

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

Дричик В'ячеслав Сергійович

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВЕРСТАТОМ З ЧПУ / AUTOMATED CNC MACHINE CONTROL SYSTEM

спеціальність: Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Випускна кваліфікаційна робота

Виконав студент групи АКІТ-41
В.С. Дричик

Науковий керівник:
д.т.н., проф Н.Я. Возна

Випускну кваліфікаційну роботу
допущено до захисту:
"___" _____ 20__ р.

Завідувач кафедри
_____ А.І.Сегін

Тернопіль 2025

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Ступінь вищої освіти "бакалавр"
Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін
“ ____ ” _____ 2024 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
ДРИЧИК В'ячеслав Сергійович

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

_____ Автоматизована система керування верстатом з ЧПУ / Automated CNC
Machine Control System _____

керівник роботи _____ д.т.н., проф. Возна Н.Я. _____

затверджені наказом по університету від "28" листопада 2024 р. № 938

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи:

06 травня 2025р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

_____ 1. Технічні характеристики верстатів з ЧПК _____

_____ 2. Вимоги до точності, швидкодії та надійності системи автоматичного
керування _____

_____ 3. Наявні апаратні компоненти та сенсорні модулі _____

4. Основні питання, які потрібно розробити:

_____ 1. Аналіз характеристик верстатів з ЧПК _____

_____ 2. Розроблення технічної реалізації проєкту _____

_____ 3. Синтез системи автоматичного управління _____

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

_____ 1. Конструктивна схема верстата з ЧПК _____

_____ 2. Блок-схема цифрового керування _____

_____ 3. Структурна схема мехатронного пристрою для автоматичної подачі
заготовок у фрезерні верстати _____

4. Структурна схема ППД-регулятора

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1			
2			
3			

7. Дата видачі завдання 28 листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз характеристик верстатів з ЧПУ	12.2024р. – 01.2025р.	
2	Розроблення технічної реалізації проекту	02.2025р. – 03.2025р.	
3	Синтез системи автоматичного управління	04.2025р. – 05.2025р.	

Студент

(підпис)

Дричик В.С.

Керівник роботи

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Дричик В.С. Автоматизована система керування верстатом з ЧПУ. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2025.

У кваліфікаційній роботі розглянуто проєктування автоматизованої системи керування верстатом з числовим програмним управлінням (ЧПУ), орієнтованої на підвищення ефективності подачі заготовок у фрезерні верстати серії GSM. Особливу увагу приділено створенню мехатронного модуля з електроприводом, керованим за допомогою центрального мікроконтролера та широтно-імпульсного перетворювача. В роботі здійснено синтез ПД-регулятора для електропривода постійного струму, а також розроблено регулятор для системи керування приводом мехатронного модуля.

Проведено моделювання системи в середовищі MATLAB/Simulink для оцінки її динамічних характеристик. Описано алгоритм роботи автоматизованої системи, а також обґрунтовано вибір сенсорних елементів, зокрема лазерних, ємнісних, індуктивних і фотоімпульсних датчиків. Результати дослідження можуть бути використані для впровадження у сучасні виробничі комплекси з метою автоматизації подачі деталей, підвищення точності та надійності їх обробки.

ABSTRACT

Drychyk V. Automated CNC Machine Control System. - Manuscript.

Research on obtaining a bachelor's degree in the specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies", educational and professional program. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2025.

This thesis presents the design of an automated control system for a CNC machine tool aimed at improving the efficiency of workpiece feeding into GSM-series milling machines. Particular attention is paid to the development of a mechatronic module equipped with an electric drive, which is controlled by a central microcontroller and a pulse-width modulation (PWM) converter. The work includes the synthesis of a PID controller for a direct current (DC) electric drive, as well as the development of a controller for the motion control system of the mechatronic module.

The system was simulated in MATLAB/Simulink to evaluate its dynamic characteristics. The control algorithm for the automated system is described in detail, and the choice of sensors—including laser, capacitive, inductive, and photo-interruptive types—is justified. The results of the research can be applied to modern production systems to automate part feeding processes and improve the accuracy and reliability of machining operations.

Let me know if you need this adapted for a specific publication format (IEEE, APA, etc.) or if you'd like a shorter/longer version.

.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРСТАТІВ З ЧПУ	9
1.1 Сутність і особливості верстатів з ЧПУ	9
1.2 Загальна будова верстатів з ЧПУ	12
1.3 Система керування ЧПУ	16
1.4 Програмування верстатів з ЧПУ.....	23
1.5. Фрезерні верстати.....	27
2 РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЄКТУ.....	31
2.1 Розроблення структурної схеми мехатронного пристрою для автоматичної подачі заготовок у верстати з ЧПУ.....	31
2.2 Вибір керуючих пристроїв.....	32
2.3 Вибір давачів.....	41
3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ.....	47
3.1 Синтез ПД-регулятора для електропривода постійного струму з широтно-імпульсним перетворювачем.....	47
3.2 Синтез регулятора системи керування електроприводом мехатронного модуля.....	52
3.3 Розроблення алгоритму управління мехатронного пристрою.....	54
ВИСНОВОК.....	56
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	57
ДОДАТКИ.....	59

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЧПК - числове програмне керування;

CNC - Computer Numerical Control - числове програмне керування;

УКП - узгоджувально-керуючий пристрій;

LAN - локальна мережа;

CAM - комп'ютерне підтримуване проектування;

PLC - програмований логічний контролер;

АД — асинхронний електродвигун;

ШГП — шарогвинтова передача;

ЧП — частотний перетворювач;

ПД - пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор;

ПІ - пропорційно-інтегральний регулятор;

ПД - пропорційно-диференціальний регулятор;

П - пропорційний регулятор.

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах стрімкого розвитку промисловості, особливо в галузі металообробки, автоматизація виробничих процесів набуває особливої актуальності. Впровадження систем числового програмного керування (ЧПК) дозволяє значно підвищити точність, продуктивність та ефективність верстатного обладнання. Одним із ключових напрямів розвитку є створення інтелектуальних мехатронних систем керування, здатних автоматично виконувати складні виробничі операції з мінімальним втручанням людини [1-10]. Саме тому розробка та вдосконалення автоматизованої системи керування верстатом з ЧПК є важливим та актуальним завданням сучасного машинобудування.

Метою даної роботи є розробка автоматизованої системи керування верстатом з числовим програмним керуванням, що базується на застосуванні мехатронних модулів, сенсорних систем і алгоритмів управління, які забезпечують надійне, точне та стабільне функціонування обладнання.

Для досягнення цієї мети в рамках роботи були поставлені такі **завдання:**

- розробити структурну схему мехатронного пристрою автоматичної подачі заготовок;
- обґрунтувати вибір мікроконтролера, датчиків і виконавчих механізмів для побудови системи;
- здійснити аналіз принципу дії та побудову алгоритму керування;
- провести синтез ПД-регулятора для електропривода постійного струму з ШІМ-перетворювачем;
- провести синтез регулятора системи керування електроприводом мехатронного модуля в середовищі MatLab/Simulink;
- оцінити технічні параметри і показники ефективності системи.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого керування технологічними операціями на верстаті з ЧПК.

Предметом дослідження виступає система керування мехатронного пристрою подачі заготовок, включно з алгоритмами регулювання і сенсорними компонентами.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості впровадження розробленої системи в сучасні виробничі лінії, що забезпечить підвищення продуктивності, автоматизацію процесів обробки деталей та зменшення ймовірності браку. Результати дослідження можуть бути використані при модернізації існуючого верстатного обладнання або при створенні нових систем з ЧПК у промисловості.

Апробація. В'ячеслав Дричик Автоматизована система керування верстатом з ЧПК на основі мехатронного модуля / В.Дричик // Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2025), Тернопіль, 2025. -С.75-78.

1. АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРСТАТІВ З ЧПК

1.1. Сутність і особливості верстатів з ЧПК

ЧПК (CNC) (англ. Computer Numerical Control; укр. числове програмне керування) – це широке поняття, яке охоплює різні типи пристроїв із різними розмірами, формами та функціями. Верстати з ЧПК – це машини, у яких комп'ютер використовується як центральний контрольний елемент [1-10].

Системи числового програмного керування застосовуються, зокрема, у таких верстатах, як: фрезерні, токарні, шліфувальні, свердлильні, розточувальні, довбальні, стругальні, хонінгувальні тощо. Залежно від типу обладнання, розрізняють 2-, 3-, 4-, 5- та 6-осьові верстати. Рух по окремих осях, а також привід шпинделів і додаткових пристроїв керуються та контролюються системою ЧПК.

Система керування ЧПК є "мозком" верстата. Порівняно зі звичайними верстатами, обладнання з ЧПК має такі особливості [8-12]:

- окремі приводи та вимірювальні системи для кожної осі з числовим керуванням;
- плавне регулювання швидкості обертання та подачі;
- використання для передачі приводу кулькогвинтових пар, зубчастих передач, лінійних двигунів і силових циліндрів;
- можливість досягнення високих параметрів обробки;
- зменшення кількості зубчастих передач або їх повне усунення;
- спеціальна конструкція, що забезпечує закритий робочий простір;
- автоматичний контроль і діагностика;
- висока сумарна потужність окремих приводів;
- паралельна обробка із використанням кількох шпинделів і інструментальних супортів;
- складна кінематика роботи (поворотно-нахильні столи, нахильні інструментальні головки, шестикоординатна обробка).

- інструментальні магазини, що забезпечують автоматичну зміну інструментів;
- автоматичне видалення стружки;
- заміна ковзних напрямних на кочені, що усуває ефект нерівномірного ковзання;
- системи інструментів зі збірними ріжучими елементами;
- сучасні інструментальні матеріали;
- автоматичний контроль інструментів;
- кодування інструментів;
- автоматична зміна заготовки;
- автоматичне вимірювання заготовки;
- багатопалетна обробка.

У традиційних верстатах інтелектуальним засобом компенсації похибок є оператор. Під час обробки кваліфікований оператор може змінювати режими різання для компенсації прогину, вібрацій тощо, щоб отримати бажану форму, розмір і якість поверхні.

Верстат із ЧПК може компенсувати лише ті похибки, які виявлені та передані в систему керування. Прогини, вібрації тощо вже не можуть контролюватися так просто. Через це верстати з ЧПК є більш жорсткими та міцними, що дозволяє їм виконувати обробку з вищою точністю, ніж традиційні аналоги.

Здатність таких машин адаптуватися до змінних умов під час обробки обмежена. По можливості умови мають бути визначені заздалегідь, оскільки процес контролюється лише програмою.

Традиційні верстати спроектовані для роботи під керуванням досвідченого оператора. У випадку ЧПК це вже не є обов'язковим, оскільки всі операції виконує машина під контролем програми.

Оптимальні режими різання, безперервна обробка, швидкі переміщення інструменту та різкі зупинки створюють навантаження, які не зустрічаються в традиційних верстатах.

Жорсткість відіграє важливу роль у точності верстата, тому у верстатах з ЧПК використовуються такі елементи, як напрямні та шпинделі. Також застосовуються товстіші елементи корпусу, ніж у традиційних верстатах. Використання симетричних литих деталей допомагає зменшити термічні напруження в машині. Ці конструктивні особливості призначені для запобігання негативному впливу сил, що виникають під час важкої обробки.

Напрямні традиційних верстатів, що працюють у режимі ковзного тертя, не мають постійного коефіцієнта тертя. При низьких швидкостях він значно збільшується, що призводить до нерівномірного ковзання. Система ЧПК потребує швидкого реагування на ковзання для коригування подачі відповідними командами.

Щоб усунути ці проблеми, ковзне тертя можна замінити коченням. Усі методи, що використовують тертя кочення, зменшують опір руху та усувають вібрації, спричинені нерівномірним ковзанням.

Основним недоліком конструкції напрямних кочення є менша несуча здатність і можливості кріплення, які гірші, ніж у напрямних традиційних верстатів. При використанні ковзних напрямних застосовуються гідростатичні системи, де рідина подається під високим тиском до 30 000 кН/м² між ковзними поверхнями. У такому випадку проблема нерівномірного ковзання повністю усувається.

Альтернативним рішенням є покриття поверхонь ковзання політетрафторетиленом (PTFE), який має надзвичайно низький коефіцієнт тертя [13].

Гвинти, що використовуються у традиційних верстатах, зазвичай мають трапецієподібну різьбу. Цей тип різьби створює великий опір тертя між боковими поверхнями гвинта та гайкою. У таких механізмах присутні значні люфти, що неприпустимо для верстатів з ЧПК.

Багато верстатів з ЧПК, особливо токарні центри, майже повністю закриті, що значно підвищує рівень безпеки. Це вважається необхідним через такі причини:

- велика кількість стружки та охолоджувальної рідини в зоні обробки;
- висока швидкість обертання шпинделя та подачі, що створює значні сили, які можуть спричинити серйозні травми у разі зіткнення або поломки інструменту;
- захисні кожухи зазвичай під'єднані до системи керування за допомогою кінцевих вимикачів – приводи працюють тільки при закритих кожухах.

У традиційних верстатах стружку зазвичай видаляє оператор вручну. Однак великий обсяг видаленого матеріалу та значне нагрівання під час обробки вимагають автоматичного видалення стружки у верстатах з ЧПК.

Багато виробників оснащують свої верстати пристроями для видалення стружки як складовий елемент обладнання. Це можуть бути конвеєри стрічкового або гвинтового типу.

Проте основна конструкція верстата також може значно сприяти відведенню стружки за межі зони обробки. Гравітаційне видалення не завжди є достатнім, тому його часто доповнюють системами подачі охолоджувальної рідини у вигляді кількох струменів навколо зони різання, що допомагає утримувати інструмент у чистоті.

Після завершення обробного циклу всю робочу зону можна очистити за допомогою струменя стисненого повітря або охолоджувальної рідини.

1.2 Загальна будова верстатів з ЧПК

Загальний вигляд верстата з числовим програмним керуванням (ЧПК) представлено на рисунку 1.1, а конструктивну схему цього ж верстата — на рисунку 1.2 [7, 11].

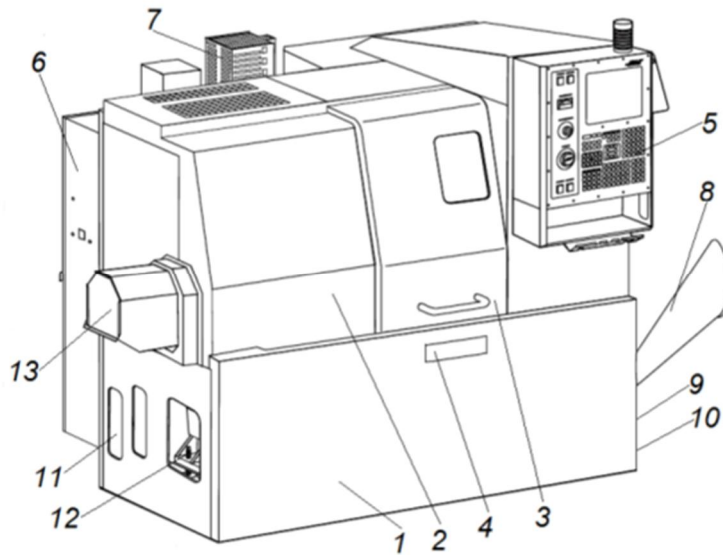


Рисунок 1.1 - Загальний вигляд верстата з ЧПК:

1 – основа, 2 – захисні кожухи, 3 – розсувні двері, 4 – уловлювач деталей, 5 – пульт керування, 6 – шафа керування, 7 – стабілізатор температури шпинделя, 8 – вихід транспортера стружки, 9 – система охолодження, 10 – гідравлічне джерело живлення, 11 – пристрої стисненого повітря, 12 – система центрального змащування, 13 – колектор охолоджувальної рідини [7, 11].

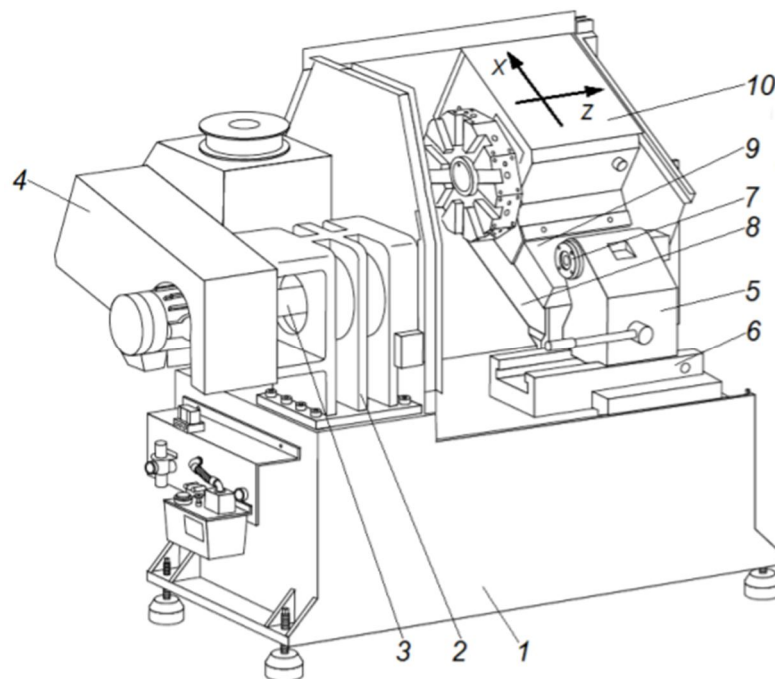


Рисунок 1.2 - Конструктивна схема верстата:

1 – чавунна основа, 2 – шпиндельна бабка, 3 – шпиндель, 4 – захисний кожух, 5 – задня бабка, 6 – основа задньої бабки, 7 – гідравлічно висувна гільза, 8 – поздовжній супорт, 9 – поперечний супорт, 10 – вузол інструментальної головки [7, 11].

На рисунку 1.3 показано вузли та підвузли, які є складовими верстата з ЧПК [11, 13-16].

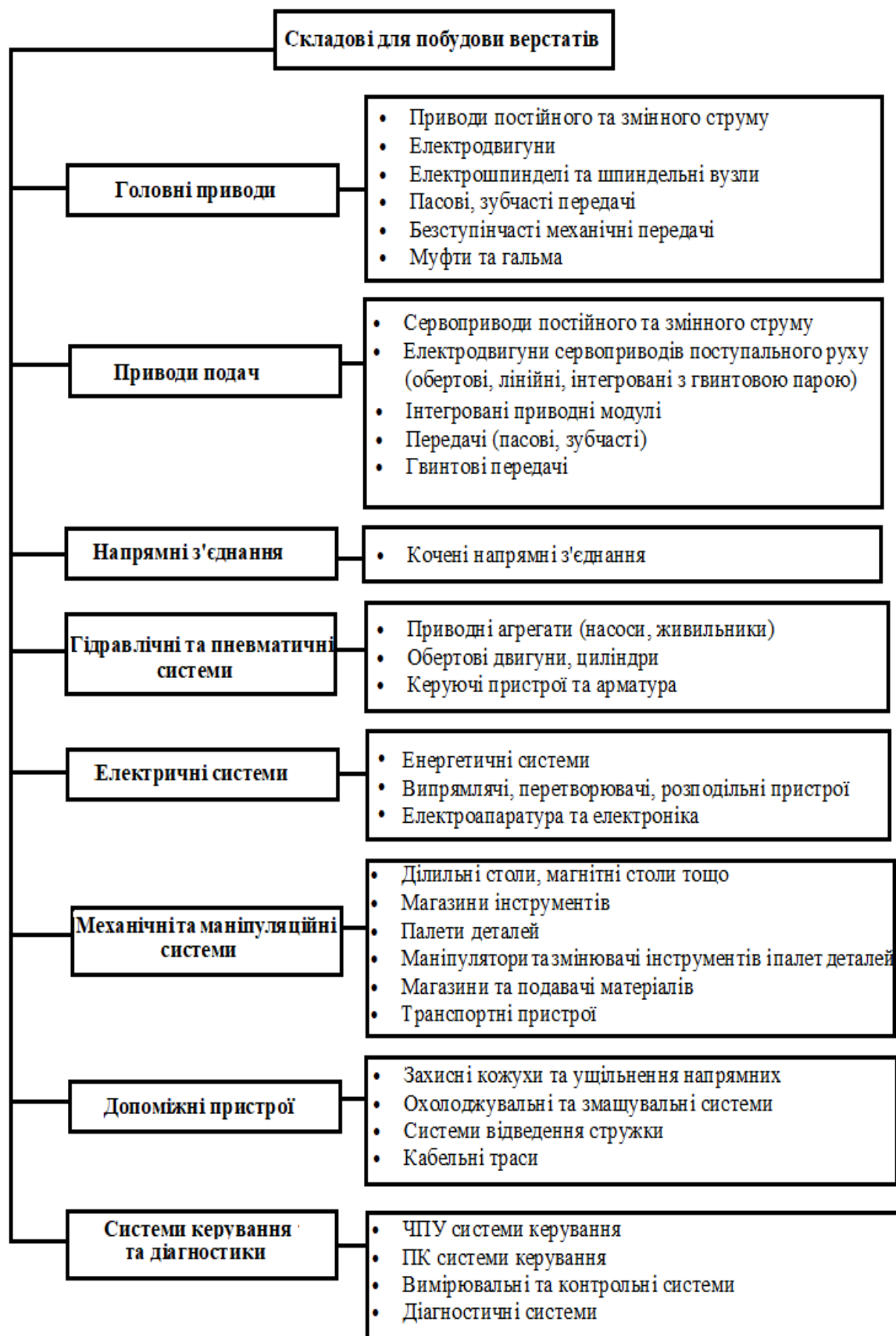


Рисунок 1.3 - Типові вузли для виготовлення верстатів.

Верстат з ЧПК також містить панель управління. Це інтерактивний пристрій між машиною та оператором. Під час роботи пристрою на екрані відображається поточне положення каретки верстата, частота обертання шпинделя, подача, деякі програми тощо. Алфавітно-цифрова клавіатура дозволяє ручне введення даних і навігацію в системному меню. Ручки та функціональні кнопки дозволяють регулювати параметри або вручну вмикати/вимикати периферійні пристрої (наприклад, конвеєри для стружки).

У сучасних верстатах з ЧПК система керування може відображати графічну симуляцію траєкторії інструменту, щоб можна було перевірити програми обробки до початку фактичної обробки. Також є можливість відобразити іншу важливу інформацію про вашу систему ЧПК, таку як параметри машини, помилки та діагностичні дані.

Модульна конструкція машини дозволяє перебудовувати або розширювати окремі компоненти. Він передбачає створення необхідних технічних рішень шляхом комбінування раніше створених окремих вузлів або компонентів.

Типи функцій, які можуть виконувати окремі команди [3]:

- основні функції: це функції, які потрібно використовувати постійно;
- допоміжні функції: цю функцію виконують з'єднувальні елементи та з'єднання;
- спеціальні функції: це функції, альтернативні основним функціям, і водночас специфічні для даного варіанту;
- адаптивні функції: відіграють значну роль у адаптаційних ситуаціях системи до іншої системи.

Модульна конструкція верстатів приносить багато переваг і виробнику, і замовнику, і наступному користувачеві.

До переваг верстата з числовим програмним керуванням слід віднести наступні твердження.

1. Скорочення часу проектування та будівництва.
2. Скорочення часу будівництва.

3. Скорочення часу запуску.
4. Зменшення кількості спеціальних частин у конструкції.
5. Більша доступність запасних частин.
6. Полегшення планування виробництва.

Модульний принцип проектування широко використовується виробниками верстатів з ЧПК.

1.3. Система керування ЧПК

ЧПК є як спеціалізованою, так і універсальною формою автоматизації процесу. Вона має широкий спектр застосування, хоча спочатку була розроблена для керування рухом і експлуатації верстатів [5, 7, 9].

Керування верстатом за допомогою системи ЧПК обумовлюється введенням числових значень у систему. Машина виконує операції механічної обробки з заданою швидкістю, щоб оброблюваний виріб мав потрібну форму та розмір, як це було передбачено.

Існують два типи систем керування верстатами ЧПК. Загальна точність машини залежить від типу використовуваного контуру керування.

Контроль положення переміщення та швидкості руху може здійснюватися як у відкритому, так і в замкнутому контурі. У системі з відкритим контуром положення та швидкість переміщення не вимірюються.

Відкритий контур системи керування не підтримує зворотного сигналу до керуючого пристрою. Імпульси потоку надсилаються регулятором і приймаються спеціальним типом сервомеханізму, який називається кроковим двигуном. Потім він виконує рух відповідно до команди. Далі система керування підраховує імпульси, щоб перевірити, чи не виникло розбіжності в позиціюванні. Однак вона не має можливості перевірити, чи досяг інструмент заданого положення. Якщо сталася помилка у визначенні позиції, пристрій продовжить працювати з цією похибкою.

Система керування у відкритому контурі може застосовуватися в тих випадках, коли немає змін у навантаженні, наприклад, у свердлильних верстатах із ЧПК.

Перевагою відкритої системи є низька вартість, оскільки вона не потребує додаткового обладнання та електроніки для контролю зворотного сигналу. Недоліком є складність виявлення похибки позиціювання [1].

Схему відкритого контуру представлено на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 - Блок-схема системи відкритого контуру.

У замкненому контурі системи керування електронні імпульси руху надсилаються з керуючої системи до сервомеханізму, що дозволяє йому обертатися відповідно до кожного імпульсу. Імпульси виявляються та підраховуються перетворювачем, який передає зворотну інформацію. З кожним кроком руху перетворювач надсилає зворотний сигнал до системи керування, яка порівнює поточне положення керованої осі із заданим положенням. Коли кількість надісланих і отриманих імпульсів збігається, система керування надсилає імпульси для наступного руху.

Системи із замкненим контуром дуже точні. Більшість із них має автоматичну компенсацію похибок, оскільки зворотний пристрій вказує на помилку, а керуюча система вносить корекції для приведення переміщення у відповідне положення. Використовуються серводвигуни постійного струму, змінного струму або гідравлічні сервомеханізми [3, 12].

Раніше написана в символічній формі програма для обробки вводиться в систему числового керування через так званий зчитувач. У ньому відбувається перетворення програми з алфавітно-цифрової форми в числову.

На рисунку 1.5 представлено принцип роботи замкненого контуру.



Рисунок 1.5 - Блок-схема системи із замкненим контуром.

Програма може вводитися в зчитувач [14]:

- блоково: інформація зчитується блоками, у яких містяться всі необхідні дані для виконання певної дії чи операції. Завдяки цьому система числового керування може негайно після зчитування перейти до виконання запрограмованої дії.

- послідовно: інформація зчитується рядок за рядком. Для зчитування всього блоку необхідно зберігати зчитані рядки в проміжній пам'яті.

Схему потоку даних у системі ЧПК наведено на рисунку 1.6.

Наведена схема відображає лише основні функціональні блоки та зв'язки між ними.

На наступному етапі інформація, що міститься в програмі, декодується декодером у форму, зрозумілу для системи числового керування. Далі окремі операції виконуються за допомогою сигналів від декодера.

У блоці проміжної пам'яті інформація розподіляється на:

- технологічну інформацію – надходить до узгоджувально-керуючого пристрою (УКП);

- геометричну інформацію – надходить до суматора.

У суматорі геометрична інформація коригується за потреби. Коригування вносить оператор через панель керування. Усі потенціометри, перемикачі та інші пристрої, якими користується оператор, формують постійну пам'ять, через яку вводяться геометричні дані. Інформація, що

виходить із суматора, є остаточною геометричною інформацією, яка реалізується верстатом.

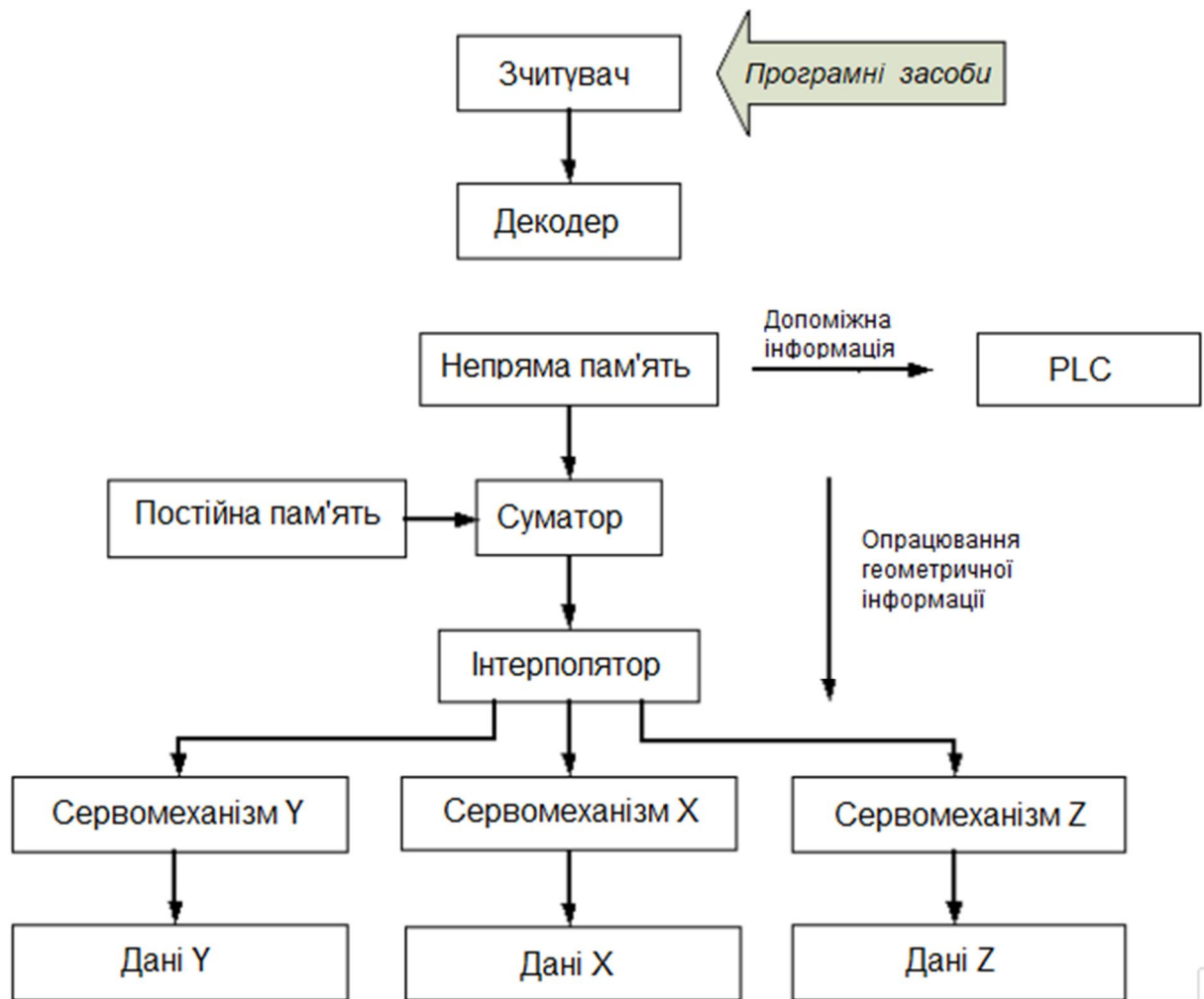


Рисунок 1.6 - Блок-схема цифрового керування [14].

Найважливішим функціональним блоком числового керування є інтерполятор. Він забезпечує керування рухом двох або більше механізмів подачі таким чином, що траєкторія руху визначається конструкцією інтерполятора.

Інтерполятор використовується в контурних системах керування, які забезпечують складний рух. Вихідна інформація з інтерполятора передається до сервомеханізмів подачі – автоматичних систем регулювання переміщення робочих вузлів верстата, що забезпечують точне позиціонування.

На рисунку 1.7 представлені всі види інтерполяції.

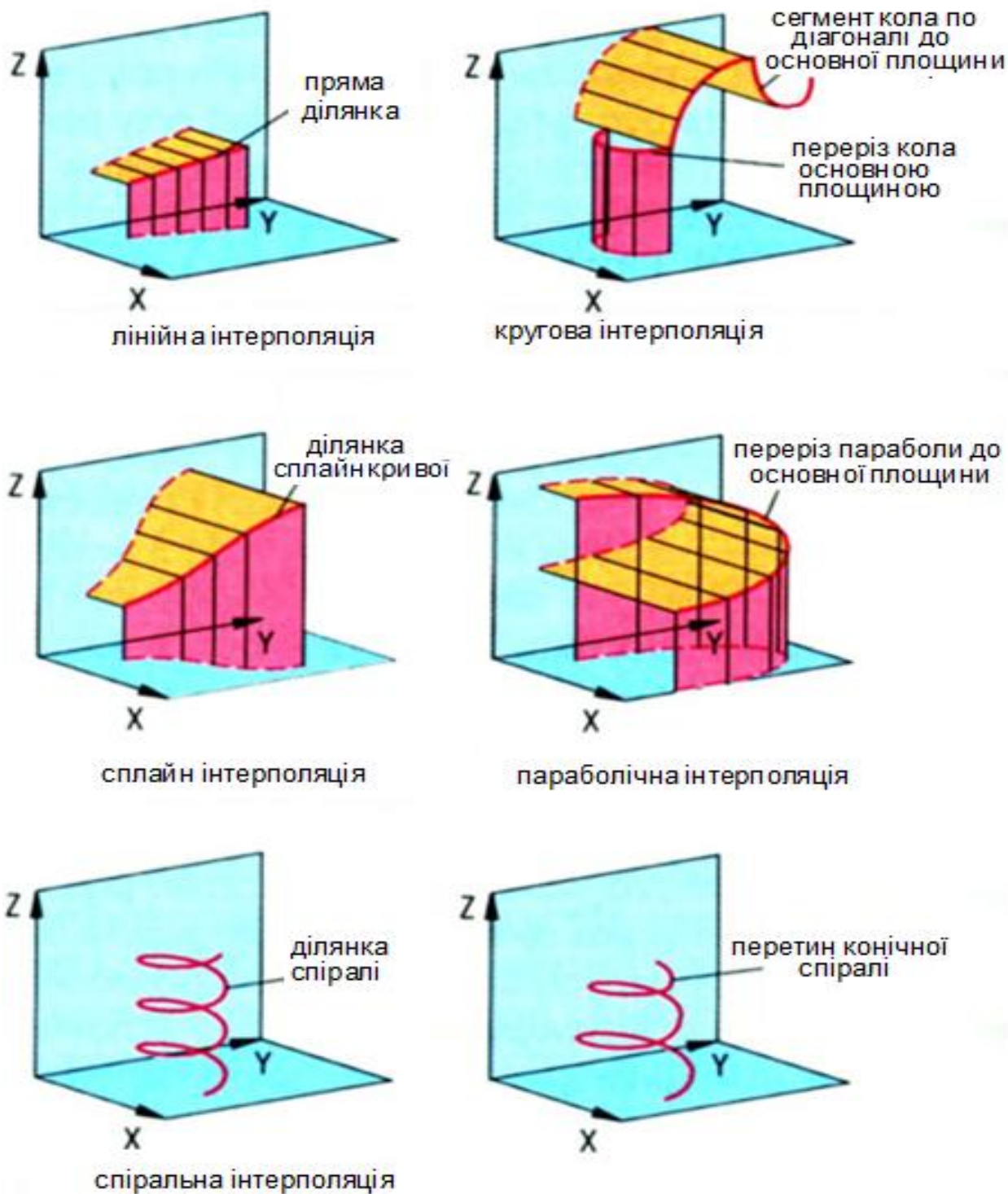


Рисунок 1.7 - Види інтерполяції.

Вхідний пристрій [7, 11]:

- USB-пам'ять: USB-пам'ять можна багаторазово вставляти і виймати, вона портативна, компактна, її вміст можна редагувати, видаляти, додавати тощо. Дані, збережені в USB-пам'яті, стійкі до пилу і подряпин. Усі

комп'ютери підтримують USB-пам'ять, можуть зчитувати і записувати на неї дані, що робить її більш популярною для використання на ЧПК-верстатах;

- послідовна комунікація: передавання даних між комп'ютером і верстатом ЧПК часто здійснюється через послідовний порт. Міжнародні стандарти для послідовної комунікації визначені так, щоб інформація могла обмінюватися в упорядкованому вигляді. Найпоширенішим підключенням між комп'ютером і верстатом ЧПК є стандарт EIA RS-232. Більшість персональних комп'ютерів і ЧПК-верстатів мають вбудований порт RS-232 та стандартний кабель RS-232, що служить для підключення верстата ЧПК до комп'ютера, забезпечуючи надійну передачу даних. Частина програм можна завантажити в пам'ять верстата або передати на комп'ютер для тимчасового зберігання, запустивши відповідну програму на комп'ютері і налаштувавши систему керування верстатом для з'єднання з цією програмою;

- Ethernet-з'єднання: через розвиток комп'ютерних технологій стає більш практичним і економічним передавати програми між комп'ютерами та верстатами ЧПК через мережу Ethernet. Цей носій забезпечує більш ефективні та надійні засоби для передачі та зберігання даних. Більшість компаній має побудовану локальну мережу (LAN) та відповідну інфраструктуру. Все більше виробників верстатів ЧПК пропонує опцію з Ethernet-картою для безпосередньої комунікації в мережі LAN;

- діалогове програмування: програми для опрацювання можуть бути введені в систему управління безпосередньо з клавіатури. Вбудоване інтелектуальне програмне забезпечення в системі управління дозволяє оператору вводити необхідні дані крок за кроком. Це дуже ефективний спосіб підготовки програм для відносно простих обробок.

Система управління [3-5].

Система управління верстатом є серцем системи ЧПК. Існують дві підсистеми в системі управління верстатом: обчислювальна одиниця та одиниця контрольно-управлінської петлі.

Обчислювальна одиниця. Після отримання програми управління, ця одиниця спочатку інтерпретує та кодує програму обробки в внутрішні машинні коди. Інтерполятор потім обчислює проміжні позиції руху в межах базової одиниці довжини, яка є найменшою одиницею довжини, яку контролер може обробляти. Обчислені дані передаються в одиницю контрольно-управлінської петлі для подальших дій.

Одиниця контрольно-управлінської петлі. Дані з обчислювальної одиниці перетворюються в електричні сигнали в одиниці контрольно-управлінської петлі для керування приводним механізмом для виконання необхідних рухів. Інші операції, такі як вмикання/вимикання шпинделя верстата, охолодження або затиск інструмента, також керуються цією одиницею відповідно до внутрішніх кодів машини.

Система управління використовується для виконання наступних функцій:

- зчитування закодованих інструкцій;
- розшифровка закодованих інструкцій;
- реалізація інтерполяції (лінійної, кругової та спіральної) для генерації команд руху осі;
- надання команд руху осі до підсилювачів для приводів механізмів осі;
- прийом сигналів зворотного зв'язку по положенню та швидкості для кожної осі приводу;
- впровадження допоміжних функцій управління, таких як вмикання/вимикання охолодження або шпинделя та зміна інструментів.

Системи зворотного зв'язку.

Щоб машина ЧПК працювала точно, значення положення і швидкості повинні бути постійно оновлювані. Зазвичай використовуються два типи систем зворотного зв'язку: система вимірювання поточного положення та система вимірювання поточної швидкості.

Система вимірювання положення.

Існують два типи пристроїв зворотного зв'язку для вимірювання поточного положення: лінійний перетворювач для прямого вимірювання положення та перетворювач обертів для кутового або проміжного вимірювання довжини.

Лінійний перетворювач. Лінійний перетворювач є пристроєм, встановленим на столі машини для вимірювання фактичного переміщення повзунка таким чином, щоб люфт на гвинтах, двигунах тощо не призводив до помилки в зворотних даних. Пристрій має дуже високу точність, але також є дорогим у порівнянні з іншими вимірювальними пристроями, встановленими на гвинті або двигуні.

Перетворювач обертів. Перетворювач обертів є пристроєм, встановленим на кінці валу двигуна чи гвинта для вимірювання кутового переміщення. Цей пристрій не може безпосередньо вимірювати лінійне переміщення, оскільки може виникнути помилка, спричинена люфтом гвинта чи двигуна тощо. Ця помилка може бути компенсована виробником машини під час калібрування пристрою.

Система вимірювання швидкості.

Фактична швидкість двигуна може вимірюватися за допомогою напруги, що генерується тахометром, встановленим на кінці валу двигуна. Тахометр постійного струму є маленьким генератором, який виробляє вихідну напругу, пропорційну швидкості обертання. Згенерована напруга порівнюється з напругою, що вказує на бажану швидкість. Різниця між напругами може використовуватись для регулювання роботи двигуна з метою усунення помилки.

1.4. Програмування верстатів з ЧПК

Програмне забезпечення для ЧПК використовується для створення траєкторії інструменту для систем керування ЧПК або для підключення

персонального комп'ютера (ПК) до контролера ЧПК. ЧПК використовує комп'ютерне підтримуване проектування (САМ) і комп'ютерно підтримуване виробництво для керування такими пристроями ЧПК, як токарні верстати, верстати чи фрезерні верстати тощо.

Системи керування верстатами ЧПК використовують програмне забезпечення ЧПК для керування як самими верстатами, так і процесами. Програмне забезпечення контролерів ЧПК може забезпечити можливості, починаючи від простого лінійного контролю руху від точки до точки до дуже складних алгоритмів із багатьма керованими осями [7, 11, 15, 16].

Персональні комп'ютери з програмним забезпеченням ЧПК не потребують спеціалізованого обладнання, наприклад, програмованих логічних контролерів (PLC) або карт керування рухом. Програмне забезпечення ЧПК виконує всі функції, пов'язані з контролером ЧПК, включаючи введення НМІ і введення/виведення (I/O) керування. Системи на основі програмного забезпечення ЧПК відрізняються за вартістю, типом, функціями та застосуваннями. Вартість може значно варіюватися, а типи визначаються їх підтримкою для об'ємних і/або поверхневих моделей.

З точки зору функцій, опції програмного забезпечення ЧПК включають підтримку четвертої осі, підтримку 2,5D для токарних верстатів чи верстатів. Часто програмне забезпечення ЧПК використовується для швидкого прототипування, моделювання, обробки деревини та виробництва годинників.

Програмне забезпечення ЧПК для об'ємних і поверхневих моделей є широко доступним. Кваліфікації працівника, який обслуговує машину з таким програмним забезпеченням, не повинні бути дуже високими, оскільки в панелі керування є готові, визначені функції. Користувачі програмного забезпечення ЧПК можуть визначати, які дані повинні відображатися, а які ні, що дає їм більшу свободу в роботі. Вікна на екрані можуть бути у формі плиток, розташованих каскадно, або повністю приховані, як у інших додатках системи Microsoft Windows.

Загальноприйнятим стандартом у програмуванні верстатів є стандарт ISO 6983 [7, 8]. Він охоплює набір функцій, які використовуються, наприклад, для:

- G0 - лінійна інтерполяція з високою швидкістю подачі.
- G1 - лінійна інтерполяція з подачею.
- G2 - колова інтерполяція за годинниковою стрілкою.
- G3 - колова інтерполяція проти годинникової стрілки.
- G17 - рухи в площині XY.
- G18 - рухи в площині ZX.
- G19 - рухи в площині YZ.
- G40 - відключення компенсації інструмента або зсуву інструмента.
- G41 - компенсація інструмента вліво.
- G42 - компенсація інструмента вправо.
- G54-G59 - зсув початку координат.
- G90 - абсолютистське позиціонування.
- G91 - інкрементальне позиціонування.
- G94 - подача на хвилину.
- M0 - зупинка програми.
- M1 - умовна зупинка програми
- M2 - кінець програми
- M3 - обертання шпинделя за годинниковою стрілкою
- M4 - обертання шпинделя проти годинникової стрілки
- M6 - зміна інструмента
- M8 - вмикання охолодження №1
- M9 - вимикання охолодження
- M30 - кінець програми
- D0 - корекція (переміщення) інструмента вимкнена.
- D1 - вмикання корекції інструмента номер 1.
- F - подачі як "абсолютне значення" геометричної суми складових швидкості відносно окремих осей.

- S - визначення швидкості обертання шпинделя.
- T - вибір інструмента.
- F - визначення швидкості подачі.
- X - положення по осі "X".
- Y - положення по осі "Y".
- Z - положення по осі "Z".

Приклад програми виглядає наступним чином:

```

N0000 G71 G90 G95
N0010 G54
N0020 T1 D41
N0030 S800 M4
N0040 G0 X73 Z78
N0050 G1 X70 Z75 F.5 M8 N0060 G0 X50 Z75
N0070 G1 G41 X49 Z72.5 F.5 N0080 X-1 F.2
N0090 G0 G40 Z75 M9
N0100 T2D42
N0110 S1200 M4
N0120 G0 X18 Z75 M8
N0130 G1 X20 Z74
N0140 X15
N0150 X70
N0160 X100 Z200 M9
N0170 M30

```

Залежно від системи керування. Представлена програма, незважаючи на те, що написана в стандарті ISO, може містити різний синтаксис для опису однієї і тієї ж операції. Це зумовлено існуючими відмінностями між різними системами керування.

1.5. Фрезерні верстати

Фрезерний верстат CNC — це комп'ютеризовані верстати для обробки матеріалів, таких як сталь, алюміній, пластмаси, дерево та пінопласт. Залежно від матеріалів, які підлягають обробці, вибираються відповідні конструктивні рішення та відповідний підбір приводів для кожної осі. Фрезерні верстати CNC здатні виконувати як двовимірну (2D), так і тривимірну (3D) обробку за допомогою фрез, що обертаються на високих швидкостях.

Верстат складається з основи, лінійних напрямних і підшипників, крокових двигунів або серводвигунів, ходових або кулькових гвинтів, шпинделя та системи керування. Основу формує рама, яка утримує всі складові частини верстата разом.

Існує кілька конструктивних типів [17]:

- верстати типу C — мають каркас у формі літери «C», осі X і Y розташовані в площині столу, а вісь Z є вертикальною — відповідно до напрямку шпинделя (рисунки 1.8).

- порталні верстати — складаються зі стаціонарного столу та мосту, який з'єднує вертикальні колони. Всі порталні верстати мають три рухомі осі: X, Y, Z (рисунки 1.9).

- чотириосьові верстати — мають додаткову вісь руху. У п'ятиосьових конфігураціях головка верстата може здійснювати обертальні та кутові рухи навколо осей. Шестиосьові верстати зазвичай мають шарнірно закріплену головку (рисунки 1.10).

Більшість інтерфейсів верстатів CNC, які працюють на спеціалізованих або універсальних комп'ютерах, використовують графічні програми під операційною системою Microsoft Windows.

Комп'ютер містить програму для зчитування спеціальних файлів із моделями деталей для обробки, створених за допомогою технології CAD. Програма автоматично генерує траєкторію інструмента, а потім контролер комп'ютера синхронізовано передає імпульси кроку та напрямку до

контролера крокового двигуна або серводвигуна. У свою чергу, контролер двигуна надсилає сигнал до двигуна, що спричиняє його рух у відповідному напрямку уздовж визначеної осі. Ходовий гвинт, що приводиться в рух кроковим двигуном або серводвигуном, осьово переміщує супорт уздовж лінійних напрямних.



Рисунок 1.8 - Верстат типу С [16].



Рисунок 1.9 - Верстат портального типу [5].

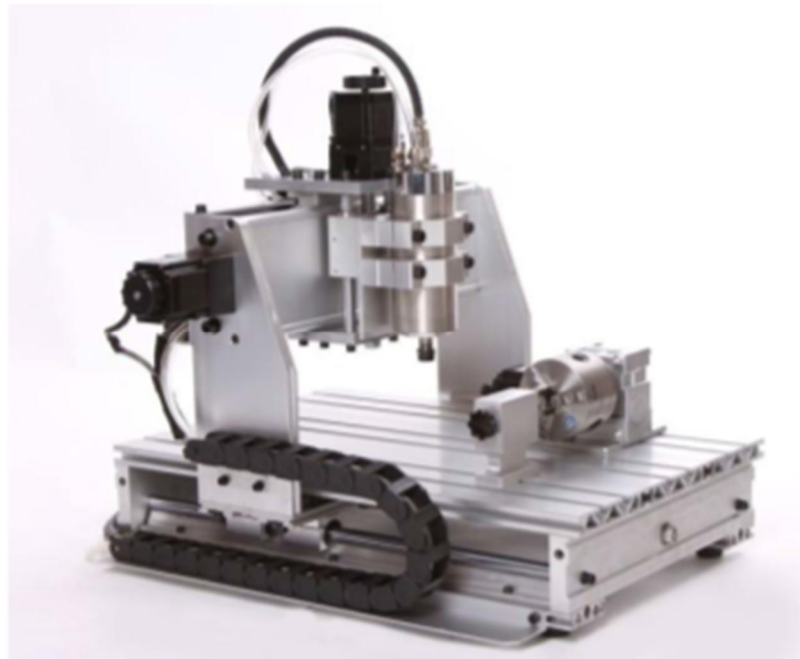


Рисунок 1.10 - Верстат з додатковою четвертою віссю [16].

Вибір CNC-верстата вимагає аналізу специфікацій і функцій. Машини з 3, 4, 5 або 6 осями є широко доступними. Робоча область таких верстатів розташована вздовж осей X, Y і Z. Максимальна швидкість стосується максимальної швидкості подачі напрямних верстата. Потужність шпинделя означає номінальну потужність шпинделя, який приводить у рух ріжучий інструмент.

На рисунку 1.11 представлено конструкцію зразкового верстата.

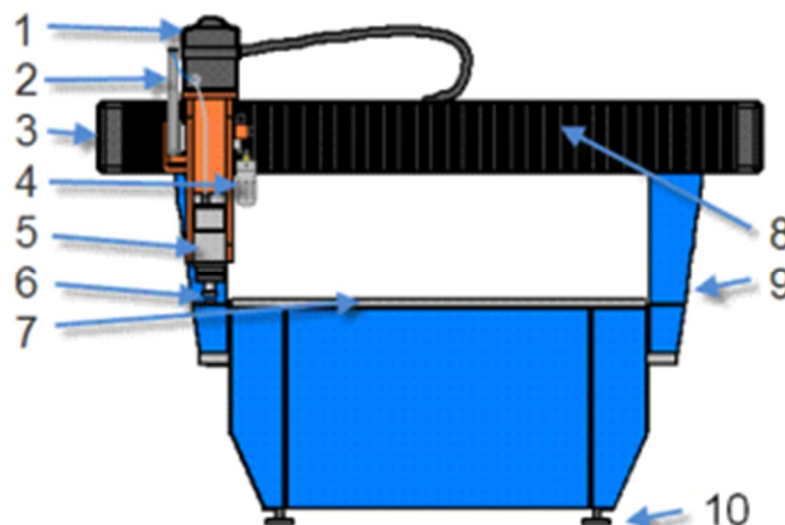


Рисунок 1.11 - Фрезерний верстат компанії Kimla BPF 1520 [5].

На рисунку 1.11 використані наступні позначення.

1. Захисний кожух, що забезпечує доступ до двигуна осі Z.
2. Пневмоциліндр, що утримує вісь Z у разі вимкнення живлення.
3. Захисний кожух, що забезпечує доступ до двигуна та редуктора осі X.
4. Масляний резервуар і регулятор механізму охолодження масляним туманом (опція).
5. Шпиндель.
6. Датчик довжини інструменту.
7. Робочий стіл.
8. Гофрований кожух, що захищає механізми від забруднення.
9. Рухома рама осі Y.
10. Опора.

З погляду функціональності деякі верстати мають захисні кожухи для захисту операторів від охолоджувальної рідини та стружки, що утворюється під час обробки. Інші верстати оснащені кількома шпинделями, що дозволяє виконувати різні операції кількома інструментами в одному налаштуванні машини. Також доступні верстати ЧПУ з вакуумною системою фіксації заготовок та системами автоматичної зміни інструменту.

2. РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЄКТУ

2.1 Розроблення структурної схеми мехатронного пристрою для автоматичної подачі заготовок у верстати з ЧПУ

Мікроконтролер, отримуючи сигнали з датчиків положення, надсилає команду на частотний перетворювач для запуску двигуна. Двигун обертає механізм подачі заготовки. При досягненні необхідного положення або за сигналом оператора, система зупиняє подачу, активуючи електромагнітне гальмо [1, 10, 17].

На рисунку 2.1 зображено структурну схему мехатронного приводу, який використовується для автоматичної подачі заготовок у фрезерні верстати серії GSM.

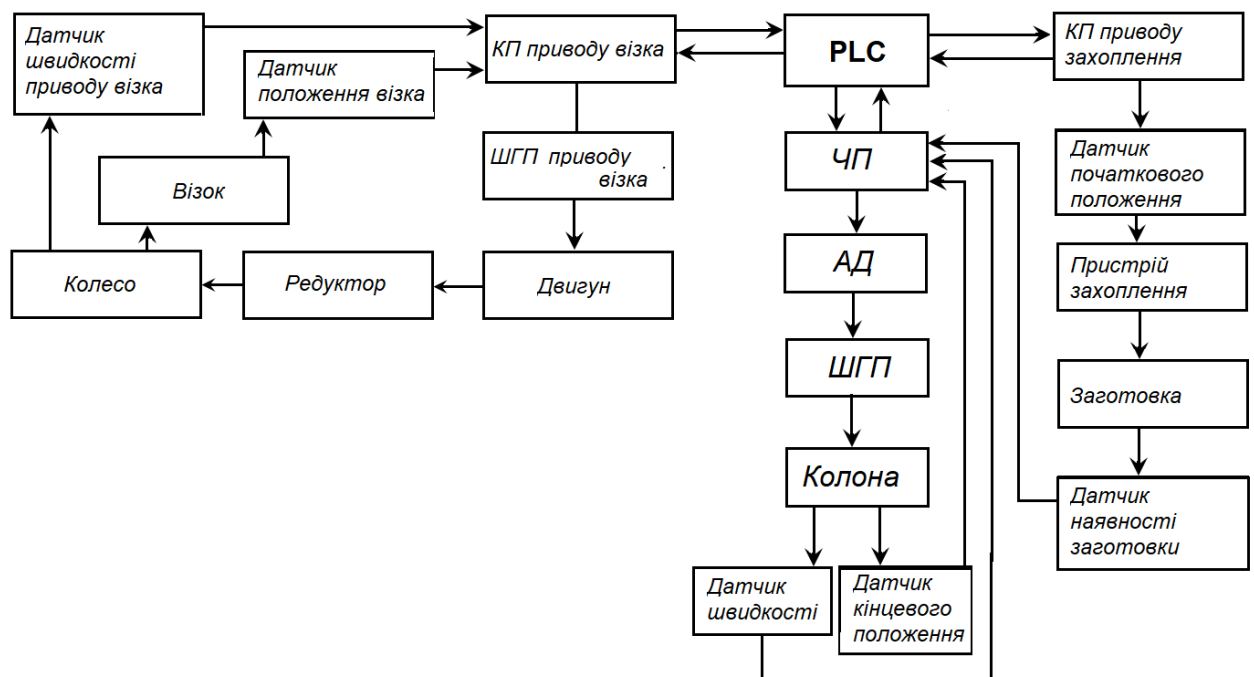


Рисунок 2.1 – Структурна схема мехатронного пристрою для автоматичної подачі заготовок у фрезерні верстати серії GSM

На схемі використані наступні компоненти: PLC — центральний мікроконтролер, що виконує керування усією системою; АД — асинхронний електродвигун, який забезпечує рух механізму подачі; ШГП — шарогвинтова

передача, яка перетворює обертальний рух двигуна на лінійне переміщення заготовки; ЧП — частотний перетворювач, що регулює швидкість та напрямок обертання двигуна [18].

АД і ШГП виступають у ролі лінійного мехатронного модуля переміщення.

Центральний мікроконтролер за допомогою широтно-імпульсних перетворювачів і пристроїв керування приводами координує рухи мехатронного пристрою вздовж рейок, а також пересування візка по напрямних.

Орієнтація в просторі для горизонтальних переміщень здійснюється за допомогою лазерних далекомірів. Вертикальні переміщення забезпечує мехатронний модуль з поступальним рухом на основі шаро-гвинтової передачі, межі ходу якого визначаються кінцевими вимикачами. Цей модуль переміщує механізм захоплення, що з'єднаний з мікроконтролером через електропневматичний перетворювач.

2.2 Вибір керуючих пристроїв

Для керування всіма асинхронними двигунами, встановленими в мехатронній системі, пропонується використовувати частотний перетворювач Invertek Drives (рисунок 2.2) [18].

Для приводу механізму переміщення рекомендовано використовувати перетворювач з векторним керуванням. Він забезпечує широкодіапазонний (не менше 1000:1) високоточний асинхронний електропривід, який підходить для різних виробничих механізмів, зокрема для головного руху та подачі металорізальних верстатів із ЧПК, а також для промислових роботів.

Ці частотні перетворювачі постачаються разом з асинхронними двигунами, які оснащені вбудованими датчиками швидкості або положення, а також електромагнітним гальмом. Це значно спрощує процес монтажу систем керування механізмами переміщення.



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд частотного перетворювача Invertek Drives

Перетворювачі мають моноблочну конструкцію для настінного монтажу та одностороннього обслуговування. Вони відповідають ступеню захисту IP20, що означає захист від проникнення твердих частинок розміром понад 12 мм, проте не мають захисту від вологи.

Завдяки різним варіантам виконання інтерфейсної плати, можливе підключення датчиків швидкості або положення, що працюють з різними типами сигналів – як імпульсними, так і синусно-косинусними.

Завдяки мінімальним статичним і динамічним втратам, а також низькому енергоспоживанню керуючих ланцюгів, частотний перетворювач має дуже високий коефіцієнт корисної дії.

Його конструкція складається лише з кількох основних елементів: несучого радіатора з вентиляторами, силової, процесорної та інтерфейсної плат, а також захисного пластикового корпусу.

Усі силові з'єднання зручно згруповані на єдиному клемному блоці силового модуля, що має чітке маркування. Живлення керуючих ланцюгів здійснюється безпосередньо від шини постійного струму, тому не потребує окремого підключення. Управлінські сигнали згруповані за функціональним призначенням та виведені на роз'єми й клемники інтерфейсної плати.

За допомогою пульта керування можна переглядати та змінювати параметри електропривода, а також запускати й контролювати його робочі режими.



Рисунок 2.3 – Плата перетворювача



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд пульта управління

Інформація на дисплеї відображається у такій структурі:

- верхній рядок використовується для індикації стану – тут відображаються сигнали захисту, обміну даними та поточного режиму роботи приводу;
- нижній рядок показує параметри електроприводу, змінні величини та назви розділів меню.

Пульт керування може працювати в режимах: вибору та перегляду параметрів, редагування параметрів, керування запуском/зупинкою двигуна.

Режим вибору та перегляду параметрів дає змогу користувачеві переглядати значення параметрів у поточному меню, а також переходити між рівнями меню вгору та вниз.

Режим редагування параметрів дозволяє змінювати значення вибраного параметра. Під час редагування значення починає блимати, що вказує на активний режим внесення змін.

Режим керування запуском/зупинкою двигуна дає можливість розблокувати або заблокувати перетворювач, а також запустити чи зупинити двигун.

Перетворювач обладнаний наступними системами захисту:

- від перевищення струму (включаючи коротке замикання вихідних фаз між собою та на землю);
- від зникнення напруги в керуючих ланцюгах;

- від збоїв програмного забезпечення;
- від надмірного підвищення напруги в мережі живлення;
- від критичного зниження напруги в мережі живлення;
- від аварійних ситуацій у системі розсіювання надлишкової енергії;
- від невідповідності фактичної швидкості заданій (включаючи помилки підключення датчика);
- тепловий захист перетворювача;
- тепловий захист двигуна (за наявності вбудованого температурного датчика);
- захист двигуна за часо-струмовою характеристикою.

Програмно реалізована система керування підтримує замкнений контур регулювання швидкості або моменту. Мінімальний цикл обчислення регулятора швидкості – 100 мкс, регулятора моменту – 50 мкс.

До інтелектуальних функцій перетворювача належать:

- автоматичне визначення параметрів двигуна та налаштування регуляторів, що значно спрощує конфігурування системи векторного керування;
- автоматичний перерахунок параметрів регуляторів, який оптимізує їх взаємозв'язок під час зміни будь-якого з них, що полегшує налаштування замкнутих контурів і мінімізує ризик помилок;
- адаптація до змінної температури ротора, яка забезпечує стабільність характеристик приводу незалежно від температурних коливань двигуна під час роботи;
- адаптація до механічного навантаження, що гарантує стабільність характеристик приводу при зміні навантажувального моменту та моменту інерції.

Усі параметри мають логічні діапазони налаштувань, дискретність і заводські значення за замовчуванням, до яких можна повернутися у будь-який момент.

Вхідні сигнали: 4 ізольовані аналогові входи, 12 програмованих ізольованих цифрових входів, вбудоване ізольоване джерело постійної напруги 24 В, 40 мА (24VI).

Вихідні сигнали: 4 ізольовані програмовані транзисторні виходи, 2 програмовані релейні виходи, комунікаційні порти RS-232/485 для підключення комп'ютера при завантаженні та модифікації програмного забезпечення.

Можливості програмування передбачають програмування через пульт керування або ПК через комунікаційний порт; налаштування аналогових входів, включаючи вибір діапазону та нульового рівня сигналу, а також параметрів цифрової фільтрації; конфігурацію параметрів датчика швидкості/положення, зокрема вибір типу сигналу та кількості періодів на оберт; Програмування структури та параметрів системи керування.

До ключових параметрів для вибору перетворювача належать: напруга живлення, номінальна вихідна потужність, номінальний вихідний струм.

Номінальний струм, споживаний електродвигунами, визначається за спеціальною формулою.

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi \cdot \eta}, \quad (2.1)$$

де $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність, споживана двигуном, Вт;

$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга живлення, В;

$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності двигуна;

η – номінальний ККД двигуна.

На основі формули (2.1) отримуємо:

– струм двигуна переміщення мехатронного пристрою – 0,025 А;

– струм двигуна переміщення візка – 0,01 А.

Оскільки в системі приводу переміщення встановлено два двигуни, їх номінальні струми підсумовуються. На основі отриманого значення вибирається відповідний перетворювач. Таке об'єднання допустиме, оскільки дозволяється підключати кілька двигунів, що працюють у межах одного

технологічного циклу, до виходу одного перетворювача, за умови, що його вихідна потужність є достатньою.

Згідно поставленій задачі оберемо перетворювачі з наступними параметрами (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Параметри перетворювача

Номінальна вихідна потужність	кВ·А	3,3
Типова потужність двигуна для виконання 2	кВт	1,5
Напруга живлення	В	380 +10/-15%
Частота напруги живлення	Гц	48..63
Вихідна напруга	В	0...вихідна напруга
Вихідна частота	Гц	0..400
Номінальний вихідний струм $I_{\text{НОМ}}$ (дійсн.)	А	5
Максимальний вихідний струм $I_{\text{МАХ}}$ (дійсн.) ²	А	6,5
Струм спрацьовування захисту $I_{\text{МТЗ}}$ (абсолютне значення)	А	12
Максимальний струм гальмування	А	10
Робочий діапазон температур навколишнього середовища	°С	0..+40

Для реалізації функцій мехатронного пристрою обираємо мікроконтролер PIC18F622 фірми Microchip Inc /10/ [2, 6, 9, 19], який забезпечує:

- управління асинхронними двигунами через перетворювач частоти;
- обробку сигналів з датчиків швидкості та положення;
- контроль параметрів роботи електроприводу;
- обмін даними з пультом управління та іншими модулями системи;
- захист від перевантажень, аварійних режимів та збоїв у роботі.

Вибраний мікроконтролер характеризується достатньою обчислювальною потужністю, необхідною кількістю входів/виходів,

інтерфейсами для зв'язку (UART, RS-485, CAN) і підтримкою алгоритмів векторного керування електроприводом.

Корпус мікроконтролера PIC18F622 з уточненням призначення виходів показаний на рисунку 2.5.

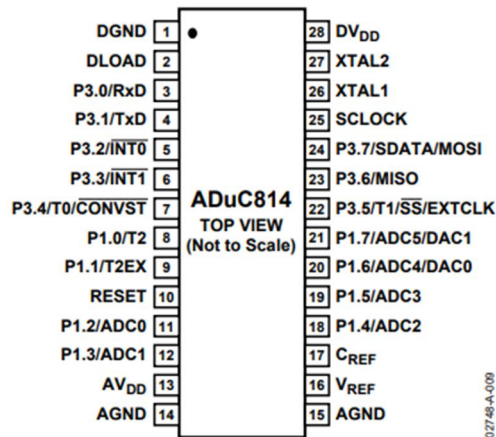


Рисунок 2.5 – Корпус мікроконтролера PIC18F622

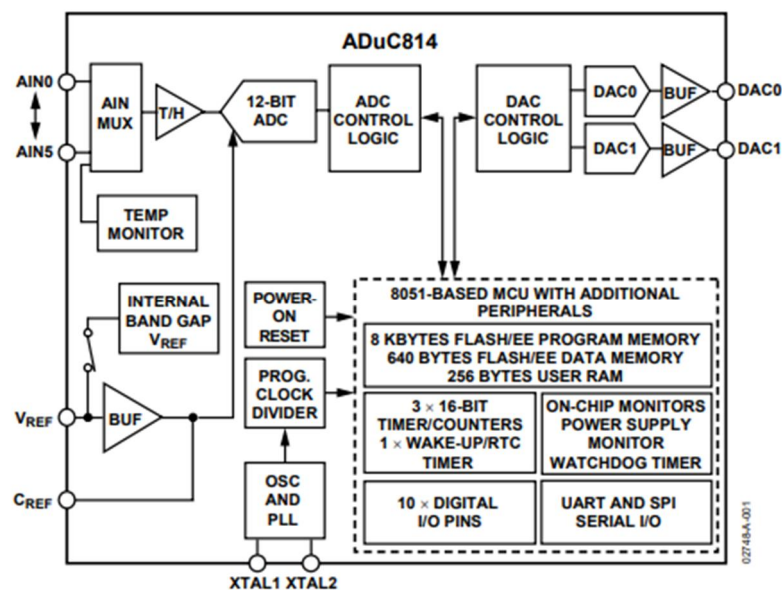


Рисунок 2.6 – Структурна схема мікроконтролера PIC18F622

Мікроконтролер PIC18F622 – це високошвидкісний RISC-мікроконтролер з повністю статичною архітектурою, виготовлений за енергоефективною та завадостійкою КМОП-технологією.

Основні характеристики мікроконтролера:

- 13-рівневий апаратний стек програм та 28 внутрішніх і зовнішніх джерел переривань;
- гарвардська RISC-архітектура з 16-розрядною пам'яттю програм та 8-розрядною пам'яттю даних;
- виконання більшості команд за один машинний цикл (100 нс при 40 МГц), команди переходу – за два цикли (200 нс);
- 33 лінії двонаправленого вводу-виводу;
- таймери:
 - TMR0: 8/16-розрядний таймер/лічильник із програмованим 8-розрядним переддільником;
 - TMR1, TMR3: 16-розрядні таймери/лічильники;
 - TMR2: 8-розрядний таймер/лічильник з 8-розрядним регістром періоду (основний для ШІМ);
- два модулі CCP (захоплення, порівняння, генерація ШІМ);
- інтерфейси зв'язку:
 - MSSP: підтримка SPI (4 режими) та I²C (ведучий і ведений режим);
 - два USART, сумісні з RS-232 та RS-485;
- 10-розрядний АЦП;
- програмований детектор зниженого напруги (PLVD).

Висока навантажувальна здатність портів вводу-виводу дозволяє спростити схему керування зовнішніми драйверами, що знижує загальну вартість системи. Асемблер цього мікроконтролера містить 35 команд, сумісних із сімействами PIC16xxx та PIC17xxx, що спрощує розробку програмного забезпечення.

Для реалізації послідовного інтерфейсу зв'язку обрано спеціалізовану мікросхему MAX232C.

Ця мікросхема є двоканальним приймально-передавальним пристроєм для інтерфейсу RS-232, який виконує перетворення рівнів напруги між мікроконтролером та стандартним послідовним портом.

До основних функцій MAX232C відносяться: перетворення рівнів сигналів мікроконтролера (логічний 0 – до 0,8 В, логічна 1 – від 1,5 В) у рівні стандарту RS-232 (двополярна напруга ± 10 В); збільшення потужності передаваного сигналу; робота від 5 В і використання зовнішніх конденсаторів для внутрішнього підвищення напруги до ± 10 В.

Перетворення однополярного сигналу на двополярний (± 10 В) відбувається за допомогою зовнішніх конденсаторів (C1-C4), ємність яких повинна бути не менше 0,1 мкФ. Вони підключаються до виводів 1-6 мікросхеми відповідно до принципової схеми.

Зовнішній вигляд корпусу MAX232C із позначенням призначення виходів наведено на рисунку 2.7, а схема підключення – на рисунку 2.8.

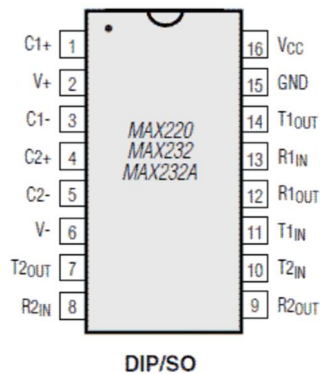


Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд мікросхеми MAX 232C.

Структурна схема мікросхеми MAX 232C приведена на рисунку 6.14.

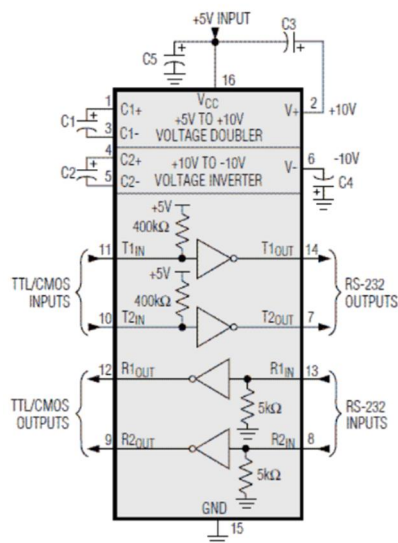


Рисунок 2.8 – Структурна схема мікросхеми MAX 232C.

Як аналоговий комутатор обрано мікросхему 590KN1 [19], яка є аналоговим мультиплексором з 8 входами та 1 виходом. Вона дозволяє перемикати один із восьми вхідних аналогових сигналів на загальний вихід, підтримує широкий діапазон вхідних напруг, що забезпечує гнучкість у використанні, може застосовуватися в схемах вибору сигналів для систем збору даних, вимірювальних пристроях і керуючих системах.

Умовне графічне позначення мікросхеми наведено на рисунку 2.9.

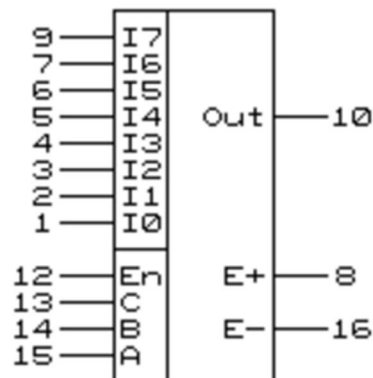


Рисунок 2.9 – Умовне графічне позначення мікросхеми 590KN1

Призначення виходів мікросхеми 590KN1:

I0-I7 – аналогові входи (виходи);

Out – аналоговий вихід (вхід);

A,B,C – адреса (вибір з'єднання);

En – дозвіл: $E_n=L$ - вихід ізольований від входів; $E_n=H$ – вихід з'єднаний з адресним входом.

2.3 Вибір давачів

Щоб забезпечити точне переміщення мехатронного пристрою та візка, доцільно застосовувати високоточні сенсори [20]. З цією метою як датчик відстані обрано лазерний сенсор Asuity AR1000 /11/ (рисунок 2.10).

Він підтримує кілька типів виходів для передачі інформації:

- стандартний послідовний інтерфейс RS-232;
- додатковий послідовний порт RS-422;

- аналоговий вихід для передавання безперервного сигналу;
- цифрові інтерфейси SSI та Profibus для інтеграції в промислові мережі.



Рисунок 2.10 – Загальний вигляд давача Acuity AR1000

Лазерний датчик Acuity AR1000 має технічні характеристики, які забезпечують високу точність та надійність вимірювань у складних умовах експлуатації.

Він здатен вимірювати відстані в діапазоні від 0,1 до 150 метрів з точністю $\pm 2,5$ мм. Частота вимірювання становить 50 Гц, що дозволяє оперативно отримувати оновлені дані. Роздільна здатність при цьому становить 0,1 мм, а розмір лазерної плями на поверхні - 5,1 мм.

Датчик використовує лазер другого класу та живиться від джерела з напругою 10–30 В, споживаючи струм у межах 50–150 мА. Його конструкція дозволяє працювати в температурному діапазоні від -10 до $+50$ °С, а також має ступінь захисту IP67, що забезпечує стійкість до пилу та вологи.

Маса пристрою без кабелю становить 850 г, а довжина кабелю може досягати 2 метрів, що дозволяє гнучко інтегрувати датчик у різні мехатронні системи.

Лінійну швидкість рухомого елемента можна визначити, знаючи кутову швидкість обертання ротора електродвигуна.

Для фіксації цієї швидкості доцільно використовувати фотоімпульсний датчик, оскільки він має просту конструкцію, займає мало місця й легко інтегрується безпосередньо в мехатронний модуль.

Такий датчик кутової швидкості (рисунок 2.11) складається з випромінювача (наприклад, світлодіода), фотоприймача (зазвичай фотодіода) і кодової мітки у вигляді диска з рівномірно розташованими отворами або

прорізами. Цей диск встановлюється безпосередньо на вал ротора двигуна або інший обертовий елемент системи.

Під час обертання диска прорізи періодично пропускають світло від світлодіода до фотодіода, створюючи імпульси, які легко підраховуються мікроконтролером. Частота цих імпульсів прямо пропорційна швидкості обертання, а знаючи геометричні параметри модуля, можна легко обчислити лінійну швидкість подачі.

Цей метод є надійним, економічно вигідним і забезпечує високу точність при низьких витратах на впровадження.

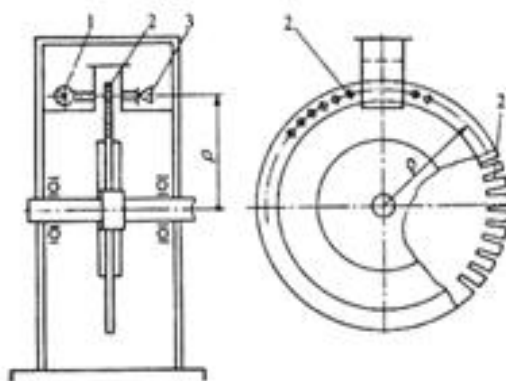


Рисунок 2.11 – Фотоімпульсний датчик кутової швидкості

Світловий потік від випромінювача (1), проходячи через отвори або прорізи в обертовому диску (2), потрапляє на чутливу поверхню фотоприймача (3). У результаті цього на виході фотодіода утворюються електричні імпульси, частота яких відповідає швидкості обертання диска.

Таким чином, чим швидше обертається диск, тим вищою є частота генерованих імпульсів. Ці імпульси зчитуються мікроконтролером або іншим керуючим пристроєм, що дозволяє точно визначати кутову, а згодом і лінійну швидкість рухомого елемента системи.

У спроектованому мехатронному пристрої використовуються щілинні фотоімпульсні датчики HOA1874 виробництва Honeywell, які відзначаються високою надійністю та придатністю для роботи в автоматизованих системах позиціонування та контролю переміщень.

Це інфрачервоні оптичні перемикачі з транзисторним виходом, що забезпечують швидке перемикання та стабільну роботу в широкому діапазоні температур - від -40 до +85 °С. Вони характеризуються часом реакції (ввімкнення/вимкнення) всього 15 мкс, що дозволяє точно фіксувати високочастотні зміни положення рухомих елементів.

Максимальний постійний струм колектора становить 30 мА, а напруга пробою колектор-емітер - 30 В. Для забезпечення ефективної роботи необхідна напруга живлення до 1,6 В, при прямому струмі 20 мА, з максимально допустимим розсіюванням потужності 100 мВт.

Фізичні параметри також адаптовані до використання у вбудованих конструкціях: діаметр отвору датчика - 1,52 мм, а ширина щілини - 3,05 мм, що дозволяє легко інтегрувати його до складу лінійного або обертового мехатронного модуля.

Завдяки таким характеристикам, НОА1874 ідеально підходить для точного контролю положення та швидкості у компактних високоточних системах.

У конструкції вертикальної колони як датчики кінцевого положення обрано ємнісні циліндричні безконтактні датчики серії CR, модель CR30-15DP /13/ (рисунок 2.12). Ці пристрої мають просту, але надійну конструкцію, що забезпечує тривалу та стабільну роботу навіть у важких умовах експлуатації, характерних для промислового середовища.

Основною перевагою таких датчиків є стійкість до пилу, бруду та вологи, що дозволяє їм надійно функціонувати навіть при високому рівні забруднення об'єктів, які вони контролюють. Завдяки ступеню захисту IP66, вони добре ізольовані від впливу навколишнього середовища, що робить їх придатними для встановлення на вертикальних рухомих вузлах.

Основні технічні характеристики:

- номінальна зона чутливості - 15 мм (з допуском $\pm 10\%$), що дозволяє точно фіксувати наближення об'єкта;

- робоча напруга живлення - від 2 до 24 В;
- струм споживання - 15 мА;
- максимальне навантаження на виході - до 200 мА;
- температурний діапазон експлуатації - від -20 до $+70$ °С;
- частота відгуку - 50 Гц, що дозволяє швидко реагувати на зміну положення об'єкта;
- маса пристрою - 212 г;
- довжина підключеного кабелю - 2 м.

Такі параметри роблять датчик оптимальним вибором для контролю положення вертикального пересування у складі мехатронного пристрою, де необхідна точність, надійність та стійкість до умов навколишнього середовища.



Рисунок 2.12 – Датчик кінцевого положення CR30-15DP

У губки захватного пристрою вбудовуються індуктивні датчики положення та наявності об'єкта моделі IIS 205 /14/ (рисунок 2.13). Ці сенсори дозволяють точно визначати, чи знаходиться об'єкт у середині захвату, а також контролювати положення елементів механізму. Їхня конструкція забезпечує високу надійність та стабільну роботу в умовах інтенсивного промислового використання.

Завдяки ступеню захисту IP67, датчики захищені від пилу та короткочасного занурення у воду, що робить їх придатними для використання в складному виробничому середовищі, зокрема біля механічних вузлів і в зоні подачі заготовок.

Основні технічні характеристики:

- робоча напруга — від 10 до 36 В;

- максимальне навантаження на виході — до 100 мА;
- падіння напруги в ланцюзі датчика — менше 2,5 В;
- струм споживання при 24 В — не більше 10 мА;
- реальна зона спрацьовування — 22 мм з допуском $\pm 10\%$;
- робоча зона — від 0 до 17,6 мм;
- частота перемикачів — 100 Гц.

Завдяки таким характеристикам, IIS 205 ідеально підходять для контролю наявності заготовки в захваті та моніторингу положення рухомих частин, забезпечуючи високу точність і швидкість відгуку системи.



Рисунок 2.13 – Індуктивний датчик IIS 205

Вибір описаних у проєкті датчиків для мехатронного пристрою є технічно обґрунтованим і повністю відповідає вимогам до надійності, точності та адаптованості до промислових умов експлуатації. Лазерний датчик Asucity AR1000 забезпечує високоточне вимірювання відстані на великих ділянках переміщення завдяки широкому діапазону, високій роздільній здатності та захисту від пилу і вологи. Щілинні фотоімпульсні датчики HOA1874 дозволяють точно визначати кутову швидкість обертання, мають компактні габарити та швидкий час відгуку, що важливо для керування динамікою руху. Ємнісні датчики CR30-15DP вибрані для контролю кінцевих положень, оскільки вони не чутливі до забруднень і мають тривалий ресурс роботи. Індуктивні датчики IIS 205, вбудовані у захват, забезпечують надійне виявлення об'єкта, гарантуючи точність захоплення заготовок. Усі ці датчики мають високий ступінь захисту, мале енергоспоживання та адаптованість до вібрацій і температурних коливань, що підтверджує доцільність їх застосування у складі мехатронної системи автоматичної подачі заготовок у процесі керування верстатом з ЧПУ.

3. СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

3.1 Синтез ПД-регулятора для електропривода постійного струму з широтно-імпульсним перетворювачем

У процесі синтезу системи керування електроприводом постійного струму важливим елементом є реалізація регулятора, що забезпечує необхідні динамічні та статичні характеристики. Одним з найбільш ефективних рішень для таких систем є використання пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора [17, 21].

ПІД-регулятор є класичним засобом автоматичного керування в замкнених системах і використовується для формування керуючого впливу на об'єкт так, щоб забезпечити мінімальну похибку та стабільність перехідних процесів (рисунк 3.1). Його вихідний сигнал складається з трьох компонентів:

- пропорційної – визначається як добуток коефіцієнта K_p на похибку між задавальним і зворотним сигналами;
- інтегральної – забезпечує компенсацію сталої складової похибки за рахунок накопичення її значення з часом;
- диференціальної – дозволяє зменшити інерційність системи, реагуючи на зміну похибки в часі.

У разі потреби можлива реалізація спрощених варіантів: ПІ-, ПД- або ПІД-регуляторів, залежно від вимог до керування об'єктом.

Застосування ПІД-регулятора в поєднанні з широтно-імпульсним перетворювачем дозволяє ефективно керувати електроприводом постійного струму, реалізуючи точне регулювання швидкості або моменту за допомогою модуляції керуючого сигналу у вигляді імпульсів змінної ширини.

Пропорційна складова формує вихідний сигнал, який прямо протидіє поточному відхиленню регульованої величини від заданого значення. Чим

більше це відхилення тим потужнішим є керуючий вплив. У випадку, коли вхідний сигнал дорівнює заданому, вихідна дія дорівнює нулю.

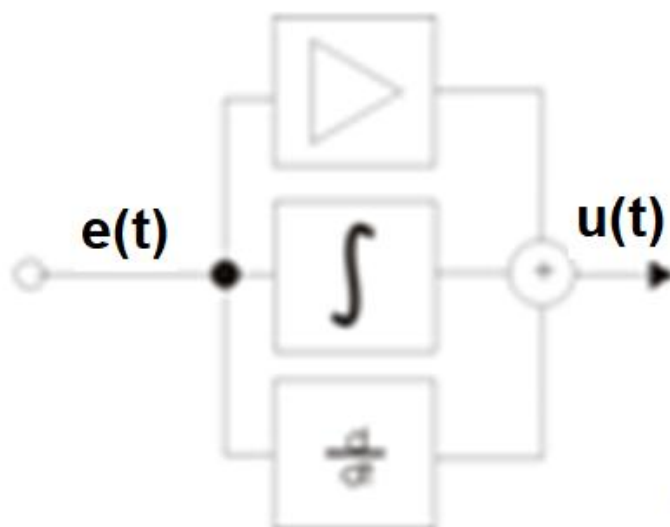


Рисунок 3.1 – Структурна схема ПІД-регулятора

Проте використання лише пропорційного регулятора не дозволяє забезпечити точне досягнення заданого значення регульованої величини. У системі виникає так звана статична похибка — залишкове відхилення, яке необхідне для підтримання вихідного сигналу на такому рівні, щоб забезпечити сталість вихідної величини.

Збільшення коефіцієнта підсилення пропорційної складової дозволяє зменшити статичну похибку. Водночас надто високі значення підсилення в умовах наявності запізнень у системі можуть призвести до автоколивань або навіть до втрати стійкості.

Інтегральна складова є пропорційною до інтегралу від похибки, тобто до накопиченої за часом різниці між заданим і фактичним значенням. Вона вводиться з метою усунення статичної похибки, накопичуючи помилку в часі та компенсуючи її. У сталому режимі, за відсутності зовнішніх збурень, регульована величина з часом наближається до заданої, а пропорційна складова прямує до нуля - при цьому інтегральна складова повністю формує керуючий сигнал. Проте, як і у випадку з пропорційною частиною, надлишкова дія інтегратора може викликати автоколивання.

Диференціальна складова залежить від швидкості зміни похибки. Її основне завдання — запобігання майбутнім відхиленням регульованої величини, які можуть бути спричинені як зовнішніми впливами, так і запізненням у дії регулятора. Завдяки передбачувальному характеру, ця складова дозволяє згладжувати коливання і покращувати динаміку системи.

Призначення ПІД-регулятора полягає в підтриманні певної фізичної величини x на заданому рівні x_0 шляхом регулювання іншої величини u . Величина x_0 називається заданим значенням, а різниця між ним і фактичним значенням x , тобто $e = x_0 - x$, отримала назву похибки, нев'язки або сигналу розузгодження [17, 21].

Керуючий сигнал регулятора u формується як сума трьох складових, кожна з яких виконує свою функцію в процесі стабілізації: пропорційна складова – реагує на поточне значення похибки, інтегральна складова – враховує накопичену похибку в часі, диференціальна складова – враховує швидкість зміни похибки [22, 23]:

$$u(t) = P + I + D = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de}{dt}, \quad (3.1)$$

де

K_p , K_i , K_d – коефіцієнти підсилення відповідно пропорційної, інтегральної та диференціальної складових регулятора.

Більшість методів налаштування ПІД-регуляторів використовують дещо іншу формулу для вихідного сигналу, де до пропорційного коефіцієнта підсилення також додаються множники для інтегральної та диференціальної складових:

$$u(t) = K_p \cdot (e(t) + K_{pi} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_{pd} \cdot \frac{de}{dt}).$$

Для забезпечення необхідної якості перехідного процесу по частоті обертання якоря двигуна постійного струму електропривода виконавчого механізму за допомогою пакету MatLab було здійснено синтез ПІД-регулятора частоти обертання якоря, який має передавальну функцію вигляду:

$$W_{\text{ПІД}}(p) = \frac{K_d \cdot p^2 + K_p \cdot p + K_i}{0,001 \cdot p^2 + p},$$

де:

K_p – коефіцієнт пропорційної складової ПД-регулятора;

K_i – коефіцієнт інтегральної складової ПД-регулятора;

K_d – коефіцієнт диференціальної складової ПД-регулятора.

Для цього введено блок Signal Constraint (рисунок 3.2).

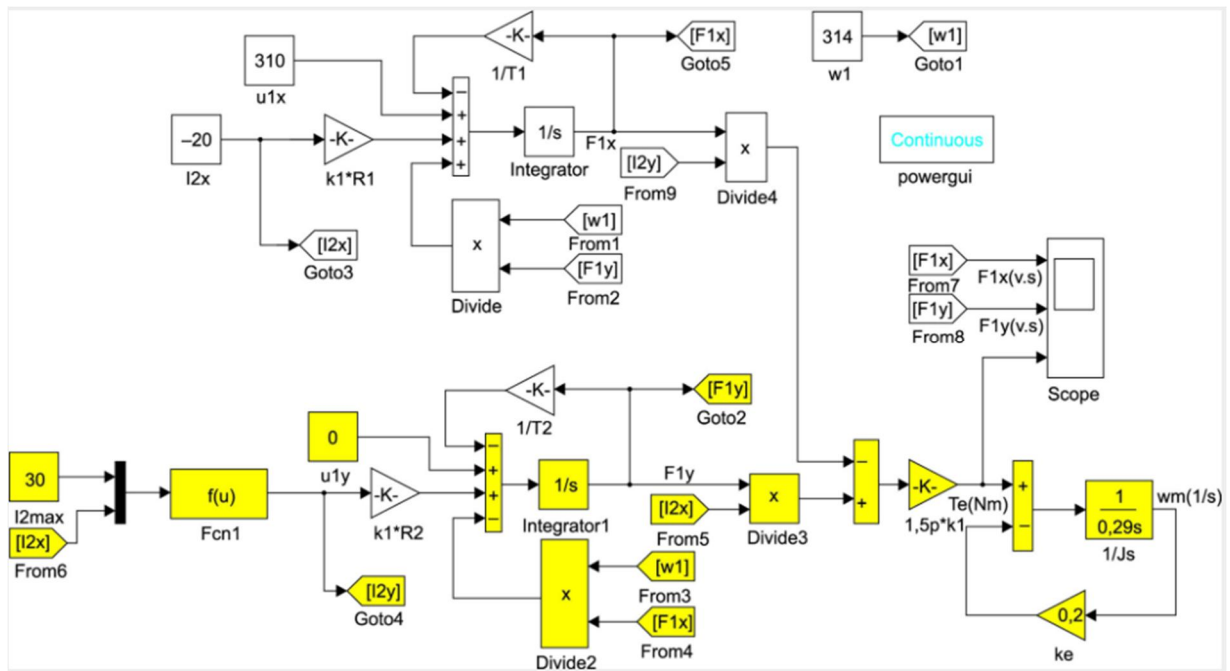


Рисунок 3.2 – Модель електроприводу постійного струму виконавчого механізму зі зворотним зв'язком по швидкості MatLab

У блоці Signal Constraint задані такі показники якості перехідного процесу:

- перерегулювання не більше 13,5%;
- час регулювання не більше 0,6с;
- встановлена помилка не більше 0,5%.

В результаті виконання пошукового алгоритму було отримано такі значення коефіцієнтів регулятора:

$$K_p=321,667; K_i=10^{-4}; K_d=36,834.$$

Отриманий перехідний процес за частотою обертання якоря двигуна постійного струму зі знайденими коефіцієнтами ПД-регулятора

представлений рисунку 3.3. Перехідний процес повністю укладається в обмеження, що є бажаними показниками якості, зазначеними вище.

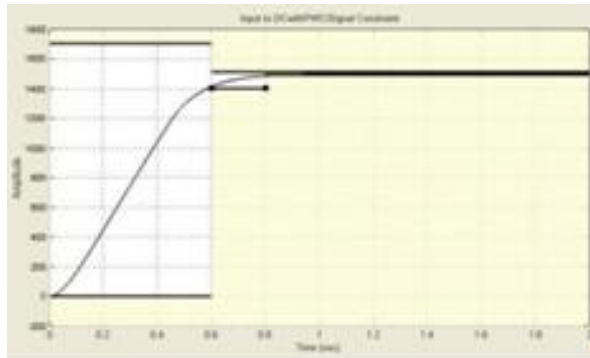


Рисунок 3.3 – Перехідний процес за частотою обертання двигуна

Далі виконано моделювання розгону електропривода до номінальної частоти обертання (1500 об/хв), навантаження у вигляді моменту величиною 3,5 Нм та гальмування електропривода [22]. У схему на рисунку 3.2 додано зворотний зв'язок за положенням виконавчого механізму та ПІД-регулятор, який здійснює компенсацію помилки за положенням. Отримана модель електропривода постійного струму виконавчого механізму зображена на рисунку 3.4.

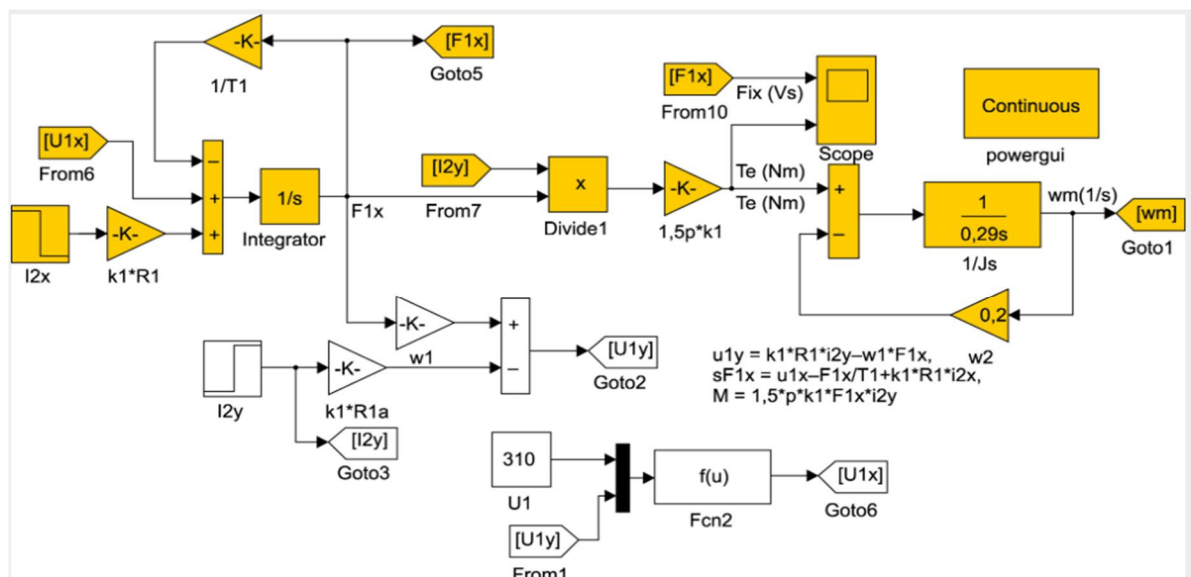


Рисунок 3.4 – Модель електропривода постійного струму виконавчого механізму зі зворотним зв'язком по положенню MatLab

У блоці Signal Constraint були задані такі показники якості перехідного процесу:

перерегулювання не більше 0%;
час регулювання не більше 1,0с;
встановлена помилка не більше 1%.

В результаті виконання пошукового алгоритму було отримано такі значення коефіцієнтів регулятора:

$$K_p=267,6715; K_i=0; K_d=30,989.$$

Отриманий перехідний процес по куту обертання якоря двигуна постійного струму з визначеними коефіцієнтами ПД-регулятора представлений на рисунку 3.5.

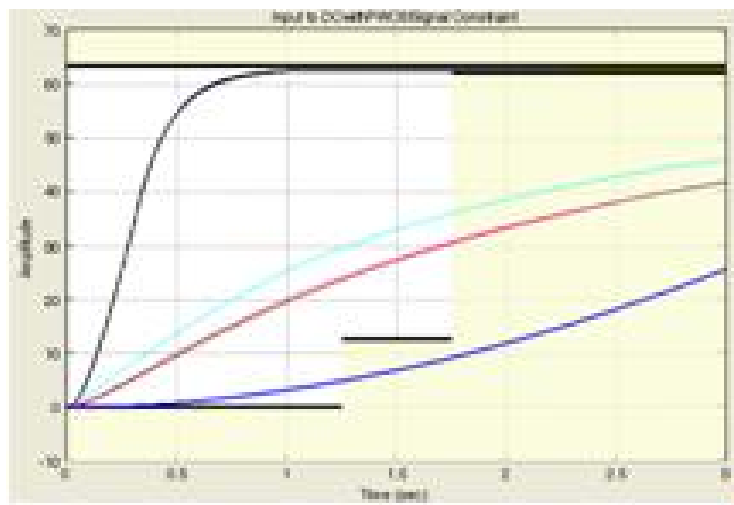


Рисунок 3.5 – Перехідний процес кута повороту двигуна

Перехідний процес повністю відповідає обмеженням, які накладаються бажаними показниками якості, зазначеними вище.

3.2 Синтез регулятора системи керування електроприводом мехатронного модуля

Виконаємо моделювання роботи електропривода мехатронного модуля на основі привода змінного струму в середовищі MatLab. У цій програмі структурна схема привода виглядає відповідно до зображення на рисунку 3.6.

Для досягнення необхідної якості перехідного процесу за кутовою швидкістю обертання ротора асинхронного двигуна, що використовується у

приводі мехатронного модуля, у середовищі MatLab було здійснено синтез ПД-регулятора. Цей регулятор забезпечує оптимальне керування кутовою швидкістю ротора і має передавальну функцію такого вигляду:

$$W_{\text{під}}(p) = \frac{K_d \cdot p^2 + K_p \cdot p + K_i}{0,001 \cdot p^2 + p},$$

де:

K_p - коефіцієнт пропорційної складової ПД-регулятора;

K_i - коефіцієнт інтегральної складової ПД-регулятора;

K_d - коефіцієнт диференціальної складової ПД-регулятора.

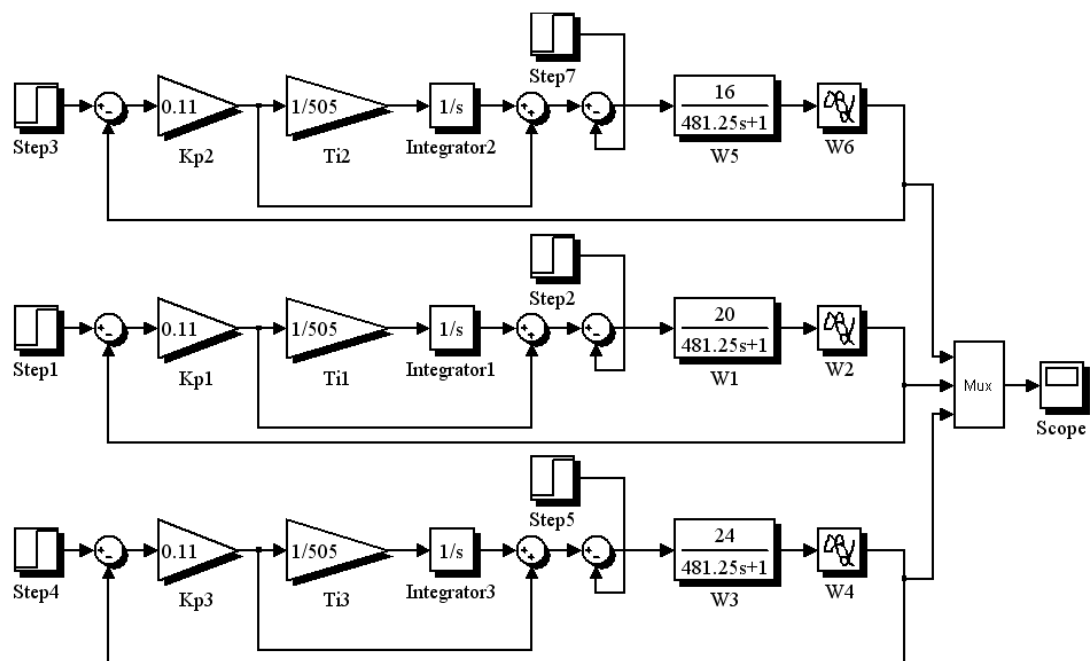


Рисунок 3.6 – Модель приводу мехатронного модуля

У блоці Signal Constraint були задані наступні вимоги до якості перехідного процесу:

- перерегулювання - не більше 20%;
- час регулювання - не перевищує 0,2 с;
- усталена похибка - не більше 0,5%.

У результаті виконання алгоритму пошуку оптимальних параметрів були отримані наступні значення коефіцієнтів ПД-регулятора:

$K_p=2081,7$ - пропорційна складова;

$K_i=0,0146$ - інтегральна складова;

$K_d=51,6156$ - диференціальна складова.

3.3 Розроблення алгоритму управління мехатронного пристрою

Робочий цикл мехатронного пристрою складається з трьох основних операцій: переміщення самого мехатронного модуля, переміщення візка, а також завершальної операції взаємодії із заготовкою (наприклад, її захоплення або передача). Кожен з цих етапів виконується у визначеній послідовності та координується за допомогою вбудованої системи керування.

Управління здійснюється автоматично за допомогою маніпулятора з пульта, при цьому тривалість виконання визначається встановленим таймером. На початку циклу номер програми задається селектором, а після завершення натискається кнопка «Кінець», що переводить алгоритм виконання до оператора «Стоп» (рисунок 3.7).

В автоматичному режимі починається послідовний пошук керувальних команд у оперативній пам'яті, починаючи з початкової позиції А. Пошук триває до моменту, коли код програми, запитаний обладнанням ($Nn1$), співпаде з номером програми, записаним у адресному рядку ($Nn2$). Після виявлення відповідної керувальної команди система переходить до виконання основної частини керувальної програми та подає відповідні сигнали на блок електрокерованих клапанів.

Алгоритм керування мехатронного пристрою побудований на принципах автоматичного виконання послідовності команд, які зберігаються в оперативній пам'яті. Кожен цикл починається з вибору програми за допомогою селектора, після чого система переходить у режим виконання.

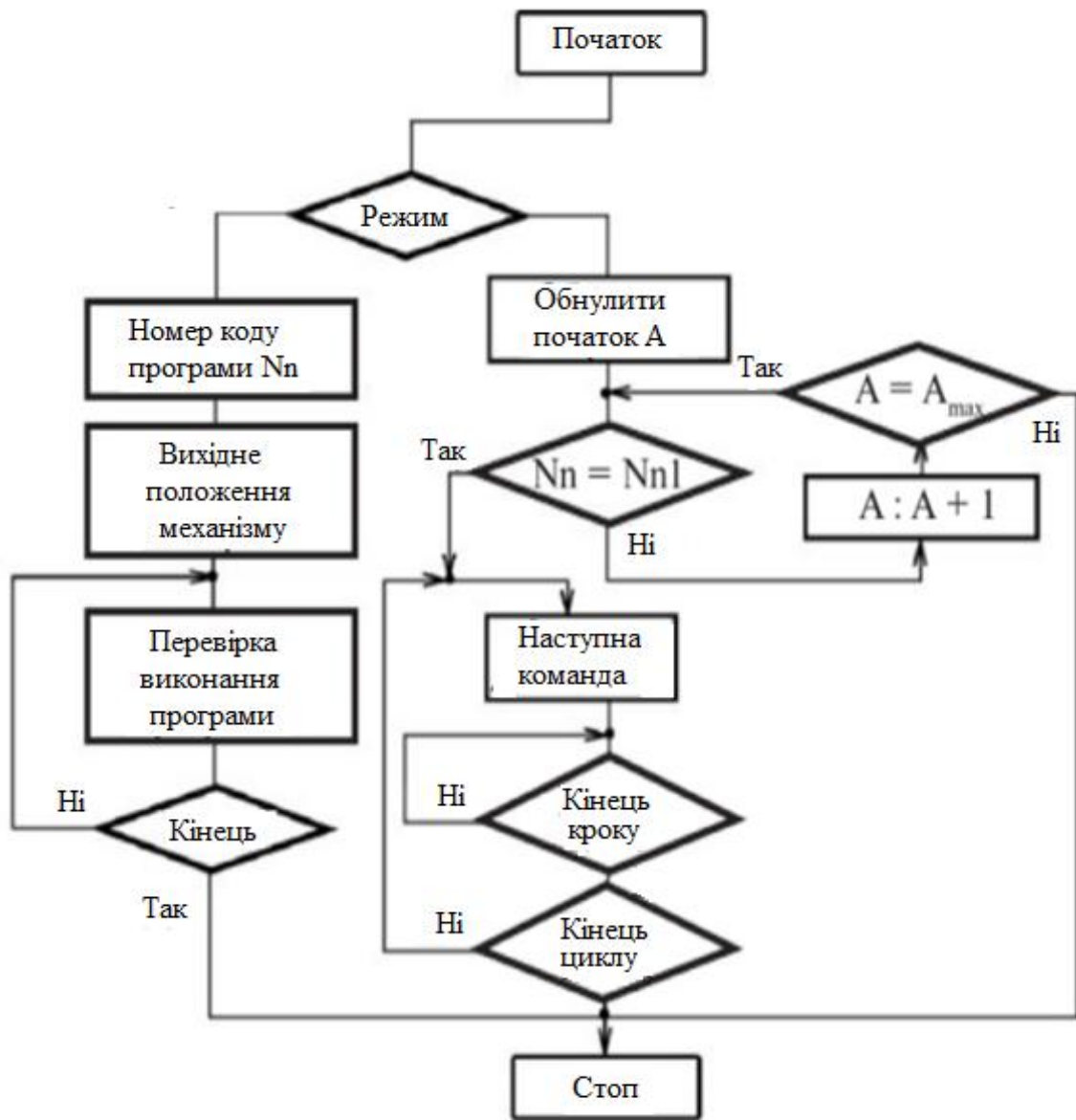


Рисунок 3.7 – Алгоритм роботи мехатронного механізму

Управляючі сигнали формуються автоматично за заданими часовими інтервалами, що задаються таймером. Після порівняння номерів програми, яка запитується обладнанням, та програми в адресній пам'яті, система активує відповідні команди, що керують блоком електропневматичних клапанів. Такий підхід забезпечує чітке й послідовне виконання всіх дій, що входять до робочого циклу пристрою, та дозволяє реалізувати повністю автоматизований режим роботи.

ВИСНОВОК

У випускній роботі було розроблено автоматизовану систему керування мехатронного пристрою для подачі заготовок до фрезерних верстатів з числовим програмним управлінням серії GSM. Проведено повний аналіз і синтез системи, включаючи вибір оптимальних технічних рішень щодо апаратної складової, засобів керування, сенсорів та алгоритмів функціонування.

Розроблено структурну схему мехатронного пристрою, а також описано його робочий цикл і алгоритм керування, що дозволяє автоматично виконувати технологічні операції відповідно до заданих умов. Такий підхід забезпечує підвищення точності, надійності та ефективності функціонування мехатронного вузла у складі верстата з ЧПУ.

Система керування реалізована на основі мікроконтролера PIC18F622, який здатен ефективно обробляти сигнали з різноманітних сенсорів — лазерних, фотоімпульсних, індуктивних та ємнісних. Вибір сучасних датчиків та спеціалізованих інтерфейсних мікросхем, таких як MAX232C, забезпечив надійну інтеграцію та взаємодію елементів системи.

У рамках роботи обґрунтовано доцільність використання асинхронного електропривода з частотним регулюванням, а також реалізовано синтез ПІД-регулятора для електропривода постійного струму з широтно-імпульсним перетворювачем, що дозволяє досягти бажаних динамічних характеристик. Окрім цього, проведено синтез регулятора системи керування електроприводом мехатронного модуля, що забезпечує точне позиціонування та стабільну роботу у динамічних режимах.

У результаті виконаної роботи створено гнучку, адаптивну та надійну автоматизовану систему керування, яка відповідає сучасним вимогам виробництва та може бути впроваджена в реальних умовах.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Смирнов, В. О. Введення в мехатроніку та робототехніку / В.О. Смирнов. – Дніпро: ДНУ, 2023. – 204 с.
2. Мельник, Н. С. Основи мехатроніки: навч. посіб. / Н.С.Мельник. – Черкаси: ЧДТУ, 2019. – 188 с.
3. Ogata, K. (2022). Modern Control Engineering. 6th ed., Pearson Education.
4. Nise, N. S. (2020). Control Systems Engineering. 8th ed., Wiley.
5. Глущенко, О. В. Системи автоматизованого програмування верстатів з ЧПК: навч. посіб. / О. В. Глущенко. – Київ: КНУТД, 2020. – 152 с.
6. Сорока, М. Л. Мехатронні модулі руху (ММР) та їх регулювання / М. Л. Сорока // Мехатроніка та автоматизація. – 2020. – № 2. – С. 42–47.
7. Романенко, Ю. В. Конструктивні особливості та основи програмування верстатів з ЧПК: навч. посіб. / Ю. В. Романенко. – Львів: Видавництво ЛНТУ, 2022. – 176 с.
8. Павленко, О. М. Електромеханічні та мехатронні комплекси: навч. посіб. / О. М. Павленко. – Вінниця: ВНТУ, 2021. – 132 с.
9. Кобилін, С. І. Програмування верстатів з ЧПК / С. І. Кобилін // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2018. – № 4. – С. 17–24.
- 10.Ткаченко, А. Ю. Сучасні електромехатронні комплекси і системи / А. Ю. Ткаченко // Мехатроніка і комп'ютерні технології. – 2020. – № 1(15). – С. 8–14.
11. Ковальов В.А. Конструктивні особливості та основи програмування верстатів з числовим програмним керуванням. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського., 2020. 7-21 с.
12. Числове програмне управління - основні характеристики. Електронний ресурс – Режим доступу: <http://sitelab-15.dss-bi.com.ua/index.php/statti/4-chyslove-prohramneupravlinniaosnovni-kharakterystyky> -

13. Sigit Widiyanto. Rancang Bangun Training Kit CNC Mill 3 Axis Sebagai Materi Praktek CAD/CAM Di STT Duta Bangsa. Jurnal Sains & Teknologi (JUS TEKNO), 2017 63 c.

14. Sandri. CNC (Computer Numerical Control) Engraver. Planet Elektrik. Bengkulu Triwardani, Dinda Hesti dkk. Analisis Overall Equipment Effectiveness (OEE) dalam Meminimalisasi Six Big Losses Pada Mesin Produksi Dual Filters, 2017. 51 c.

15. Z. Mu, G. Zhang, Y. Ran, S. Zhang, and J. Li, "A Reliability Statistical Evaluation Method of CNC Machine Tools Considering the Mission and Load Profile," IEEE. DOI: 10.1109/access.2019.2935622.

16. R. Wdowik, M. Magdziak, R. M. C. Ratnayake, and C. Borsellino, "Application of Process Parameters in Planning and Technological Documentation: CNC Machine Tools and CMMs Programming Perspective," Procedia CIRP, vol. 78, pp. 43 – 48. DOI: 10.1016/j.procir.2018.09.054.

17. Дудка, І. А. Моделювання ПІД-регулятора руху мехатронного пристрою для техніки АПК / І. А. Дудка // Вісник ХНАУ. – 2019. – № 3. – С. 90–96.

18. Бабіченко А.К., В.І. Тошинський, В.С. Михайлов Промислові засоби автоматизації : Навч. посібник. Харків: НТУ "ХПІ", 2021 р.

19. Комплектуючі для верстатів з ЧПК. Електронний ресурс – Режим доступу: <https://cncprom.ua/ua/g1022485-kontrollery>

20. Датчики. Електронний ресурс – Режим доступу: <https://tehbezpeka.ua/ua/g106107359-datchiki>

21. Åström, K. J., & Hägglund, T. (2021). PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 2nd ed., Instrument Society of America.

22. Богданов Г.В. Системи автоматичного керування: навч. посібник. – К.: Ліра-К, 2020.

23. Кулагін В. П., Єгоров В. І. Теорія автоматичного керування. – Харків: НТУ "ХПІ", 2021.