).

Цифровий двійник — це віртуальна модель фізичного об'єкта або процесу, яка відображає його в реальному часі. Вони дозволяють моделювати сценарії роботи обладнання, виявляти потенційні проблеми ще до їх виникнення та оптимізувати процеси.

Технології AR/VR використовуються для навчання працівників, технічної підтримки та обслуговування обладнання. Наприклад, доповнена реальність дозволяє оператору бачити інструкції в реальному часі під час ремонту обладнання.

MES, ERP системи дозволяють ефективно керувати ресурсами підприємства, відстежувати виробничі процеси в реальному часі та швидко реагувати на зміни попиту.

### **1.3 Інтернет речей**

Інтернет речей (Internet of Things, IoT) — це концепція, що охоплює мережу фізичних об'єктів, обладнання та пристроїв, які оснащені сенсорами, програмним забезпеченням та підключенням до інтернету. Головна ідея IoT полягає у тому, щоб пристрої могли збирати, обмінюватися та аналізувати дані без втручання людини, що сприяє підвищенню ефективності, автоматизації та безперервного моніторингу різних процесів.[20]

IoT відіграє ключову роль у розвитку Індустрії 4.0, адже забезпечує інтеграцію фізичних об'єктів у цифровий простір. Сьогодні IoT охоплює різні галузі, від розумних будинків і міських інфраструктур до складних виробничих та логістичних систем.

IoT-системи зазвичай складаються з таких ключових елементів:

- Сенсори. Це фізичні компоненти, які збирають дані про стан навколишнього середовища або процеси. Прикладами є датчики температури, вологості, руху, GPS-трекери тощо.

- Комунікаційні протоколи та мережі. Для передачі даних використовуються різні технології: Wi-Fi, Bluetooth, 5G, ZigBee, LoRaWAN. Вибір протоколу залежить від вимог до швидкості передачі даних, енергоспоживання та радіусу дії.

- Платформи обробки даних. Дані передаються до хмарних платформ або обробляються на периферії мережі (edge computing). Хмара використовується для аналізу великих масивів даних, а edge-пристрої дозволяють приймати рішення локально і з мінімальною затримкою.

- Системи управління та інтерфейси. Це програмне забезпечення, що дозволяє користувачам моніторити та керувати IoT-пристроями через веб-інтерфейси або мобільні додатки. Прикладом можуть бути інтерфейси для керування розумним домом або виробничими процесами.

У промисловості IoT використовується для моніторингу та управління виробничими лініями, а також прогнозування поломок обладнання (predictive maintenance). Завдяки сенсорам та аналітиці підприємства можуть уникати простоїв і зменшувати витрати на ремонт.

## **1.4 Кіберфізичні системи**

Кіберфізичні системи (Cyber-Physical Systems, CPS) — це інтеграція фізичних об'єктів та процесів із цифровими технологіями через комп'ютерні системи та мережі. Вони дозволяють здійснювати моніторинг, управління та оптимізацію процесів у реальному часі завдяки тісній взаємодії між фізичним і віртуальним світом. CPS є основою таких сучасних концепцій, як Індустрія 4.0, розумні фабрики, автономні транспортні системи та розумні міста.[1]

Головною ідеєю кіберфізичних систем є поєднання даних з фізичних сенсорів і пристроїв з аналітикою та управлінням через цифрові платформи, що дозволяє системам працювати автономно та адаптуватися до змін у середовищі.

У результаті активного впровадження датчиків та мережевих пристроїв відбувається безперервне накопичення великих обсягів даних, відомих як Big Data [1]. В умовах такої динаміки кіберфізичні системи (CPS) можна адаптувати для ефективного управління цими даними та координації взаємодії між пристроями, що дозволить створювати автономні, гнучкі та самоконтрольовані системи [2]. Додатково, впровадження CPS у процеси виробництва, логістики та обслуговування сприятиме перетворенню традиційних заводів у фабрики Індустрії 4.0, що матиме значний економічний ефект [3].

Розглянемо архітектуру CPS, вона складається з п'яти рівнів.

Фізичний рівень. Включає датчики, актуатори та пристрої, що взаємодіють із фізичним середовищем (обладнання, машини, транспортні засоби тощо). Сенсори збирають дані, а актуатори виконують команди на основі аналітики.

Комунікаційний рівень. Забезпечує обмін даними між фізичними та цифровими компонентами. Зазвичай використовуються мережі IoT, Wi-Fi, 5G, а також спеціальні промислові протоколи (наприклад, OPC-UA, Modbus).

Цифровий рівень (обчислювальний). Включає обчислювальні ресурси для обробки даних, що надходять із сенсорів, а також для прийняття рішень. Це може бути як хмарна платформа для аналізу великих обсягів даних, так і edge-пристрої, що забезпечують обчислення безпосередньо на місці.

Керуючий рівень. На цьому рівні працюють алгоритми управління, що аналізують дані та приймають рішення щодо автоматизації процесів. Це може бути система керування виробництвом (MES) або автономна система управління транспортом.

Інтерфейси користувача. Дає можливість людям взаємодіяти з системою через мобільні додатки, веб-інтерфейси або диспетчерські платформи. Інтерфейси забезпечують візуалізацію процесів і дають змогу втручатися у роботу системи в разі потреби.

У розумних фабриках (smart factories) кіберфізичні системи (CPS) інтегрують усі виробничі процеси в єдину систему, забезпечуючи безперервний обмін даними між обладнанням, програмним забезпеченням та управлінськими рішеннями. Датчики на виробничих лініях відстежують стан обладнання,

температуру, рівень вібрації, знос компонентів та інші параметри в реальному часі. На основі цих даних система автоматично коригує налаштування, оптимізуючи робочі процеси або запускає профілактичне обслуговування, якщо виявлено відхилення чи загрозу поломки. Це дозволяє уникати непередбачених збоїв, мінімізувати простої та підвищувати загальну ефективність виробництва.

Крім того, такі системи можуть самостійно планувати виробничі процеси залежно від рівня завантаження ліній і попиту на продукцію, що забезпечує гнучкість у виконанні замовлень. Завдяки інтеграції з ERP-системами (Enterprise Resource Planning) і ланцюгами постачання, виробництво автоматично оновлює дані про наявність матеріалів та оптимізує логістичні операції.

Інтелектуальне виробництво також сприяє підвищенню якості продукції. Системи машинного зору та алгоритми штучного інтелекту здійснюють контроль якості на кожному етапі, виявляючи дефекти ще до завершення циклу виробництва. Це зменшує кількість браку та дозволяє своєчасно вносити корективи.

Крім підвищення продуктивності та якості, такі рішення допомагають зменшити споживання енергії та ресурсів. Системи аналізують дані про споживання ресурсів та виявляють можливості для оптимізації, наприклад, автоматично вимикаючи невикористовувані машини або переналаштовуючи процеси для зменшення енергоспоживання. Таким чином, розумні фабрики не лише підвищують конкурентоспроможність підприємств, але й сприяють екологічній сталості.

Така інтеграція усіх компонентів у єдину мережу дозволяє створити повністю автоматизоване та гнучке виробниче середовище, яке адаптується до змін попиту та умов ринку, відкриваючи нові можливості для розвитку бізнесу в умовах Індустрії 4.0.

Кіберфізичні системи складаються з двох основних компонентів. Перший забезпечує безперервне підключення для швидкого збору даних із фізичного середовища та обміну інформацією між фізичними об'єктами і цифровими системами. Другий компонент зосереджений на розумній обробці цих даних, використовуючи аналітичні інструменти та обчислювальні ресурси для створення

кіберпростору, де здійснюється керування та оптимізація процесів у реальному часі.

Проте така вимога є надто загальною та нечіткою для практичної реалізації. На відміну від архітектури 5C, яка покроково описує процес побудови CPS, починаючи від збору даних і завершуючи аналітикою та оцінкою кінцевої вартості, ця модель забезпечує структурований підхід до впровадження систем.

Архітектура 5C має наступні рівні.

З'єднання (Connection). На першому рівні відбувається інтеграція фізичних пристроїв, таких як датчики, контролери, роботи та інше виробниче обладнання, із цифровими системами. Цей етап передбачає підключення всіх пристроїв до мережі для збору даних у реальному часі. Датчики відстежують такі параметри, як температура, вібрація, швидкість роботи, зношення компонентів тощо, передаючи дані у систему для подальшої обробки. Основна мета: Забезпечити доступ до всіх даних і створити базу для цифровізації виробничих процесів.

Перетворення (Conversion). Зібрані дані обробляються та перетворюються у зрозумілий формат для аналітичних систем. На цьому етапі проводиться фільтрація, очищення та первинний аналіз даних. Метою цього рівня є перетворення великого потоку «сирих» даних у корисну інформацію, яка може використовуватися для прийняття рішень на наступних рівнях. Основна мета: Підготувати дані для аналітики та виявлення аномалій у процесах.

Кібернетика (Cyber). Цей рівень забезпечує централізований моніторинг та контроль за допомогою цифрових моделей виробничих процесів. Інформація з різних пристроїв об'єднується в єдину кібернетичну модель, яка відображає стан системи в реальному часі. На цьому рівні використовуються технології інтернету речей (IoT), машинного навчання та аналітики великих даних для виявлення закономірностей і побудови моделей поведінки систем. Основна мета: Створити цифровий двійник виробничої системи для моніторингу й оптимізації в реальному часі.

Пізнання (Cognition). На цьому рівні дані, отримані з кібернетичних моделей, аналізуються за допомогою алгоритмів штучного інтелекту (AI) для

глибшого розуміння процесів. Системи можуть прогнозувати можливі проблеми, такі як поломки обладнання, відхилення від норм чи потенційні простої. Крім того, на основі цих даних система може рекомендувати оптимальні стратегії виробництва та управління. Основна мета: Розуміння ситуації та прийняття обґрунтованих рішень для підвищення ефективності.

Конфігурація (Configuration). Останній рівень передбачає впровадження змін у виробничі процеси на основі отриманих інсайтів і рекомендацій. Система може автономно коригувати параметри обладнання або змінювати виробничі плани для підвищення продуктивності, зменшення простоїв чи економії ресурсів. У разі виявлення проблемних ситуацій система запускає профілактичні заходи чи технічне обслуговування.[2]

### **1.5 Керуючі програми**

Керуючі програми є важливим елементом автоматизованих систем, оскільки вони забезпечують управління обладнанням, координацію процесів та інтеграцію фізичних і цифрових компонентів. Розробка таких програм вимагає застосування спеціальних методів і підходів для забезпечення надійності, продуктивності та адаптивності системи. Одним із поширених підходів є програмування на основі логіки та станів, зокрема використання Ladder Logic або скінчених автоматів (FSM). Цей метод часто застосовується в програмуванні промислових контролерів (PLC) і базується на релейній логіці, що полегшує перехід із ручного управління на автоматичне. Програма в такому випадку складається з набору станів, кожен із яких відповідає певним умовам чи подіям. Хоча цей підхід є простим для візуалізації та зручним для інженерів, він може бути менш гнучким при реалізації складних систем.

Ще одним ефективним методом є модульне програмування, коли програма розбивається на окремі незалежні блоки (модулі), кожен з яких виконує певну функцію. Така структура дозволяє легко повторно використовувати або змінювати окремі частини без впливу на всю систему. Це значно спрощує тестування та налагодження програми, проте вимагає ретельного планування для забезпечення

ефективної взаємодії між модулями. Обидва підходи можуть комбінуватися для створення більш гнучких, надійних та масштабованих систем управління, що відповідають потребам сучасного виробництва.

Ключовим аспектом розробки керуючих програм також є забезпечення масштабованості та гнучкості. Це особливо важливо в умовах Індустрії 4.0, де системи повинні адаптуватися до змін у виробничих процесах та інтегрувати нове обладнання без значних змін у програмному коді. Для цього широко використовуються об'єктно-орієнтовані підходи, де кожен фізичний елемент чи функція системи реалізуються у вигляді окремих об'єктів із власними методами та атрибутами. Це полегшує додавання нових компонентів і сприяє масштабуванню системи з мінімальними витратами часу.

Ще одним важливим підходом є використання сервіс-орієнтованої архітектури (SOA), яка забезпечує інтеграцію різних програмних компонентів через стандартизовані інтерфейси. Це дозволяє об'єднувати локальні та віддалені ресурси в єдину систему й реалізовувати гнучке управління через централізовані платформи. Наприклад, у системах, пов'язаних із логістикою або управлінням ланцюгами постачання, SOA забезпечує інтеграцію виробничих даних у реальному часі з ERP або IoT-платформами.

Окрему увагу приділяють питанням надійності та безпеки керуючих програм. В умовах підключення обладнання до мережі існує ризик кібератак, які можуть зупинити виробництво або призвести до викривлення даних. Для запобігання таким ситуаціям використовуються методи захищеного програмування, які передбачають шифрування даних, автентифікацію користувачів та багаторівневий контроль доступу до системи. Крім того, системи моніторингу та відновлення після збоїв дають змогу мінімізувати вплив непередбачуваних ситуацій на виробничий процес.

У сучасному підході до створення керуючих програм все більшого значення набуває штучний інтелект (AI) та машинне навчання (ML). Ці технології дозволяють програмам не лише виконувати задані алгоритми, але й самонавчатися, виявляти приховані закономірності та адаптувати роботу обладнання залежно від змінних умов. Наприклад, прогнозне технічне

обслуговування на основі AI може аналізувати показники обладнання та попереджати про можливі поломки ще до їхнього виникнення, що знижує ризик простоїв і підвищує ефективність виробництва.

Таким чином, методи створення керуючих програм спрямовані не лише на забезпечення базових функцій управління, а й на інтеграцію сучасних технологій для досягнення високої гнучкості, продуктивності та безпеки. Використання таких підходів сприяє формуванню розумних, адаптивних систем, здатних відповідати викликам динамічного виробничого середовища та підтримувати стратегії сталого розвитку підприємств.

## **1.6 Аналіз сучасних систем фрезерувальних верстатів з ЧПК**

Сучасні системи числового програмного керування (ЧПК) відіграють ключову роль у розвитку промислового обладнання, особливо у верстатах для точного фрезерування, токарної обробки та шліфування. Вони є основою для автоматизації процесів і підвищення продуктивності на виробництві, дозволяючи компаніям відповідати вимогам ринку та високим стандартам якості. Нижче розглянуто основні аспекти сучасних ЧПК-систем, таких як FANUC, SINUMERIK і Haas, та їх можливості.

Системи FANUC широко використовуються в різних галузях завдяки підтримці універсальних G-кодів та сумісності з більшістю програмного забезпечення для ЧПК.

Нові моделі контролерів FANUC мають функції адаптивного управління, які дозволяють автоматично коригувати параметри різання залежно від стану інструменту та матеріалу, що значно підвищує продуктивність і точність обробки.

Інтуїтивний інтерфейс FANUC сприяє швидкому навчанню операторів та спрощує процес програмування, що знижує ризик помилок і простоїв на виробництві.[5]

Система SINUMERIK від Siemens, зокрема серії 840D, забезпечує точність і швидкість у процесах обробки завдяки функціям для 5-осьової фрезерної обробки та складної токарної роботи.

Siemens SINUMERIK легко інтегрується з кіберфізичними системами, що дозволяє створювати "розумні" виробничі процеси з можливістю віддаленого моніторингу, діагностики та прогнозування обслуговування обладнання.

Система SINUMERIK пропонує модульний підхід до налаштування та можливість масштабування залежно від розміру підприємства та складності виробничих процесів.[6]

Важливим аспектом контролерів Haas є зрозумілий інтерфейс і широкий набір інструкцій для програмування, що робить ці системи привабливими для малих і середніх підприємств.

Контролери Haas легко підключаються до CAD/CAM-програм, що дозволяє швидко генерувати та завантажувати траєкторії обробки, оптимізуючи час налаштування та знижуючи помилки.

Сучасні моделі обладнані можливостями віддаленого контролю через інтернет, що дозволяє керівникам виробництва контролювати процеси в реальному часі.

Сучасні контролери мають функції самоадаптації, що дозволяє системам налаштовувати параметри обробки залежно від стану інструменту або матеріалу. Це знижує ризик пошкодження інструменту і забезпечує якісніший кінцевий продукт.

Підтримка технологій Індустрії 4.0. Багато сучасних систем ЧПК розроблені з урахуванням вимог Індустрії 4.0 і підтримують обмін даними з іншими елементами виробництва через IoT та кіберфізичні системи, що дозволяє підприємствам створювати інтегровані виробничі процеси.

Автоматизовані системи ЧПК оснащені датчиками та моніторинговими системами, що дозволяє відслідковувати стан обладнання і прогнозувати технічне обслуговування.

Аналіз сучасних систем ЧПК показує, що ці рішення надають підприємствам великий потенціал для підвищення ефективності та продуктивності. Від вибору налаштувань обробки до адаптивного управління та інтеграції з кіберфізичними системами – кожна з систем має свої переваги та сфери застосування. Успішне використання ЧПК-систем сприяє забезпеченню якості

продукції, зниженню затрат і досягненню високої конкурентоспроможності на ринку.

## 1.7 Різновиди контролерів

Arduino Uno — це компактна і популярна мікроконтролерна плата, розроблена для легкого освоєння електроніки та програмування. Вона використовується як у навчальних цілях, так і для створення різноманітних проєктів, починаючи від простих прототипів і закінчуючи складними системами автоматизації. В основі плати лежить мікроконтролер ATmega328P, який забезпечує достатню потужність для виконання багатьох задач, а його тактова частота 16 МГц дозволяє швидко обробляти команди. Arduino Uno має 14 цифрових входів і виходів, з яких 6 можна використовувати для генерації ШІМ-сигналів, а також 6 аналогових входів, які часто застосовуються для зчитування сенсорних даних. Для живлення плата може використовувати як 5 В від USB-порту, так і зовнішнє джерело з напругою від 7 до 12 В, що забезпечує гнучкість у виборі джерела енергії.[13]



Рисунок 1.1 – мікроконтролерна плата Arduino Uno

Мікроконтролерна плата Arduino Uno підтримує стандартні інтерфейси, такі як UART, SPI і I2C, що дозволяє легко підключати до неї інші пристрої. Це робить

плату універсальною, адже вона може взаємодіяти з різноманітними сенсорами, модулями зв'язку, дисплеями та іншими електронними компонентами, що є основою для створення інтерактивних пристроїв. Плата підключається до комп'ютера через USB, що використовується як для програмування, так і для передачі даних. Програмування Arduino Uno відбувається за допомогою спеціальної середовища Arduino IDE, де користувачі пишуть програми на мові, що базується на C++, завдяки чому процес навчання та розробки проєктів стає інтуїтивно зрозумілим.

Arduino Uno є платформою з відкритим кодом, і це означає, що будь-хто може вільно користуватися її схемами та документацією, а також створювати власні модифікації чи сумісні пристрої. Така відкритість дозволила Arduino Uno стати популярною серед початківців і професіоналів по всьому світу. Сотні доступних бібліотек значно спрощують додавання різних функціональностей, таких як управління двигунами, читання з датчиків температури чи вологості, зчитування з акселерометрів, використання бездротових модулів і навіть створення мережі Інтернет речей (IoT).[13]

Arduino Uno часто використовують у різних галузях, зокрема в робототехніці, автоматизації, системах моніторингу, інтернеті речей, а також для домашньої автоматизації та управління пристроями. Завдяки великій спільноті розробників та ентузіастів, Arduino Uno має безліч інструкцій, навчальних ресурсів та готових прикладів проєктів. Інтеграція плати з кіберфізичними системами або іншими пристроями дозволяє створювати як прості експериментальні проєкти, так і складніші системи, що відповідають вимогам сучасної автоматизації та контролю.

Raspberry Pi — це компактний одноплатний комп'ютер, створений для навчання основам програмування та електроніки, але завдяки своїм потужним можливостям він знайшов застосування і в професійних проєктах. Розроблений у Великобританії фондом Raspberry Pi, цей пристрій став популярним серед ентузіастів та професіоналів по всьому світу. Raspberry Pi має різні моделі, від базових до потужніших, таких як Raspberry Pi 4, які дозволяють працювати з різноманітними операційними системами, найчастіше на основі Linux, як-от

Raspberry Pi OS (раніше відомої як Raspbian), Ubuntu та інших. Завдяки USB- і HDMI-портам, а також вбудованим Wi-Fi та Bluetooth модулям (у новіших моделях), Raspberry Pi дозволяє легко підключати периферійні пристрої, підключатися до інтернету, виводити відео та під'єднувати різні датчики і модулі.



Рисунок 1.2 – мікроконтролерна плата Raspberry Pi 5

Raspberry Pi оснащений процесором ARM і може мати від 512 МБ до 8 ГБ оперативної пам'яті залежно від моделі, що робить його здатним виконувати різноманітні задачі — від запуску простих програм і написання коду до роботи в ролі мультимедійного центру або навіть невеликого сервера. Цей комп'ютер підтримує GPIO (General Purpose Input/Output) порти, що дозволяє з'єднувати його з іншими електронними компонентами, такими як світлодіоди, кнопки, датчики, мотори, завдяки чому він ідеально підходить для інтерактивних проєктів, робототехніки, домашньої автоматизації та розробки пристроїв для Інтернету речей (IoT).[22]

Популярність Raspberry Pi також спричинена широкою підтримкою в інтернет-спільноті. В мережі є безліч посібників, відеоуроків, форумів і готових прикладів, які допомагають новачкам і досвідченим користувачам реалізовувати свої проєкти. Raspberry Pi також активно використовується в школах та університетах для навчання програмуванню, електроніці, мережевим технологіям

та робототехніці.

Окрім освітніх та дослідницьких цілей, Raspberry Pi все частіше застосовують у комерційних рішеннях завдяки низькій вартості, низькому енергоспоживанню і можливості адаптації до широкого спектра задач. Наприклад, він може служити основою для медіаплеєра, контролера системи безпеки, основою для автоматизації в "розумному домі", а також як сервер для зберігання даних.

### **1.7 Мета дослідження**

Мета даного дослідження полягає у глибокому аналізі сучасних підходів до створення, інтеграції та оптимізації кіберфізичних систем (CPS) у виробничих процесах з урахуванням принципів Індустрії 4.0. Зокрема, дослідження спрямоване на вивчення архітектурних рішень, таких як модель 5С, а також інноваційних підходів до розробки керуючих програм, що забезпечують автоматизацію, гнучкість та адаптивність виробництва.

Основна увага приділяється впливу таких технологій, як інтернет речей (ІоТ), штучний інтелект (АІ), великі дані та прогнозне технічне обслуговування, на підвищення ефективності управлінських і виробничих процесів. Окрім цього, дослідження ставить за мету визначити методи підвищення надійності та кібербезпеки інтегрованих систем, що є критичними для мінімізації ризиків і забезпечення безперебійної роботи підприємств.

Досягнення поставленої мети включає не лише розробку теоретичних підходів, але й аналіз існуючих практик реалізації CPS у промисловості, оцінку їхньої економічної ефективності та визначення потенційних викликів. У рамках дослідження буде запропоновано шляхи оптимізації виробничих процесів шляхом впровадження новітніх технологій, що відповідають вимогам сучасних підприємств та сприяють сталому розвитку.

## 2 ПРОЕКТУВАННЯ СПОСОБУ КЕРУВАННЯ ВЕРСТАТОМ З ЧПК

### 2.1 Способи керування верстатом з ЧПК

Для аналізу методів управління верстатами з числовим програмним керуванням та подальших досліджень як основу будемо використовувати компактний настільний фрезерний верстат, призначений для виконання фрезерних робіт. (рисунок 2.1).[18]

Цей верстат виконує обробку за допомогою обертального інструменту, який здійснює рух по осях X, Y, Z для обробки деталі; переміщення робочих органів здійснюється за допомогою гвинтових передач, а станина слугує основою для розміщення елементів компактного обладнання.

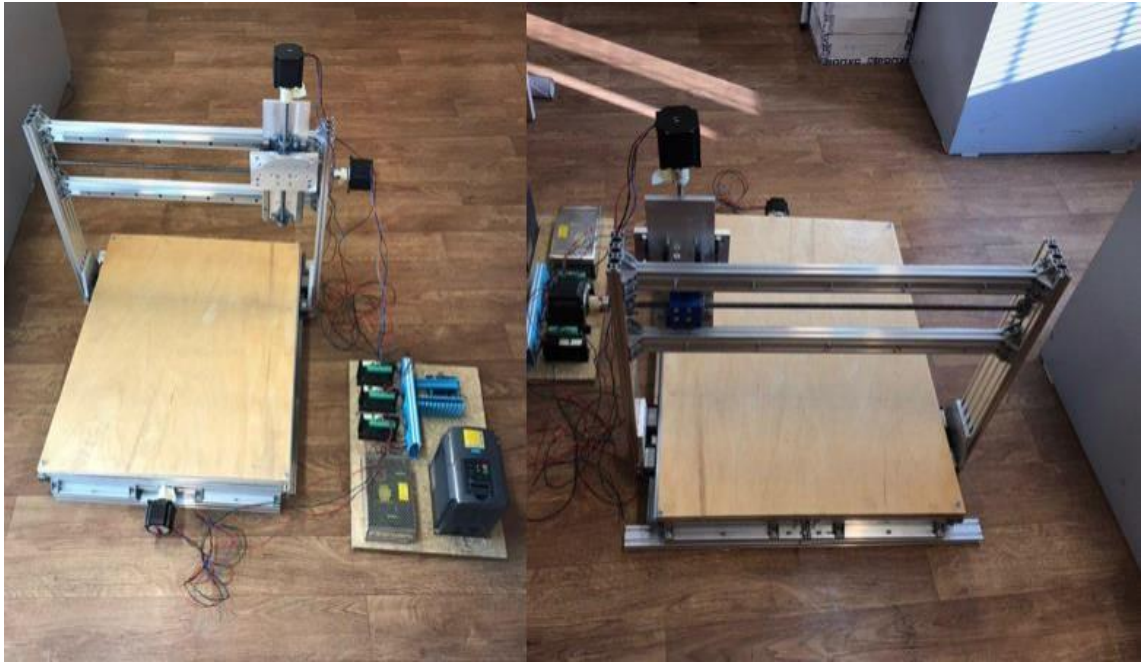
Переваги:

- компактні розміри;
- мала вага;
- простота обслуговування та експлуатації;
- низький рівень шуму під час роботи;
- економне споживання електроенергії;
- можливість підключення до мережі 220 В.

Недоліки:

- трудомісткий процес підготовки програмного забезпечення, що потребує участі досвідченого фахівця;
- висока вартість додаткового програмного забезпечення;
- дорогий спеціалізований інструмент;
- ризик пошкодження заготовки або верстата внаслідок помилки у програмі.

Для того, щоб керувати верстатом з ЧПК, необхідно використовувати спеціалізовані методики та підходи. Вибір конкретного способу управління визначається вимогами до рівня точності та продуктивності, яких слід досягти під час роботи.



а) фронтальний вид; б) тильний вид

Рисунок 2.1 – Компактний настільний фрезерний верстат

Загалом у системах числового програмного керування застосовують один із підходів:

- методи з прямим зв'язком і зворотним зв'язком (рисунок 2.2);
- методи адитивного, інтелектуального та робастного керування.

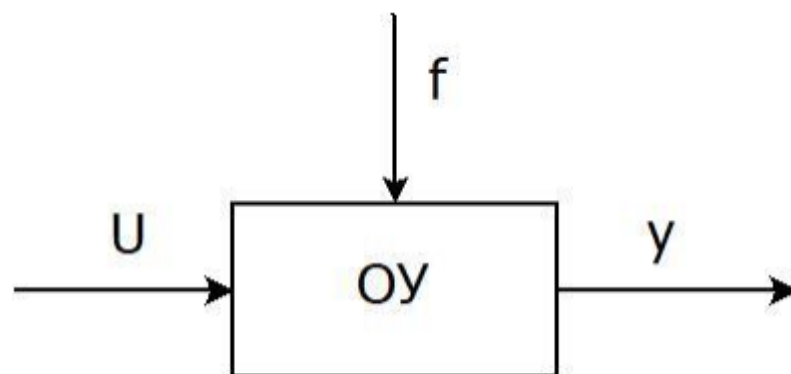


Рисунок 2.2 - Система керування верстатом з ЧПК із прямим зв'язком

У системі керування для узгодженої роботи двигунів фрезерного верстата застосуємо ПД-регуляцію. Далі слід детально розглянути закони керування, побудувати структурну схему та обчислити ключові коефіцієнти для математичної моделі.

У нашій моделі об'єктом керування виступає електродвигун, представлений трьома параметрами:

- вихідний показник  $y$ ;
- вхідний задавальний параметр  $U$ ;
- вхідний збурюючий вплив  $f$ .

За допомогою ПД-регулятора ми будемо здійснювати контроль і керування кроковими двигунами, які забезпечують переміщення робочого органу вздовж осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

Загальне зображення об'єкта керування наведено на рисунку 2.4.

Для контролю за електродвигуном на його осі встановлено енкодер, який передає значення вихідного параметра  $u$ , тобто кут повороту (кількість імпульсів на один оберт).

Збурююча дія – це вплив зовнішніх факторів, які порушують коректне функціонування об'єкта. Прикладами таких впливів є тертя, навантаження тощо. За значного навантаження кроковий двигун може «втрачати» імпульси, що призводить до неповного виконання необхідної кількості кроків.

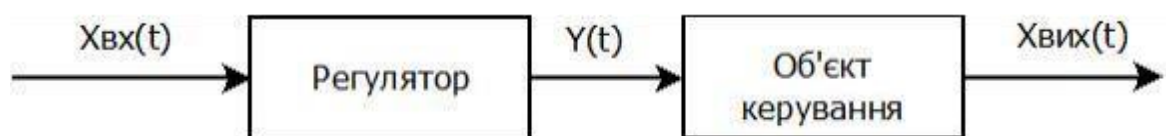


Рисунок 2.3 – Модель об'єкта керування

Щоб усунути вхідний збурюючий вплив, використовуємо другий параметр, тобто задавальний. Технічний пристрій, який здійснює автоматичне керування, називається керуючим пристроєм (КП). Об'єкт керування (ОК) разом із керуючим та задавальним пристроєм утворюють Систему Автоматичного Керування (САК).

На рисунку 2.4 зображена структурна схема САК

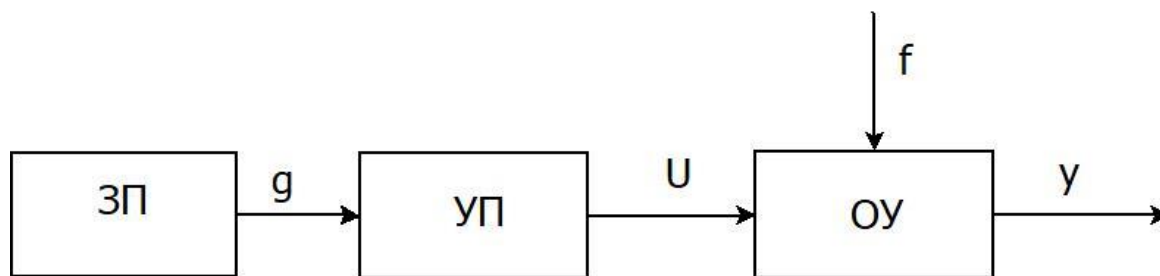


Рисунок 2.4 – Структурна схема САК

Структурна схема системи автоматичного керування (САК) відображає основні компоненти системи та їхні зв'язки, показуючи, як сенсори, контролери, виконавчі механізми, контури зворотного зв'язку та інші елементи працюють спільно для підтримання контролю над процесом чи обладнанням. Основна мета такої схеми — продемонструвати функції кожного з елементів, потік інформації між ними та послідовність дій, що забезпечують ефективну роботу системи. У цій схемі сенсори вимірюють необхідні параметри, такі як температура, тиск чи швидкість, передаючи ці дані до контролера.

Контролер, у свою чергу, обробляє отриману інформацію, порівнює її з потрібним значенням і відправляє команди виконавчим механізмам для коригування параметрів, якщо це потрібно. Виконавчі механізми реалізують ці команди, здійснюючи коригування, яке допомагає підтримувати заданий стан системи. При цьому контур зворотного зв'язку забезпечує постійне надходження інформації про поточний стан процесу, що дозволяє контролеру здійснювати коригування в реальному часі та зберігати стабільність роботи.

Усі компоненти схеми об'єднані в єдиний цикл обміну даними та команд, що дозволяє системі оперативно реагувати на зміни й адаптуватися до умов роботи.

Керування об'єктом керування (Ок) можна здійснювати за трьома основними принципами.

Перший — це принцип розімкнутого управління, який передбачає, що керування здійснюється за заздалегідь визначеним алгоритмом без урахування зовнішніх факторів.

Другий принцип — компенсація збурень, де при виникненні збурення його результат враховується як коректива в алгоритмі управління, що дозволяє реагувати на зовнішні впливи.

Третій принцип — управління по відхиленню (зворотній зв'язок), коли алгоритм управління коригується на основі фактичного значення вихідної величини, що дозволяє враховувати реальні відхилення від заданого значення. У нашому випадку буде використано принцип управління по відхиленню.

На рисунку 2.5 зображена схема САК з керування по принципу відхилення або зі зворотнім зв'язком.

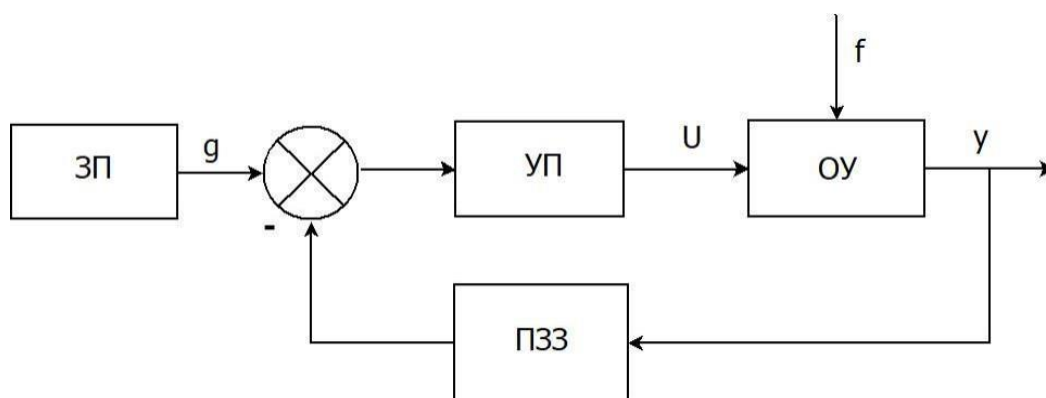


Рисунок 2.5 – САК по принципу відхилення (зворотній зв'язок)

Мікроконтролер генерує ШІМ сигнал необхідної частоти та передає його на вхід другого двигуна з енкодером. Імпульси, що надходять від цього двигуна, є вихідною величиною та вносять корекцію у зворотний зв'язок.

Далі САК класифікуються [21] за такими критеріями:

а) за алгоритмом роботи:

- 1) системи стабілізації – підтримують регульований параметр на заданому рівні;
- 2) програмне керування – алгоритм заданий як функція часу, де вихідна величина змінюється відповідно до заданого закону;
- 3) слідкуючі системи – алгоритм роботи невідомий заздалегідь, і регульована величина має відтворювати зміну певної зовнішньої величини;

4) екстремальні системи – показник якості або ефективності процесу подається як функція параметрів системи, де сама функція має екстремум (максимум або мінімум);

5) системи оптимального керування – процес керування відбувається так, щоб певна характеристика процесу була оптимальною;

6) адаптивні системи – деякі параметри об'єкта керування та інших елементів системи можуть змінюватися відповідно до умов.

Наш алгоритм належить до програмного керування, де вихідна величина визначається як результат ПД-регулювання.

б) по виду диференціальних рівнянь, що описують систему;

1) лінійні (статичні характеристики всіх елементів є прямолінійними); 2) нелінійні (статична характеристика є нелінійною).

в) за характером сигналів в основних елементах; 1) безперервні;

2) дискретні – безперервний вхідний сигнал перетворюється на виході в послідовність імпульсів.

Наш проект нелінійний і сигнали дискретні. І останнє, розглянемо типові закони управління, що визначають алгоритм управління у функції від помилки управління. Під законом регулювання розуміють алгоритм, відповідно до якого керуючий пристрій формує вплив, що подається на вхід ОУ. Закони керування описуються передавальними функціями, які є одним із способів математичного опису динамічної системи.

## 2.2 Огляд законів керування

Тип передавальної функції керуючого пристрою визначає відповідний закон керування. Виділяють п'ять основних законів керування: пропорційний (П), інтегральний (І), пропорційно-інтегральний (ПІ), пропорційно-диференційний (ПД) і пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД).

П-регулятор є одним із найпростіших пристроїв та алгоритмів керування у  $u(t)u(t)u(t)$ , пропорційний вхідному сигналу (помилці регулювання)  $e(t)e(t)e(t)$  з коефіцієнтом пропорційності  $K$ . Цей коефіцієнт визначається пропорційною

частиною П-регулятора і протидіє відхиленню регульованої величини від заданого значення в поточний момент часу.

$$u(t) = K_p \cdot e(t), \quad (2.1)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт підсилення регулятора.

Чим більше відхиляється регульована величина, тим вищий вихідний сигнал відносно потрібного значення. Це означає, що статична помилка дорівнює величині цього відхилення. Може трапитися так, що система ніколи не досягне стабільного стану на заданому рівні. Збільшення коефіцієнта посилення знижує статичну помилку, підсилюючи різницю між вхідним та вихідним сигналами. Однак надмірне зростання цього коефіцієнта здатне викликати автоколивання, і подальше підвищення може призвести до нестабільності всієї системи.

У практичних випадках підсилювальні властивості П-регулятора визначаються такими параметрами:

– величина, обернена до коефіцієнта пропорційності  $K_p$ :

$$d = \frac{1}{K_p} \quad (2.2)$$

– межа пропорційності, відображена у відсотках і обчислена за формулою (2.3), показує, на скільки відсотків має змінитися вхідний сигнал від максимального значення, щоб вихід досяг зміни на 100%.

$$D = d \cdot 100\%. \quad (2.3)$$

Автоколивання – це незгасаючі коливання, які виникають у дисипативній системі, де стійкий стан формується в умовах нерівноважного середовища при розсіюванні енергії, що надходить ззовні. Вони підтримуються за рахунок постійного (неперіодичного) зовнішнього впливу.

П-регулятор використовується в процесах, де не вимагається точне

утримання заданого значення, і як наслідок, виникає статична помилка. Це пояснюється тим, що вихідний сигнал не має достатньої сили для підтримання параметрів системи на потрібному рівні. Хоча регулятор може досягти необхідного значення, у випадку впливу зовнішніх збурень він не зможе повернути систему до початкового рівня, доки помилка не зросте до такого рівня, що вихідний сигнал стане досить потужним для впливу. Через це для нашого прикладу такий принцип регулювання не підходить.

ІІІ-регулятор застосовує ізодромне керування, генеруючи суму двох компонентів — сигналу, пропорційного помилці, та сигналу, пропорційного інтегралу від цієї помилки. Отже, вихідний сигнал ІІІ-регулятора  $u(t)$  визначається не лише значенням помилки керування  $e(t)$ , але й інтегралом цієї помилки.

$$U(t) = K_1 \cdot e(t) + K_0 \int_0^t e_t \cdot dt \quad (2.4)$$

де  $K_1$  — коефіцієнт посилення пропорційної частини;

$K_0$  — коефіцієнт посилення інтегральної частини.

Оскільки ІІІ-регулятор можна уявити як поєднання двох регуляторів, що працюють паралельно, його підсилювальні властивості визначаються двома параметрами: межею пропорційності  $d = 1 / K_1$ , оберненою до коефіцієнта  $K_1$ , і часом ізодрому  $T = 1 / K_0$ , оберненим до  $K_0$ . Система з ІІІ-регулятором має кращі динамічні характеристики порівняно з пропорційним законом. У перехідних процесах ізодромна система подібна до системи з пропорційним керуванням, а в сталому режимі — до інтегрального. Вища пропорційна константа зменшує вихідний рівень при однаковій помилці, а більша інтегральна константа уповільнює накопичення інтегральної складової. ІІІ-регулювання забезпечує нульову статичну помилку і стійкість до перешкод вимірювального каналу. Інтегральна частина компенсує статичну помилку шляхом безперервного накопичення похибки  $\varepsilon$  за певний час і створення керуючого сигналу, пропорційного накопиченій величині.

Слабка сторона ПІ-регулятора полягає в його повільній реакції на впливи, що можуть змінювати систему. Для його налаштування спочатку інтегральну постійну часу встановлюють на нуль, а пропорційний коефіцієнт — на максимальне значення. Потім, як і в налаштуванні ПІ-регулятора, зменшують пропорційний коефіцієнт доти, доки система не почне проявляти стабільні коливання. Найкраще значення пропорційного коефіцієнта — приблизно удвічі більше за те, при якому виникають коливання, а постійна часу інтегрування повинна бути приблизно на 20% меншою за період цих коливань. Оптимальним вважається перехідний процес із перерегулюванням близько 20%.

ПІД-регулятор об'єднує три елементи: пропорційний, інтегральний і диференціальний, що створює комплексний пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор. Вихідний сигнал ПІД-регулятора  $u(t)$  формується на основі значення регульовальної помилки  $e(t)$ , інтеграла від цієї помилки, а також її похідної, що дозволяє йому враховувати і накопичену помилку, і швидкість зміни помилки, забезпечуючи більш точне керування.

$$U(t) = K_1 \cdot e(t) + K_0 \int_0^t e(t) \cdot dt + K_2 \cdot \frac{de(t)}{dt}. \quad (2.5)$$

Підсилювальні властивості ПІД-регулятора визначаються трьома ключовими параметрами: межа пропорційності  $d = 1/K_1$ ; час ізодрому  $T_1 = 1/K_0$ , та час передування  $T_d = K_2$ . Системи з ПІД-регуляторами об'єднують переваги, властиві пропорційним, інтегральним і пропорційно-диференціальним регуляторам. Вони відрізняються відсутністю статичної помилки і забезпечують високу швидкість реакції на зміни.

### 2.3.1 Огляд конструкції фрезерного верстата з ЧПУ

Наш верстат є настільною моделлю фрезерного верстата, що має три осі. Він обробляє деталі за допомогою ріжучого інструменту тіл обертання, який обертається та переміщається вздовж осей X, Y та Z для виконання обробки.

Переміщення робочих елементів здійснюється через гвинтові передачі, а станина слугує основою для розміщення елементів компактного обладнання.

На рисунку 2.1 зображено загальний вигляд верстата.

Наш верстат обладнаний платою керування Arduino Uno. Плата зображена на рисунку 1.1.

Arduino Uno — це мікроконтролерна плата на основі чіпа ATmega328P, яка широко використовується в різних проєктах для автоматизації та керування. Завдяки своїй простоті в програмуванні, універсальності та можливості підключення додаткових датчиків і виконавчих механізмів, Arduino Uno стала популярним вибором у різних сферах, зокрема в системах керування малогабаритними верстатами.[13]

Для фрезерного верстата невеликих розмірів, Arduino Uno може виконувати функції контролера, керуючи рухом і роботою верстата. За допомогою драйверів крокових двигунів, Arduino може забезпечувати точне керування положенням інструмента по осях X, Y і Z. Додаткові сенсори, такі як датчики положення чи кінцеві вимикачі, можуть забезпечити точне зупинення в потрібних координатах, підвищуючи безпеку і точність обробки.

Arduino Uno також дозволяє підключати ШІМ-управління для контролю швидкості обертання ріжучого інструменту. Це дає змогу адаптувати верстат для обробки різних матеріалів. Написання програмного коду для Arduino Uno дозволяє задати параметри обробки, швидкість руху осей, швидкість обертання інструмента та інші важливі параметри, що робить її ефективною платформою для керування малогабаритним фрезерним верстатом.

### **2.3.2 Основні характеристики плати Arduino Uno**

Мікроконтролер: ATmega328P — популярний 8-бітний мікроконтролер від компанії Microchip Technology. Має оптимальний баланс між продуктивністю та енергоспоживанням, що робить його універсальним для широкого спектра завдань.

Кількість виводів. Цифрові входи/виходи: 14 цифрових пінів (виводів), 6 із

яких підтримують ШІМ (широотно-імпульсну модуляцію) для регулювання частоти сигналу, що дозволяє керувати, наприклад, швидкістю обертання двигуна.

Аналогові входи: 6 аналогових пінів, які можуть використовуватись для зчитування аналогових сигналів від датчиків, наприклад, для визначення положення повзунка або датчика обертання.

Тактова частота: 16 МГц — достатньо висока швидкість для більшості базових завдань керування, забезпечує швидке виконання команд і обробку даних.

Пам'ять. Флеш-пам'ять: 32 кБ для зберігання програмного коду. Приблизно 0.5 кБ зайнято завантажувачем (Bootloader), який забезпечує просте завантаження програм через USB.

Оперативна пам'ять SRAM: 2 кБ для роботи з тимчасовими змінними, що використовуються під час виконання програми.

EEPROM: 1 кБ для зберігання даних, які зберігаються навіть після вимкнення живлення.

Напруга живлення. Робоча напруга: 5 В — оптимальна для роботи з цифровими компонентами, доступними для Arduino.

Живлення через USB. Arduino Uno можна жити через USB, що забезпечує як програмування, так і живлення від комп'ютера.

Живлення через зовнішній роз'єм. від 7 до 12 В, для автономної роботи (наприклад, від адаптера або акумулятора).

USB-інтерфейс. Arduino Uno використовує інтерфейс USB Type-B для підключення до комп'ютера, через який можна завантажувати програми, а також вести моніторинг та налагодження роботи. USB також забезпечує живлення плати, що зручно для тестування та відладки.

Розширення можливостей. Arduino Uno має спеціальні роз'єми для підключення додаткових плат (шилдів), таких як драйвери крокових двигунів, Wi-Fi або Bluetooth модулі, що дозволяє розширювати функціональні можливості плати.

Модулі ШІМ можуть керувати двигунами і підключатися до шилдів для управління потужними двигунами на верстатах.

Зручне програмування. Плата підтримує Arduino IDE — інтуїтивно

зрозуміле середовище для написання коду з бібліотеками для роботи з різними датчиками та модулями, яке суттєво спрощує процес програмування. Користувачі можуть писати код на мові, схожій на C/C++.

Світлодіоди індикації. Вбудований світлодіод на цифровому піні 13: можна використовувати для відладки або просто тестування плати.

Світлодіоди живлення та передачі даних: вказують на підключення до живлення та на передачу даних через USB.

Температурний діапазон роботи: Arduino Uno розрахована на роботу при температурі від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ , що робить її придатною для використання в різних умовах, включаючи промислові.

### **2.3.3 Переваги Arduino Uno для фрезерного верстата**

Можливість точного керування кроковими двигунами для позиціонування по осям.

ШІМ дозволяє змінювати швидкість обертання ріжучого інструмента.

Проста інтеграція з датчиками положення та кінцевими вимикачами для контролю робочої області.

Легке підключення до драйверів двигунів і інших модулів для побудови функціональної системи керування.

Arduino Uno є оптимальним рішенням для малогабаритних фрезерних верстатів, оскільки вона забезпечує гнучкість, надійність та достатню обчислювальну потужність для керування основними компонентами верстату.

### **2.3.4 Двигуни та їх драйвери**

На наш верстат встановлено три двигуни типу Nema 17 HS4401, який є високоточним кроковим двигуном, що підходить для застосувань у верстатах з ЧПУ, принтерах і системах автоматизації, де необхідний точний контроль руху.

Цей двигун оснащений чотирма проводами для підключення до драйвера, що підтримує біполярний режим роботи. Використовується переважно з

драйверами, здатними забезпечити необхідний струм, для оптимального контролю його роботи та уникнення перегріву. Він чудово підходить для CNC-машин, принтерів, різаків машин та інших додатків, де важлива точність.



Рисунок 2.6 – Кроковий двигун Nema 17 HS4401

Таблиця 2.1 містить ключові технічні характеристики крокового двигуна Nema 17 HS4401.

Таблиця 2.1 - ключові технічні характеристики крокового двигуна Nema 17 HS4401.

Параметр	Значення
Тип двигуна	Біполярний кроковий
Крок кута	1,8°
Потужність, P	10-25 Вт(залежить від навантаження)
Утримуючий момент	0.42 Н·м (або 0.45 Н·м)
Струм на фазу	1.5 А (або 1.68 А)
Обертаючий момент	3,5 Н·см <sup>2</sup>
Момент інерції	260 Г/см <sup>2</sup>
Осьовий	≤0,02 мм
Макс. радіальний	75N
Макс. осьовий	25N
Опір ізоляції	≥100 МΩ
Кількість пар полюсів	50
Опір фази	1,2 Ом
Індуктивність	~2.8 мГн
Клас ізоляції	B (130°C)
Розмір корпусу	57 x 57 мм
Довжина корпусу	113 мм
Діаметр вала	5 мм
Довжина вала	24 мм
Тип вихідного вала	Плоский (D)
Кількість виводів	4
Довжина проводів	400 мм
Маса	~280 г

Для подальшого вивчення автоматизації фрезерувального процесу на верстаті з ЧПК необхідно розробити його структурну схему, визначити передавальні функції для кожної частини системи, а також усієї системи — як

відкритої, так і замкненої. Далі слід провести аналіз стабільності системи та оцінити її основні характеристики.

За основу беремо дану структурну схему[18] (рисунок 2.7).

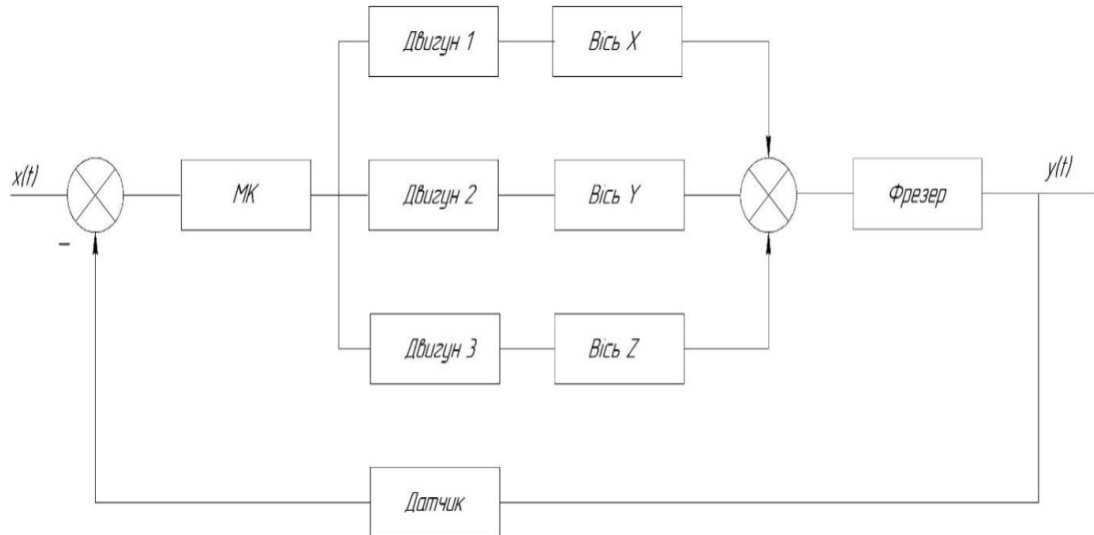


Рисунок 2.7 – Структурна схема фрезерувального верстата з ЧПК

Механізм керування (МК) – відповідає за обробку вхідного сигналу  $x(t)$ , формування керуючих команд і передачу їх до виконавчих механізмів.

Приводи (Двигун 1, Двигун 2, Двигун 3) – реалізують переміщення фрезерного інструменту по трьох координатах: X, Y, Z.

Осі X, Y, Z – координатні осі, по яких виконується рух приводу для позиціонування інструменту.

Датчики – забезпечують зворотній зв'язок, контролюючи поточне положення інструменту на кожній осі. Інформація з датчиків надходить до блоку керування для корекції руху.

Фрезер – кінцевий виконавчий механізм, що здійснює обробку деталі відповідно до заданих програмою траєкторій.

Суматор сигналів – використовується для порівняння вхідного сигналу  $x(t)$  із зворотним сигналом  $y(t)$  який формується датчиками. Результат подається до блоку керування для обчислення помилки і корекції руху.

В якості драйверів для наших двигунів використаємо три драйвери моделі DRV8825.

Драйвер DRV8825 — це інтегроване рішення для керування біполярними кроковими двигунами, DRV8825яке широко використовується в обладнанні для принтерів, сканерів та інших автоматизованих систем.

Основні характеристики DRV8825:

- Підтримка напруги живлення:
- Діапазон напруги: 8.2 В - 45 В, що дозволяє працювати з широким спектром джерел живлення.
- Оптимальне використання при напрузі близько 24 В для більшості стандартних застосувань.
- Максимальний вихідний струм:
  - До 2.5 А на фазу (з належним охолодженням).
  - Для стандартного використання без додаткових радіаторів рекомендовано обмежити струм до 1.5–2 А.
- Підтримує мікрокрокування до 1/32 кроку, що забезпечує плавність руху та високу точність позиціювання.
- Перевага для систем, які потребують високої роздільної здатності, наприклад, у 3D-принтерах або ЧПУ.
- Контроль струму:
  - Інтегровані режими швидкого, повільного та змішаного спаду.
  - Струм можна регулювати за допомогою потенціометра, що дозволяє налаштувати драйвер під конкретний двигун.
- Інтегрований захист від перевантаження по струму.
- Захист від перегріву, замикання на землю, замикання між обмотками двигуна.
- Додатковий захист у разі заниженої напруги (UVLO).
- Інтерфейс:
  - Простий у використанні інтерфейс STEP/DIR, який дозволяє інтеграцію з мікроконтролерами (наприклад, Arduino або STM32).

- Можливість реверсу обертання за допомогою входу DIR.

Драйвер має таку архітектуру:

- Драйвер має дві Н-мости, реалізовані на основі N-канальних MOSFET-транзисторів, які керують обмотками двигуна.
- Налаштування мікрокрокування виконується через п'ять контрольних входів (MODE0–MODE4).
- Вбудований осцилятор забезпечує плавність роботи без додаткових компонентів.

Драйвер зображений на рисунку 2.8.

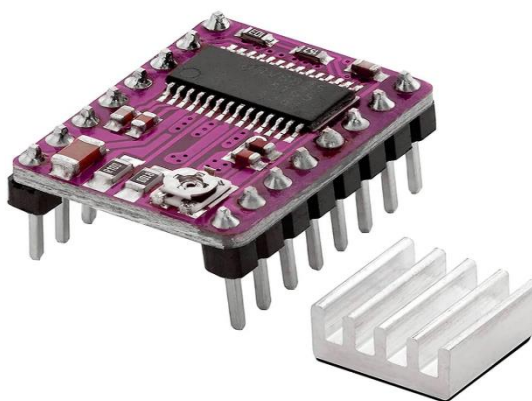


Рисунок 2.8 – Драйвер крокового двигуна DRV8825

### 2.3.5 Живлення верстата ЧПК

Для живлення верстата використаємо блок живлення LEDTEX 24V. Блок живлення LEDTEX 24V є одним із популярних рішень для забезпечення стабільної роботи світлодіодних (LED) систем. Він використовується в різних освітлювальних проєктах, зокрема для підсвітки інтер'єрів, зовнішньої архітектурної підсвітки, рекламних конструкцій, а також для промислового застосування. Нижче розглянемо технічні характеристики, переваги, принцип роботи та галузі використання цього пристрою.

- Вхідна напруга (АС): 100–240 В (50–60 Гц).

- Підтримка широкого діапазону вхідної напруги забезпечує стабільну роботу навіть при перепадах електроживлення.

- Вихідна напруга (DC): 24 В.

- Ця напруга є стандартною для багатьох LED-систем.

- Потужність: Залежно від моделі, потужність може варіюватися від 30 Вт до 500 Вт, що дозволяє підібрати пристрій для конкретного навантаження.

- Коефіцієнт корисної дії (ККД): 85–95%.

- Високий ККД дозволяє знизити втрати енергії та забезпечити економічність.

- Рівень захисту: IP20, IP65, IP67 або інші.

Залежно від типу корпусу, пристрій може бути призначений для використання всередині приміщень або в умовах високої вологості та пилу.

Захист:

- Від короткого замикання.

- Від перевантаження.

- Від перегріву.

Охолодження: Пасивне (радіатор) або активне (вентилятор).

Тип охолодження залежить від потужності пристрою.

Температурний діапазон роботи: -20°C до +50°C.

У верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПУ) блоки живлення, такі як LEDTEX 24V, відіграють важливу роль у забезпеченні стабільної роботи електронних компонентів. Завдяки своїм технічним характеристикам, блок живлення цього типу ідеально підходить для живлення периферійних пристроїв, електродвигунів і контролерів верстатів ЧПУ.

Блок живлення зображений на рисунку 2.9.



Рисунок 2.9 - Блок живлення LEDTEX 24V

Блок живлення LEDTEX 24V є ефективним і надійним рішенням для забезпечення стабільної роботи електроніки та механіки в системах ЧПУ, що сприяє підвищенню точності та надійності верстатів.

#### 2.4 Розрахунок системи керування

Для кожного елемента верстата потрібно знайти передавальні функції. Щоб обчислити передавальну функцію обраних крокових двигунів, скористаюся формулою (2.6).

$$W(s) = \frac{2p^2\Phi_M n l_0}{s^2 J + sD + 2p^2\Phi_M n l_0} \quad (2.6)$$

де  $p$  – кількість пар полюсів;

$\Phi_M$  – магнітний потік ( $\text{Тл} \cdot \text{м}^2$ );  $n$  – кількість витків;

$l_0$  – сила струму (А);

$J$  – момент інерції ( $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ );

$D$  – коефіцієнт в'язкого тертя ( $\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{рад}^{-1}$ ).

$$W_{\text{дв}(1,2,3)} = \frac{2 \cdot 50^2 \cdot 8,4 \cdot 1,55 \cdot 3,5}{0,000026s^2 + s + 2 \cdot 50^2 \cdot 8,4 \cdot 1,55 \cdot 3,5} =$$

$$= \frac{227850}{0,000026s^2 + s + 227850}$$

На верстаті для передачі крутного моменту від двигунів до рухомих частин (порталу) використовується передача типу гвинт–гайка (рисунок 2.8). Основні параметри цієї передачі такі:

- Розміри вала (довжина × діаметр): 790 мм × 8 мм;
- Розміри гайки (висота × діаметр): 15 мм × 22 мм;
- Крок різьби: 1 мм;
- Матеріал вала: сталь С45;
- Матеріал гайки: бронза.



Рисунок 2.10 – Гвинт трапецеїдальний [8]

Для такого типу передач зазвичай використовують безінерційну ланку. Однак спочатку необхідно визначити передаточне відношення для передачі гвинт–гайка за формулою (2.7).

$$U = \frac{p}{\pi D} \quad (2.7)$$

де  $p$  – крок різі, мм;

$D$  – діаметр, мм.

$$U = \frac{1}{3,14 \cdot 8} = 0,04$$

Передавальна функція для передачі гвинт–гайка матиме такий вигляд:

$$W_{\text{вл}(1,2,3)} = 0,04.$$

Далі потрібно знайти передавальну функцію електродвигуна, який використовується як шпиндель для фрезерування [9]. Ось основні характеристики шпинделя з водяним охолодженням, який є в конструкції фрезерного верстата:

- Діаметр: 80 мм
- Регулювання швидкості: через вихідну напругу інвертора та налаштування робочого режиму
- Швидкість обертання: до 24,000 об/хв
- Охолодження: водяне
- Потужність: 2,2 кВт
- Напруга: 220 В
- Номінальний струм: 10 А
- Частота: від 0 Гц до 400 Гц
- Підшипники: 2x7005С Р4 DT і 2x7002С Р4DT
- Цанга: ER20
- Діаметри фрез: 13 мм, 12 мм, 11 мм, 10 мм, 9 мм, 8 мм, 7 мм, 6,35 мм, 6 мм, 5 мм, 4 мм, 3,175 мм, 3 мм, 2 мм, 1 мм

Передавальна функція розраховується за такою формулою:

$$W(s) = \frac{k_{дв}}{s} \quad (2.8)$$

де  $k_{дв}$  – коефіцієнт передачі двигуна (2.9).

$$k_{дв} = \frac{1}{k\Phi} \quad (2.9)$$

де  $k\Phi$  – номінальне значення струму збудження (2.10)

$$k\Phi = \frac{U_H - I_{я}R_d}{\omega} \quad (2.10)$$

де  $U_H$  – номінальна напруга, В;

$I_{я}$  – струм у обмотці якоря,

$A$ ;  $R_d$  – опір у обмотці, Ом;

$\omega_H$  – номінальна кутова швидкість, рад/с (формула 2.11).

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} \quad (2.11)$$

де  $n_H$  – кутова швидкість вихідного валу, рад/с (формула 2.12).

$$n_H = 2\pi V, \quad (2.12)$$

де  $V$  – номінальна частота обертання, об/сек.

$$n_H = 2 \cdot 3,14 \cdot 1570,$$

$$\omega_H = \frac{3,14 \cdot 1570}{30} = 164,3,$$

$$k\Phi = \frac{220 - 10 \cdot 0,324}{164,3} = 1,32,$$

$$k_{дв} = \frac{1}{1,32} = 0,7,$$

$$W_{фрез} = \frac{0,76}{s}.$$

Як датчик швидкості застосуємо тахогенератор, що можна розглядати як безінерційний лінійний елемент. У такому разі передавальна функція датчика швидкості має вигляд (2.13):

$$W_{датч}(s) = \frac{U_{н.тг}}{\omega_{н.тг}}, \quad (2.13)$$

де  $U_{н.тг}$  – номінальна напруга тахогенератора, В;

$\omega_{н.тг}$  – номінальна швидкість обертання тахогенератора, 1/с (2.14).

$$\omega_{н.тг} = \frac{2\pi n_{н.тг}}{60} \quad (2.14)$$

де  $n_{н.тг}$  – номінальна частота обертання тахогенератора.

За формулами (2.13)-(2.14):

$$\omega_{н.тг} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 15000}{60} = 1570,$$

$$W_{\text{датч}}(s) = \frac{100}{1570} = 0,064.$$

Arduino Uno можна розглядати як імпульсний елемент системи з певними характеристиками дискретизації. Контролер має 10-бітний аналогово-цифровий перетворювач, що забезпечує 1024 рівні дискретності.

При робочій напрузі 0-5 В роздільна здатність складає близько 0,0049 В на рівень, що дозволяє досить точно передавати аналогові сигнали. На виході, за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШИМ), Arduino Uno може імітувати аналоговий сигнал з роздільною здатністю 8 біт (256 рівнів), що також підтримує непогану лінійність для багатьох додатків.

Кварцовий генератор мікроконтролера Arduino Uno працює на частоті 16 МГц. Один такт програми виконується за 1/16 цієї частоти, що забезпечує високу швидкість обробки. За хвилину Arduino Uno виконує близько 960 мільйонів тактів програми, що дозволяє ефективно обробляти навіть досить складні завдання в реальному часі.

Отже, якщо Arduino Uno виконує 960 мільйонів тактів на хвилину, то його дискретність складає 960 млн тактів за цей час, а період дискретності  $T = 1,04 \times 10^{-9}$  хвилин. Це зводить дискретність контролера майже до нуля за часом, тоді як найбільша постійна часу системи дорівнює 1 хвилині. Таким чином, робимо висновок, що Arduino Uno не створює затримок у системі, тому для його передавальної функції можна прийняти значення, рівне одиниці.

$$W_{\text{МК}} = 1.$$

На рисунку 2.9 зображено структурну схему САК

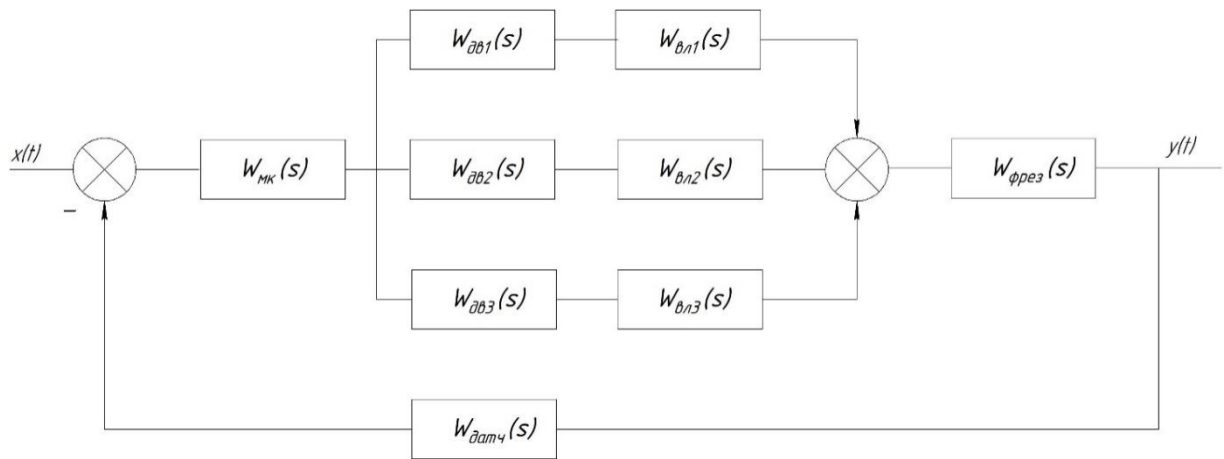


Рисунок 2.11 – Структурна схема САК

Щоб оцінити характеристики системи, потрібно визначити передавальні функції як розімкнутої, так і замкнутої систем. Це дозволить провести аналіз стійкості, динамічних властивостей та інших важливих параметрів.

$$W_p(s) = W_{\text{мк}} \cdot (W_{\text{дв1}} W_{\text{вл1}} + W_{\text{дв2}} W_{\text{вл2}} + W_{\text{дв3}} W_{\text{вл3}}) \cdot W_{\text{фрез}}, \quad (2.15)$$

$$W_3(s) = \frac{W_{\text{мк}} \cdot ((W_{\text{дв1}} W_{\text{вл1}}) + (W_{\text{дв2}} W_{\text{вл2}}) + (W_{\text{дв3}} W_{\text{вл3}})) \cdot W_{\text{фрез}}}{1 + W_{\text{мк}} \cdot ((W_{\text{дв1}} W_{\text{вл1}}) + (W_{\text{дв2}} W_{\text{вл2}}) + (W_{\text{дв3}} W_{\text{вл3}})) \cdot W_{\text{фрез}} \cdot W_{\text{датч}}}, \quad (2.16)$$

Підставивши знайдені значення окремих передавальних функцій у формули (2.15) та (2.16), можна отримати загальну передавальну функцію розімкнутої системи  $W_p(s)$ . Це дасть змогу оцінити її динамічні властивості та поведінку в умовах відсутності зворотного зв'язку:

$$W(s) = \frac{20779,92}{p \cdot (0,000003s^3 + 0,04s^2 + 9114s)}.$$

Далі, підставивши відомі передавальні функції у формулу (2.16), обчислимо передавальну функцію замкнутої системи  $W_3(s)$ .

$$W_3(s) = \frac{0,06s^3 + 831,2s^2 + 189,39 \cdot 10^6 s}{9 \cdot 10^{-12} \cdot s^6 + 2,4 \cdot 10^{-7} \cdot s^5 + 0,06 \cdot s^4 + 729,12 \cdot s^3 + 8,3 \cdot 10^7 s^2 + 1,2 \cdot 10^7 s}$$

Перевіримо стійкість замкненої системи за допомогою критерію Михайлова, для чого побудуємо відповідну криву. У програмному середовищі MATLAB виконаємо необхідні перетворення для отримання характеристичного полінома в комплексній площині. Це реалізується через виконання наступних команд у командному рядку (рис. 2.13).

```
>> W
W =

      0.06 s^3 + 831.2 s^2 + 1.894e08 s
-----
9e-12 s^6 + 2.4e-07 s^5 + 0.06 s^4 + 729.2 s^3
      + 8.3e07 s^2 + 2.014e08 s

Continuous-time transfer function.

>> syms s w
>> D=9e-12*s^6 + 2.4e-07*s^5 + 0.06*s^4 + 729.2*s^3 + 8.3e07*s^2 + 2.014e08*s;
>> s=j*w;
>> Djw=compose(D,s)

Djw =

- (5570730176784211*w^6)/618970019642690137449562112 +
+ (w^5*4533471823554859i)/18889465931478580854784 + (3*w^4)/50 -
- (w^3*3646i)/5 - 83000000*w^2 + w*201400000i
```

Рисунок 2.12 – Частина коду для розрахунку комплексного характеристичного поліному

Далі побудуємо криву Михайлова (рис. 2.14). Код програми для її побудови наведено на рисунку 2.13.

```
>> Re=[];Im=[];
for w=0:0.1:100
Djw =-(5570730176784211*w^6)/618970019642690137449562112+
+(w^5*4533471823554859i)/18889465931478580854784+(3*w^4)/50-
-(w^3*3646i)/5-83000000*w^2+w*201400000i;
Rel=real(Djw);
Im1=imag(Djw);
Re=[Re,Rel];
Im=[Im,Im1];
end
>> figure, plot(Re,Im)
>> grid on
```

Рисунок 2.13 – Код для побудови кривої Михайлова

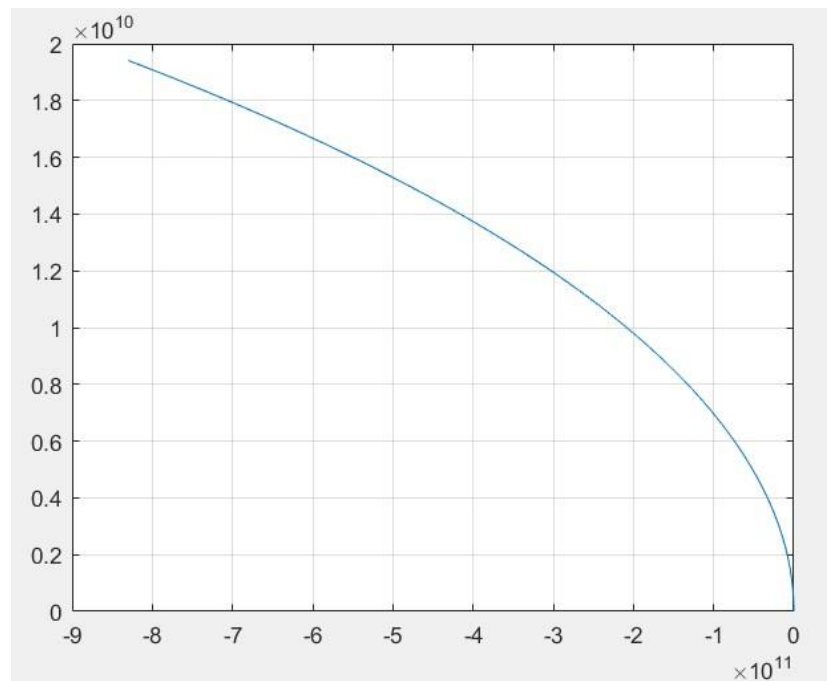


Рисунок 2.14 – Крива Михайлова

З графіка (рис. 2.15) можна зробити висновок, що система стабільна. Це

пояснюється тим, що крива характеристичного рівняння виходить у нескінченність у шостий квадрант, що відповідає порядку рівняння  $n=6n$ .

Перевіряємо за критерієм Найквіста. Для підтвердження стійкості замкнутої системи необхідною та достатньою умовою є відсутність прaviх коренів у характеристичному рівнянні ( $l=0$ ). Також важливо, щоб амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) розімкнутої системи (рис. 2.15) не охоплювала точку  $(-1;j0)$ .

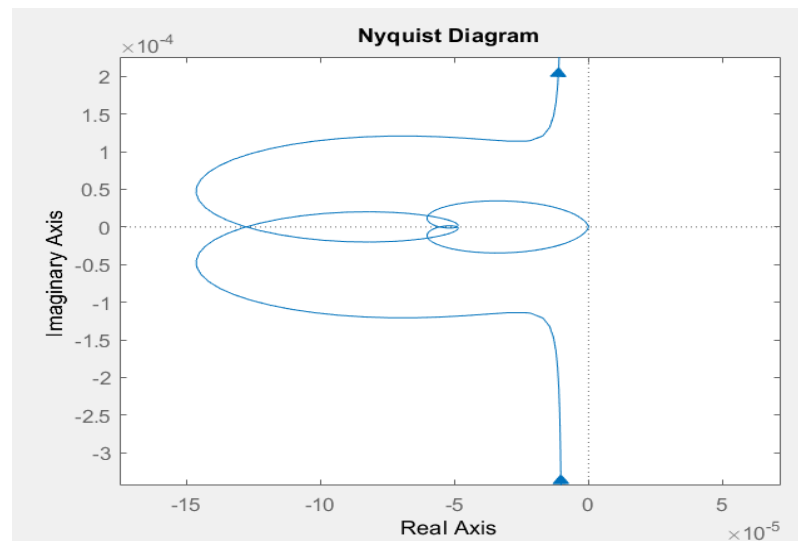


Рисунок 2.15 – АФЧХ системи керування верстату з ЧПК

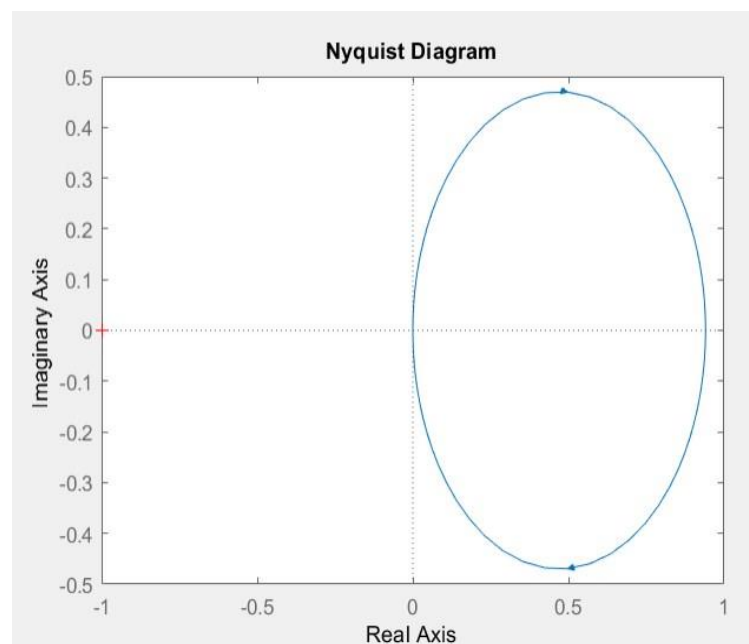


Рисунок 2.16 – Масштабована АФЧХ до нуля координат

Зробимо оцінку нашої системи автоматичного керування. Для цього робимо розрахунок показників якості системи. Будуємо графік перехідної характеристики (рис. 2.17) і робимо його аналіз.

На графіку видно що час встановлення нашої системи складає  $t_p = 5,1$  с.

За формулою 2.17 визначаємо відсоток перерегулювання:

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_{\infty}}{h_{\infty}} \cdot 100, \quad (2.17)$$

$$\sigma = \frac{1,22 - 0,99}{0,99} \cdot 100 = 23\%.$$

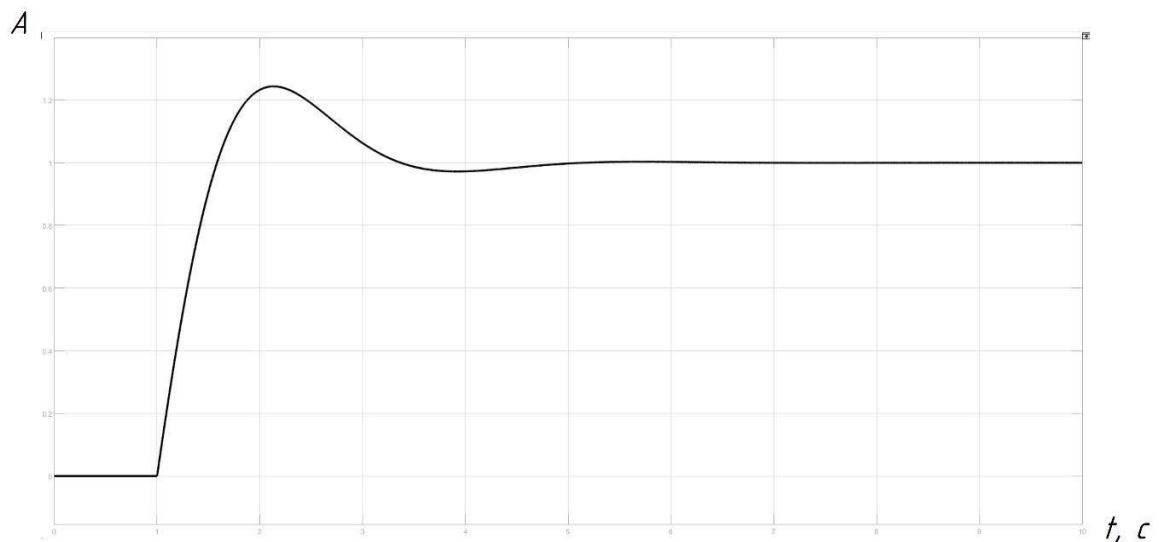


Рисунок 2.17 – Перехідна характеристика системи керування ЧПК

Під час роботи фрезерного верстата з ЧПУ обладнання піддається впливу різних факторів, таких як вібрації, нерівності поверхні, зміни тиску, температури та сил різання. Такі впливи можуть негативно позначатися на роботі верстата. Наприклад, крокові двигуни, які забезпечують рух осей, можуть пропускати кроки, що призводить до зниження точності позиціонування інструменту.

Ці фактори також можуть спричинити втрату стійкості системи, особливо якщо робота відбувається поблизу межі стійкості. Щоб уникнути таких проблем,

важливо забезпечити стабільну роботу системи з достатнім запасом відстані від кордону стійкості.

Отже, можна дійти висновку, що для забезпечення надійної роботи системи керування фрезерного верстата з ЧПУ критично важливо визначити запаси стійкості за фазою та амплітудою. Це дозволить мінімізувати ризики втрати стійкості під впливом зовнішніх факторів.

Для визначення запасу стійкості необхідно побудувати логарифмічні амплітудно-частотну (ЛАЧХ) та фазо-частотну характеристики (ЛФЧХ) розробленої системи. Графіки характеристик зобразимо на рисунку 2.18.

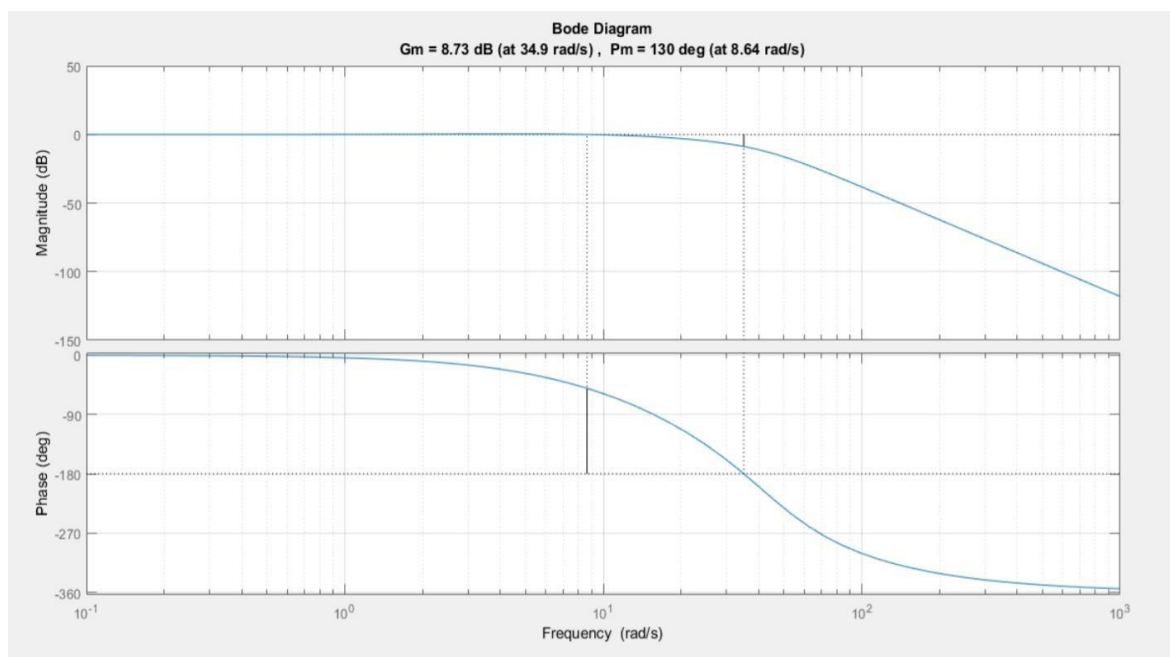


Рисунок 2.18 – ЛАЧХ та ЛФЧХ системи керування

На основі отриманого графіка можна визначити такі показники стійкості:

- запас стійкості за амплітудою:  $\Delta A = 8,73$  дБ;
- запас стійкості за фазою:  $\Delta\varphi = 130^\circ$ .

Аналізуючи графік, видно, що запас стійкості за амплітудою лежить у межах від 6 дБ до 20 дБ, а запас за фазою потрапляє в діапазон від  $30^\circ$  до  $600^\circ$ . Це свідчить про те, що розроблена система має нормальне демпфування і є стійкою.

## 2.6 Висновки до розділу

Для створення автоматизованої системи керування було проаналізовано методи управління фрезерним верстатом з ЧПУ та відповідні закони регулювання.

Розроблено макет фрезерного верстата з ЧПУ, детально досліджено його основні компоненти та визначено передавальні функції кожного елемента. На основі цього була спроектована система керування.

Проведено аналіз стійкості та якості роботи системи управління. Результати досліджень показали, що система є стійкою, а отримані характеристики запасів стійкості та структури відповідають вимогам до таких систем. Проте, показники часу встановлення  $t_p = 5,1$  та перерегулювання  $\sigma = 23\%$  не задовольняють стандарти.

Для вдосконалення системи у третьому розділі передбачено оснащення її ПІД-регулятором, підбір його параметрів та порівняння нових показників часу встановлення й перерегулювання з отриманими у попередньому розділі.

## 3 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВЕРСТАТУ З ЧПК

### 3.1 Структурна схема системи з ПІД-регулятором

Фрезерний верстат із числовим програмним керуванням — це складна система з багатьма змінними, які динамічно змінюються під час роботи. Створення ефективної системи управління таким обладнанням є серйозним викликом, адже вона повинна забезпечувати високу точність і стабільність. Наприклад, під час обробки поверхонь, особливо циліндричних, двигуни не повинні втрачати кроки, щоб уникнути похибок. Окрім цього, робота шпинделя має залишатися стабільною протягом усього технологічного циклу.

Для цього використовуємо ПІД-регулятор. Але, на систему керування верстату під час роботи можуть впливати чинники, які не завжди враховуються під час розробки системи керування. Тому важливим завданням є автоматичне налаштування параметрів регулятора. У разі потреби також можна виконати ручний підбір параметрів ПІД-регулятора для забезпечення оптимальної роботи системи.

Моделювання системи з ПІД-регулятором будемо робити у MatLab.

На рисунку 3.1 зображено змодельовану систему у середовищі MatLab. У ПІД-регулятор заводимо стандартні значення, вони зображені на рисунку 3.2.

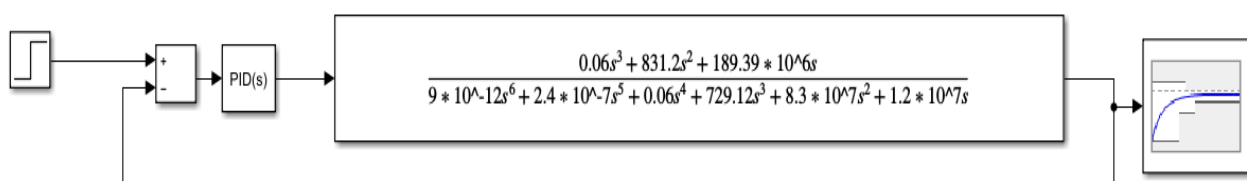


Рисунок 3.1 – Система керування верстатом з ЧПК з ПІД-регулятором та зворотнім зв'язком

▼ Compensator formula

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Main Initialization Output Saturation Data Types State Attribute

Controller parameters

Source: internal

Proportional (P): 1

Integral (I): 1

Derivative (D): 0

Use filtered derivative

Filter coefficient (N): 100

Рисунок 3.2 – Налаштування параметрів ПД-регулятора

Графік перехідної характеристики, отриманий із використанням стандартних параметрів ПД-регулятора, представлений на рисунку 3.3. У зв'язку з цим актуальним є завдання автоматичного налаштування параметрів регулятора для досягнення оптимальної роботи системи. Також можливий ручний підбір параметрів ПД-регулятора залежно від вимог до процесу управління.

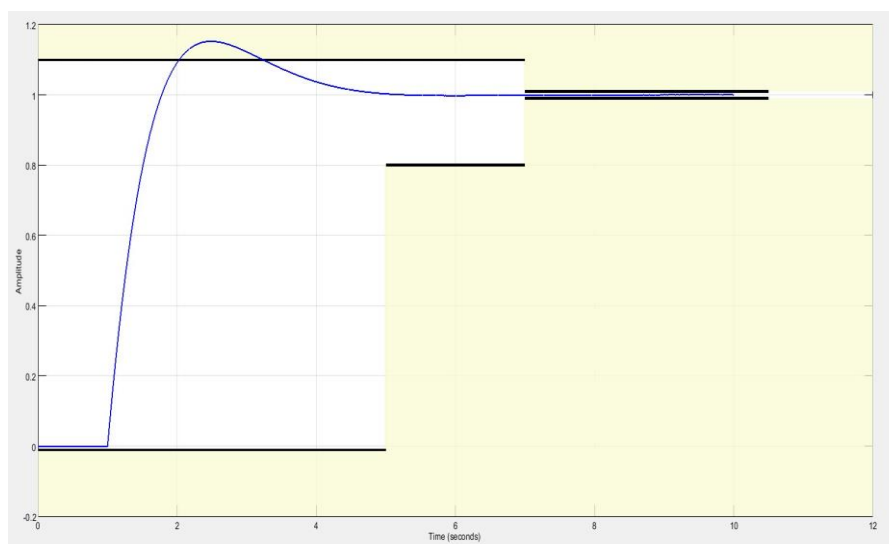


Рисунок 3.3 – Графік перехідної характеристики, побудований на основі стандартних значень коефіцієнтів ПД-регулятора

Щоб покращити показники перерегулювання та часу встановлення,

застосуємо такий алгоритм.

Відкриваємо налаштування параметрів ПІД-регулятора (рис.3.4). Чорним прямокутником виділено кнопку Tune, яка дозволяє перейти до вікна оптимізації коефіцієнтів ПІД-регулятора (рис. 3.5).

Source: internal

Proportional (P): 1

Integral (I): 1

Derivative (D): 0

Use filtered derivative

Filter coefficient (N): 100

Automated tuning

Select tuning method: Transfer Function Based (PID Tuner App) Tune...

Рисунок 3.4 – Вікно налаштування ПІД – регулятора

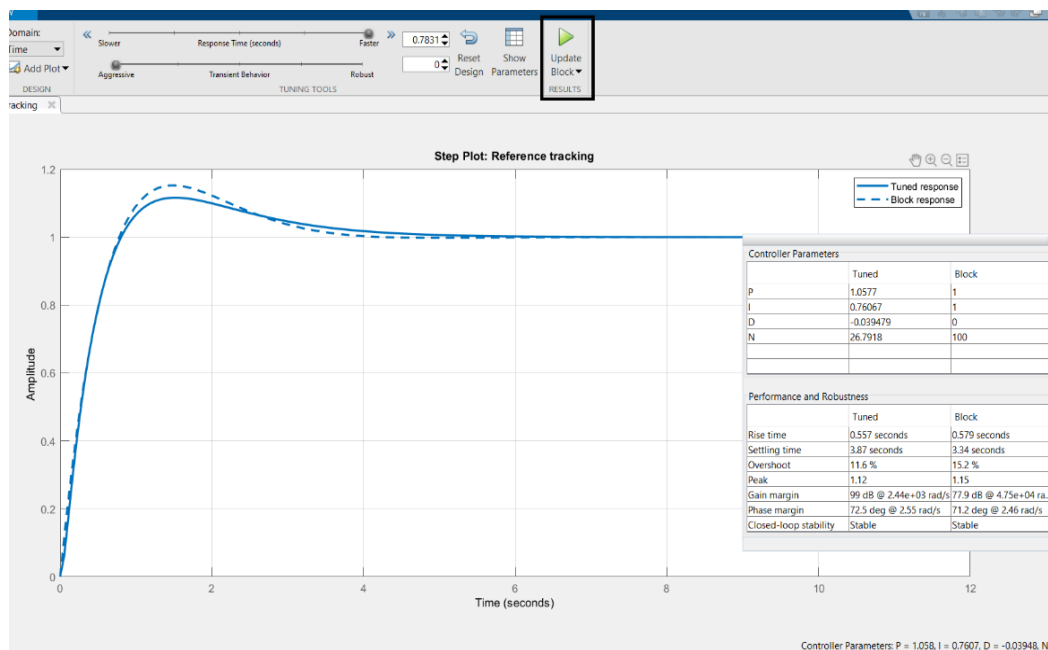


Рисунок 3.5 – Вікно оптимізації ПІД – регулятора

На рисунку 3.5 чорним прямокутником позначено кнопку, за допомогою якої можна внести оновлені значення до блоку ПІД-регулятора.

Регулюючи параметр часу реакції (Response time), підбираємо оптимальні

значення коефіцієнтів для налаштування ПД-регулятора.

У вікні Controller Parameters (рис. 3.6) відображаються поточні коефіцієнти блоку ПД-регулятора (стовпець Block) та нові значення, отримані під час налаштування (стовпець Tuned).

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	1.0577	1
I	0.76067	1
D	-0.039479	0
N	26.7918	100
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	0.557 seconds	0.579 seconds
Settling time	3.87 seconds	3.34 seconds
Overshoot	11.6 %	15.2 %
Peak	1.12	1.15
Gain margin	99 dB @ 2.44e+03 rad/s	77.9 dB @ 4.75e+04 ra...
Phase margin	72.5 deg @ 2.55 rad/s	71.2 deg @ 2.46 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Рисунок 3.6 – Параметри до та після налаштування

У цьому ж вікні можна побачити додаткові параметри, такі як час зростання (Rise time), час встановлення (Settling time), перерегулювання (Overshoot) та пік (Peak).

Перевага цього підходу полягає в можливості безпосереднього спостереження за основними характеристиками системи під час налаштування та їх порівняння з початковими значеннями.

Аналізуючи результати (рис. 3.6), можна зазначити, що після оптимізації параметрів ПД-регулятора час встановлення дещо збільшився, але перерегулювання суттєво зменшилося — з 15,2 % до 11,6 %.

У цьому випадку збільшення часу встановлення не має критичного впливу,

адже цей параметр не є вирішальним. Натомість велике перерегулювання може спричинити серйозні проблеми, наприклад:

- вихід швидкості переміщення або частоти обертання за межі допустимих значень;
- зниження точності позиціонування через пропуск кроків кроковими двигунами;
- порушення якості оброблюваних поверхонь через надмірну швидкість обертання, що може також призвести до поломки інструменту або заготовки.

Оновлені значення параметрів наведені на рисунку 3.7.

▼ Compensator formula

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Main   Initialization   Output Saturation   Data Types   State Attributes

Controller parameters

Source:

Proportional (P):

Integral (I):

Derivative (D):

Use filtered derivative

Filter coefficient (N):

Рисунок 3.7 - Оновлені значення параметрів

Оновлений графік перехідної характеристики системи керування фрезерним верстатом з ЧПУ представлено на рисунку 3.8.

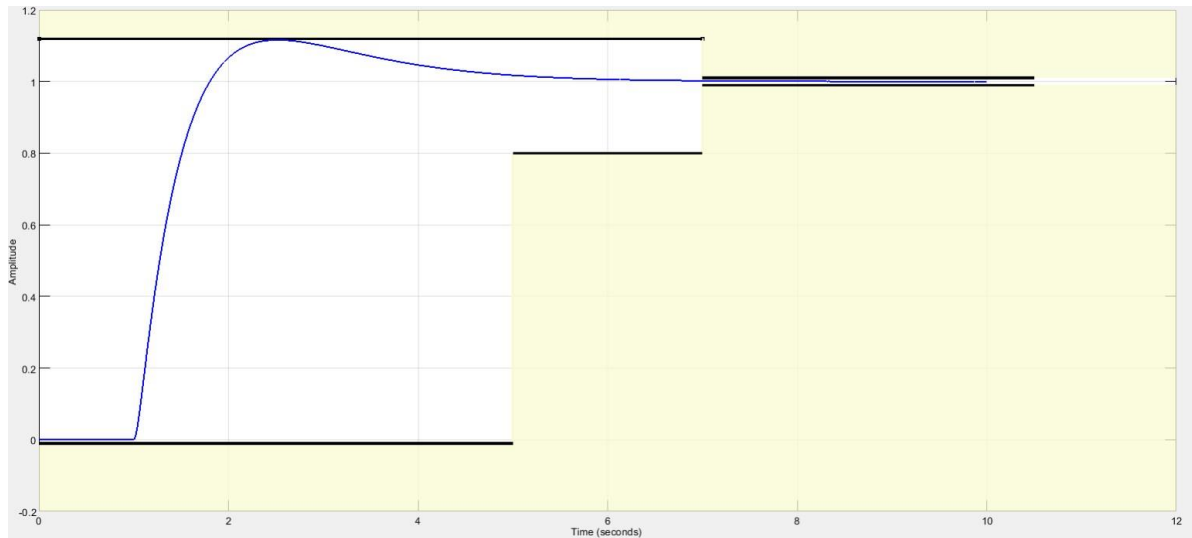


Рисунок 3.8 – Графік перехідної характеристики з оптимізованими значеннями коефіцієнтів ПД-регулятора

Отже, отримані параметри відповідають вимогам, що висуваються до розробленої конструкції, а також цілям і завданням, поставленим перед фрезерним верстатом з ЧПУ.

Верстат орієнтований на виконання фрезерної обробки в умовах одиничного та експериментального виробництва.

### 3.2 Розробка програми керування

Керуюча програма для настільного фрезерного верстата з числовим програмним керуванням (ЧПК) розроблена з урахуванням багатофункціональності та зручності управління. Програма реалізує кілька способів керування: за допомогою пульта дистанційного керування (ІЧ-пульт), через Bluetooth-з'єднання з мобільним пристроєм, а також програмне керування через комп'ютер із використанням 3D-моделей і G-коду.

Для реалізації було використано мікроконтролер Arduino Uno, який працює в парі з кроковими двигунами, Bluetooth-модулем HC-06 (рис. 3.9) та ІЧ-приймачем. Управління двигунами здійснюється за допомогою бібліотеки Stepper, що забезпечує точність переміщень.

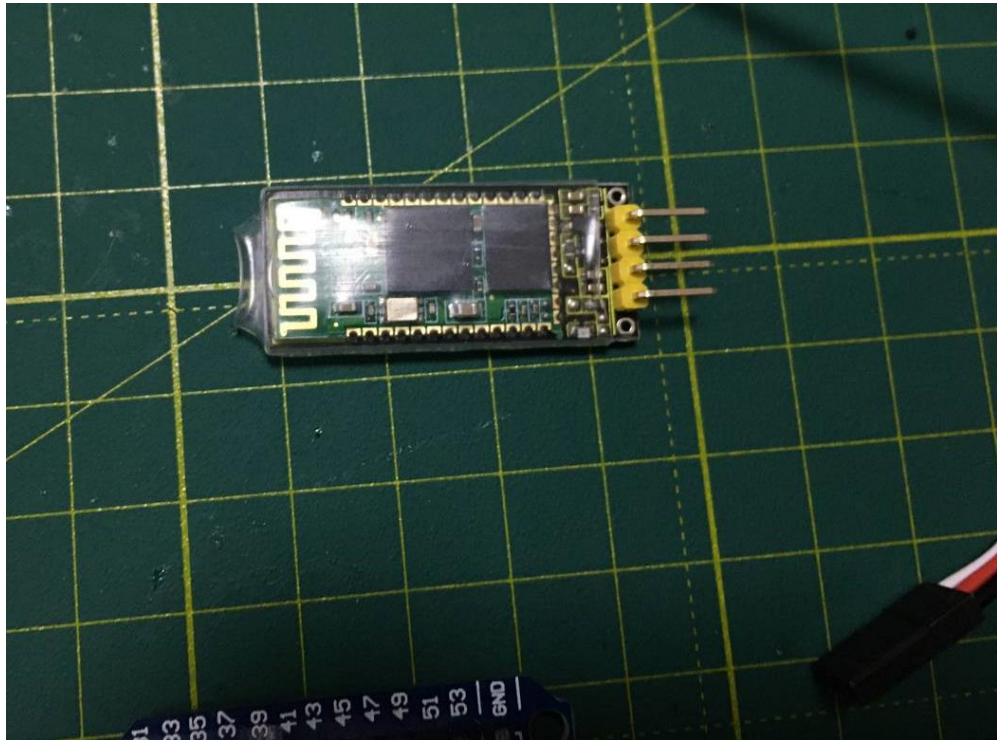


Рисунок 3.9 - Bluetooth-модуль HC-06

Програмне забезпечення яке буде використовуватись:

- Fusion 360 — це інтегроване програмне забезпечення для тривимірного моделювання, проектування та симуляції, яке також дозволяє генерувати G-код для фрезерних верстатів. Воно надає широкий набір інструментів для створення 3D-моделей деталей, їх аналізу та підготовки до обробки на ЧПУ. Fusion 360 дозволяє налаштовувати параметри фрезерування, такі як швидкість обертання інструменту, подача та глибина різання. Отриманий G-код зберігається у вигляді текстового файлу, який може бути переданий на фрезерний верстат.
- UGS (Universal Gcode Sender) — це інструмент для передачі G-коду на мікроконтролери, що використовують GRBL як прошивку. Програма дозволяє передавати підготовлений G-код на Arduino Uno через USB-з'єднання. Вона також надає можливість візуалізації траєкторії руху інструмента, моніторингу стану системи та налаштування параметрів.
- Bluetooth Terminal — це мобільний додаток, який дозволяє передавати

текстові команди або G-код через Bluetooth-з'єднання. Він слугує інтерфейсом для ручного управління верстатом, наприклад, переміщення осей у ручному режимі або виконання простих команд обробки без необхідності підключення комп'ютера.

Код був реалізований у середовищі Arduino IDE. Він забезпечує прийом і обробку команд із трьох джерел: пульта дистанційного керування, Bluetooth-з'єднання та комп'ютера через GRBL.

```
#include <IRremote.h>      // Бібліотека для ІЧ-приймача
#include <SoftwareSerial.h> // Бібліотека для Bluetooth
#include <Stepper.h>       // Бібліотека для крокових двигунів

#define STEPS_PER_REV 200 // Кількість кроків на оберт двигуна
Stepper stepperX(STEPS_PER_REV, 8, 9, 10, 11); // Двигун осі X
Stepper stepperY(STEPS_PER_REV, 4, 5, 6, 7); // Двигун осі Y
SoftwareSerial BTSerial(2, 3); // RX, TX для Bluetooth HC-05
int RECV_PIN = 12;          // Пін для ІЧ-сенсора
IRrecv irrecv(RECV_PIN);
decode_results results;

void setup() {
  Serial.begin(9600);      // Стандартний порт для GRBL
  BTSerial.begin(9600);   // Порт для Bluetooth
  irrecv.enableIRIn();    // Включити ІЧ-приймач
  stepperX.setSpeed(60);   // Швидкість осі X (об/хв)
  stepperY.setSpeed(60);   // Швидкість осі Y (об/хв)
  Serial.println("System Ready");
}

void loop() {
  if (irrecv.decode(&results)) {
    handleIRCommand(results.value);
    irrecv.resume();
  }
}
```

```

if (BTSerial.available()) {
    char command = BTSerial.read();
    handleBluetoothCommand(command);
}
if (Serial.available()) {
    char gcodeCommand = Serial.read();
    handleGCodeCommand(gcodeCommand);
}
}

void handleIRCommand(unsigned long command) {
    switch (command) {
        case 0xFF629D: stepperY.step(10); break; // UP
        case 0xFFA857: stepperY.step(-10); break; // DOWN
        case 0xFF22DD: stepperX.step(-10); break; // LEFT
        case 0xFFC23D: stepperX.step(10); break; // RIGHT
        default: Serial.println("Unknown IR Command"); break;
    }
}

void handleBluetoothCommand(char command) {
    switch (command) {
        case 'U': stepperY.step(10); break; // UP
        case 'D': stepperY.step(-10); break; // DOWN
        case 'L': stepperX.step(-10); break; // LEFT
        case 'R': stepperX.step(10); break; // RIGHT
        default: Serial.println("Unknown Bluetooth Command"); break;
    }
}

void handleGCodeCommand(char command) {
    Serial.print("G-code received: ");
    Serial.println(command);}

```

ІЧ-керування приймає сигнали від пульта, які обробляються мікроконтролером для точного переміщення осей. Це дозволяє вручну керувати інструментом у реальному часі.

Bluetooth-з'єднання забезпечує мобільне керування через спеціальний додаток. Це зручно для оперативного внесення змін у процесі обробки або переміщення верстата без підключення комп'ютера.

Завдяки GRBL Arduino Uno може обробляти складні G-коди, які передаються через Universal Gcode Sender. Це дозволяє виконувати обробку 3D-моделей із високою точністю.

### **3.3 Висновок розділу**

У розділі було впроваджено ПІД-регулятор у систему управління фрезерним верстатом з ЧПУ, що дозволило зменшити час перехідного процесу з  $t_p = 5,1$  с до  $t_p = 3,87$  с, а також знизити рівень перерегулювання з  $\sigma = 23\%$  до  $\sigma = 11,6\%$ .

Розроблена керуюча програма для настільного фрезерного верстата забезпечує зручне та багатофункціональне керування, використовуючи сучасні інтерфейси та програмне забезпечення. Поєднання ІЧ-керування, Bluetooth-з'єднання та підтримки GRBL значно розширює можливості верстата, що робить його придатним для експериментальних завдань.

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було досліджено питання підвищення ефективності технологічних процесів фрезерування для верстатів із числовим програмним керуванням (ЧПК) шляхом вдосконалення системи автоматичного управління.

Проведено аналіз сучасних рішень у сфері автоматизованого управління. Розглянуто етапи розвитку систем ЧПК, концепції Індустрії 4.0, а також впровадження інтелектуальних технологій, що дозволяють забезпечити високу продуктивність і точність обробки на сучасних верстатах.

Розроблено макет настільного фрезерного верстата з ЧПК. Виконано моделювання конструкції та розроблено керуючу систему на базі мікроконтролера Arduino Uno. Верстат обладнано кроковими двигунами типу Nema 17, які забезпечують точне позиціонування інструмента по осях X, Y, Z.

Запропоновано багатофункціональну керуючу програму, що підтримує три режими роботи:

- Керування за допомогою ІЧ-пульта для ручного налаштування положення робочого інструмента.

- Bluetooth-керування, що забезпечує бездротове управління верстатом через мобільний додаток.

- Програмне управління з комп'ютера, використовуючи GRBL для виконання G-кодів, згенерованих у Fusion 360 та переданих через Universal Gcode Sender.

Проведено аналіз стійкості та якості системи управління. На основі побудованих характеристик ЛАЧХ та ЛФЧХ було визначено запаси стійкості системи:

- Запас стійкості за амплітудою:  $\Delta A = 8,73$  дБ;

- Запас стійкості за фазою:  $\Delta \varphi = 130^\circ$ .

Система виявилася стійкою та нормально демпфованою.

Впроваджено ПД-регулятор у систему управління, що дозволило значно покращити показники перехідного процесу. Час встановлення було зменшено з 5,1 с до 3,87 с, а значення перерегулювання знижено з 23% до 11,6%. Це сприяло

підвищенню точності позиціонування та якості обробки поверхонь .

Проведено експериментальні дослідження на розробленому макеті. Результати показали, що система управління верстатом відповідає вимогам щодо точності та стабільності роботи. Використання ПІД-регулятора дозволило мінімізувати негативний вплив вібрацій, сил різання та інших зовнішніх чинників під час роботи верстата.

Таким чином, поставлена у роботі мета досягнута: вдосконалено систему управління фрезерним верстатом з ЧПК, що дозволило покращити показники часу встановлення, перерегулювання та забезпечити стійку роботу системи в умовах реального виробництва. Отримані результати можуть бути використані для подальшого дослідження та впровадження у навчальних та промислових процесах.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Lee J. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment / J. Lee, B. Bagheri, H.-A. Kao // Manufacturing Letters. – V. 1. – I. 1. – 2013. – P. 38-41.
2. Foundations for Innovation in Cyber-Physical Systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nist.gov/system/files/documents/el/CPS-WorkshopReport-1-30-13-Final.pdf>. – 01.2013
3. Lee J. Predictive Manufacturing System – Trends of Next-Generation Production Systems / J. Lee, E. Lapira, S. Yang, A. Kao // IFAC Proceedings Volumes. – V. 46. – I. 7. – 2013. – P. 150-156.
4. Гаркуша О. М., Ільченко Ю. О. Технологія машинобудування: Проектування процесів обробки металів. – Київ: КНУБА, 2019. – 278 с.
5. SINUMERIK CNC Systems – User Guide. – Siemens, 2021.
6. Technical documentation and manuals. – FANUC Europe, 2020.
7. Кондратьєв С. І., Бондаренко В. М. Системи числового програмного керування: Принципи та можливості. – Харків: ХНАДУ, 2018. – 320 с.
8. Трапецеїдальний вал г винт THSL-300-8D с гайкою для 3D-принтера [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www / URL: <https://evse.com.ua/trapetseidalnyj-val-vint-thsl-400-8d-s-gajkoj-dlya-3d-printera>](http://www.evse.com.ua/trapetseidalnyj-val-vint-thsl-400-8d-s-gajkoj-dlya-3d-printera). – 2024 рік.
9. Костенко С.В. КТ 2. Розробка конструкції фрезерного верстату з програмним управлінням. ПТ 2. Розробка електричного блоку: дипломна робота, пояснювальна записка/ Костенко С.В.; кер. роботи доц. КІТАМ Разумов-Фризюк Є.А.; ХНУРЕ, Кафедра Комп'ютерно-інтегровані технології, автоматизації та мехатроніка. – Харків, 2019. – 63 с.: CD.
10. Кірко́в, В. П. (2016). Системи керування електроприводами. Київ: Наукова думка.
11. **Boucher, M.** (2013). Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. Newnes.

12. Wang, Z. (2024). The milling parameters of mechanical parts are optimized by NC machining technology. *Frontiers in Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1367009>.
13. Hamiddin, I., & Munir, M. (2018). AUTOMATIC SWITCH WITH INTEGRATED CONTROL SYSTEM USING ARDUINO UNO.
14. Войцицький А.П. Войцицький М.А. Електроніка і мікросхемотехніка – Гельветика 2018.
15. Pereira, N. (2016). Measuring the RC time constant with Arduino. *Physics Education*, 51. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/51/6/065007>.
16. Bluetooth модуль HC-05 [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www / URL: https://arduino.ua/prod999-bluetooth-modyl-hc-05](http://www.arduino.ua/prod999-bluetooth-modyl-hc-05) - 2024 рік.
17. Verma, K., Gianchandani, I., & Verma, P. (2018). Efficient Use of Electronic Waste for CNC Machine. *International Journal of Computer Applications*. <https://doi.org/10.5120/IJCA2018917694>.
18. Малінін Є.Є. КТ 2. Розробка конструкції фрезерного верстату з програмним управлінням. ПТ 2. Розробка механіки фрезерного верстата: дипломна робота, пояснювальна записка/ Малінін Є.Є.; кер. роботи доц. КІТАМ Разумов-Фризюк Є.А.; ХНУРЕ, Кафедра Комп'ютерно-інтегровані технології, автоматизації та мехатроніка. – Харків, 2019. – 77 с.: CD.
19. Kharb, A. (2018). INDUSTRIAL REVOLUTION – FROM INDUSTRY 1.0 TO INDUSTRY 4.0.
20. Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *J. Ind. Inf. Integr.*,
21. M. Poliakov. "BEHAVIOR CLASSIFICATION OF CONTROL UNIT OF SYSTEMS." *Radio Electronics, Computer Science, Control* (2022). <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-3-17>.
22. Kadhar, K., & Anand, G. (2021). Introduction to the Raspberry Pi. *Data Science with Raspberry Pi*. [https://doi.org/10.1007/978-1-4842-6825-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-6825-4_3).

# 1 ANALYSIS OF MODERN SOLUTIONS IN THE FIELD OF AUTOMATED CONTROL OF NUMERICALLY CONTROLLED MACHINES

## 1.1 Evolution of Modern Production Process Automation Systems

The evolution of production process automation systems has been one of the key factors driving industrial development through various stages of industrial revolutions. From the introduction of steam engines to modern cyber-physical systems, automation has directly influenced productivity improvement, efficient production management, and the assurance of high product quality. The key stages are as follows:

- Industry 1.0: The first stage of the Industrial Revolution (18th–19th century) focused on the mechanization of production using steam engines. This significantly increased production capacity and reduced labor costs. Automation during this period was limited to mechanical devices and machines. [19]

- Industry 2.0: The second stage (late 19th–early 20th century) was marked by the mass implementation of electricity and process standardization. Electrification of factories and enterprises spurred the development of automated systems based on electromechanical components, enhancing the flexibility and speed of production processes. Conveyor systems emerged at this stage, promoting mass production. [19]

- Industry 3.0: In the 20th century, automation reached a new level with the advent of computer technologies and information systems. This era saw the introduction of programmable logic controllers (PLCs), which enabled the automation of complex production processes and their control via computers. The digital transformation of manufacturing began, leading to optimized management and high operational precision.

- Industry 4.0: The modern stage, beginning in the early 21st century, is characterized by the integration of cyber-physical systems, artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), and big data into production processes. Industry 4.0 focuses on creating "smart factories" where machines and systems automatically adapt to changing

conditions, interacting with each other in real-time. This ensures high flexibility, efficiency, and productivity in manufacturing. [19]

## **1.2 Industry 4.0**

Industry 4.0 is a modern concept of industrial development that entails the digital transformation of manufacturing through the integration of cutting-edge information and communication technologies (ICT). This approach relies on the use of cyber-physical systems (CPS), the Internet of Things (IoT), big data, artificial intelligence (AI), and cloud computing to create smart enterprises. The primary goal of Industry 4.0 is to enhance productivity, increase the flexibility of production processes, and improve resource management efficiency. [20]

The concept was introduced in Germany in 2011 at the Hannover Fair, marking the beginning of a new phase in global industrial development. Industry 4.0 has transformed approaches to production organization, supply chain management, and interactions between enterprises and consumers. [19]

IoT enables data exchange between physical objects over networks. Using sensors and devices connected to the internet, businesses can automate processes, monitor equipment performance, and predict technical failures. [20]

CPS integrate physical objects with their digital twins, allowing production processes to be embedded in the digital environment. These systems enable real-time interaction between physical and digital components of production.

AI and machine learning algorithms facilitate the analysis of large volumes of data and the optimization of production processes. This includes automated diagnostics, failure prediction, and resource optimization.

Cloud platforms provide centralized storage and processing of data, simplifying enterprise management. Meanwhile, edge computing technologies process data at the network's edge, reducing latency and boosting productivity. [20]

Other technologies employed include digital twins, augmented and virtual reality (AR/VR), and integrated production management systems (MES, ERP).

Digital twins are virtual models of physical objects or processes that reflect their real-time state. They enable the simulation of equipment operations, detection of potential issues before they arise, and process optimization.

AR/VR technologies are used for employee training, technical support, and equipment maintenance. For instance, augmented reality allows operators to view instructions in real-time during equipment repair.

MES and ERP systems allow efficient enterprise resource management, real-time production process monitoring, and rapid response to demand changes.

### **1.3 Internet of Things**

Internet of Things (IoT) is a concept encompassing a network of physical objects, equipment, and devices equipped with sensors, software, and internet connectivity. The main idea behind IoT is to enable devices to collect, exchange, and analyze data without human intervention, thus enhancing efficiency, automation, and continuous monitoring of various processes. [20]

IoT plays a crucial role in the development of Industry 4.0, as it ensures the integration of physical objects into the digital space. Today, IoT spans multiple domains, from smart homes and urban infrastructures to complex industrial and logistics systems.

IoT systems typically consist of the following key components:

**Sensors:** Physical components that collect data about the environment or processes. Examples include temperature sensors, humidity sensors, motion detectors, and GPS trackers.

**Communication protocols and networks:** Various technologies, such as Wi-Fi, Bluetooth, 5G, ZigBee, and LoRaWAN, are used to transmit data. The choice of protocol depends on requirements for data transfer speed, energy consumption, and range.

**Data processing platforms:** Data is transmitted to cloud platforms or processed at the network's edge (edge computing). Clouds are used for analyzing large datasets, while edge devices allow for localized decision-making with minimal latency.

Control systems and interfaces: Software that enables users to monitor and manage IoT devices through web interfaces or mobile applications. Examples include interfaces for controlling smart homes or production processes.

In industry, IoT is utilized for monitoring and managing production lines, as well as predicting equipment failures (predictive maintenance). Thanks to sensors and analytics, businesses can avoid downtime and reduce maintenance costs.

#### **1.4 Cyber-Physical Systems**

Cyber-Physical Systems (CPS) are the integration of physical objects and processes with digital technologies via computer systems and networks. They enable real-time monitoring, control, and optimization of processes through seamless interaction between the physical and virtual worlds. CPS serve as the foundation for modern concepts such as Industry 4.0, smart factories, autonomous transportation systems, and smart cities. [1]

The primary idea of CPS is to combine data from physical sensors and devices with analytics and management through digital platforms, allowing systems to operate autonomously and adapt to environmental changes.

The active deployment of sensors and network devices leads to the continuous accumulation of large volumes of data, commonly referred to as Big Data. [1] Given this dynamic, CPS can be adapted for efficient data management and coordination between devices, enabling the creation of autonomous, flexible, and self-regulating systems. [2] Additionally, the implementation of CPS in production, logistics, and service processes can transform traditional factories into Industry 4.0 factories, yielding significant economic benefits. [3]

CPS Architecture. CPS architecture consists of five levels:

Physical Level: Includes sensors, actuators, and devices that interact with the physical environment (equipment, machines, vehicles, etc.). Sensors collect data, and actuators execute commands based on analytics.

**Communication Level:** Ensures data exchange between physical and digital components. Common technologies include IoT networks, Wi-Fi, 5G, and industrial protocols like OPC-UA and Modbus.

**Digital Level (Computational):** Includes computational resources for processing sensor data and decision-making. This may involve cloud platforms for analyzing large data volumes or edge devices for on-site computations.

**Control Level:** At this level, control algorithms analyze data and make decisions to automate processes. Examples include Manufacturing Execution Systems (MES) or autonomous transportation systems.

**User Interfaces:** Allow human interaction with the system through mobile applications, web interfaces, or dispatch platforms. Interfaces provide process visualization and enable manual intervention when necessary.

#### Applications in Smart Factories

In smart factories, CPS integrate all production processes into a unified system, ensuring continuous data exchange between equipment, software, and management decisions. Sensors on production lines monitor equipment conditions, temperature, vibration levels, component wear, and other parameters in real time. Based on this data, the system automatically adjusts settings, optimizes workflows, or initiates preventive maintenance when deviations or potential failures are detected. This helps avoid unexpected breakdowns, minimize downtime, and enhance overall production efficiency.

These systems can also autonomously plan production processes depending on line utilization and product demand, ensuring flexibility in order fulfillment. Integration with ERP systems (Enterprise Resource Planning) and supply chains enables automated updates on material availability and optimized logistics operations.

#### Benefits of CPS

**Quality Enhancement:** Machine vision systems and AI algorithms ensure quality control at every stage, identifying defects before production completion. This reduces waste and enables timely corrections.

**Resource Optimization:** CPS analyze resource consumption data and identify opportunities for optimization, such as turning off unused machines or adjusting processes to reduce energy consumption.

Such integration of all components into a single network creates a fully automated and flexible production environment capable of adapting to changing demand and market conditions, opening new opportunities for business growth within the framework of Industry 4.0.

**Key Components of CPS.** CPS consist of two main components:

Continuous connectivity for rapid data collection from the physical environment and information exchange between physical objects and digital systems.

Intelligent data processing using analytical tools and computational resources to create a cyber environment where real-time management and process optimization are carried out.

**5C Architecture of CPS.** Unlike generic requirements, the 5C architecture provides a structured approach to building CPS, starting with data collection and ending with analytics and value assessment.

The 5C architecture includes the following levels:

**Connection:** Physical devices such as sensors, controllers, robots, and other production equipment are integrated with digital systems. This stage involves connecting all devices to the network for real-time data collection. Sensors track parameters like temperature, vibration, operating speed, and component wear, transmitting data for further processing.

**Goal:** Ensure access to all data and establish a foundation for digitizing production processes.

**Conversion:** Collected data is processed and converted into a comprehensible format for analytical systems. This stage includes filtering, cleaning, and preliminary data analysis.

**Goal:** Prepare data for analytics and identify anomalies in processes.

**Cyber:** This level provides centralized monitoring and control through digital models of production processes. Data from various devices is unified into a single cyber

model representing the system's real-time state. Technologies such as IoT, machine learning, and big data analytics are used to identify patterns and build behavioral models of the system.

Goal: Create a digital twin of the production system for real-time monitoring and optimization.

Cognition: At this level, data obtained from cyber models is analyzed using AI algorithms for deeper insights into processes. Systems can predict potential problems, such as equipment failures, deviations from norms, or potential downtimes. Additionally, the system can recommend optimal production and management strategies.

Goal: Understand situations and make informed decisions to enhance efficiency.

Configuration: The final level involves implementing changes in production processes based on insights and recommendations. The system can autonomously adjust equipment parameters or modify production plans to increase productivity, reduce downtime, or save resources. In case of detected issues, the system initiates preventive measures or maintenance. [2]

## **1.5 Control Programs**

Control programs are a crucial component of automated systems, as they ensure equipment management, process coordination, and the integration of physical and digital elements. Developing such programs requires the application of specialized methods and approaches to ensure system reliability, performance, and adaptability.

One widely used approach is logic- and state-based programming, such as Ladder Logic or Finite State Machines (FSMs). This method is commonly applied in programming industrial Programmable Logic Controllers (PLCs) and is based on relay logic, which simplifies the transition from manual to automated control. A program in this case consists of a set of states, each corresponding to specific conditions or events. While this approach is easy to visualize and convenient for engineers, it may be less flexible when implementing complex systems.

Another effective method is modular programming, where the program is divided into separate independent blocks (modules), each performing a specific function. This structure makes it easy to reuse or modify individual parts without affecting the entire system. It significantly simplifies testing and debugging but requires careful planning to ensure effective interaction between modules. Both approaches can be combined to create more flexible, reliable, and scalable control systems that meet the needs of modern production.

A key aspect of control program development is ensuring scalability and flexibility. This is especially critical in the context of Industry 4.0, where systems must adapt to changes in production processes and integrate new equipment without substantial changes to the code. Object-oriented approaches are widely used for this purpose, where each physical element or system function is implemented as a separate object with its own methods and attributes. This facilitates the addition of new components and supports system scalability with minimal time investment.

Another important approach is the use of service-oriented architecture (SOA), which enables the integration of different software components through standardized interfaces. SOA allows the unification of local and remote resources into a single system and the implementation of flexible management through centralized platforms. For example, in systems related to logistics or supply chain management, SOA integrates real-time production data with ERP or IoT platforms.

Special attention is paid to the reliability and security of control programs. With equipment connected to networks, there is a risk of cyberattacks that can halt production or lead to data distortion. To prevent such situations, secure programming methods are employed, including data encryption, user authentication, and multi-level access control. Additionally, monitoring and recovery systems help minimize the impact of unforeseen situations on production processes.

In modern control program development, Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML) are gaining increasing importance. These technologies enable programs not only to execute predefined algorithms but also to learn independently, identify hidden patterns, and adapt equipment operation based on changing conditions. For instance,

predictive maintenance powered by AI can analyze equipment metrics and alert operators to potential failures before they occur, reducing downtime and enhancing production efficiency.

Thus, control program development methods are focused not only on ensuring basic management functions but also on integrating modern technologies to achieve high flexibility, productivity, and security. Employing these approaches facilitates the creation of intelligent, adaptive systems capable of addressing the challenges of dynamic production environments and supporting sustainable development strategies for enterprises.

## **1.6 Analysis of Modern CNC Milling Machine Systems**

Modern Computer Numerical Control (CNC) systems play a crucial role in advancing industrial equipment, particularly in precision milling, turning, and grinding machines. They form the foundation for process automation and production efficiency, enabling companies to meet market demands and high-quality standards. Below are key aspects of modern CNC systems, including FANUC, SINUMERIK, and Haas, along with their capabilities.

FANUC systems are widely used across various industries due to their support for universal G-codes and compatibility with most CNC software.

New FANUC controller models feature adaptive control capabilities, allowing automatic adjustment of cutting parameters based on tool and material conditions, significantly enhancing productivity and machining accuracy.

The intuitive FANUC interface facilitates rapid operator training and simplifies programming, reducing the risk of errors and production downtime. [5]

The SINUMERIK system by Siemens, especially the 840D series, offers precision and speed in machining processes, supporting 5-axis milling and complex turning operations.

Siemens SINUMERIK seamlessly integrates with cyber-physical systems, enabling the creation of "smart" manufacturing processes with remote monitoring, diagnostics, and predictive equipment maintenance capabilities.

The SINUMERIK system adopts a modular configuration approach, allowing scalability based on the enterprise size and production process complexity. [6]

Haas controllers are known for their user-friendly interface and extensive programming instructions, making them attractive for small and medium-sized enterprises.

Haas controllers easily connect to CAD/CAM software, enabling quick generation and uploading of machining trajectories, optimizing setup time, and reducing errors.

Modern Haas models are equipped with internet-enabled remote control features, allowing production managers to monitor processes in real-time.

Self-adaptive features in these controllers allow automatic adjustments to machining parameters based on tool or material conditions, reducing tool damage and ensuring higher-quality end products.

#### Support for Industry 4.0 Technologies

Many modern CNC systems are designed to meet Industry 4.0 requirements, supporting data exchange with other production elements through IoT and cyber-physical systems. This enables enterprises to create integrated manufacturing processes.

Automated CNC systems are equipped with sensors and monitoring tools that track equipment conditions and predict maintenance needs.

An analysis of modern CNC systems highlights their significant potential to improve efficiency and productivity for businesses. From selecting machining settings to adaptive control and integration with cyber-physical systems, each system offers unique advantages and application areas. Successful utilization of CNC systems enhances product quality, reduces costs, and ensures high market competitiveness.

## 1.7 Types of Controllers

Arduino Uno is a compact and popular microcontroller board designed for easy

learning of electronics and programming. It is used for both educational purposes and various projects, ranging from simple prototypes to complex automation systems. The board is based on the ATmega328P microcontroller, which provides sufficient power to perform numerous tasks, with a clock speed of 16 MHz enabling fast command processing. Arduino Uno features 14 digital input/output pins, 6 of which can be used for PWM signals, and 6 analog inputs commonly used for reading sensor data. The board can be powered either through a 5V USB port or an external power source ranging from 7 to 12V, offering flexibility in choosing the power supply. [13]



Figure 1.1 – Arduino Uno Microcontroller Board

Arduino Uno supports standard interfaces such as UART, SPI, and I2C, allowing seamless connection to other devices. This versatility enables interaction with various sensors, communication modules, displays, and other electronic components, serving as the foundation for creating interactive devices. The board connects to a computer via USB, used for programming and data transfer. Programming Arduino Uno is done through the Arduino IDE environment, where users write programs in a C++-based language, making the learning and project development process intuitive.

As an open-source platform, Arduino Uno allows anyone to freely use its

schematics and documentation, as well as create their modifications or compatible devices. This openness has made Arduino Uno popular among beginners and professionals worldwide. Hundreds of available libraries simplify adding functionalities such as motor control, temperature or humidity readings, accelerometer data collection, using wireless modules, and even building Internet of Things (IoT) networks. [13]

Arduino Uno is widely used in fields such as robotics, automation, monitoring systems, IoT, and home automation. Thanks to its large community of developers and enthusiasts, Arduino Uno offers numerous tutorials, resources, and ready-made project examples. Its integration with cyber-physical systems or other devices enables the creation of both simple experimental projects and more complex systems that meet modern automation and control requirements.

Raspberry Pi is a compact single-board computer designed for teaching programming and electronics fundamentals. However, its powerful capabilities have also made it useful in professional projects. Developed in the UK by the Raspberry Pi Foundation, this device has become popular among enthusiasts and professionals worldwide. Raspberry Pi comes in various models, ranging from basic to more powerful ones like the Raspberry Pi 4, which supports various operating systems, most often Linux-based, such as Raspberry Pi OS (formerly Raspbian), Ubuntu, and others. With USB and HDMI ports, as well as built-in Wi-Fi and Bluetooth modules (in newer models), Raspberry Pi easily connects to peripherals, internet networks, displays video, and interfaces with various sensors and modules.



Figure 1.2 – Raspberry Pi 5 Microcontroller Board

Equipped with an ARM processor and memory ranging from 512 MB to 8 GB depending on the model, Raspberry Pi is capable of handling diverse tasks—from running simple programs and writing code to serving as a multimedia center or a small server. The computer supports **GPIO (General Purpose Input/Output)** pins, enabling connections to other electronic components like LEDs, buttons, sensors, and motors, making it ideal for interactive projects, robotics, home automation, and IoT device development. [22]

Raspberry Pi’s popularity is also driven by its extensive online community support. Numerous guides, video tutorials, forums, and project examples are available online to help both beginners and experienced users realize their ideas. Raspberry Pi is also widely used in schools and universities to teach programming, electronics, networking, and robotics.

Beyond educational and research purposes, Raspberry Pi is increasingly used in commercial applications due to its low cost, energy efficiency, and adaptability to a wide range of tasks. Examples include serving as a media player, a security system controller, a core for home automation, and even a data storage server.

## 1.7 Research Objective

The objective of this research is to conduct an in-depth analysis of modern approaches to designing, integrating, and optimizing cyber-physical systems (CPS) within production processes, considering the principles of **Industry 4.0**. Specifically, the research focuses on studying architectural solutions like the **5C model** and innovative approaches to developing control programs that ensure automation, flexibility, and adaptability in manufacturing.

The main emphasis is on the impact of technologies such as **IoT, AI, Big Data,** and **predictive maintenance** on improving management and production efficiency. Additionally, the research aims to identify methods for enhancing the reliability and

cybersecurity of integrated systems, which are critical for minimizing risks and ensuring uninterrupted enterprise operations.

Achieving this goal involves not only the development of theoretical approaches but also the analysis of existing CPS implementation practices in industry, evaluation of their economic efficiency, and identification of potential challenges. The research will propose methods for optimizing production processes by implementing cutting-edge technologies that meet the requirements of modern enterprises and promote sustainable development.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ  
КОНДРАТЮКА»**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

за матеріалами X Всеукраїнської науково-практичної конференції

**«ЕЛЕКТРОННІ ТА МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ:  
ТЕОРІЯ, ІННОВАЦІЇ, ПРАКТИКА»**

20 грудня 2024 року



**Полтава 2024**

***I. Silin, V. Lysechko***

MODELS FOR DESCRIBING THE CONDITIONS OF RADIO WAVE PROPAGATION INSIDE BUILDINGS..... 62

***С.В. Індик, В.О. Михайленко***

ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ВІРТУАЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ІР ТЕЛЕФОНІЇ..... 63

***М.М. Губіцький***

МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНІЗМУ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ ЦЕГЛИ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА..... 64

***С.Г. Кислиця, А.І. Остапенко***

ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ УПРАВЛІННЯ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ..... 66

***О.Г. Дрючко, Б.С. Гребенюк, Д.А. Погрібняченко, Д.О. Фещенко, Р.А. Белей***

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФІЗИЧНИХ СЕРЕДОВИЩ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ..... 68

***В.М. Галай, Д.П. Плешкань***

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АЛГОРИТМУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО СОРТУВАННЯ ПОСИЛОК..... 72

***А.В. Марчук***

ВИКОРИСТАННЯ СИМУЛЯТОРА AWS СЕРВІСІВ LOCALSTACK ДЛЯ НАВЧАННЯ РОБОТІ З ХМАРНИМИ СЕРВІСАМИ ТА ІНФРАСТРУКТУРОЮ..... 74

***А.М. Капітон, Р.М. Талибов, О.С. Дзюбан***

ОПТИМІЗАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ.. 76

***Є.О. Мельник***

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЛЯ ВЕРСТАТІВ З ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ.... 78

***С.Г. Кислиця, Є.В. Вітченко***

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ГІДРОАГРЕГАТУ МІНІ-ГЕС..... 79

***О.В. Шефер, А.В. Пащенко***

ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ У ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСАХ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА..... 81

УДК 621.9

*Є.О. Мельник, магістрант*

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»*

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЛЯ ВЕРСТАТІВ З ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ**

У сучасних галузях підвищення ефективності технологічних процесів стало дуже важливим завданням для підвищення ефективності, зниження витрат і забезпечення конкурентоспроможності підприємств. Фрезерні верстати з ЧПУ відіграють важливу роль у високоточній обробці металів та інших матеріалів. Однак для досягнення максимальних результатів необхідно оптимізувати технічні процеси, скоротити час простою обладнання і мінімізувати знос інструменту.

Вибір правильних параметрів різання (швидкість шпинделя, глибина різання і швидкість подачі) має важливе значення для підвищення ефективності і зниження зносу інструменту. Застосування адаптивного управління дозволяє налаштовувати параметри в режимі реального часу в залежності від стану інструменту і матеріалу заготовки.

Контролери FANUC, Siemens SINUMERIK і Haas мають інтуїтивно зрозумілий інтерфейс і функції автоматичної настройки, які дозволяють більш ефективно програмувати і скорочують час простою. Багато сучасних систем ЧПУ також підтримують можливості віддаленого моніторингу, скорочуючи час діагностики та обслуговування. [5]

Установка інструментів з поліпшеними характеристиками з використанням високошвидкісних твердосплавних інструментів або інструментів з керамічним покриттям підвищує точність і довговічність інструменту. Вибір правильного інструменту для конкретного матеріалу може запобігти пошкодженню поверхні та зменшити кількість необхідних обробок.

Сучасний фрезерний верстат інтегрований з кіберфізичної системою, яка забезпечує автоматичний моніторинг процесу обробки, виявлення відхилень в реальному часі і запобігання аварійних ситуацій. Такі системи можуть бути незалежно сплановані для обслуговування на основі даних датчиків.

Програмне забезпечення для автоматизованого виробництва (СAМ) дозволяє створювати оптимізовані траєкторії інструменту, скорочувати час простою і підвищувати ефективність робочого часу.

Впровадження нових інструментів і адаптивного контролера на виробничій лінії з ЧПУ дозволило 1 галузі скоротити час обробки деталей на 15% і знизити знос інструменту на 20%. Використання датчиків для контролю стану машини дозволило уникнути незапланованих простоїв і підвищило загальну ефективність.

Підвищення ефективності фрезерування з ЧПУ підвищення ефективності фрезерування з ЧПУ вимагає комплексного підходу: оптимізації параметрів обробки, використання сучасних систем ЧПУ, застосування високоякісних інструментів і автоматизації виробничих процесів. Інтеграція з кіберфізичними системами дозволяє створити гнучку і продуктивну виробничу середу, що відповідає вимогам Industry 4.0. [7]

Ці заходи сприяють підвищенню якості продукції, зниженню витрат і забезпеченню високого рівня конкурентоспроможності компаній на світовому ринку.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Lee J. *Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment* /J. Lee, B. Bagheri, H.-A.Kao // *Manufacturing Letters*. – V. 1. – I. 1. – 2013. – P. 38-41.
2. *Foundations for Innovation in Cyber-Physical Systems* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nist.gov/system/files/documents/el/CPS-WorkshopReport-1-30-13-Final.pdf>. – 01.2013
3. Lee J. *Predictive Manufacturing System – Trends of Next-Generation Production Systems* /J. Lee, E. Lapira, S. Yang, A.Kao // *IFAC Proceedings Volumes*. – V. 46. – I. 7. – 2013. – P. 150-156.
4. Гаркуша О. М., Ільченко Ю. О. *Технологія машинобудування: Проектування процесів обробки металів*. – Київ: КНУБА, 2019. – 278 с.
5. *SINUMERIK CNC Systems – User Guide*. – Siemens, 2021.
6. *Technical documentation and manuals*. – FANUC Europe, 2020.
7. Кондратьєв С. І., Бондаренко В. М. *Системи числового програмного керування: Принципи та можливості*. – Харків: ХНАДУ, 2018. – 320 с.

#### **IMPROVING THE EFFICIENCY OF CNC MILLING**

UDC 621.9

**Y.O. Melnyk**, master's student

*National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic"*

Міністерство освіти та науки України  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

# Підвищення ефективності технологічних процесів фрезерування для верстатів з ЧПК

Кваліфікаційна робота магістра

Виконав:

Студент 601МЕ групи

Мельник Є.О.

Керівник:

Лактіонов О.І.

Полтава 2024

**Метою роботи** є підвищення ефективності фрезерної обробки через покращення показників часу встановлення та перегулювання системи.

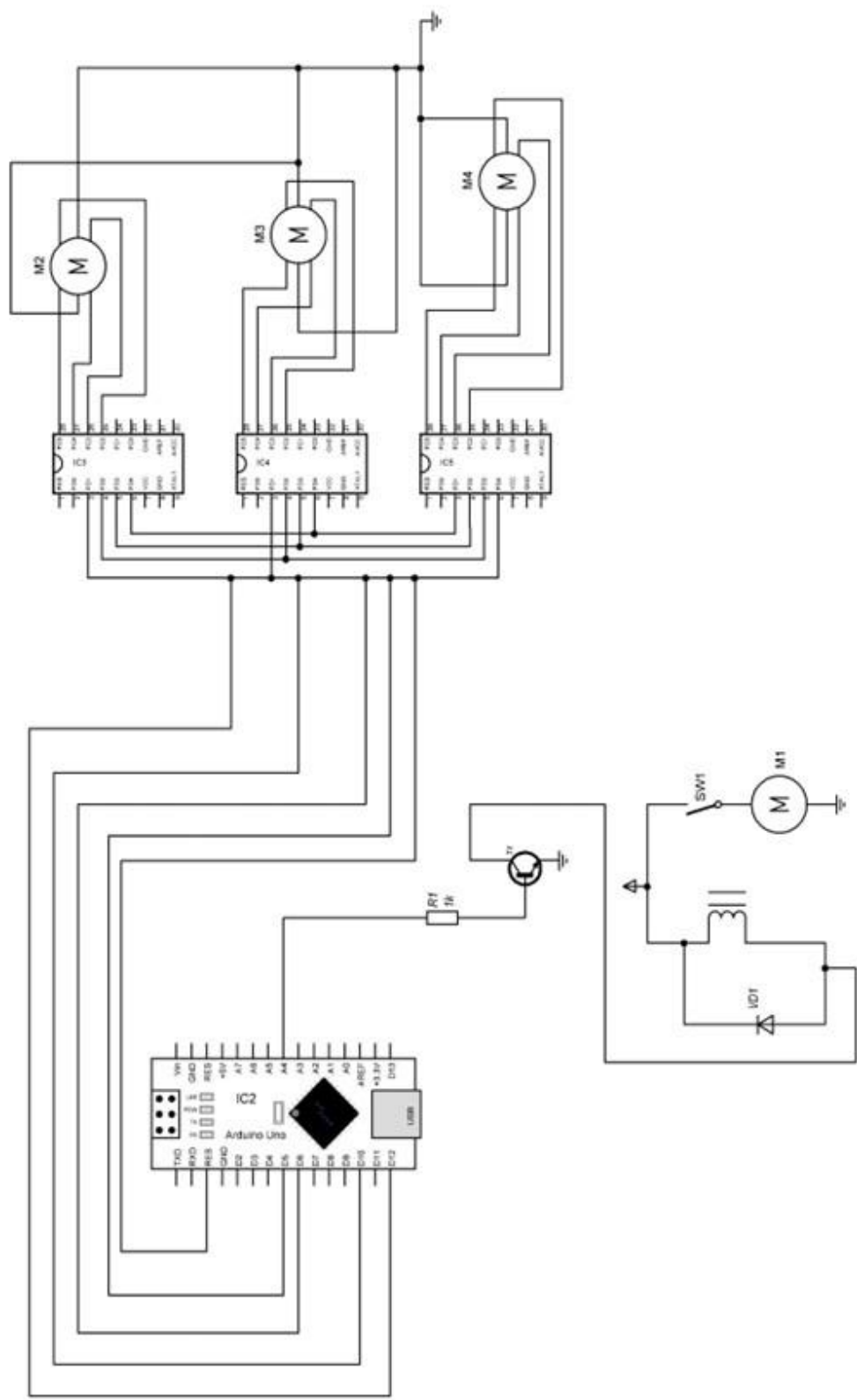
Для вирішення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати сучасний стан розвитку систем автоматизації управління верстатів з ЧПУ;
- розробити макет верстату;
- розробити спосіб підвищення якостей перехідного процесу системи;
- розрахувати параметри стійкості та якості системи;
- оптимізувати отримані параметри;
- провести експериментальні дослідження.

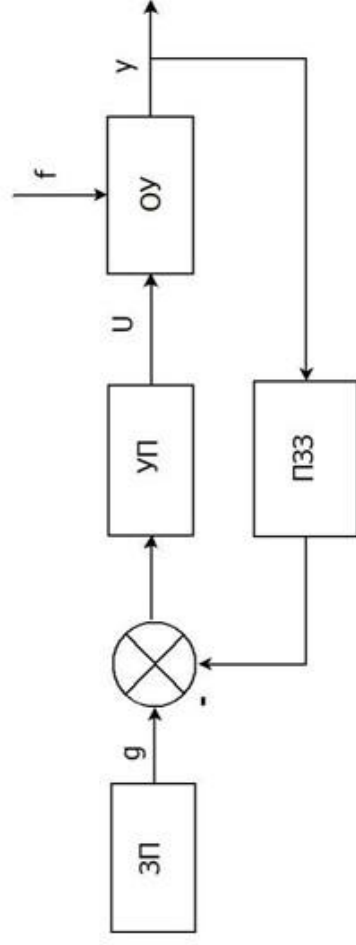
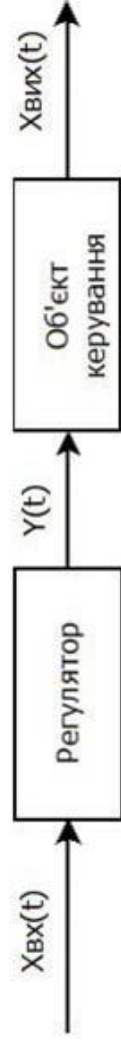
**Об'єкт дослідження:** Технологічні процеси фрезерування на верстатах із числовим програмним керуванням (ЧПК).

**Предмет дослідження:** Методи та засоби підвищення ефективності фрезерування, включаючи оптимізацію параметрів системи управління верстатами з ЧПК.

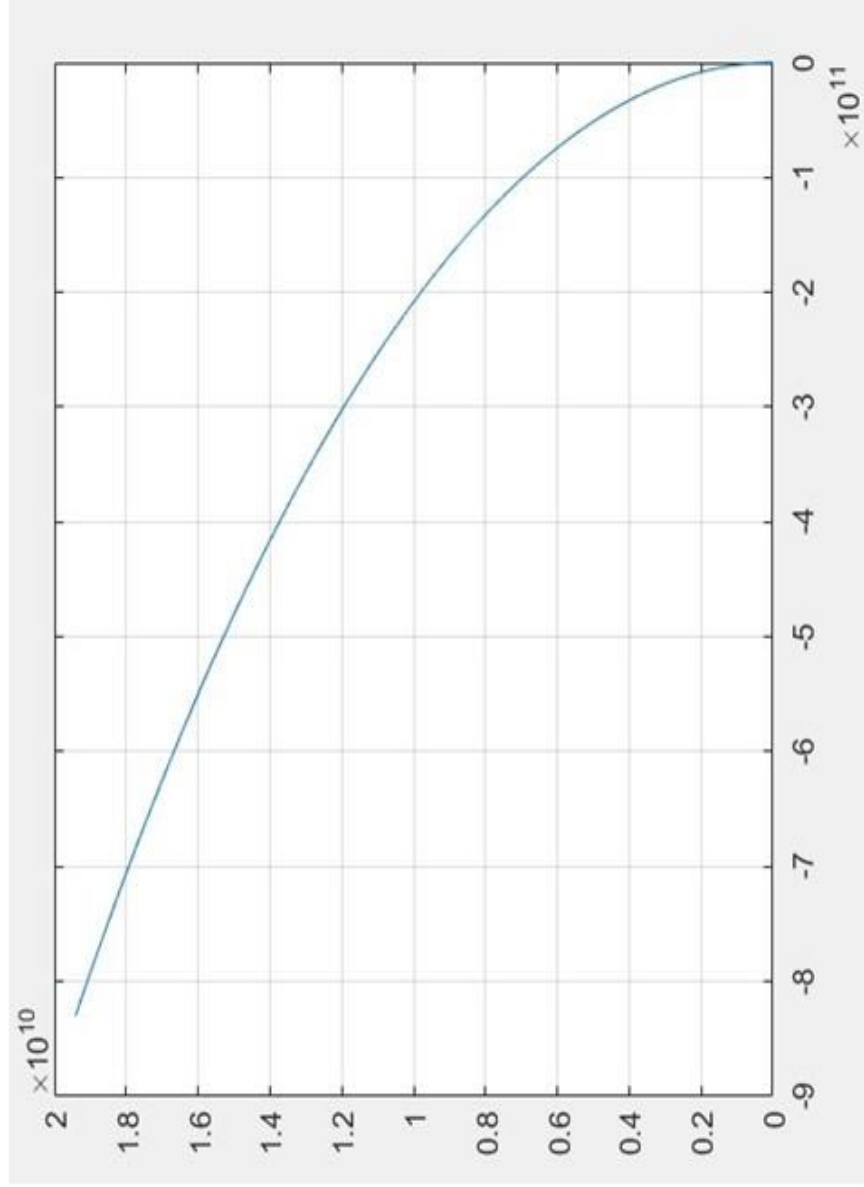
# Електрична схема верстату з ЧПК



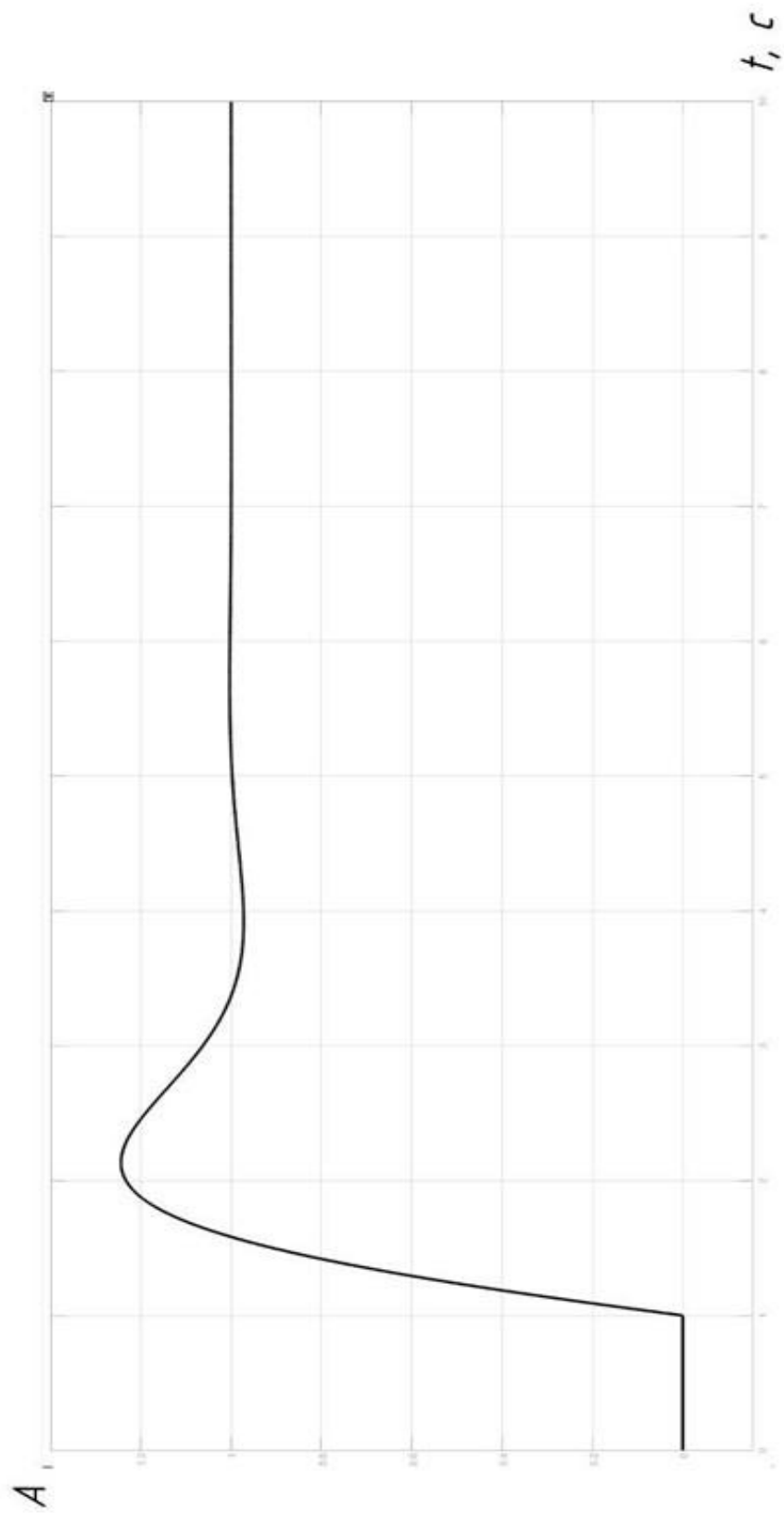
# Структурна схема САК та схема САК зі зворотнім зв'язком



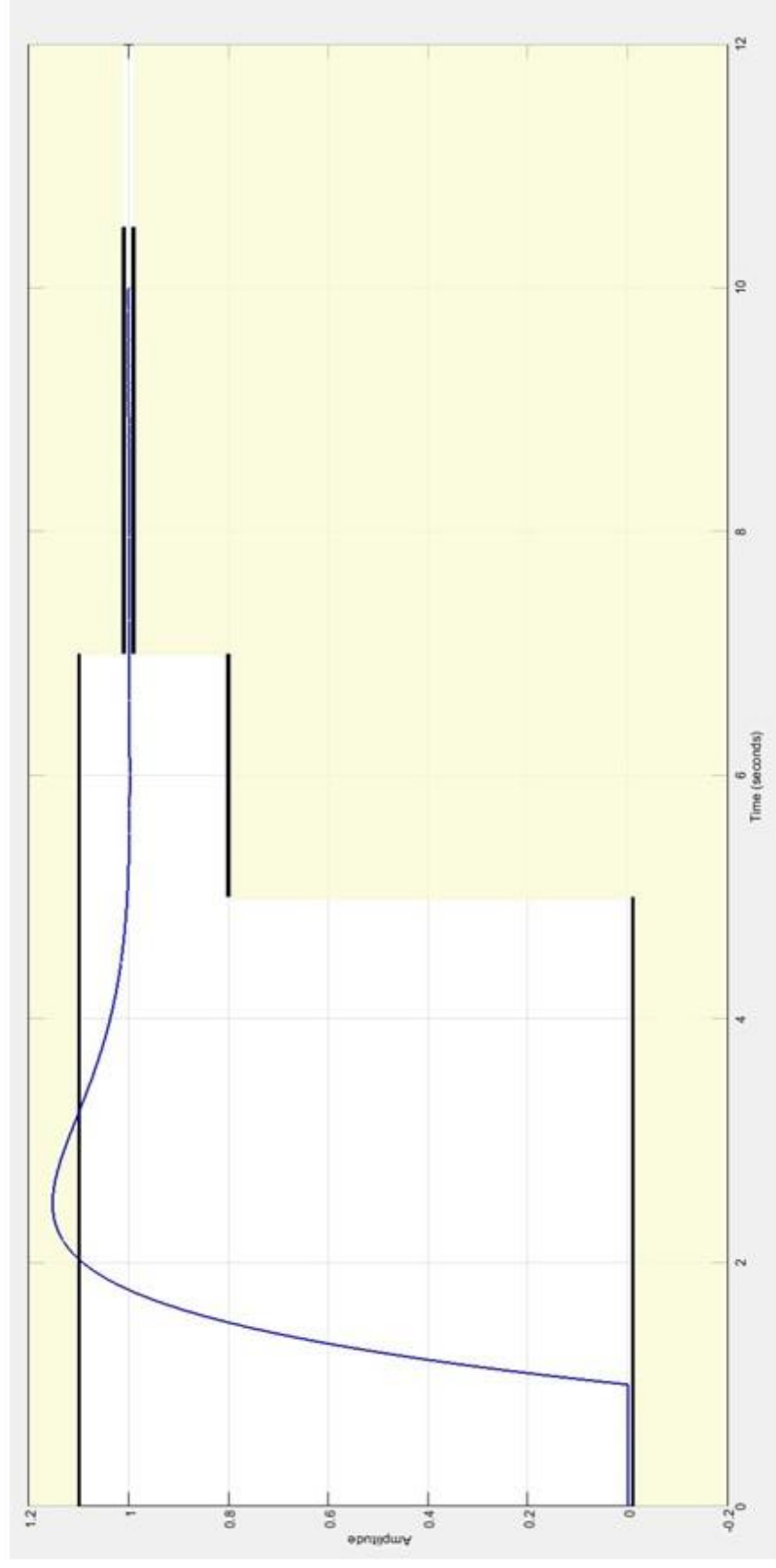
# Крива Михайлова



# Перехідна характеристика керування ЧПК



# Графік перехідної характеристики, побудований на основі стандартних значень коефіцієнтів ПІД-регулятора



# Графік перехідної характеристики з оптимізованими значеннями коефіцієнтів ПІД-регулятора

