

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка
другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Автоматизація процесу фрезерування для верстатів з ЧПК

(тема)

Виконав: студент 2 курсу, гр. КІТПВМ-19-1
Малінін Є.Є.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
освітньої програми Комп'ютерно-інтегровані
технологічні процеси і виробництва
(код і повна назва напрямку)

Тип програми освітньо-професійна
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Євсєєв В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.
(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми	освітньо-професійний
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____

Малініну Єгору Євгеновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація процесу фрезерування для верстатів з ЧПК

затверджена наказом по університету від 02.11.2020 р. № 1511 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 07.12.2020 р.

3. Вихідні дані до роботи Фрезерний верстат 1000 мм x 1000 мм x 1000 мм, вага макету 20 кг, потужність 2,2 кВт, джерело – 220 В, окремий блок живлення, 50 Гц, 3D-модель верстата, плата керування – STB4100, програмне забезпечення ArtSoft Mach3, час встановлення – 5,1 с, перерегулювання – 23%

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Аналіз сучасних систем автоматизації управління верстатів з ЧПУ;

4.2 Розробка методу керування верстатом з ЧПУ;

4.3 Покращення системи управління верстатом з ЧПУ;

4.4 Розробка КП;

4.5 Експериментальна частина;

4.5 Охорона праці в галузі автоматизації;

4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) –17 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Отримання завдання</i>	2.11.2020	Вик
2	<i>Аналіз сучасних систем автоматизації управління верстатів з ЧПУ</i>	6.11.2020	Вик
3	<i>Розробка методу керування верстатом з ЧПУ</i>	13.11.2020	Вик
4	<i>Покращення системи управління верстатом з ЧПУ</i>	18.11.2020	Вик
5	<i>Експериментальні дослідження</i>	20.11.2020	Вик
6	<i>Охорона праці в галузі автоматизації</i>	24.11.2020	Вик
7	<i>Оформлення атестаційної роботи</i>	26.11.2020	Вик
8	<i>Подання на підпис керівнику атестаційної роботи</i>	27.11.2020	Вик
9	<i>Подання роботи на підпис зав.кафедри</i>	30.11.2020	Вик
10	<i>Подання роботи на рецензію</i>	2.12.2020	Вик
11	<i>Подання роботи в ЕК</i>	4.12.2020	Вик
		7.12.2020	

Дата видачі завдання 02 листопада 2020 року

Студент

_____ (підпис)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Малінін Є.Є.

_____ (прізвище, ініціали)

проф. Євсєєв В.В.

_____ (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить – 90 с., 3 табл., 40 рис., 1 дод., 46 джерел.

3D-МОДЕЛЮВАННЯ, ФРЕЗЕРНА ОБРОБКА, ФРЕЗЕРНИЙ ВЕРСТАТ, ЧИСЛОВЕ ПРОГРАМНЕ УПРАВЛІННЯ.

Об'єкт дослідження – автоматизований процес управління верстатом для фрезерної обробки.

Предмет дослідження – моделі автоматизації системи управління верстатом з ЧПУ.

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

Методи дослідження – теорія автоматичного управління, критерій Гурвіца, критерій стійкості Найквіста, критерій стійкості Михайлова, експерименти на макеті.

В ході виконання атестаційної роботи проведено аналіз сучасного стану розвитку систем ЧПУ. Проаналізували та створили модель системи управління для фрезерного верстату з ЧПУ. На основі проведеного аналізу створили макет фрезерного верстату з ЧПУ. розраховано стійкість створеної системи. Виявлені недоліки системи, а саме зavelикий час встановлення та перерегулювання. Для їх вирішення впроваджено в систему управління ПД–регулятор. Провели комп'ютерне моделювання створеної системи. Також розроблена керуюча програма для створення деталей (макет плати та кришка). Проведені експериментальні дослідження.

За результатами наукового дослідження опубліковано статтю у збірнику «Автоматизація та приладобудування» «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2020 (випуск 2).

ABSTRACT

Explanatory note to attestation work – 90 pages, 3 tables, 40 drawings, 1 adding, 46 sources.

3D-SIMULATION, COMPUTER NUMERICAL CONTROL, MILLING, MILLING MACHINE.

The object of research is the process of automation of a machine for milling.

The subject of research is the model of a milling machine with numerical program control.

The purpose of the master's thesis work is to increase the efficiency of milling processing by improving the time of installation and overshoot of the system.

Research methods – automatic control theory, Hurwitz test, Nyquist stability criterion, Mikhailov stability criterion, mock-up experiments.

During the certification work, an analysis of the current state of development of CNC systems was conducted. Control system model for a CNC milling machine was analyzed and created. A model of a CNC milling machine was created based on the analysis. The stability of the created system was calculated. The shortcomings of the system were revealed, namely too long settling time and overshoot. To solve them, a PID regulator was introduced into the control system. Computer simulation of the created system was performed. A control program for creating parts (board layout and cover) was also developed. Experimental researches are carried out.

According to the results of scientific research, an article was published in the collection "Automation and Development of Electronic Devices" ADED-2020 (issue 2).

ЗМІСТ

	с.
Перелік скорочень.....	7
Вступ.....	8
1 Аналіз сучасних систем автоматизації управління верстатів з ЧПУ.....	10
1.1 Розвиток сучасних систем автоматизації управління виробництвом. Індустріальні революції.....	10
1.2 Internet of things.....	12
1.3 Кіберфізичні виробничі системи.....	14
1.4 Аналіз систем ЧПУ.....	18
1.5 Методи створення і структура керуючих програм.....	21
1.6 Аналіз сучасних систем ЧПУ.....	22
1.7 Постановка задачі дослідження.....	28
2 Розробка методу автоматичного управління фрезерним верстатом з ЧПУ..	30
2.1 Методи керування верстатом з ЧПУ.....	30
2.2 Аналіз законів управління.....	35
2.3 Аналіз конструкції фрезерного верстату з ЧПУ.....	39
2.4 Розробка системи керування верстатом.....	41
2.5 Визначення стійкості системи та показників якості.....	48
2.6 Висновки до 2 розділу.....	57
3 Покращення системи управління верстатом з ЧПУ та експериментальні дослідження.....	58
3.1 Розробка системи з ПІД-регулятором.....	58
3.2 Розробка керуючої програми та експериментальні дослідження.....	64
3.3 Розрахунок занулення для фрезерного верстату з ЧПУ.....	72
3.4 Висновки до 3 розділу.....	80
Висновки.....	81
Перелік джерел посилання.....	82
Додаток А Демонстраційний матеріал у вигляді презентації.....	88

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;

ОУ – об'єкт управління;

ПІД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор;

ПК – персональний комп'ютер;

ПЧПУ – пристрій числового програмного керування;

СЧПУ – система числового програмного керування;

УП – управляючий пристрій;

ЧПУ – числове програмне управління.

ВСТУП

У наш час у світі відбувається перехід у виробництві від стандартів Індустрії 3.0 до Індустрії 4.0. Тобто у світі іде четверта промислова революція. На виробництвах впроваджуються технології Інтернету речей, кіберфізичних виробничих систем, новітніх систем з використанням числового програмного управління (ЧПУ). На виробництвах застосовують мережі, які дозволяють контролювати виробництво на усьому обладнанні [1].

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

Актуальність автоматизації виробництва, в цілому, та кожного обладнання, окремо, полягає в тому, що автоматизація виробничих процесів є однією із ключових ланок у загальній системі функціонування та розвитку будь якого сучасного машинобудівного підприємства, тому що це дозволяє збільшити об'єм випуску продукції та знизити її собівартість.

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 [2].

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 атестаційної 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 [2] та з використанням ДСТУ 3008:2015 [3].

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПУ

1.1 Розвиток сучасних систем автоматизації управління виробництвом. Індустріальні революції

Діяльність сучасних виробничих підприємств сьогодні реалізується у відповідно до технологічних процесів Індустрії 3.0 [4] – [7]. В проектно-виробничу діяльність впроваджуються нові технічні та програмні засоби і системи автоматизації, що підвищують продуктивність праці проектувальників і знижують час виконання окремих етапів життєвого циклу виробів.

Аналіз шляхів модернізації виробничих потужностей підприємств показує [7] – [10], що основні напрямки розвитку, які підтримують організації, орієнтовані не тільки на зниження витрат, автоматизацію технологічних процесів і т.д., але і на цифровізацію проектних процедур, процесів постачання, виробництва, логістики, підтримки виробу в експлуатації і т.д. в загальному життєвому циклі виробів.

Необхідність покращення етапів життєвого циклу виробів призводить до вирішення ряду супутніх завдань [11] – [14] орієнтованих на розробку нових підходів до створення виробничих комплексів підприємств майбутнього, що підтримують інтеграцію технологічних, технічних, програмних та інших засобів і систем, що автоматизують етапи розробки та виготовлення виробів приладобудування. Такими системами, призначеними для роботи на підприємствах майбутнього, є кіберфізичні системи [4].

Для того, щоб краще розуміти сучасний стан речей давайте розглянемо шлях, яким чином людство розвивало виробництво з початку 1800–х років. Є чотири основних індустріальних революцій, які людство вже пережило, чи продовжує розвивати сьогодні.

Перший етап це Перша Індустріальна Революція. Перший суттєвий стрибок у розвитку виробництва стався поміж кінцем 1700–х років, і початком 1800–х років

(з 1760 року по 1830 рік). Протягом цього часу, виробництво розвивалось, еволюціонувало від сфокусованості на ручній праці, яка виконувалася руками або за допомогою тварин до більш оптимізованих форм праці через початок використання водяних чи парових двигунів та інших типів машинних інструментів.

Основні результати першої промислової революції забезпечили наступні переваги:

- в текстильній промисловості виробництво та ефективність фабрик різко зросла за рахунок використання парової бавовняно-прядильної машини;
- вартість виробництва заліза зменшується внаслідок заміни вугілля, як палива, на деревне вугілля.

Друга Індустріальна Революція. На початку 20 століття світ вступив у другу промислову революцію із впровадженням сталі та використанням електроенергії на заводах. Впровадження електроенергії дозволило виробникам підвищити ефективність та допомогло зробити заводські машини більш мобільними. Саме на цьому етапі запроваджені такі концепції масового виробництва, як конвеєр, як спосіб підвищення продуктивності.

Третя промислова революція. Починаючи з кінця 1950-х, третя промислова революція повільно почала розвиватися, коли виробники почали включати на свої заводи більше електронних та, врешті-решт, комп'ютерних технологій. У цей період почались певні зрушення, які робили менше акценту на аналоговій та механічній технологіях, а більше на цифрових технологіях та програмному забезпеченні для автоматизації.

Четверта промислова революція, або Індустрія 4.0. За останні кілька десятиліть виникла четверта промислова революція, відома як Індустрія 4.0. Індустрія 4.0 робить акцент на цифрових технологіях останніх десятиліть на абсолютно новий рівень за допомогою взаємозв'язку через Інтернет речей (Internet of Things (IoT)), доступ до даних у реальному часі та впровадження кіберфізичних систем. Індустрія 4.0 пропонує більш комплексний, взаємопов'язаний та цілісний підхід до виробництва. Він поєднує фізичне з цифровим та забезпечує кращу співпрацю та доступ між відділами, партнерами, постачальниками, продуктами та

людьми. Індустрія 4.0 надає можливість власникам підприємств краще контролювати та розуміти всі аспекти своєї діяльності, а також дозволяє використовувати миттєві дані для підвищення продуктивності, вдосконалення процесів та стимулювання зростання.

В основі організації виробничих підприємств Індустрії 4.0 типу «розумна фабрика» лежать технології промислового IoT, хмарні технології, технології збору та обробки великих масивів виробничих даних і ін., що забезпечують роботу роботизованого автоматичного технологічного обладнання – кіберфізичних систем [14]–[18].

1.2 Internet of things

Взагалі кажучи, IoT відноситься до мережевого взаємозв'язку повсякденних об'єктів, які часто оснащені всюдисущим інтелектом. IoT збільшить всюдисущість Інтернету завдяки інтеграції кожного об'єкту для взаємодії за допомогою вбудованих систем, що створить високо розподілену мережу пристроїв, що контактують з людьми, а також інші пристрої.

Завдяки швидкому розвитку основних технологій, IoT відкриває величезні можливості для великої кількості нових додатків, які обіцяють покращити якість нашого життя. Останніми роками до IoT зросла велика увага з боку дослідників та практиків з усього світу [18].

Інтерфейс IoT підтримується різними специфікаціями бездротових мереж. Найбільше поширення на практиці отримали специфікації Bluetooth, Wi-Fi та ін.. Основний недолік цих і інших протоколів передачі виробничих даних в бездротових мережах полягає в обмеженій дальності поширення радіосигналів між абонентами мережі, внаслідок чого на практиці для організації безперебійної роботи технологічного обладнання протяжних виробничих ліній використовуються роутери.

З боку персоналу технології бездротових мереж підтримуються на апаратно–програмному рівні користувацьким обладнанням (персональний комп'ютер (ПК),

планшет, телефон), що створює передумови для організації «безлюдного» виробництва, управління яким забезпечується дистанційно.

У якості прикладу практичної реалізації дистанційного способу управління компонентом кіберфізичної системи можна привести спосіб управління 3D-принтерами, встановленими на виробництві одного підприємства (ділянки), виробничим персоналом, територіально розташованим у корпусах іншого виробничого підприємства, що входять до складу однієї корпорації. Очевидно, що технологічне обладнання (3D-принтери) доцільно розміщувати в безпосередній близькості від підприємства, що формує сировину (металева пудра, що спікається у робочій камері 3D-принтера) для роботи цифрових підприємств, що підтримують адитивну технологію. При цьому управлінський персонал підприємства може територіально розташовуватися в іншому регіоні країни, контролюючи стан процесів на підприємстві за допомогою інтерфейсів IoT із застосуванням хмарних технологій.

З боку технологічного обладнання кіберфізичних систем на фізичному рівні протоколи бездротового зв'язку підтримуються вбудованими в виробничі автомати контролерами мережі IoT. Кожен виробничий автомат оснащений персональним контролером мережі IoT.

Виробничі дані, що передаються від кіберфізичної системи персоналу «розумної фабрики», включають:

- стан виконання технологічного процесу в робочій камері виробничого автомата (установка на друковані плати елементної бази, промивка друкованих плат, нанесення гальванічного покриття на деталі, отримані методом тривимірного друку та ін.), що реєструється спеціальною системою вбудованих датчиків;

- стан технологічного обладнання, що виконує виробничу операцію (справність; залишок сировини (компонентів), необхідних для виконання технологічної операції; необхідність заміни інструменту, проведення регламентних і попереджувальних робіт з технічного обслуговування обладнання і т.д.), що реєструється спеціальною системою вбудованих датчиків.

Попередню обробку даних від датчиків стану технологічного обладнання і датчиків виконання технологічних операцій забезпечує вбудований контролер управління, що здійснює інформаційний обмін з контролером IoT.

1.3 Кіберфізичні виробничі системи

Кіберфізичні системи (CPS) – це трансформаційні технології управління взаємопов'язаними системами між її фізичними активами та обчислювальними можливостями [19]. За недавніми розробками, які призвели до вищої готовності до роботи та економічності сенсорів, систем збору даних та комп'ютерних мереж, конкурентний характер сучасної галузі змушує більше заводів рухатись до впровадження високотехнологічних методологій.

Отже, постійно зростаюче використання датчиків та мережевих машин призвело до постійного генерування великих обсягів даних, які відомі як великі дані (Big Data) [20]. У такому середовищі CPS може бути додатково розроблена для управління великими даними та використання взаємозв'язку машин для досягнення мети інтелектуальних, еластичних та саморегульованих машин [21]. Крім того, інтегруючи CPS з виробництвом, логістикою та послугами в сучасну промислову практику, це перетворить сучасні заводи на фабрику промисловості 4.0 (Industry 4.0) зі значним економічним потенціалом [22].

Коротке порівняння між сучасними фабриками та фабриками Індустрії 4.0 представлено в таблиці 1.1.

Оскільки CPS знаходиться на початковій стадії розробки, важливо чітко визначити структуру та методологію CPS як керівні принципи для їх впровадження у промисловості. Для задоволення такого попиту розроблена уніфікований каркас системи для загальних застосувань. Крім того, пропонуються відповідні алгоритми та технології на кожному системному рівні для співпраці з уніфікованою структурою та реалізації бажаних функціональних можливостей загальної системи для підвищення ефективності обладнання, надійності та якості продукції.

Таблиця 1.1 – Порівняння сучасних фабрик та фабрик Індустрії 4.0

	Джерело даних	Сучасна фабрика		Індустрія 4.0	
		Атрибути	Технології	Атрибути	Технології
Компонент	Датчик	Точність	Розумні датчики та виявлення несправностей	Самоусвідомлення Самопрогнозування	Моніторинг деградації та прогноз корисного ресурсу
Машина	Контролер	Відтворюваність та продуктивність	Моніторинг та діагностика на основі умов	Самоусвідомлення Самопрогнозування Самопорівняння	Час роботи з прогностичним моніторингом стану обладнання
Виробнича система	Мережева система	Продуктивність	Операції Lean: робота та скорочення відходів	Самоконфігурація Самокерування Самоорганізація	Безтурботна продуктивність

Розглянемо рівневу архітектуру CPS 5C. Запропонована 5-рівнева структура CPS, а саме 5C Architecture забезпечує покрокове керівництво з розробки та розгортання CPS для виробничих додатків.

Загалом, CPS складається з двох основних функціональних компонентів: вдосконаленого підключення, що забезпечує реальний час отримання даних із фізичного світу та інформації зворотній зв'язок з кіберпростором; та інтелектуальне управління даними, аналітика та обчислювальні можливості, що створюють кіберпростір.

Однак така вимога дуже абстрактна та недостатньо конкретна для цілей реалізації загалом. На відміну від представленої архітектури 5C тут чітко визначається, шляхом послідовного робочого процесу, як побудувати CPS від

початкового збору даних до аналітики, до остаточного визначення вартості. Детальна архітектура 5С викладена наступним чином як проілюстровано на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Архітектурна модель 5С

Рівень Smart Connection. Отримання точних та надійних даних з машин та їх складові – це перший крок у розробці кібер-фізичної системи. Дані можуть бути безпосередньо вимірюватись датчиками або отримуватись від контролера. На цьому рівні є два важливих фактори.

По-перше, розглядаючи різні типи даних, а саме безпроблемний та безприв'язочний метод управління процедурою збору даних та передачі даних на центральний сервер необхідний там, де конкретні протоколи, такі як MTConnect [23] та ін. ефективно корисні.

По-друге, вибір правильних датчиків (тип та специфікація) є другим важливим фактором для першого рівня.

Рівень перетворення Даних на Інформацію (Data-to-Information). Значуща інформація повинна бути виведена з даних. В даний час існує кілька інструментів та методологій доступних для рівня перетворення даних в інформацію. В останні роки велика увага приділяється розвитку цих алгоритмів спеціально для прогнозування та стану програми управління. Обчислюючи цінність для здоров'я,

передбачуваний термін корисного використання та ін., Другий рівень CPS–architecture приносить самосвідомість машинам (рисунок 1.2).

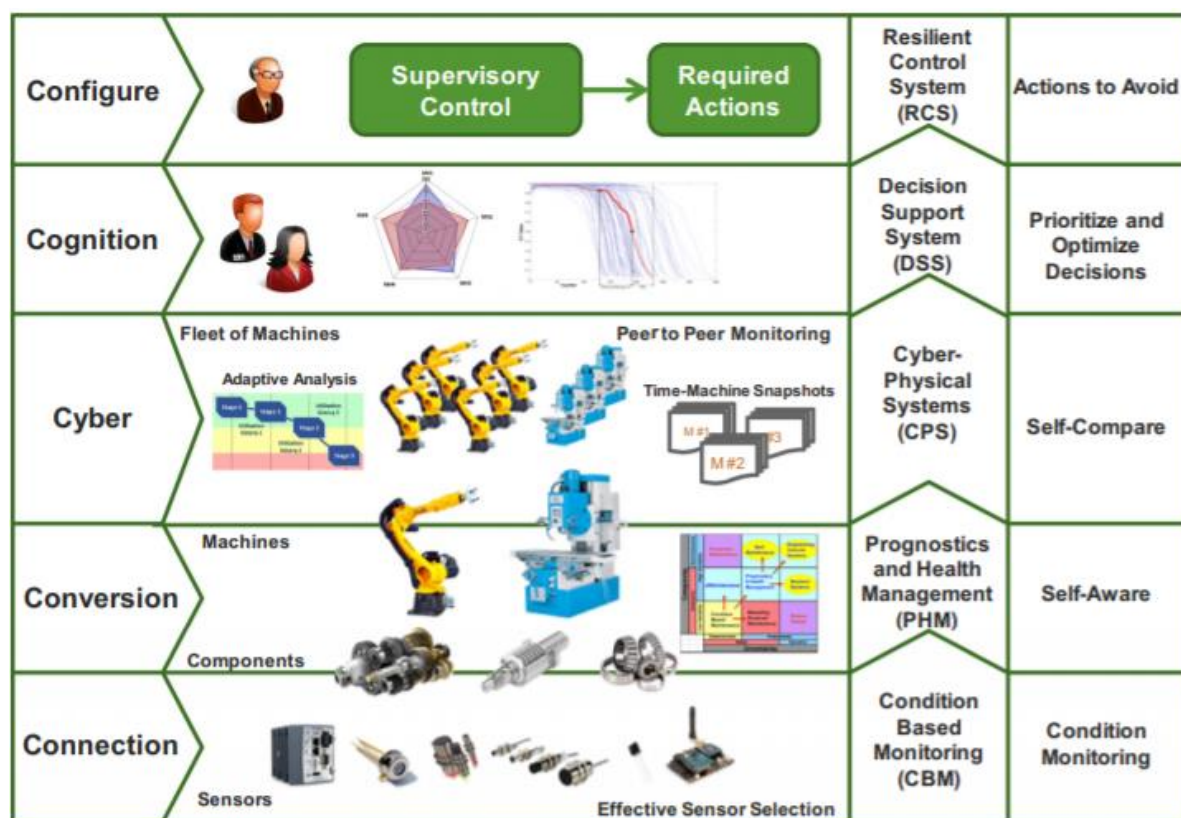


Рисунок 1.2 – Додатки та методи кожного рівня архітектури 5C [19]

Кібер рівень. Кібер рівень виступає центральним інформаційним центром у цій архітектурі. Інформація надходить до нього з кожної підключеної машини для формування мережі машин. Маючи масивну інформацію, зібрану до купи, спеціальна аналітика повинна бути використана для отримання додаткової інформації, яка забезпечує краще розуміння стану окремих машин. Ця аналітика забезпечує машинам здатність самостійного порівняння де продуктивність однієї машини може бути порівняно та оцінено серед інших машин.

З іншого боку, подібність між продуктивністю машини та попередніми активами (історична інформація) можна виміряти, щоб передбачити майбутню поведінку машини.

Розпізнавальний рівень. Впровадження СПС на цьому рівні породжує глибокі знання щодо моніторингової системи. Правильна презентація набутих

знань досвідченим користувачам допомагає прийняти правильне рішення. Оскільки доступна порівняльна інформація, а також окремий стан машини, прийняття рішення про пріоритетність завдань для покращення обслуговування процес може бути зроблене. Для цього рівня потрібна відповідна інформаційна графіка, необхідна для повної передачі набутих знань користувачам.

Рівень конфігурації. Рівень конфігурації – це зворотний зв'язок кіберпростору із фізичним і виконує функції наглядового контролю, щоб зробити машини такими, що самоконфігуруються та самоадаптуються. Цей етап діє, як система контролю стійкості для застосування коригуючих і превентивних рішень, які прийнято на розпізнавальному рівні до моніторингової системи.

1.4 Аналіз систем ЧПУ

Системи ЧПУ мають призначення – автоматизація роботи верстатного обладнання, а також виконання заданої оператором програми.

Сучасні обробляючі комплекси мають призначення виконувати задану програму з високою точністю, мають значну технологічну гнучкість та універсальність. Все це, багато в чому, завдяки наявності в них систем числового програмного керування (СЧПУ).

Зараз та раніше у крупносерійному та масовому виробництвах на лініях обробки деталей використовували вузькоспеціалізовані верстати та оснастку та роботи-автомати. На сучасному етапі розвитку виробництва позначено тенденцію використовувати універсальне обладнання, оснащене СЧПУ, навіть при крупносерійному виробництві. Тому, що такі верстати через легку переналадку, дуже легко почати використовувати навіть у масовому виробництві. Окрім цього використання таких верстатів дає можливість здійснювати обробку складних профільованих деталей. Обробка таких деталей без використання багатокоординатної програмної обробки неможливо принципово.

Використання СЧПУ дає такі переваги:

- висока продуктивність обладнання;

- поєднання універсальності та точності обробки;
- спрощення виробничого процесу (пов'язана, однак, з деяким ускладненням підготовчого етапу – розробки керуючих програм);
- висока повторюваність (малий розкид) якості виробів в межах однієї партії випуску;
- швидкість переналагодження обладнання та переходу до випуску інших виробів;
- простота оснащення верстатів;
- легкість обслуговування і експлуатації і т. д.

На відміну від стандартного персонального комп'ютера, який є універсальним пристроєм для обробки інформації і здатний працювати з будь-якими даними, представленими у цифровому вигляді. Мікропроцесор, який використовується в конструкції багатьох верстатів з ЧПУ це спеціалізований пристрій. Він не містить нічого зайвого, і весь набір його функцій призначений для виконання головного завдання – контролю стану всіх виконавчих органів верстата і управління їх роботою за спеціальною програмою. Щоб керувати особливо складними сучасними верстатами, застосовують більш продуктивні і багатозадачні пристрої – промислові комп'ютери.

Однією з найважливіших характеристик, яка дозволяє судити про продуктивність і технічні можливості верстата і управляючої його роботою системи, є кількість «осей». Інакше кажучи, каналів взаємодії з об'єктом, керованих параметрів. Однак у кожному випадку, незалежно від того, мікропроцесор якого рівня складності і архітектури встановлено в даному керуючому контролері, для його роботи потрібна заздалегідь підготовлена керуюча програма. В якій повинні бути точно і послідовно описані всі дії механізмів верстата ЧПУ, необхідні для виготовлення або обробки необхідної деталі.

При роботі верстатів з ЧПУ використовується два види програм: системні та керуючі.

Системні (службові) програми, які зберігаються в постійному запам'ятовуючому пристрої системи. Вони забезпечують початковий етап роботи

контролера після включення, відповідають за налаштування верстата і всієї системи ЧПУ, її здатність розуміти команди оператора і взаємодіяти з зовнішніми пристроями.

Керуючі – зовнішні програми. Містять набір команд і інструкцій для виконавчих органів верстата. Керуючі програми (КП) в контролер може крок за кроком вводити оператор, можливе введення з зовнішніх носіїв інформації, а в сучасних системах програми можуть надходити прямо з комп'ютерів розробників програмного забезпечення через комп'ютерну мережу підприємства.

Замінивши людину, яка до настання ери верстатів з ЧПУ сама успішно справлялася з виготовленням потрібних деталей, програмований блок управління, він же – контролер, повинен забезпечити необхідний результат, крок за кроком вмикаючи і вимикаючи механізми пересування столу, заготовки та інструментального магазину, змінюючи режими обертання або швидкість поступального руху заготовки. В результаті виконання програми повинна бути отримана деталь, яка повністю відповідає завданням за розмірами і чистоті обробки поверхонь.

Компанії, які стояли біля витоків розробки і виробництва систем CNC, на першому етапі програмували свої верстати за допомогою власних, спеціально розроблених команд. Якби при такому підході на виробництво потрапили верстати з ЧПУ від різних виробників, підготовка програм для їх роботи б важко здійсненним завданням. Щоб спробувати забезпечити програмну і технічну сумісність обладнання різних брендів, мова створення програм для верстатів з ЧПУ уніфікована.

Базовим керуючим кодом для підготовки програм став набір команд, розроблений фахівцями компанії Electronic Industries Alliance в 60-і роки минулого століття. Це так звана мова «G» і «M» кодів, який частіше називають просто G-кодом (G-code). Прийняті в цій мові позначення підготовчих і основних функцій починаються з латинської літери «G», а позначення додаткових – технологічних команд - з букви «M».

«G» і «M» коди в програмах для верстатів з ЧПУ. За стандартом всі команди, код яких починається на букву "G", призначені для лінійного або кругового пересування робочих органів верстата ЧПУ, виконання певних послідовностей дій, функцій управління інструментами, зміною параметрів координат і базової площини. Синтаксис команди зазвичай складається з найменування G-коду, координат або адрес переміщень (X, Y, Z) і заданої швидкості руху робочого органу, що позначається буквою «F».

В команду ЧПУ може бути включений параметр, що описує тривалість паузи, так звану витримку – «P», вказівку про параметри обертання шпинделя – «S», значення радіуса – «R», функцію корекції інструменту – «D», а також параметри дуги «I», «J» і «K» [24].

1.5 Методи створення і структура керуючих програм

Сучасне обладнання дозволяє створювати програми для роботи верстатів з ЧПУ декількома способами.

Перший спосіб це написання програми вручну або в текстовому редакторі ПК. Необхідний етап в підготовці фахівців для роботи на верстатах з ЧПУ. Підходить також як основний спосіб програмування на виробництвах, де протягом тривалого часу випускають кілька простих деталей, не вдаючись до перебудови обладнання.

Другий спосіб це складання і введення програми на стійці ЧПУ. Пульта управління більшості сучасних систем управління містить клавіатуру і дисплей, що дозволяє програмувати і переглядати віртуальну імітацію процесу обробки безпосередньо на робочому місці. Багато систем дозволяють проводити введення програм у «фоновому» режимі, коли верстат зайнятий обробкою заданої деталі.

Третій спосіб це використання можливостей CAD-CAM систем комп'ютеризованої підготовки виробництва. Спеціальне програмне забезпечення дозволяє створити тривимірну модель деталі, розрахувати і підготувати програму для її виробництва. А також віртуально «виготовити» необхідну деталь,

використовуючи реальні дані про кінематику конкретного верстата ЧПУ. Цей метод дозволяє створювати керуючі програми швидко і точно, практично виключити помилки програмування і пов'язане з цим псування заготовок. Особливо висока ефективність даного способу при створенні КП при виготовленні особливо складних деталей.

Структурно програма в G-кодах складається з кадрів. Так називають групи команд, які призначені для виконання будь-якої завершеної дії. Кадри можуть складатися і з однієї команди. Про закінчення кожного «кадру» повідомляє знак зміни рядка (ПС/LF). Кожна програма починається з порожнього «кадру», який складається із знаку «%», а закінчується кодами M02 або M30, що позначають відповідно фініш програми ЧПУ або закінчення наявного в пам'яті інформаційного блоку [25].

1.6 Аналіз сучасних систем ЧПУ

SINUMERIK – найпоширеніший базовий модульний ПЧПУ для широкого кола верстатів і технологічних завдань [26]. Це повністю цифрова система для практично всіх типів застосувань; системна платформа з прогресивними функціями [27].

У всьому світі SINUMERIK застосовується для токарної обробки, свердління, фрезерування, шліфування, лазерної обробки, різання, перфорації, виготовлення оснащення та інструменту, як система управління пресами, для високошвидкісного розкрою матеріалів, обробки деревини та скла, транспортування, складських завдань.

SINUMERIK в модулі NCU (Numeric Control Unit – пристрій числового керування) об'єднує завдання ЧПУ, програмованого логічного контролеру та комунікації. Встановлений в каркас-носій, NCU вбудовується безпосередньо в цифрову систему перетворення SIMODRIVE 611D, при цьому він розташовується праворуч, безпосередньо у модуля живлення-рекуперації.

Варіанти процесорів NCU і системне програмне забезпечення дає можливість оптимальної адаптації до верстата і до задачі обробки. Такий модульний принцип дозволяє оснастити цілий ряд верстатів різного типу.

За допомогою SINUMERIK можна управляти максимум 31 осями/шпинделями. При максимальному використанні підтримується до 10 каналів на кожну групу режимів роботи і максимум 12 осей/шпинделів на кожен канал. Кожен канал може мати свою власну групу режимів роботи.

ЧПУ Heidenhain – числове програмне управління для верстатів фрезерного і гравіювального типу. ЧПУ Heidenhain є професійними стійками, які мають універсальну систему. Вона підходить для верстатів, що мають від трьох до п'яти осей. ЧПУ взаємодіє з широко спеціалізованим обладнанням [28].

Основною особливістю числового програмного управління Хайденхайн є універсальність. Вона забезпечується завдяки програмі TNC. Дана програма однаково добре сумісна як зі старими пристроями, так і з новими. Вона дозволяє виконати будь-яке завдання на верстатах. Для роботи з програмою не потрібно навичок програмування. TNC передбачає комплекс підказок, що спрощують роботу оператора і його помічника.

Переваги систем Хайденхайн:

- забезпечує високоякісну поверхню;
- гарантує високу точність контурів деталі;
- виконує завдання за короткий час.

Серед всіх систем числового програмного керування Heidenhain найбільш затребуваною є TNC320. Вона створена спеціально для роботи з багатофункціональними верстатами, що мають від 4 до 5 осей. Ця модель може бути використана для:

- будівництва машин;
- цехового виготовлення;
- одиничної збірки деталей для наукових цілей;
- виробництва експериментальних запчастин;
- виготовлення інструментів.

Системи управління, які виробляє японська компанія FANUC, відомі у всьому світі і використовуються на багатьох підприємствах [29].

Фахівці цієї корпорації одними з перших адаптували роботу своїх систем під програми в «G» і «M» кодах, і зуміли організувати роботу найскладніших систем строго в рамках стандарту програмування. Поширені стійки FANUC серії 0i розраховані на роботу з від 6 до 8 керованими осями (одночасне керування – 4 осі). Сійки серій 30i-35i дозволяють виконувати високоточну обробку на найвищих швидкостях, і є поки недосяжним орієнтиром для багатьох конкурентів.

Основні переваги систем ЧПУ FANUC. Завдяки точної взаємодії багатофункціональних високоякісних апаратних засобів з такими спеціальними програмними функціями, як нано-згладжування або вдосконаленого п'ятиосьового управління машинною обробкою, системи ЧПУ FANUC дозволяють з легкістю добитися найвищої якості обробки поверхонь.

Гнучкість. Тільки FANUC пропонує дві версії систем ЧПУ: компактну модель, що встановлюється на РК-монітор, і окремо встановлюється універсальна модель. Так що коли мова йде про конструкцію верстата, ви завжди можете вибрати варіант, що відрізняється максимальною експлуатаційною гнучкістю.

Єдиний простий підхід. Створені на основі єдиного підходу FANUC до управління, системи ЧПУ FANUC прості в управлінні і програмуванні, а значить, не вимагають тривалого навчання. Крім того, завдяки сумісності з більш пізніми версіями можна використовувати існуючі програми. Як наслідок знижується сукупна вартість володіння.

Унікальні вбудовані функції безпеки. Функція тривимірного контролю на відсутність зіткнень FANUC захищає верстат, деталі та інструмент. В результаті час простою скорочується до мінімуму, забезпечується захист дорогого устаткування, і запобігається пошкодження виробів і верстата.

Збільшення ефективності верстата. Сотні функцій програмного забезпечення FANUC з управління штучним інтелектом, рухом, безпекою і продуктивністю дозволяють ідеально адаптувати ЧПУ FANUC під необхідну задачу і домогтися більшої ефективності.

Fagor Automation пропонує комплексне рішення для високопродуктивних обробних центрів та токарних верстатів завдяки великому вибору функцій. Наші системи ЧПУ відповідають найвищим вимогам. Діапазон ЧПУ варіюється від програмування в діалоговому режимі ЧПУ для коротких виробничих серій, які вимагають швидкості, до високошвидкісних ЧПУ з нанометричною точністю для верстатів з високим технологічним значенням або систем ЧПУ для конкретних застосувань, таких як лазерне різання тощо [30].

ЧПУ Fagor призначені для всіх типів верстатів із додатковими перевагами:

- простота програмування. Немає необхідності знати мову програмування ISO;

- алгоритм, який забезпечує найкращу продуктивність, швидкість і точність у процесі обробки;

- ергономічний та функціональний дизайн (сенсорний екран, зручна навігація, вбудовані посібники, sms-зв'язок, монітори з високою роздільною здатністю, клавіатури та монітори з найвищим рівнем захисту від пилу/бруду тощо);

- інструменти налаштування інтерфейсу;

- безкоштовне завантаження програмного забезпечення без обмеження часу для роботи на будь-якому ПК;

- контроль положення осі кожні 250 мкс.

Такі технологічні особливості, як упереджаючий перегляд. ЧПУ заздалегідь аналізує зміни в рухах осей, забезпечуючи високошвидкісну обробку. Цей ЧПУ заздалегідь аналізує 2400 блоків, і час обробки блоків становить 0,25 мс.

Fagor Automation пропонує системи приводу та зворотного зв'язку, що є великою перевагою, оскільки замовник має справу лише з однією контактною особою або постачальником, який надає йому цілісне рішення, яке прискорює його робочий процес.

Системи числового програмного управління від Delta, серія CNC це інтегрована система, що забезпечує максимальну гнучкість та повний функціональний процес управління, що відповідає всім сучасним вимогам.

Delta Electronics Inc., один із світових лідерів у виробництві промислової автоматизації, має у своєму доробку інноваційне рішення, що являє собою сучасну інтегровану систему для застосування у промисловому обладнанні, що використовується у ЧПУ.

Рішення з ЧПУ Delta забезпечує високошвидкісну, високу точність та чудову обробку поверхні, що підвищує швидкість, якість та стабільність верстатів з ЧПУ. Воно особливо підходить для високошвидкісних процесів різання, гравірування та фрезерування, виготовлення прес-форм, обробки та виготовлення деталей та багатьох інших галузей промисловості.

За порівнянням з традиційно застосовуваними в промисловості європейськими та японськими системами ЧПУ, рішення Delta є більш економічним за рахунок гнучкості та повноти функціональних можливостей, зниженню затрат на додаткові функції, обладнання та програмного забезпечення, і при цьому залишається конкурентоспроможним по відношенню до більш дорогих систем.

Системи ЧПУ від Delta включають контролери, багатокординатні сервоприводи та серводвигуни з роздільною здатністю до 20 біт, а також двигуни та шпиндельні приводи з постійними магнітами (ПМ). Рішення Delta забезпечує розподілену конфігурацію систем та багатозадачність управління з високою продуктивністю, забезпечену контролерами NC300. У співпраці з найшвидшою системою управління переміщенням DMCNET, система ЧПУ від Delta забезпечує високу швидкість і точність, що забезпечує значне зростання продуктивності [31].

Системи ЧПУ серії CNC відрізняються високою швидкістю роботи, високою точністю та максимальною якістю обробки. Рішення повністю підходить для різних виробничих процесів та галузей промисловості, ЧПУ від Delta – це завжди конкурентоспроможне та інноваційне рішення.

Спектр обладнання, виробника корпорації Okuma [32] для металообробних машин, дуже широк. Це і звичайні токарні станки, і багатофункціональні обробні центри, які підходять для виконання різного роду завдань – від найпростіших до найскладніших. Компанія вперше у світовій практиці впровадила багато

інноваційних, запатентованих систем та технологій, за розробку яких неодноразово визначена національними та міжнародними нагородами.

Верстати Okuma завжди забезпечують високу продуктивність і якість. Основні їх переваги – точність, надійність, довговічність та «розумні» технології. У розвитку своєї лінійки обладнання японська корпорація завжди велику увагу приділяє саме «інтелектуальним» верстатам.

ЧПУ OKUMA OSP 200. ЧПУ Okuma OSP – унікальна та зручна в роботі системи управління, що забезпечує високу продуктивність роботи та якість виконання технологічних операцій. Нижче наведені деякі функції системи ЧПУ Okuma OSP 200, які вирізняють її поміж конкурентами.

DD Encoder (Direct Detection). Прямий датчик положення, розміщений на мотор-шпинделі токарних верстатів з роздільною здатністю 36 000 000 імпульсів на оборот ходового гвинта.

Navi Mg / Mi / Lg. Система контролю і попередження виникнення вібрацій при фрезерній і токарній обробці за допомогою мікрофона вбудованого в верстат. Програма порівнює рівень шуму при обробці з заданим рівнем і в разі відхилення значень в більшу сторону автоматично змінює режими різання на оптимальні.

Tool Posture Manipulation Function. Функція оптимального позиціонування інструменту при 5 осьовій обробці. Виключає непотрібні прискорення і уповільнення інструменту по лінії контуру, за рахунок чого скорочується час обробки деталі і підвищується якість чистоти поверхні.

High gain control. Система контролю «надшвидкого реагування» для виявлення похибок, що виникають внаслідок погіршення умов обробки. За допомогою швидких робочих циклів системи серводвигунів дозволяє отримувати дуже високу точність обробки і дзеркальну чистоту поверхні.

Variable spindle speed control. Програма для попередження виникнення вібрацій при токарній обробці прутків і осей з співвідношенням діаметр/довжина до 1:18. Рух по осях оптимально синхронізовано і узгоджено зі зміною швидкості обертання шпинделя.

3D virtual monitor. Віртуальна тривимірна графічна система для забезпечення візуального контролю управління верстатом (в тому числі довжини інструменту і захисного кожуха). У режимі «Симуляція» можна попередньо переглянути всі функції, включаючи нульові точки позиціонування деталі, компенсацію інструментів та інші параметри, виявити всі можливі помилки і виконувати програму обробки не використовуючи опцію «блок»–«блок» із зупинкою верстата для перевірки деталі.

Program restart. Запуск програми з будь-якого, необхідного в даний момент, рядка. Функція, яка впроваджена багатьма виробниками, але в верстатах Okuma рівень її виконання унікальний. Наприклад, після перезапуску устаткування можна продовжити безперервний цикл обробки – під час нового пуску ЧПУ використовує всі необхідні дані для обробки з раніше вже запущеної програми.

Для всіх моделей своїх верстатів Okuma пропонує вдосконалений режим збереження інформації з використанням програми Microsoft Excel.

Можливості цього рішення. Це збереження всіх даних по обробці безпосередньо в таблиці Excel – креслення деталі, режими різання, список інструменту. Всі необхідні параметри переносяться зі стійки управління в таблицю Excel. Та реалізація різних складних обчислювальних операцій безпосередньо на стійці управління, з використанням даних, записаних раніше в Excel.

Наприклад, інформація по точності обробки: до стійки підключається електронний штангенциркуль, всі деталі партії заміряються і результати заносяться в таблицю. Згодом, при обробці наступних партій, якщо виявляються відхилення від зазначеного поля допуску, на обробляючий інструмент автоматично подається команда для коригування.

1.7 Постановка задачі дослідження

Дослідивши сучасні тенденції розвитку систем управління виробництвом, існуючі виробничі системи, системи ЧПУ, піходи до створення програм управління, можна побачити, що розвиток систем управління знаходиться на

високій стадії. Кожна з розглянутих систем має в своєму складі всі необхідні компоненти та оснащена всім необхідним, щоб досягати найвищих показників у виробництві.

Проте, існує актуальна проблема автоматизації управління обробкою на невеликих виробництвах, на малогабаритних верстатах.

На основі отриманої інформації виникає необхідність у дослідженні системи ЧПУ та її характеристик.

Для цього необхідно:

- проаналізувати методи управління верстатом з ЧПУ;
- розробити діючий макет фрезерного верстату з ЧПУ;
- розробити спосіб підвищення якостей перехідного процесу системи;
- розрахувати параметри стійкості та якості системи;
- оптимізувати отримані параметри;
- провести експериментальні дослідження на макеті фрезерного верстату з ЧПУ.

2 РОЗРОБКА МЕТОДУ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ФРЕЗЕРНИМ ВЕРСТАТОМ З ЧПУ

2.1 Методи керування верстатом з ЧПУ

Для аналізу методів керування верстатами з ЧПУ і подальшого дослідження використаємо нашу минулу розробку [33]. Це настільний малогабаритний фрезерний верстат для виконання фрезерних операцій (рисунок 2.1).

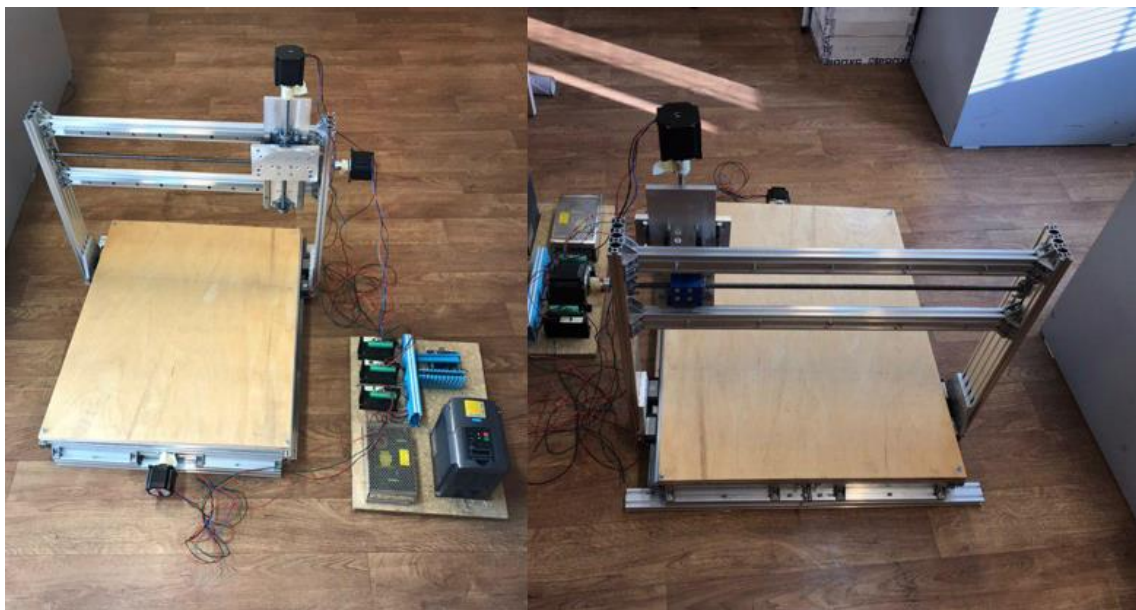
Характеристики: виконує обробку за допомогою інструменту тіл обертання, ріжучий інструмент обертається та рухається по осям X , Y , Z і здійснює обробку деталі, робочі органи переміщуються за допомогою гвинтових передач, станина є основою для розміщення елементів малогабаритного обладнання..

Переваги:

- невеликі габаритні розміри;
- невелика вага;
- легкість у обслуговуванні та експлуатації;
- малOSHUMність у роботі;
- економія електроенергії;
- можливість підключення до мережі 220 В.

Недоліки:

- трудомісткий процес підготовки програмного продукту, потребує участі кваліфікованого фахівця;
- дороге додаткове програмне забезпечення ;
- дорогий спеціалізований інструмент;
- помилка у програмі може привести до пошкодження заготовки або верстата.



а)

б)

а) вид спереду; б) вид позаду

Рисунок 2.1 – Настільний малогабаритний фрезерний верстат

Для того, щоб керувати верстатом ЧПУ потрібно використовувати певні методи та методики. Вибір методу керування верстатом з ЧПУ залежить від того, яких результатів у точності, виробничості ми маємо досягнути.

Загалом у системах числового програмного управління використовують один з методів:

- методи із прямим зв'язком та із зворотнім зв'язком (рисунок 2.2);
- методи адитивних, інтелектуальних та робастних систем керування.

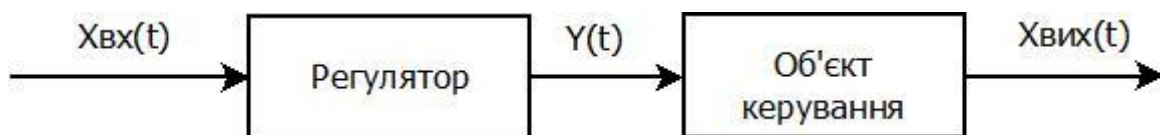


Рисунок 2.2 – Система керування верстату з ЧПУ із прямим зв'язком

Цей принцип контролю застосовується лише на основі того алгоритму поведінки керованого об'єкта, який є бажаним з точки зору оператора системи і не зважає на можливість появи у процесі роботи системи зовнішніх впливів, які можуть спричинити неочікувані та непрогнозовані відхилення у роботі об'єкта.

Система управління із зворотним зв'язком забезпечує можливість управління зважаючи на реальні значення вихідної величини (рисунок 3.3). У цьому випадку пристрій управління впливає на об'єкт управління залежно від відхилення вхідного значення від заданого.



Рисунок 2.3 – Система керування із зворотнім зв'язком.

У системі управління для синхронізації двигунів фрезерного верстата використаємо ПД–регулювання. Далі необхідно розібрати закони управління, побудувати структурну схему та розрахувати основні коефіцієнти законів для математичної моделі.

Об'єкт управління в нашій моделі – електродвигун. Як елемент моделі для електродвигуна маємо три параметри:

- вихідна величина y ;
- вхідний задаючий параметр U ;
- вхідний збурюючий вплив f .

За допомогою ПД–регулювання ми будемо здійснювати контроль та керування кроковими двигунами, які здійснюють переміщення робочого органу за осями X , Y , Z .

Загальний вигляд об'єкту управління зображено на рисунку 2.4.

Для контролю електродвигуна на його осі встановлено енкодер. Дані з енкодера є нашої вихідною величиною y . А саме – кут повороту (числу імпульсів за один оборот).

Наступним параметром – збурюючою дією є вплив зі сторони зовнішнього середовища, яка порушує правильне функціонування об'єкту. Прикладами такого впливу є тертя, навантаження і т.д.. Під впливом значного навантаження кроковий

двигун може «пропускати» імпульси і таким чином не до кінця виконувати задану кількість кроків.

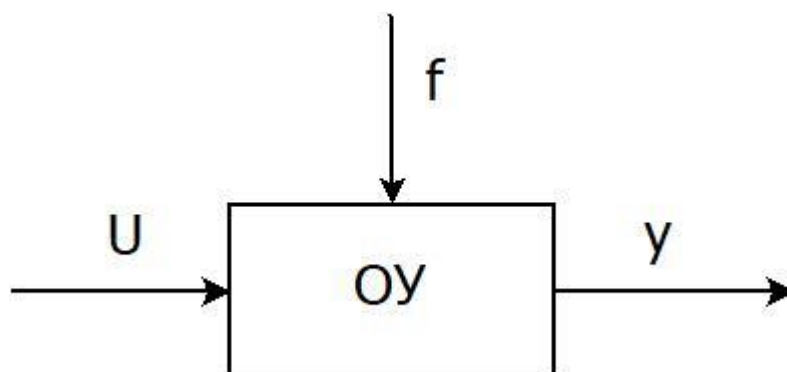


Рисунок 2.4 – Модель об'єкту управління

Для того, щоб виключити вхідний збурюючий вплив використовуємо другий параметр, тобто задаючий. Технічний пристрій, що здійснює автоматичне управління називається управляючим пристроєм (УП). А об'єкт управління (ОУ) разом із управляючим та задаючим пристроєм складають Систему Автоматичного Управління (САУ).

Структурну схему САУ подано нижче (рисунок 2.5):

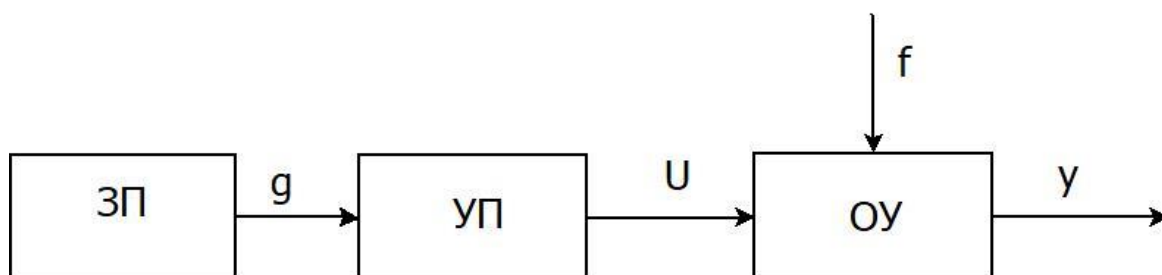


Рисунок 2.5 – Структурна схема САУ

Управління ОУ може здійснюватися за трьома основними принципами:

- принцип розімкнутого управління – виконується на основі заданого алгоритму і не контролюється іншими факторами;
- принцип компенсації збурень, де результат збурення у вигляді корективи вноситься в алгоритм управління;

– принцип управління по відхиленню. Тут корективи вносяться в алгоритм управління по фактичному значенню вихідної величини.

У нашому випадку скористуємось принципом управління по відхиленню.

Виконаємо структурну схему даної САУ (рисунок 2.6):

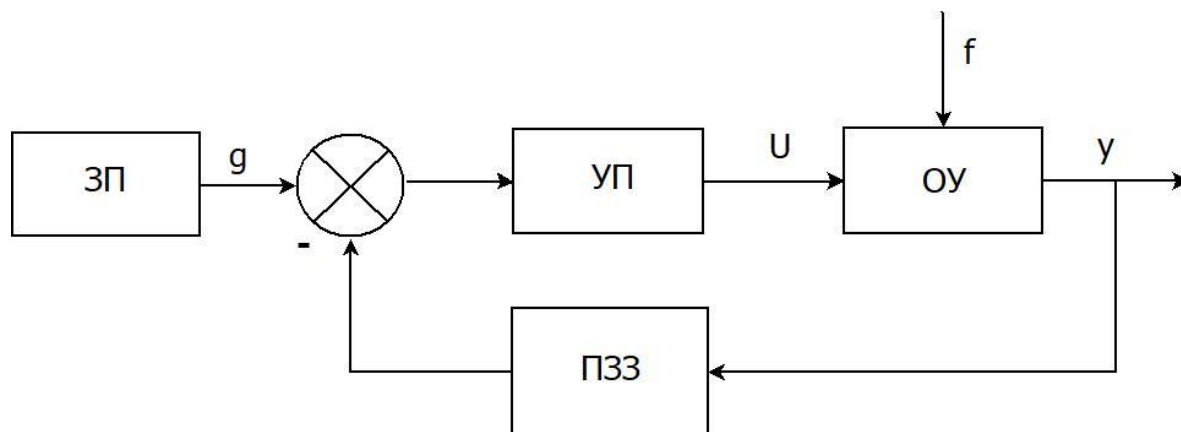


Рисунок 2.6 – САУ із зворотнім зв'язком

Задаючий пристрій (ЗП) – це електродвигун з енкодером, імпульси з якого поступають до мікроконтролера. У мікроконтролері прописана математична модель ПД–регулятора. Мікроконтролер виступає у ролі УП.

Мікроконтролер генерує ШІМ необхідного імпульсу і посилає його на вхід другого двигуна з енкодером. Вихід імпульсів з якого, є вихідною величиною і помилкою в зворотного зв'язку.

Далі САУ класифікуються [24] за:

а) алгоритмом функціонування;

1) системи стабілізації – підтримання регульованого параметра на заданому рівні;

2) програмне управління – алгоритм заданий в функції часу, де вихідна величина змінюється в часі за заданим законом;

3) слідкуючі системи – алгоритм функціонування заздалегідь не відомий, де регульована величина повинна відтворювати зміна деякої зовнішньої величини;

4) екстремальні системи – показник якості або ефективності процесу може бути виражений у вигляді функції параметрів системи, а сама функція має екстремум (максимум чи мінімум);

5) системи оптимального управління – процес управління ведеться таким чином, що деяка характеристика процесу б оптимальною;

б) адаптивні системи – деякі параметри ОУ та ін. Елементів системи можуть змінюватися. Наш алгоритм це програмне управління, де вихідна величина буде результатом ПІД управління;

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 управління описуються передавальними функціями, які є одним із способів математичного опису динамічної системи.

2.2 Аналіз законів управління

Вид передавальної функції керуючого пристрою визначає закон управління. Розрізняють п'ять основних законів управління: пропорційний (П), інтегральний (І), пропорційно-інтегральна (ПІ), пропорційно-диференціальний (ПД), пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД).

П–регулятор. Один з простих пристроїв і алгоритмів керування, у зворотному зв'язку, яке формує керуючий сигнал. Видає вихідний сигнал $u(t)$, пропорційний

вхідному (помилка регулювання) $e(t)$, з коефіцієнтом пропорційності K , який виробляється пропорційною частиною П-регулятора в протидії відхиленню регульованої величини від даного значення, в даний момент часу:

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

де K_p – коефіцієнт підсилення регулятора.

Чим більше відхилення, тим більше вихід саме за даним значенням. Тобто статична помилка дорівнює відхиленню регульованої величини. Тут присутня ймовірність, що система ніколи не стабілізується на заданому значенні. Збільшення коефіцієнта посилення збільшує різницю між входом і виходом, при цьому зменшується статична помилка. Але зростання цього коефіцієнта може привести до автоколиваний в системі, а подальше його збільшення призведе до втрати стійкості.

Зазвичай на практиці підсилювальні властивості П-регулятора характеризують такими величинами:

– межа пропорційності зворотна K_p :

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

– межа пропорційності, виражена у відсотках, розраховується за формулою (2.3). Показує, на скільки відсотків від свого максимального значення має змінитись вхідний сигнал, щоб вихідний змінився на 100 %

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

Автоколивання – це незгасаючі коливання в дисипативній (стійкий стан, що виникає в нерівноважній середовищі за умови дисипації (розсіювання) енергії, яка надходить ззовні) динамічній системі з нелінійним зворотним зв'язком, які

підтримуються за рахунок енергії постійного, тобто неперіодичного зовнішнього впливу.

П-регулятор знаходить своє застосування в тих же процесах, де не потрібне точна підтримка заданого значення, описаних раніше, тобто в контрольованому процесі буде присутня статична помилка. Виникає ця помилка через те, що вихідний сигнал занадто малий для надання істотного впливу на підтримку системи на заданому рівні. Цілком допускається, що регулятор виведе необхідне значення, але при виникненні впливів, що обурюють, регулятор не зможе повернути задане значення, поки неузгодженість не стане досить великою, щоб вихідний сигнал зміг надати достатній вплив. Для нашого прикладу такий закон не підходить.

ІІІ-регулятор. Ізодромне управління. Керуючий пристрій виробляє суму двох сигналів - пропорційної помилки і пропорційного інтегралу від помилки. Вихідний сигнал ІІІ-регулятора $u(t)$ залежить і від помилки регулювання $e(t)$, і від інтеграла від 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

Так як ІІІ-регулятор можна розглядати як два регулятора, з'єднані паралельно, то підсилювальні властивості ІІІ-регулятора характеризують два параметри:

- межа пропорційності $d = 1 / K_1$ – величина, зворотна K_1 ;
- час ізодрому $T_i = 1 / K_0$ – величина, зворотна K_0 .

Динамічні властивості системи з ІІІ-регулятором кращі, ніж з П-законом. Ізодромна система в перехідному режимі наближується до системи з пропорційним управлінням. А в сталому режимі подібна системі з інтегральним управлінням. Чим більший коефіцієнт пропорційності, тим менша вихідна потужність при одній і тій же помилці регулювання, чим більше постійна часу інтегрування, тим повільніше

накопичується інтегральна складова. ПІ регулювання забезпечує нульову помилку регулювання і невідчутне до перешкод вимірювального каналу. Помилка регулювання (статична) виключається за рахунок інтегральної ланки, яка утворюється шляхом постійного підсумовування ε за певний проміжок часу і формування сигналу управління, пропорційного отриманої величині.

Недоліком ПІ регулювання є повільна реакція на збурюючі впливи. Для налаштування ПІ регулятора слід спочатку встановити постійну часу інтегрування дорівнює нулю, а коефіцієнт пропорційності – максимальним. Потім, як при налаштуванні пропорційного регулятора, зменшенням коефіцієнта пропорційності потрібно домогтися появи в системі незатухаючих коливань. Близьке до оптимального значення коефіцієнта пропорційності буде в два рази більше того, при якому виникли коливання, а близьке до оптимального значення постійної часу інтегрування – на 20% менше періоду коливань. Оптимальним є перехідний процес з 20% перерегулюванням.

ПІД-регулятор. Це сума трьох регуляторів П, І і Д (пропорційно-інтегрально-диференціюючий). Вихідний сигнал ПІД-регулятора $u(t)$ залежить від помилки регулювання $e(t)$, від інтеграла від цієї помилки і від похідною від цієї помилки:

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

Підсилювальні властивості характеризують три параметри:

- межа пропорційності $d = 1 / K_1$;
- час ізодрому $T_i = 1 / K_0$;
- час передування $T_d = K_2$.

Системи регулювання з ПІД-регуляторами поєднують в собі переваги П-, І-, і ПІД регуляторів. У таких системах відсутня статична помилка і вони мають високу швидкодію.

2.3 Аналіз конструкції фрезерного верстату з ЧПУ

Верстат являє собою настільний фрезерний верстат. Оснащений трьома осями. Виконує обробку за допомогою інструменту тіл обертання. Ріжучий інструмент обертається та рухається по осям X, Y, Z і здійснює обробку деталі. Робочі органи переміщуються за допомогою гвинтових передач. Станина є основою для розміщення елементів малогабаритного обладнання.

Загальний вигляд верстату представлений на рисунку 2.1.

Верстат оснащений платою керування малогабаритним фрезерним верстатом STB4100 STB4100. Зображена на рисунку 2.7.



Рисунок 2.7 – Плата керування малогабаритним фрезерним верстатом STB4100

Інтерфейсна плата оснащена, опторозв'язкою силової і логічної частини плати. Опторозв'язка – це один з видів гальванічної розв'язки. Також плата потребує, повну підтримку програми MACH3 та інших комп'ютерних програм для управління верстатом за допомогою паралельного порту.

Основні характеристики плати управління LPT порту:

- кількість осей: 4;
- кабель: USB/LPT;
- сумісні програми: підтримка всіх версій програмного забезпечення MACH3;
- з'єднання з комп'ютером: LPT DB25;
- частота сигналу STEP до 100 кГц;
- 4 входи для підключення датчиків кінцевих вимикачів ;
- напруга живлення силової частини: від 12 В до 24 В;
- 4 входи для підключення насосів;
- наявність світлового індикатора, який вказує стан з'єднань на платі ;
- можливість підключення ручного генератора імпульсів MPG100 (пульт управління) для верстатів з ЧПУ;
- канал для управління швидкістю шпинделя (від 0 до 10);
- вага: 150 г;
- розміри: 8,5 мм × 8,1 мм × 1,4 мм. [24]

На верстат встановлено двигуни осей типу Nema 17 17HS4401. Схема та зовнішній вигляд на рисунку 2.8.



Рисунок 2.8 – Кроковий двигун Nema 23 J-5718HB2401

У таблиці 2.1 подано основні технічні характеристики крокового двигуна Nema 23 J-5718HB2401 [24].

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики крокового двигуна Nema 23 J-5718HB2401

Параметри	Значення
1	2
Крок кута	1,8°
Підвищення температури	≤80
Номинальний струм	3,5 А
Опір	0,8 Ом
Індуктивність	2,4 мГн
Вал радіальний	≤0,02 мм
Утримуючий момент	1,3 Н·см ²
Обертаючий момент	3,5 Н·см ²
Момент інерції	260 Г/см ²
Осьовий	≤0,02 мм
Макс. радіальний	75N
Макс. осьовий	25N
Опір ізоляції	≥100 МΩ
Кількість пар полюсів	50

2.4 Розробка системи керування верстатом

Для подальшого дослідження автоматизації процесу фрезерування верстата з ЧПУ потрібно скласти структурну схему верстата, розрахувати передавальні функції кожного елемента системи та всієї системи (розімкненої та замкненої) та дослідити систему на стійкість та визначити якості системи.

Для створеного верстата розробив структурну схему, в яку включено складові частини верстату (рисунок 2.9).

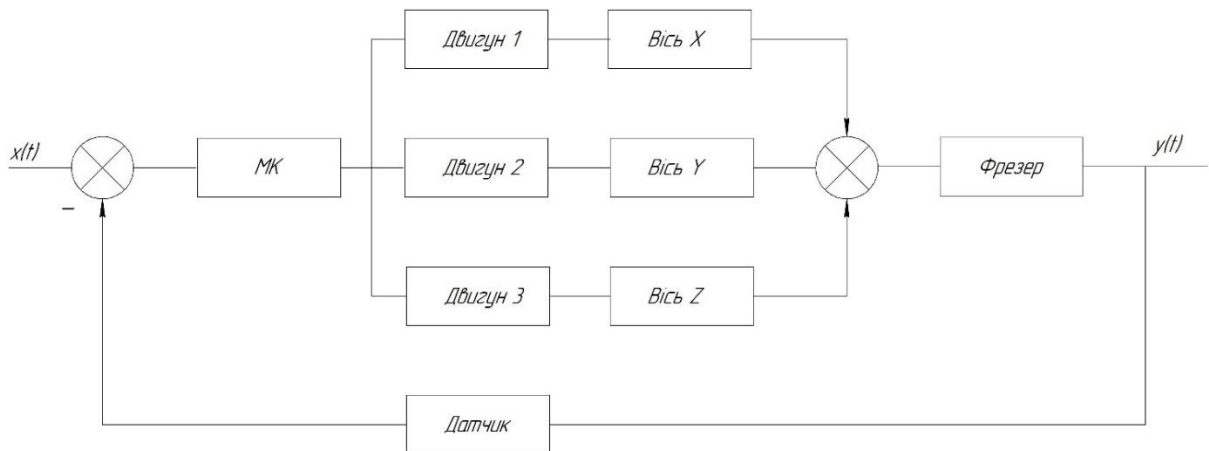


Рисунок 2.9 – Структурна схема фрезерного верстата з ЧПУ

Для кожної складової частини верстата необхідно визначити передаточні функції.

Для того, щоб визначити передаточну функцію обраних крокових двигунів, скористаюсь формулою (2.6) [34]:

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

де p – кількість пар полюсів;

Φ_M – магнітний потік (Тл · м²);

n – кількість витків;

l_0 – сила струму (А);

J – момент інерції (кг · м²);

D – коефіцієнт в'язкого тертя (Н · м · с · 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 верстата (портал), використовуються передачі типу гвинт–гайка (рис. 2.10).

Параметри цієї передачі наведені нижче:

Характеристики:

- габарити вала (довжина x діаметр): 790 мм × 8 мм;
- габарити гайки (висота x діаметр): 15 мм × 22 мм;
- крок різі: 1 мм;
- матеріал вала: сталь С45;
- матеріал гайки: бронза.



Рисунок 2.10 – Гвинт трапецеїдальний [35]

Для цього типу передачі типово використовується безінерційна ланка. Але, спочатку, визначимо передаточне відношення передачі гвинт–гайка (2.7)

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

де p – крок різі, мм;

D – діаметр, мм.

$$U = \frac{1}{3,14 \cdot 8} = \frac{1}{25,12} = 0,04.$$

Передаточна функція буде мати вигляд:

$$W_{\text{вл}(1,2,3)} = 0,04.$$

Далі необхідно визначити передаточну функцію нашого електродвигуна, що використовується у якості фрезера [36], [37], [38].

Основні характеристики шпинделя з водяним охолодженням, що використовується в конструкції фрезерного верстату:

- діаметр: 80 мм;
- швидкісна здатність: через вихідну напругу інвертора і регулювання робочої;
- швидкість обертання: до 24000 об/хв;
- охолодження: водяне;
- потужність: 2,2 кВт;
- напруга: 220 В;
- номінальний струм – 10 А;
- частота: від 0 Гц до 400 Гц;
- підшипник тип: 2x7005С Р4 DT та 2x7002С Р4DT;
- цанга: ER20;
- застосовується діаметр фрези: 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;

Передаточна функція визначається за формулою:

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

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

$$k_{дв} = \frac{1}{кФ}, \quad (2.9)$$

де кФ – номінальне значення току збудження (2.10)

$$кФ = \frac{U_H - I_я R_d}{\omega_H}, \quad (2.10)$$

де U_H – номінальна напруга, В;

$I_я$ – струм у обмотці якоря, А;

R_d – опір у обмотці, Ом;

ω_H – номінальна кутова швидкість, рад/с (2.11).

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

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

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

де V – номінальна частота обертання, об/сек.

$$n_H = 2 \cdot 3,14 \cdot 250 = 1570,$$

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

$$кФ = \frac{220 - 10 \cdot 0,234}{164,3} = 1,32,$$

$$k_{дв} = \frac{1}{1,32} = 0,76,$$

$$W_{фрез} = \frac{0,76}{s}.$$

У якості датчика швидкості використаємо тахогенератор, який можна уявити у якості безінерційного лінійного елементу. Тоді передаточна функція датчика швидкості (2.13):

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

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

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

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

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

За формулами (2.13)-(2.14):

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

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

Розглянемо мікроконтролер, як імпульсний елемент системи і розрахуємо його дискретність.

Входи і виходи мікроконтролера аналогові з дискретністю 8 біт – 256, при напрузі від 0 В до 5 В на входах і виходах, мікроконтролер видає дозвіл 0,02 В, що дозволяє судити про його практичну лінійність по входах і виходах.

Частота кварцу мікроконтролера дорівнює 12 МГц. Один такт програми виконується за 1/12 частоти мікроконтролера, відповідно за 1 хвилину виробляється 6107 тактів програми.

Припустимо, що для прийняття рішення мікроконтролера необхідно 10^3 такти програми, тоді дискретність мікроконтролера дорівнює 610^4 тактів в

хвилину, а період дискретності $T = 1,610^{-5}$ хв, що зводить до нуля дискретність мікроконтролера за часом, тоді як найбільша постійна часу дорівнює 1 хв. Робимо висновок, що мікроконтролер не вносить перешкод в розглянуту систему, і його передавальну функцію приймаємо за одиницю. Тому:

$$W_{\text{МК}} = 1.$$

Складено структурну схему САУ (рис. 2.11).

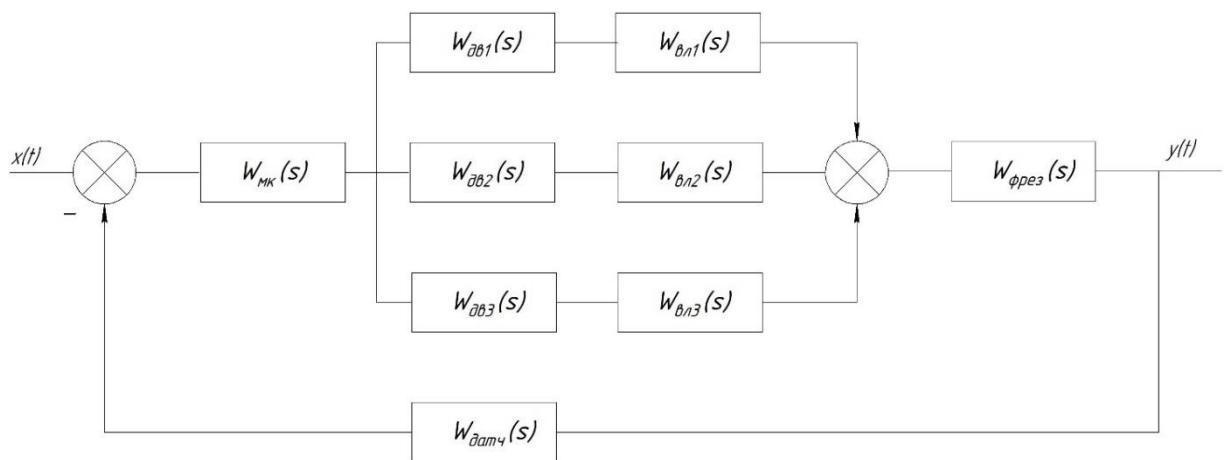


Рисунок 2.11 – Структурна схема САУ

Далі, для оцінки якостей системи, необхідно розрахувати передавальну функцію розімкненої та замкненої систем:

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

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

Підставивши до формул (2.15) та (2.16) отримані значення окремих передавальних функцій отримаємо загальну передавальну функцію розімкненої системи $W_p(s)$:

$$W_p(s) = \frac{20779,92}{0,000003s^3 + 0.04s^2 + 9114s}$$

Далі підставимо відомі вже передавальні функції у формулу (2.16) та отримаємо передавальну функцію замкнутої системи $W_3(s)$:

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

2.5 Визначення стійкості системи та показників якості

Наступним кроком буде оцінка розробленої системи на стійкість та визначення показників якості системи.

Необхідно провести оцінку стійкості розімкнутої системи за коренями характеристичного рівняння. З передавальної функції замкненої системи складемо характеристичне рівняння (2.17):

$$9 \cdot 10^{-12} \cdot \lambda^6 + 2,4 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda^5 + 0,06 \cdot \lambda^4 + 729,12 \cdot \lambda^3 + 8,3 \cdot 10^7 \lambda^2 + 1,2 \cdot 10^7 \lambda = 0. \quad (2.17)$$

Всі коефіцієнти цього рівняння мають один і той самий знак (усі додатні), отже можна зробити висновок, що необхідна умова стійкості виконується, але у нашому випадку система складає собою систему шостого порядку, і маємо необхідність знайти корені рівняння (2.18):

$$\begin{cases} \lambda_1 = -0.7880 + 6.5846i \\ \lambda_2 = -0.7880 - 6.5846i \\ \lambda_3 = -0.5452 + 4.5467i \\ \lambda_4 = -0.5452 - 4.5467i \\ \lambda_5 = -0.0002 + 0.0000i \\ \lambda_6 = 0.0000 + 0.0000i. \end{cases} \quad (2.18)$$

Побудував графік розташування на комплексній площині коренів характеристичного рівняння (рис. 2.12).

Переглянувши отриманий графік розташування коренів характеристичного рівняння можна зробити висновок про стійкість системи, тому що на графіку відсутні додатні корені, то замкнута система стійка.

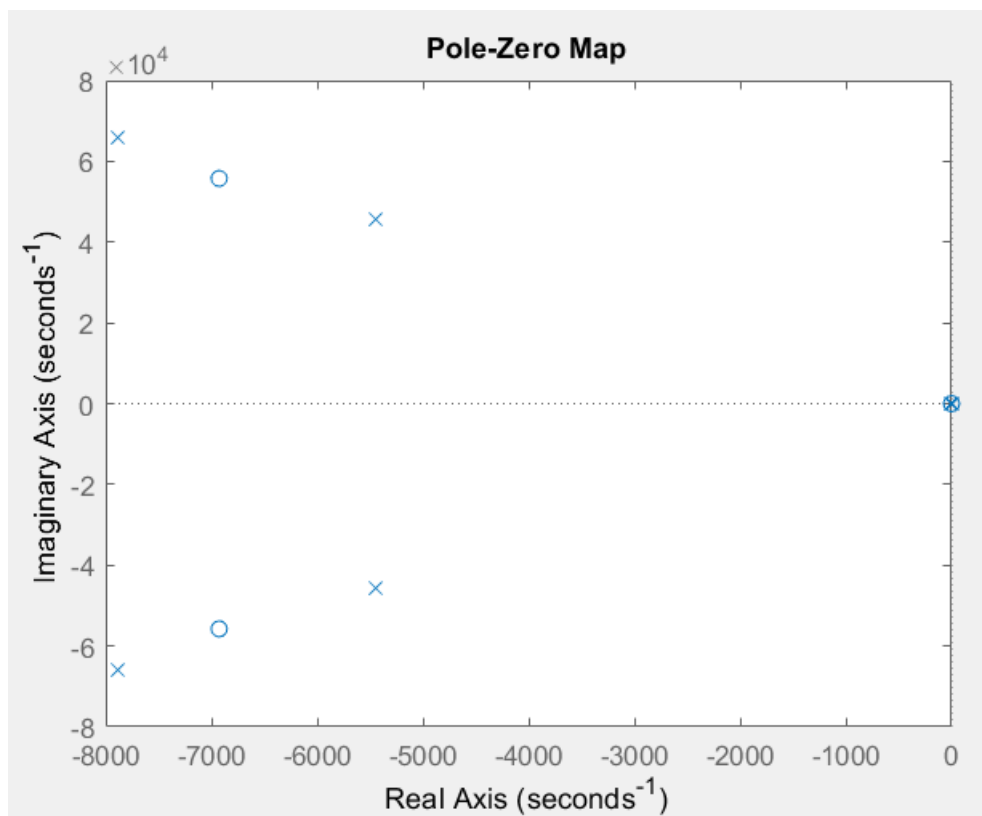


Рисунок 2.12 – Розташування коренів характеристичного рівняння

Далі важливо зробити оцінку замкнутої системи за таким критерієм, як Гурвіца. Для цього необхідно взяти передавальну функцію замкнутої системи та

складене характеристичне рівняння та виконати перевірку системи на достатню умову. Побудуємо головний визначник Гурвіца (2.19):

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} 2,4 \cdot 10^{-7} & 729,12 & 1,2 \cdot 10^7 & 0 & 0 \\ 9 \cdot 10^{-12} & 0,06 & 8,3 \cdot 10^7 & 0 & 0 \\ 0 & 2,4 \cdot 10^{-7} & 729,12 & 1,2 \cdot 10^7 & 0 \\ 0 & 9 \cdot 10^{-12} & 0,06 & 8,3 \cdot 10^7 & 0 \\ 0 & 0 & 2,4 \cdot 10^{-7} & 729,12 & 1,2 \cdot 10^7 \end{vmatrix}. \quad (2.19)$$

Далі, відкреслюючи у головному визначникові Гурвіца, отримаємо визначники Гурвіца нижчого порядку та визначимо їх (2.20):

$$\Delta_1 = a_1, \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix}, \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix}, \quad (2.20)$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix}, \Delta_5 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & a_3 & a_5 \end{vmatrix}.$$

Тоді,

$$\Delta_1 = 2,4 \cdot 10^{-7},$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 2,4 \cdot 10^{-7} & 729,12 \\ 9 \cdot 10^{-12} & 0,06 \end{vmatrix} = 7,8 \cdot 10^{-9},$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 2,4 \cdot 10^{-7} & 729,12 & 1,2 \cdot 10^7 \\ 9 \cdot 10^{-12} & 0,06 & 8,3 \cdot 10^7 \\ 0 & 2,4 \cdot 10^{-7} & 729,12 \end{vmatrix} = 9,3 \cdot 10^{-7},$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 2,4 \cdot 10^{-7} & 729,12 & 1,2 \cdot 10^7 & 0 \\ 9 \cdot 10^{-12} & 0,06 & 8,3 \cdot 10^7 & 0 \\ 0 & 2,4 \cdot 10^{-7} & 729,12 & 1,2 \cdot 10^7 \\ 0 & 9 \cdot 10^{-12} & 0,06 & 8,3 \cdot 10^7 \end{vmatrix} = 77,52,$$

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} 2,4 \cdot 10^{-7} & 729,12 & 1,2 \cdot 10^7 & 0 & 0 \\ 9 \cdot 10^{-12} & 0,06 & 8,3 \cdot 10^7 & 0 & 0 \\ 0 & 2,4 \cdot 10^{-7} & 729,12 & 1,2 \cdot 10^7 & 0 \\ 0 & 9 \cdot 10^{-12} & 0,06 & 8,3 \cdot 10^7 & 0 \\ 0 & 0 & 2,4 \cdot 10^{-7} & 729,12 & 1,2 \cdot 10^7 \end{vmatrix} = 930,232,206,35.$$

Далі необхідно перевірити систему на необхідну і достатню умову стійкості за формулою (2.21):

$$a_0 > 0 \quad \Delta_1 > 0 \quad \Delta_2 > 0 \quad \Delta_3 > 0 \quad \Delta_4 > 0 \quad \Delta_5 > 0. \quad (2.21)$$

З цього можна зробити висновок, що необхідна та достатня умова стійкості Гурвіца виконується і система стійка.

Наступним виконаємо перевірку розробленої системи за критеріями Михайлова, Найквіста та проведемо оцінку показників якості розробленої системи керування верстатом.

Критерій Михайлова. Оцінимо стійкість замкнутої системи за критерієм Михайлова. Для цього побудуємо криву Михайлова (рис. 2.13).

У середовищі MatLab виконаємо перетворення з метою отримання комплексного характеристичного поліному. Задля цього у командному вікні виконаємо такі дії (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 2.13 – Фрагмент програмного коду для визначення комплексного характеристичного поліному

Наступним кроком побудуємо криву Михайлова (рис. 2.15). Програмний код для цієї побудови зображено на рисунку 2.14.

```

>> 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;

Re1=real(Djw);
Im1=imag(Djw);
Re=[Re,Re1];
Im=[Im,Im1];
end
>> figure, plot(Re,Im)
>> grid on

```

Рисунок 2.14 – Фрагмент програмного коду для побудови кривої Михайлова

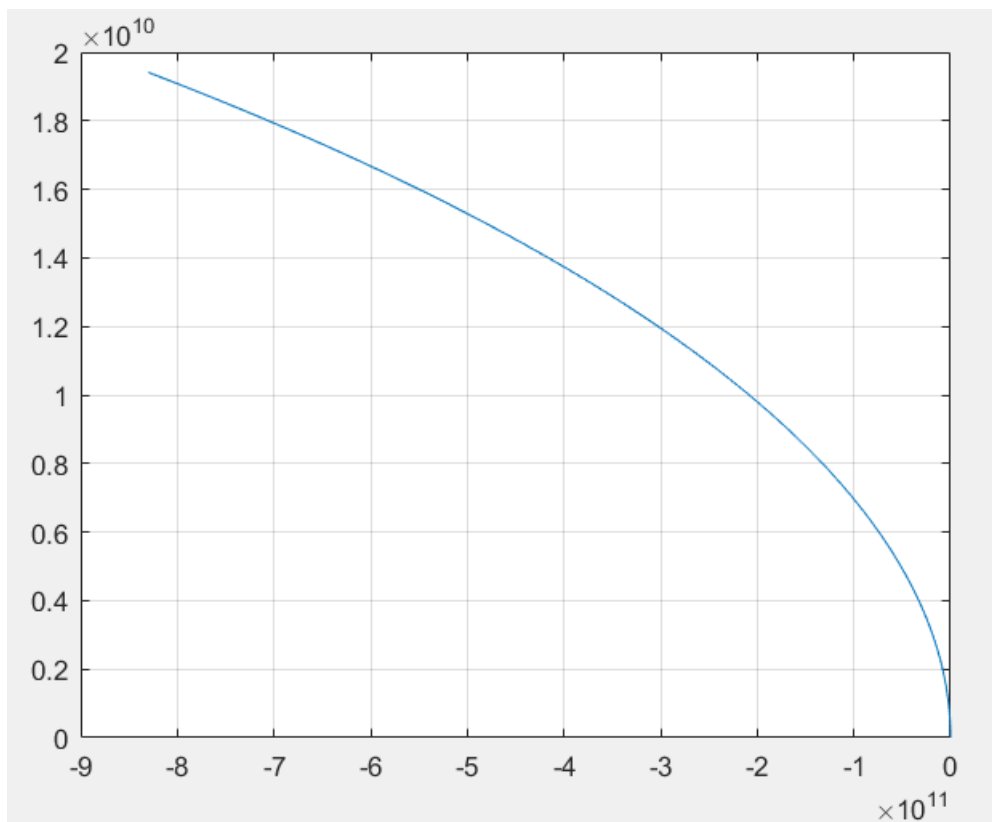


Рисунок 2.15 – Крива Михайлова

З графіку (рис. 2.15) видно, що система стійка, тому що графік характеристичного рівняння прямує до нескінченності у шостому квадранті, що дорівнює ступеню характеристичного рівняння ($n=6$).

Критерій Найквіста.

Для того, щоб замкнута система могла б бути необхідно та достатньо визнана стійкою, за умови, що кількість правих коренів дорівнює нулю ($l = 0$), необхідно, щоб АФЧХ (рис. 2.16) розімкнутої системи не охоплювала точку $(-1; j0)$.

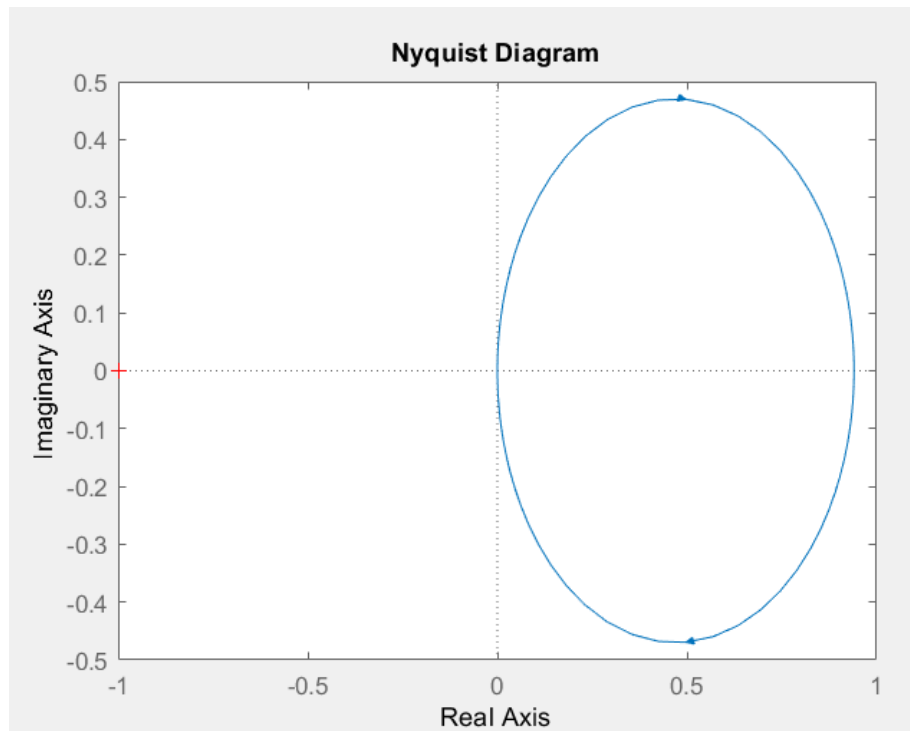


Рисунок 2.16 – АФЧХ системи управління фрезерним верстатом з ЧПУ

Для кращого розуміння графіку необхідно зробити масштабування графіку до нуля координат (рис. 2.17).

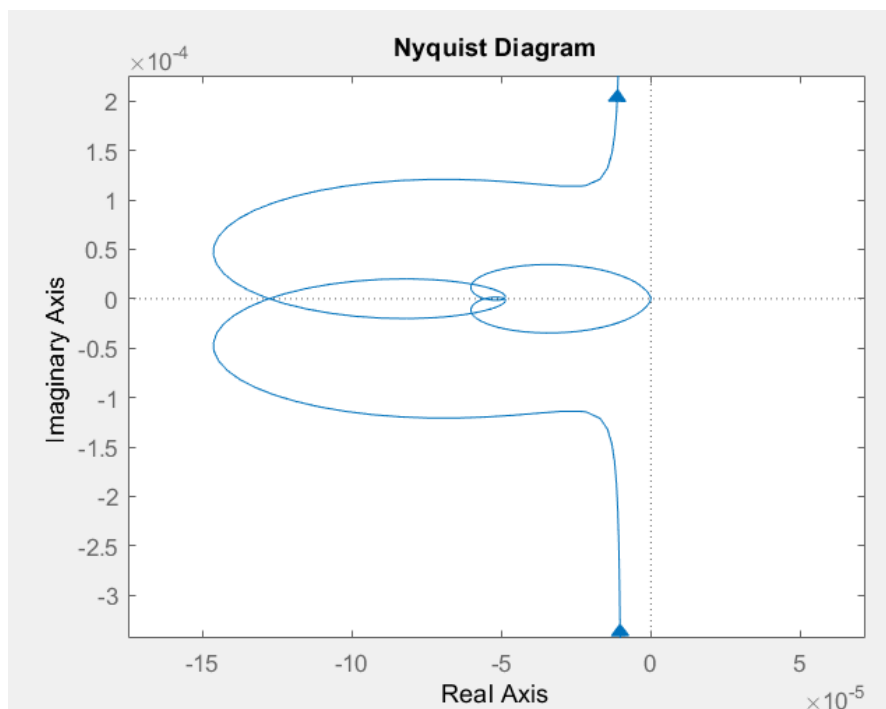


Рисунок 2.17 – Масштабована АФЧХ системи управління фрезерним верстатом з ЧПУ

Важливим кроком є оцінка якості нашої розробленої САУ.

Розрахуємо показники якості нашої системи. Збудувавши графік перехідної характеристики системи, що зображений на рисунку 2.18, проаналізуємо його.

З графіку можна побачити, що час встановлення розробленої системи складає $t_p = 5,1$ с.

Виходячи з формули (2.21), підставивши отримані значення з графіку розрахуємо відсоток перерегулювання:

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_{\infty}}{h_{\infty}} \cdot 100, \quad (2.21)$$

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

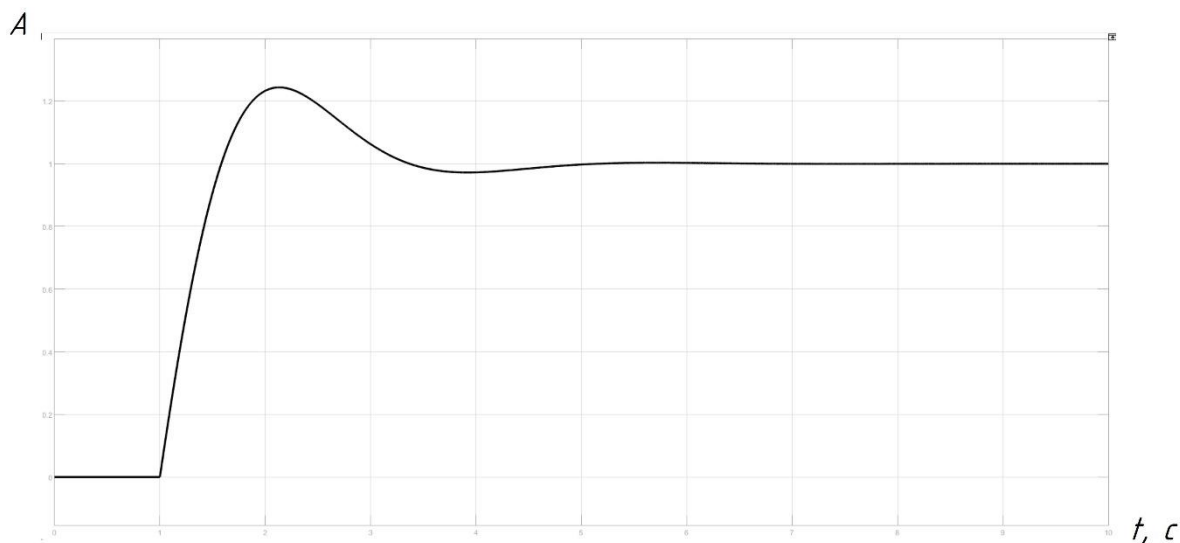


Рисунок 2.18 – Перехідна характеристика системи управління ЧПУ

Під час експлуатації фрезерного верстату з ЧПУ на обладнання впливають різні чинники (вібрації, рівність поверхні, тиск, температура, сили різання). Ці впливи можуть тим чи іншим чином впливати на роботу фрезерного верстату з ЧПУ, наприклад крокові двигуни, які приводять до руху осі верстату, можуть пропускати кроки, що збиває точність позиціонування робочого органу. Ці впливи також можуть призвести до втрати стійкості системи, особливо це може відбутися,

якщо система працює поблизу кордону стійкості. Щоб запобігти втраті системою стійкості необхідно забезпечити віддалення роботи системи від кордону стійкості.

З цього можна зробити висновок, що визначення запасів стійкості системи управління для верстата з ЧПУ за значення запасу за фазою та амплітудою є вкрай необхідним.

Для визначення цього запасу необхідно збудувати ЛАЧХ та ЛФЧХ розробленої системи (рис. 2.19).

Розглянувши отриманий графік є можливість визначити наступні показники стійкості:

- запас стійкості по амплітуді – $\Delta A = 8,73$ дБ;
- запас стійкості по фазі – $\Delta\varphi = 130^\circ$.

Розглянувши отриманий графік можна зробити висновок, що значення запасу стійкості потрапляє в межі від 6 дБ до 20 дБ. Також можна побачити, що значення запасу за фазою потрапляють в діапазон від 30° до 600° , з цього можна побачити, що розроблена система є нормально демпфованою.

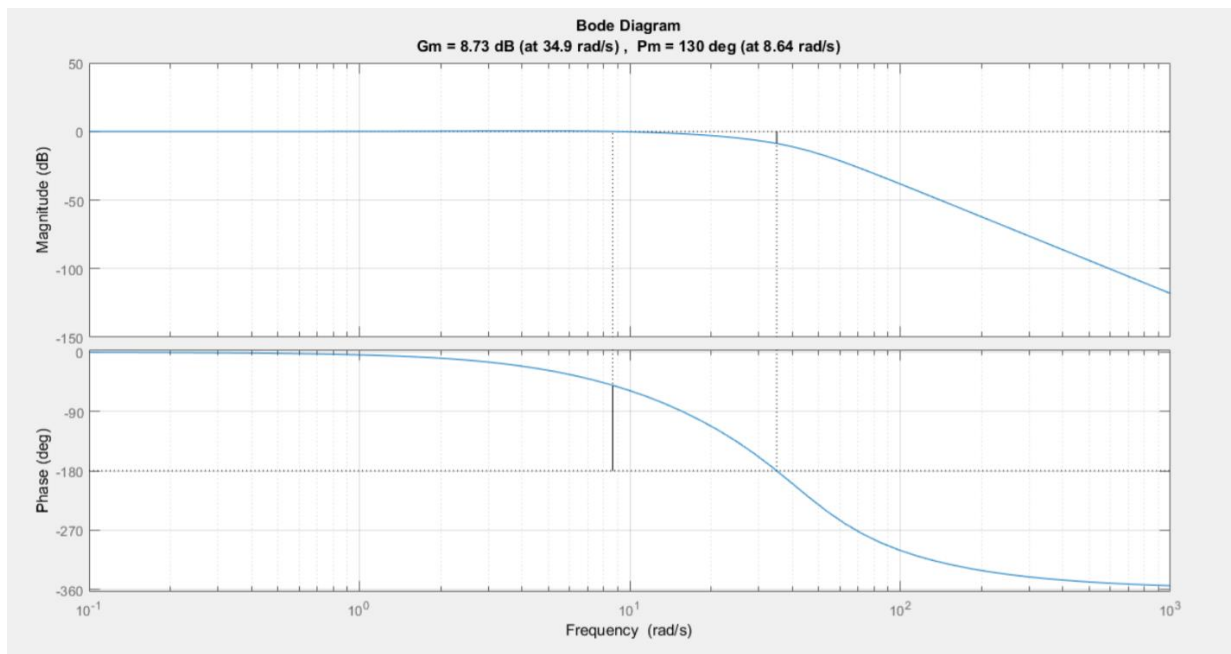


Рисунок 2.19 – ЛАЧХ та ЛФЧХ системи управління верстатом

2.7 Висновки до 2 розділу

Для розробки автоматизованого управління ми проаналізували методи управління фрезерним верстатом з ЧПУ та закони управління.

Розробили макет фрезерного верстату з ЧПУ.

Проаналізували основні частини верстату, визначили передавальну функцію кожного з них. На їх базі розроблена система управління

Провели дослідження системи управління на стійкість та якість.

Отримані дані дослідження стійкості розробленої системи керування фрезерним верстатом, показників якості та запасу стійкості її елементів, структури дають можливість зробити висновок, що вони задовільняють вимогам до проектування таких систем.

Система є стійкою, але показники часу встановлення ($t_p = 5,1$ с) та перерегулювання ($\sigma = 23$ %) не задовільняють вимогам і через це система потребує покращення за допомогою регулятора.

У третьому розділі, на основі отриманих даних, планується оснастити систему ПД – регулятором, підібрати його коефіцієнти, порівняти отримані значення часу встановлення та перерегулювання із отриманими у другому розділі.

Також необхідно провести експериментальні дослідження на макеті фрезерного верстату з ЧПУ, виконавши обробку деталей.

3 ПОКРАЩЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВЕРСТАТОМ З ЧПУ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Розробка системи з ПДД-регулятором

Фрезерний верстат з ЧПУ є складним багатовимірним об'єктом, а його параметри, та значення його показників не є статичними, а є динамічними. Розробити систему управління фрезерним верстатом є досить складним завданням. Система управління повинна мати високі показники з точності. Наприклад при обточуванні поверхонь, особливо циліндричних не може бути допущено пропуски кроків на двигунах. Перехідна характеристика шпинделя має бути стабільною на протязі всього процесу обробки.

Тому в системі управління верстатом пропонується використовувати ПДД-регулювання. Для того, щоб розрахувати коефіцієнти ПДД-регулятора можна використовувати стандартні методи [39]. Проте переходячи від теорії до практики, ми бачимо, що розраховані коефіцієнти ПДД-регулятора не завжди відповідають очікуванням. Це відбувається, як раз, через те, що на верстат, та його систему управління у процесі обробки впливають певні зовнішні чинники, які можуть бути не враховані під час розробки системи управління. Через це є актуальною задача автоматичного корегування налаштувань регулятора, або є можливість підібрати налаштування ПДД – регулятора вручну.

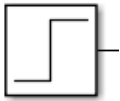
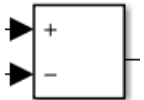
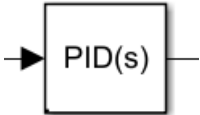
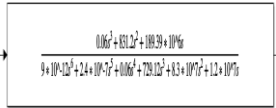
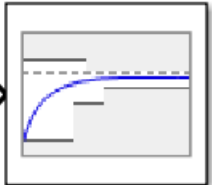
Задля цього у системі математичного моделювання MatLab здійснімо моделювання нашої системи управління. В яку включено ПДД – регулятор.

Далі зберемо елементи у систему (рис.3.1) і задамо ПДД – регулятору стандартні значення (рис. 3.2).

Отриманий графік перехідної характеристики із стандартними значеннями ПДД – регулятора зображений на рисунку 3.3.

Система складається з елементів, наведених у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Складові частини системи

Елемент	Короткий опис
	Генератор одиничного імпульсу
	Від'ємний суматор
	ПД – регулятор
	Перехідна функція, що описує систему управління верстатом
	Блок, що показує реакцію системи на одиничний вплив

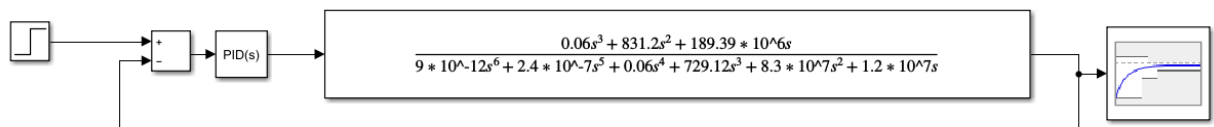


Рисунок 3.1 – Макет системи управління верстатом з ЧПУ для покращення ПД-регулятора

▼ 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 – Вікно налаштувань параметрів ПД – регулятора

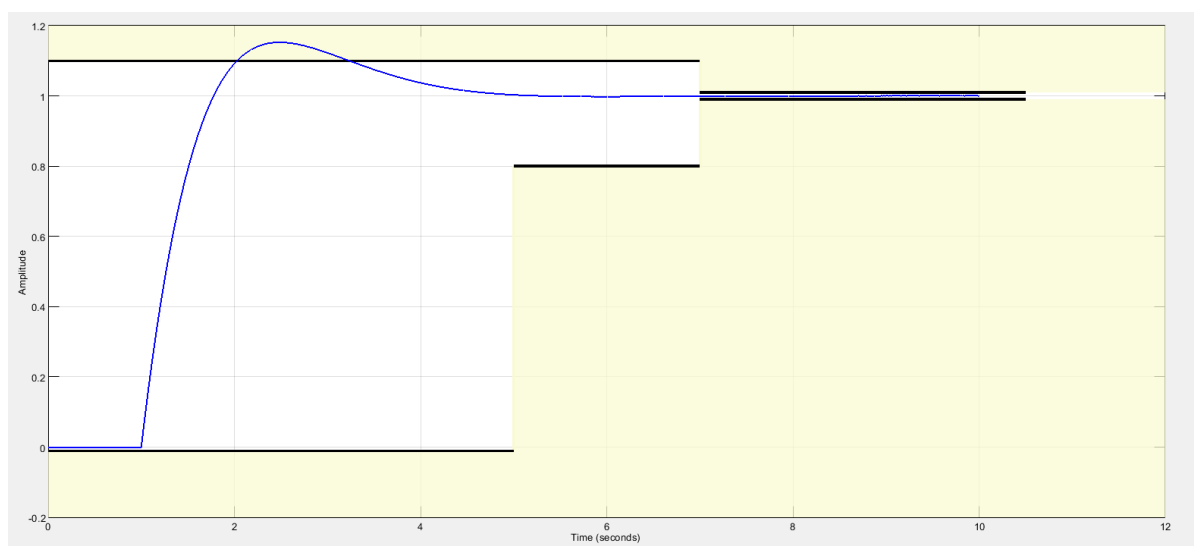


Рисунок 3.3 – Графік перехідної характеристики із стандартними значеннями коефіцієнтів ПД – регулятора

Для отримання кращих результатів за показниками перерегулювання та часу встановлення застосуємо наступний алгоритм.

На рисунку 3.4 показано вікно налаштувань параметрів ПД-регулятора. Чорним прямокутником обведена кнопка Tune..., натискаючи на яку ми переходимо до вікна покращення коефіцієнтів ПД-регулятора (рис. 3.5)

Source:

Proportional (P):

Integral (I):

Derivative (D):

Use filtered derivative

Filter coefficient (N):

Automated tuning

Select tuning method:

Рисунок 3.4 – Вікно налаштувань параметрів ПІД – регулятора (чорним прямокутником обведена необхідна кнопка)

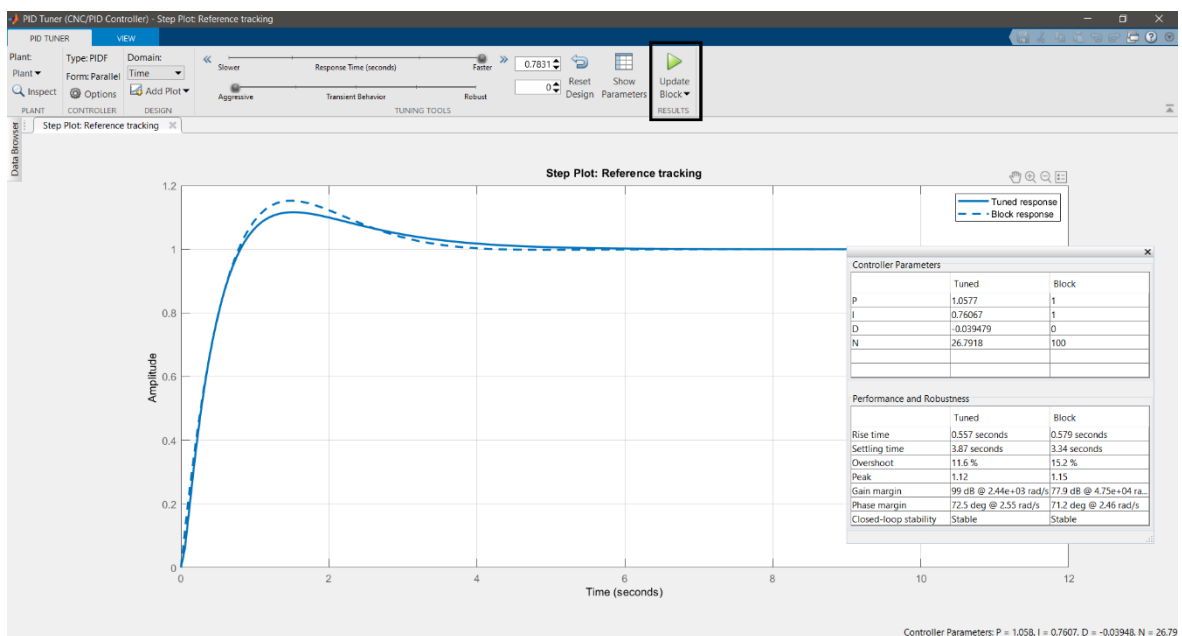


Рисунок 3.5 – Вікно покращення параметрів ПІД – регулятора

На рисунку 3.5 чорним прямокутником обведена кнопка, натисканням на яку можна прописати оновлені значення в блок ПІД – регулятора.

Змінюючи необхідні нам параметри часу реакції (Response time) підбираємо найкращі параметри ПІД – регулятора.

У вікні Controller Parameters (рис. 3.6) можна побачити які зараз коефіцієнти має блок ПІД – регулятора (стовпчик Block) та ті параметри, які вийшли у процесі підбору коефіцієнтів (стовпчик 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 – Отримані та минулі параметри

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

Зручність такого методу полягає в тому, що є можливість спостерігати за основними параметрами під час підбору та порівнювати їх із вихідними.

Аналізуючи отримані параметри (рис. 3.6) можна побачити, що незначно виріс час встановлення після покращення параметрів ПДД – регулятора. Але значно зменшилось перерегулювання з 15,2 % до 11,6 %.

У цій ситуації збільшенням часу встановлення можна знехтувати, тому що час встановлення не грає великої ролі, але через велике перерегулювання існує можливість виходу швидкості переміщення робочих інструментів, частоти обертання робочого інструменту з нормальних параметрів, що може призвести до збиття позиціонування, пропускання кроковими двигунами кроків, а підвищення швидкості обертання може призвести до не отримання необхідної якості оброблюваних поверхонь, може зламатись оброблюючий інструмент та заготовка.

Прописані значення зображено 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 – Нові параметри ПД–регулятора

На рисунку 3.8 зображено оновлений графік перехідної характеристики системи управління фрезерним верстатом з ЧПУ.

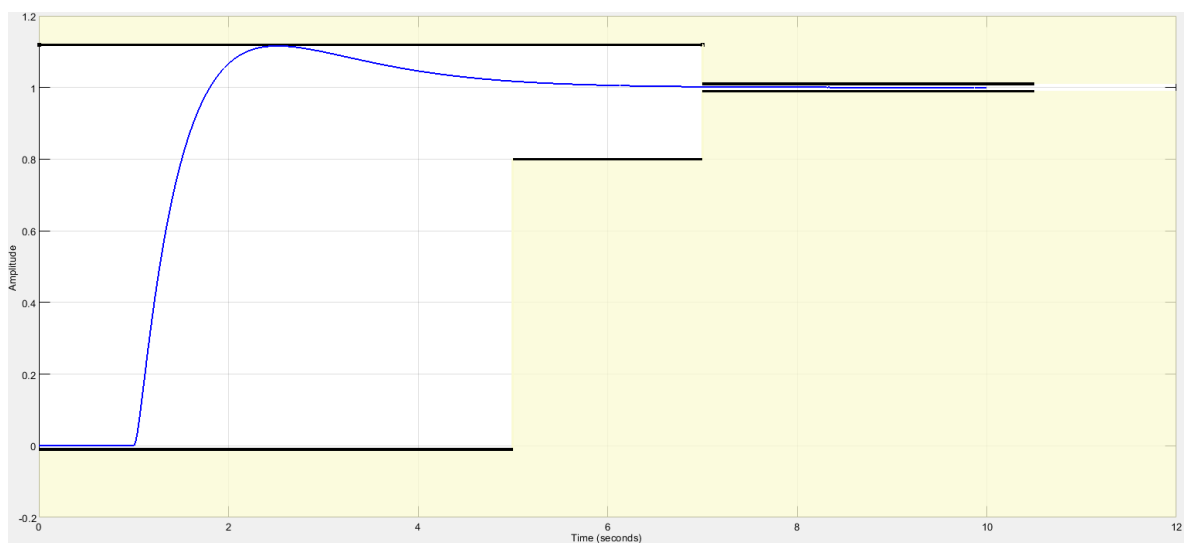


Рисунок 3.8 – Графік перехідної характеристики із оптимізованими значеннями коефіцієнтів ПД–регулятора

Таким чином отримані параметри задовольняють вимогам до розробленої конструкції, цілям та задачам, які ставляться перед розробленим фрезерним верстатом з ЧПУ.

Цей верстат призначений для одиничного, експериментального виробництва, для виконання фрезерної обробки одиничного порядку.

3.2 Розробка керуючої програми та експериментальні дослідження

На цьому етапі відбудеться описання підготовки керуючої програми (КП) для обробки двох деталей: макет плати та кришки.

Для початку необхідно виконати 3D – моделювання розроблюваних деталей. Виконаємо це у САД КОМПАС – 3D v17.

Компас 3D-це сучасне програмне рішення для виконання автоматизованого проектування, яке використовується тисячами груп-інженерів. Мета програми-швидке та зручне моделювання, що значно прискорює процес проектування, знижує витрати на проектування та пришвидшує запуск у виробництво. Ця мета досягається завдяки можливості швидкого отримання конструкторської документації

Основні компоненти КОМПАС-3D V17:

- система тривимірного твердотільного моделювання;
- креслярсько-графічний редактор;
- модуль проектування специфікацій.

Виконаємо 3D – модель макету плати. Зображено на рисунку 3.9. Розміри деталі зображено на рисунку 3.10.

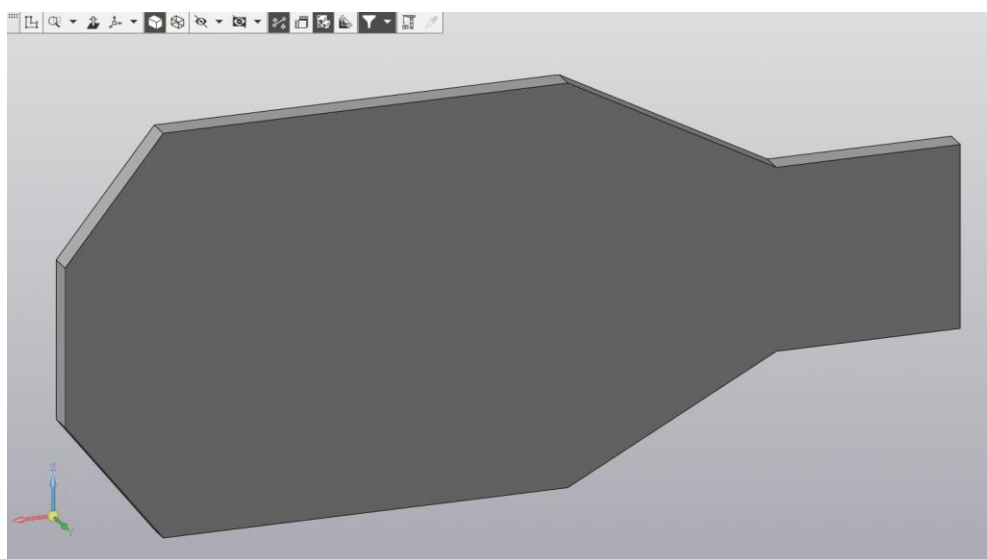


Рисунок 3.9 – 3D-модель макету плати

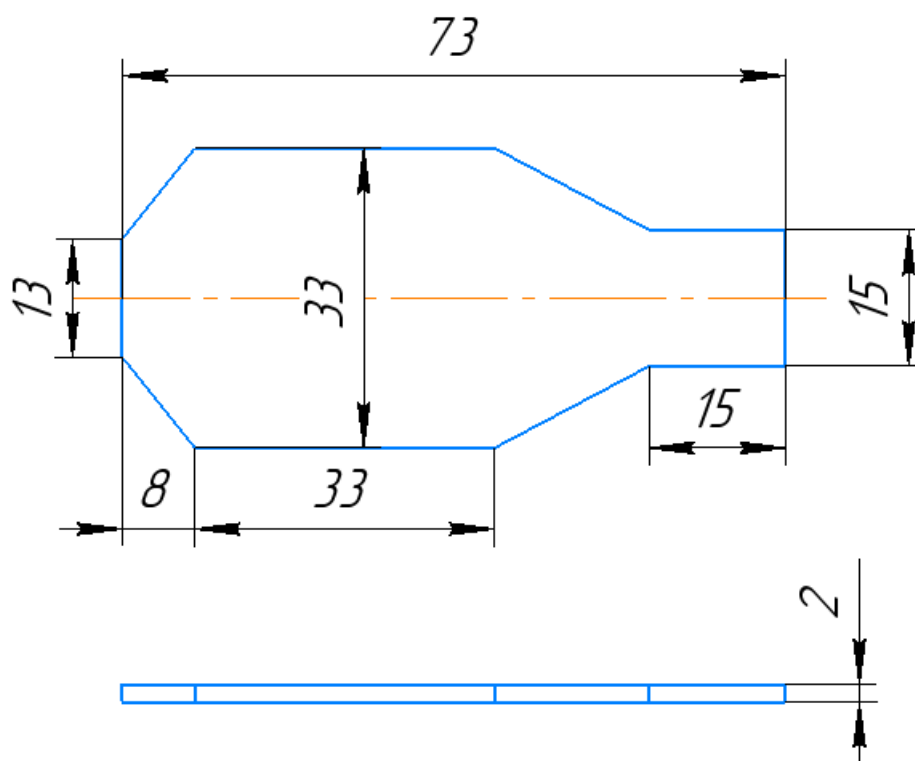


Рисунок 3.10 – Ескіз макету плати із розмірами

Далі необхідно 3D-модель зберегти у форматі STEP з метою універсальності цієї моделі і можливості прочитання моделі різними програмами.

Для розробки траєкторії обробки використовуватись буде середовище розробки Autodesk ArtCAM Premium 2018.

ArtCAM – це програмний пакет для просторового моделювання/механообробки, який дозволяє автоматично генерувати просторові моделі із плоского рисунку і отримувати по ним вироби на верстатах з ЧПУ. ArtCam пропонує потужний, легкий у використанні набір засобів моделювання, який надає інженеру свободу при створенні складних просторових рельєфів.

Створення 2D елементів:

- імпорт 2D векторів або растрових зображень, створених в будь-якому графічному редакторі, підтримуються формати DXF, DWG, EPS, AI, BMP, TIF, JPEG, GIF;

- різноманітні інструменти векторного редактора дозволять швидко створити проект будь-якої складності;

– створення і позиціонування тексту уздовж будь-якої кривої. Дозволяє легко редагувати положення тексту, керувати відстанню між літерами, словами і пропозиціями.

Створення 3D елементів:

– розвинені інструменти моделювання дозволяють створювати 3D моделі, використовуючи растр або вектори, створювати складні профілі витяжки, гладку стиковку і похилі площини;

– інструменти "Інтерактивного скульптора" дозволяють "вручну" редагувати моделі в ArtCAM. Згладжування, видалення і додавання матеріалу, розмиття дозволяють отримати ефект ручної роботи;

– майстер роботи з текстурями дозволяє декорувати модель, використовуючи стандартні текстури з бібліотеки ArtCAM, або створюючи власні з довільних растрових зображень або фотографій.

Стратегії механообробки:

– швидкі та ефективні 3D-стратегії обробки, включаючи чорнову вибірку і фінішну обробку;

– майстер компоновки векторів дозволить скоротити витрату матеріалу при розкрої. Ефективна компоновка безлічі векторів і/або тексту в заданій області, описаної вектором, або на аркуші з заданими розмірами;

– 3D гравірувальні стратегії з автоматичною підчисткою кутів і гравірування по середній лінії.

ArtCam – це дуже гнучкий та універсальний інструмент, що дозволяє у самій програмі створювати та автоматично проектувати траєкторії руху обробляючого інструменту. Існує можливість задавати необхідний інструмент, розробляти траєкторії для чорнової, чистової, фінішної обробки [40].

Модель плати у середовищі ArtCam виглядає таким чином (рис. 3.11):

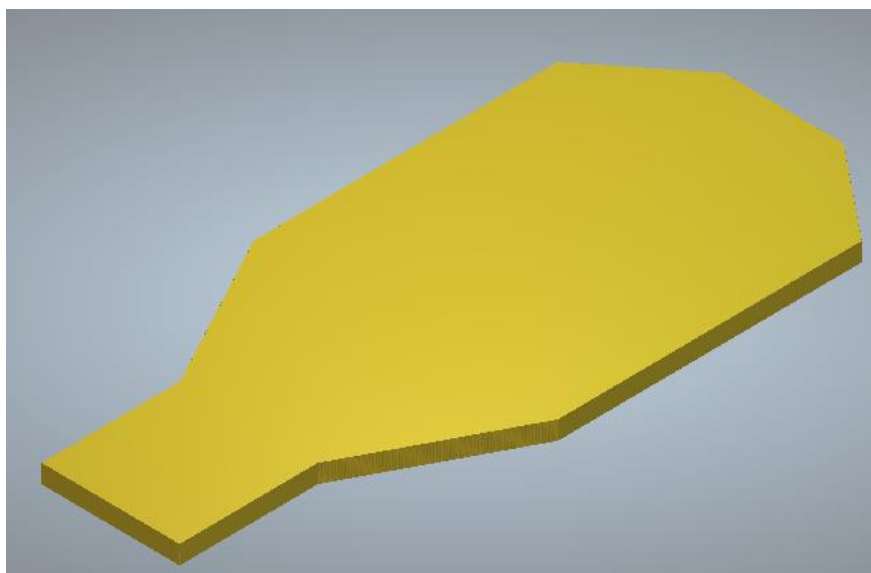


Рисунок 3.11 – Модель макету плати у середовищі ArtCam

ArtCam дозволяє згенерований шлях інструменту (траєкторію) зберегти, як файл, адаптований до безлічі програм, які керують верстатами. У нашому випадку використовується Mach3 від компанії ArtSoft.

Для нашої деталі (макет плати) траєкторія руху інструменту виглядає як зображено на рисунку 3.12.

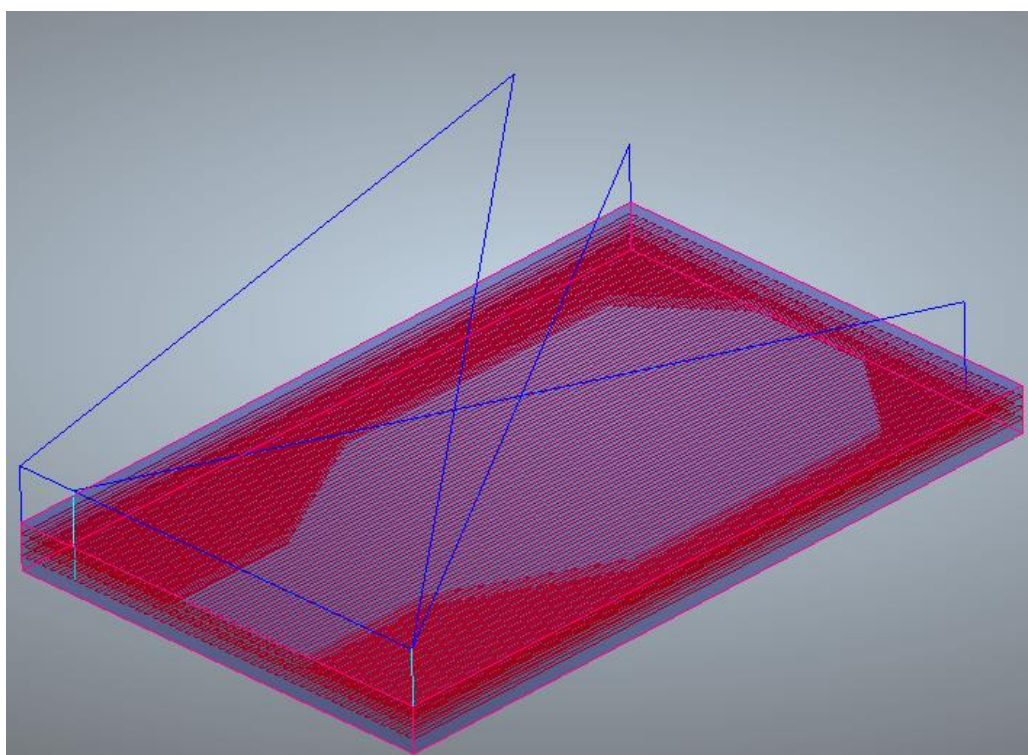


Рисунок 3.12 – Траєкторія руху обробляючого інструменту

Mach3 – програмне забезпечення для управління станком з ЧПУ. Здійснює управління фрезерними, гравірувальними, токарними та іншими станками з ЧПУ.

Функції і характеристики Mach3:

- переконвертація стандартного ПК в повнофункціональну станцію управління 6-осьовим верстатом з ЧПУ;
- імпорт DXF, BMP, JPG, і HPGL файлів за допомогою вмонтованої програми LazyCam;
- графічна візуалізація G-кодів;
- генерування G-кодів в програмі LazyCam або в Wizard;
- створення користувацьких M-кодів та макросів на основі VB-скриптів;
- управління частотою обертання шпинделя;
- багаторівневе релейне регулювання;
- застосування ручних генераторів імпульсів (MPG);
- відеоспостереження за ходом обробки;
- сумісність сенсорного дисплею;
- повноекранний користувацький інтерфейс.

Mach3 успішно застосовується для управління з наступними типами устаткування:

- токарні станки;
- фрезерні станки;
- швидкохідні деревообробні фрезерні станки;
- лазерні станки;
- плазморізи;
- гравірувальне обладнання [41].

Завантаживши наш код у Mach3, ми отримуємо такий вигляд програми як на рисунку 3.13. У лівому кутку відображається код КП.

У процесі виконання програми змінюються рядки коду, і виділяється той рядок, відпрацювання якого відбувається у цей момент часу.

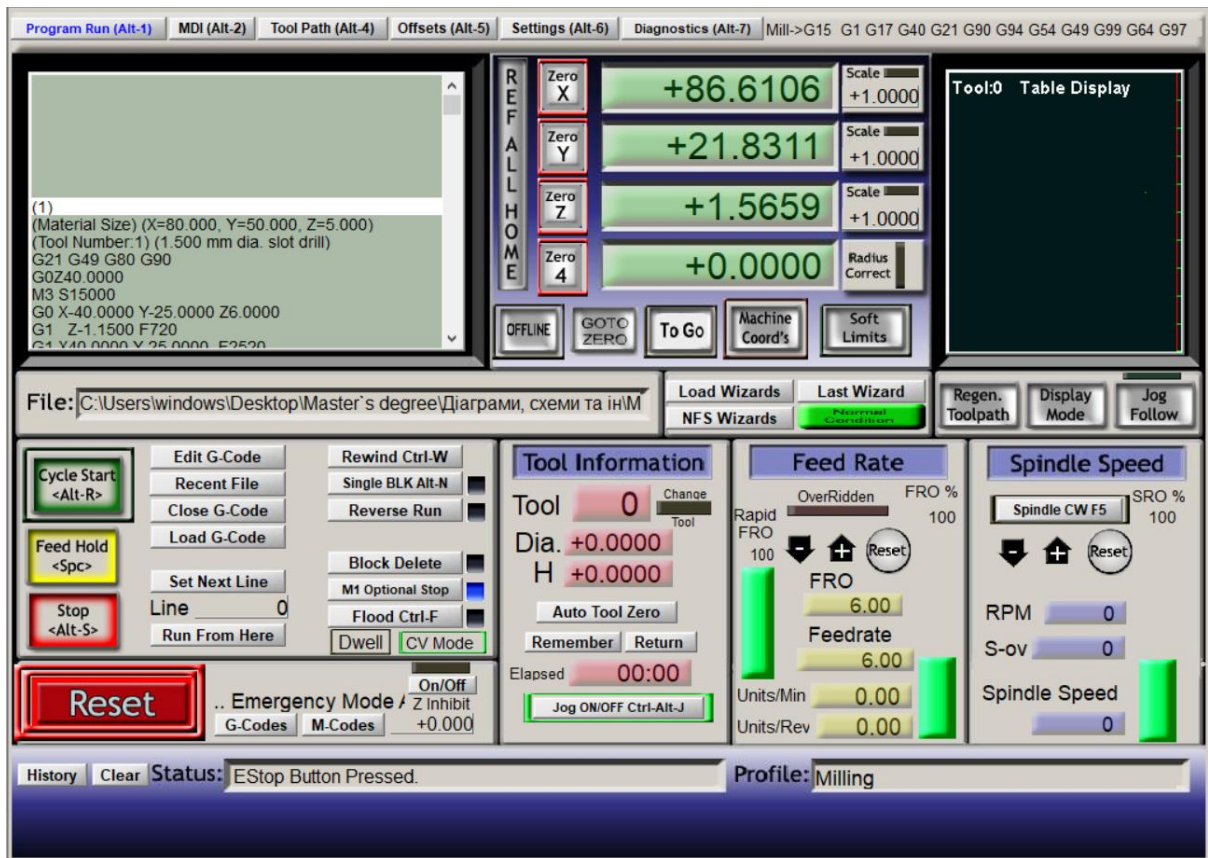


Рисунок 3.13 – Головне робоче вікно програми Mach3

Далі відбувається виконання програми та обробка деталі. Готова деталь зображена на рисунку 3.14.

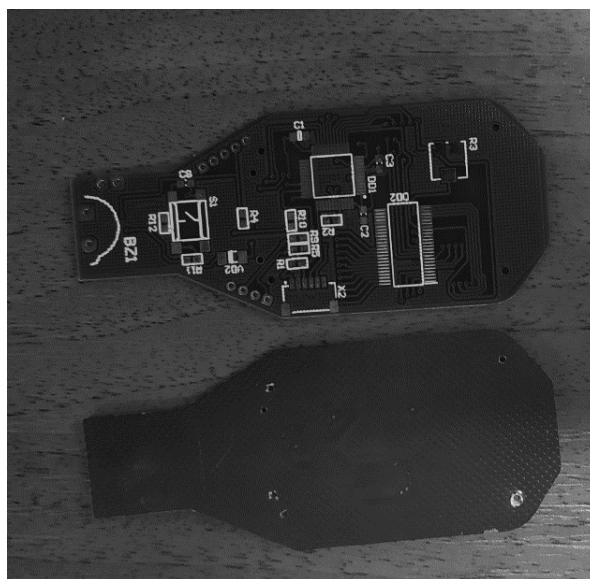


Рисунок 3.14 – Готовий макет плати (знизу на рисунку)

Далі виконаємо 3D-модель кришки. Зображено на рисунку 3.15. Розміри деталі зображено на рисунку 3.16.

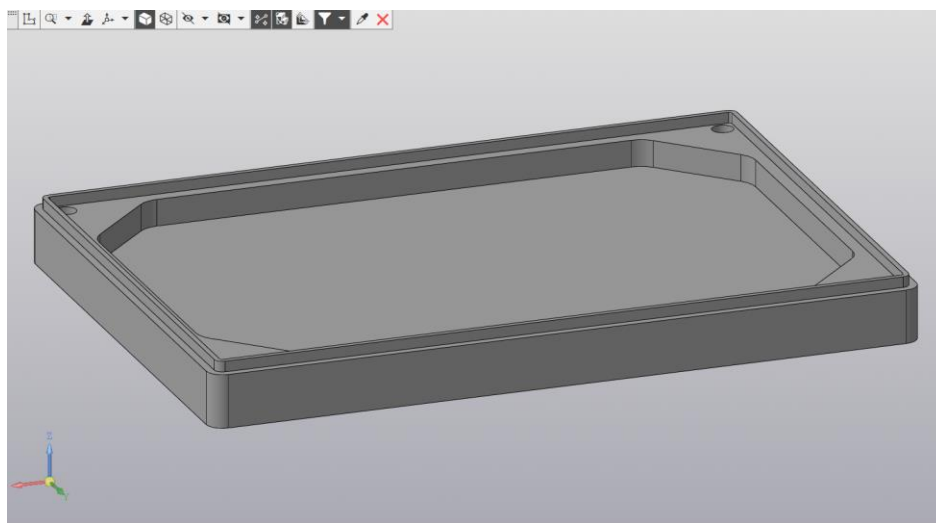


Рисунок 3.15 – 3D-модель кришки

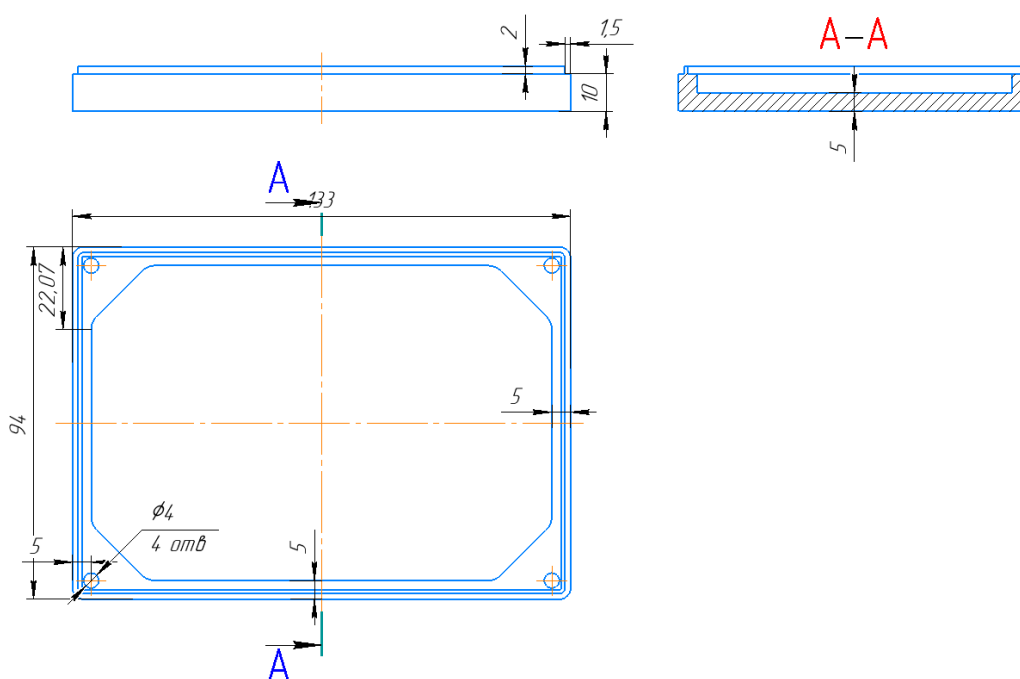


Рисунок 3.16 – Ескіз кришки із розмірами

Завантажимо модель цієї деталі у ArtCam. Завантажена деталь зображена на рисунку 3.17. А пророблена траєкторія руху обробляючого інструменту зображена на рисунку 3.18.

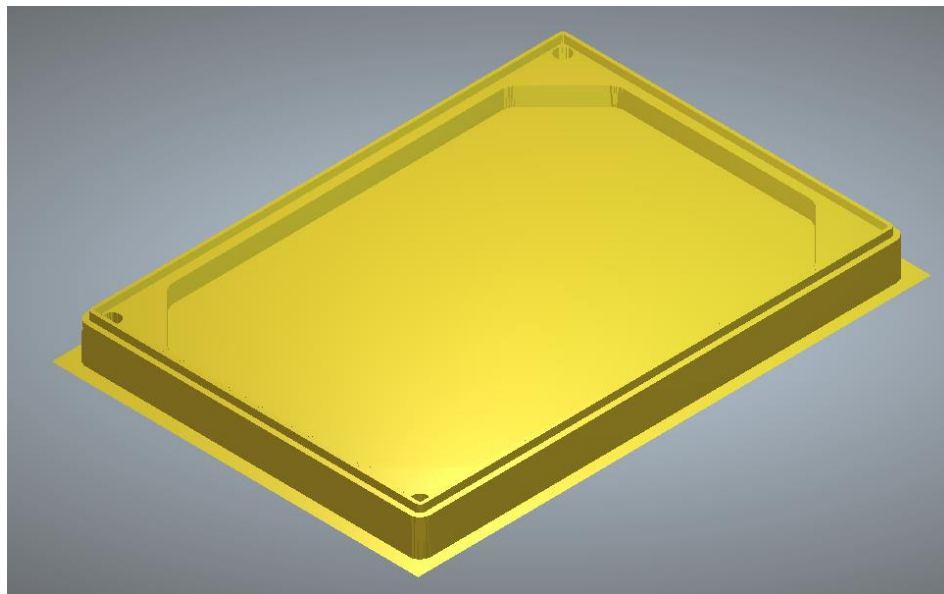


Рисунок 3.17 – Модель кришки у ArtCam

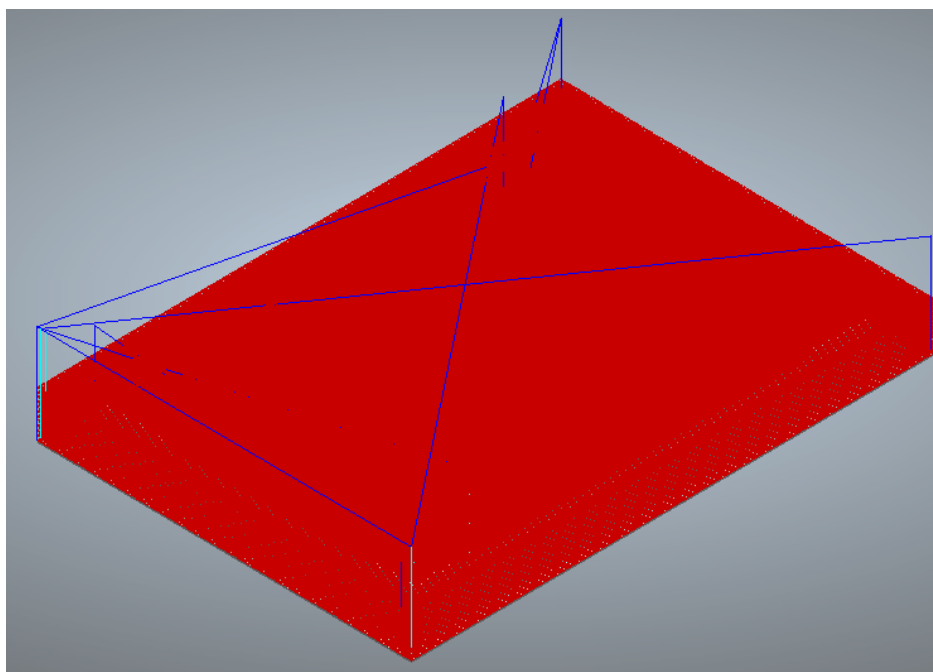


Рисунок 3.18 – Траєкторія інструменту

По алгоритму згенерована траєкторія завантажується у Mach3 і проводиться виконання програми.

Готова деталь зображена на рисунку 3.19.



Рисунок 3.19 – Готова кришка

3.3 Розрахунок занулення для фрезерного верстату з ЧПУ

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини в процесі трудової діяльності. Таке визначення встановлено чинним Законом України «Про охорону праці».

Загальними законами України, що визначають основні положення з охорони праці є Конституція України, Закон України «Про охорону праці (зі змінами, внесені Законом України від 19.12.2017 №2249-VIII), Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування, Кодекс законів про працю України, Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення, Кодекс цивільного захисту України.

Спеціальними законодавчими актами є міжгалузеві та галузеві акти про охорону праці, а саме Державні стандарти, Системи стандартів безпеки праці,

Будівельні норми та правила, Санітарні норми, Правила будови електроустановок та інші. Конкретні вимоги охорони праці містяться в загальних і галузевих (міжгалузевих) правилах з охорони праці. Загальні й галузеві правила з охорони праці містять норми і вимоги, обов'язкові для адміністрації підприємств, установ, організацій [42].

Основні нормативні документи з охорони праці у автоматизованому виробництві:

– «Система управління охороною праці» (СУОП) - положення про систему управління охороною праці підприємства повинно бути розроблено у відповідності до «Рекомендації щодо побудови, впровадження та удосконалення системи управління охороною праці» затвердженої наказом Держгірпромнагляду від 07.02.2008 №35;

– «Типове положення про службу охорони праці», затверджене наказом Державного комітету України з нагляду за охороною праці від 15.11.2004 № 255 і зареєстроване у Міністерстві юстиції України 01.12.2004 за № 1526/10125зі змінами;

– «Порядок проведення розслідування та ведення обліку нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на виробництві», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 30 листопада 2011 року № 1232 зі змінами;

– «Положення про розробку інструкцій з охорони праці», затверджене наказом Комітету по нагляду за охороною праці від 29.01.1998 № 9 і зареєстроване у Міністерстві юстиції України 07.04.1998 за № 226/2666 зі змінами;

– «Міністерстві юстиції України» 07.02.1994 за № 20/229 зі змінами;

– НПАОП 29.2-1.01-58 - загальні правила техніки безпеки та виробничої санітарії для підприємств і організацій машинобудування;

– «Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин», затверджені наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 21.12.1993 № 132 і зареєстровані у Міністерстві юстиції України 19.04.2010 за № 293/17588;

– типові інструкції з охорони праці;

– НПАОП 0.00-7.15-18 - вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями.

Головними причинами, що формують небезпечні, критичні і аварійні ситуації при експлуатації автоматизованого обладнання являються:

- непередбачені рухи виконавчих пристроїв промислових роботів при наладці, ремонті, підчас навчання і виконання програми, що управляє;
- раптова відмова в роботі промислового робота або технологічного устаткування, спільно з яким він працює;
- помилкові (неумисні) дії оператора або налагоджувальника під час наладки і ремонту при роботі в автоматичному режимі;
- доступ людини в робочий простір робота, що функціонує в режимі виконання програми;
- порушення умов експлуатації промислового робота або роботизованого технологічного комплексу;
- порушення вимог ергономіки і безпеки праці при плануванні комплексу і ділянки.

Встановлено, що найбільш травмонебезпечною ситуацією є прямий контакт людини з машиною, коли людина виконує такі операції, як перепрограмування, наладку, ремонт, встановлення, зняття інструменту, монтаж, змащення або чищення, виявлення причин і усунення пошкоджень. Основним принципом забезпечення безпеки автоматичних і автоматизованих виробничих процесів або виробництв є виключення або зведення до мінімуму ймовірності (соціально-допустимого ризику) виникнення небезпечних ситуацій, які формують нещасні випадки та інші небажані явища [43] – [45].

Для безпеки при роботі на автоматичних, автоматизованих і механізованих лініях слід дотримуватись таких вимог:

- до основних елементів конструкції;
- до захисних огорож;
- до головного приводу лінії, до гідроприводу, пневмоприводу і систем змащення;

- до завантажувальних пристроїв;
- до органів управління;
- до рівня шуму і вібрації;
- до устрою майданчиків і сходів;
- до електроустаткування.

Розглянемо систему заходів щодо забезпечення електробезпеки. Основними причинами електротравматизму є:

- недостатня навченість, несвоєчасна перевірка знань персоналу, який обслуговує електроустановки;
- порушення правил улаштування, технічної експлуатації та техніки безпеки електроустановок;
- неправильна організація праці;
- неправильне розташування пускової апаратури та розподільних пристроїв, захаращеність підходів до них;
- порушення правил виконання робіт в охоронних зонах ЛЕП, електричних кабелів і ліній зв'язку;
- несправність ізоляції, через що металеві неструмоведучі частини обладнання виявляються під напругою;
- обрив заземлюючого провідника;
- використання електрозахисних пристроїв, що не відповідають умовам виконання робіт;
- виконання електромонтажних та ремонтних робіт під напругою;
- застосування проводів і кабелів, які не відповідають умовам виробництва і величиною напруги;
- низька якість з'єднань та ремонту;
- недооцінка небезпеки струму і «крокової напруги», що виникає, коли ноги людини знаходяться на ділянках з різними електричними потенціалами;
- ремонт обірваного нульового провідника повітряної лінії при мережі, що не вимкнена;

- живлення декількох споживачів від загального пускового пристрою з захистом запобіжниками, розрахованими на вимикання найбільш потужного з них, або від однієї групи розподільної шафи;

- недооцінка необхідності виключення електроустановки (зняття напруги) в неробочі періоди;

- виконання робіт без індивідуальних засобів електрозахисту або використання захисних засобів, які не пройшли чергове випробування;

- невиконання періодичних випробувань, зокрема перевірок опору ізоляції (електромереж, обмоток електродвигунів, котушок комутаційної апаратури, реле) і опорів заземлюючих пристроїв;

- користування електроустановками, опір ізоляції яких не перевищує нормативних значень;

- використання електроустановок кустарного виготовлення, виготовлених з порушенням вимог правил електробезпеки;

- некваліфікований інструктаж робітників, які використовують ручні електричні машини;

- відсутність контролю за діями працівників з боку ІТП або виконавців робіт;

- відсутність маркування, запобіжних плакатів, блокування, тимчасових огорож місць електротехнічних робіт.

Ці причини можна згрупувати за такими чинниками:

- дотик до струмоведучих частин під напругою внаслідок недотримання правил безпеки, дефектів конструкції та монтажу електрообладнання;

- дотик до неструмоведучих частин, які випадково опинилися під напругою (пошкодження ізоляції, замикання проводів);

- помилкова подача напруги в установку, де працюють люди;

- відсутність надійних захисних засобів [46].

Ознаками підвищеної небезпеки є: наявність струмопровідних підлог, наявність струмопровідного пилю, вологі приміщення (вологість понад 70 %), жаркі приміщення (температура більш 35 °С), можливість одночасного дотику людини до частин електроустановки і елементам, які мають контакт із землею.

Технічні засоби безпечної експлуатації електроустаткування при нормальних режимах роботи:

- електрична ізоляція;
- блокування;
- малі напруги;
- вирівнювання потенціалів;
- захисне розділення мереж.

Виконаємо розрахунок занулення для фрезерного верстату з ЧПУ.

Дано: потужність двигуна $N = 2,2$ кВт, $\cos \varphi = 0,86$. Напруга $U_{\Phi} = 220$ В. Живильні дроти виконані з міді, перетин провідників 14 мм², довжина $1,5$ м, опір трансформатора $Z_T = 0,93$ Ом. Як елементи захисту застосовані плавкі запобіжники.

Визначаємо номінальний струм електродвигуна:

$$I_{\text{ном}} = \frac{N \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi}, \quad (3.1)$$

Тоді:

$$I_{\text{ном}} = \frac{2,2 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,86} = 6,71.$$

Визначаємо пусковий струм електродвигуна:

$$I_{\text{ел.дв.}}^{\text{пуск}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}} \cdot I_{\text{ном}}. \quad (3.2)$$

Тоді:

$$I_{\text{ел.дв.}}^{\text{пуск}} = 6 \cdot 6,71 = 40,3 \text{ А.}$$

Вибираємо запобіжники типу НПН2-60-40А-У3, умовний струм плавлення:

$$I_{\text{ум}}^{\text{пл}} = 43,75 \text{ А.}$$

Визначаємо очікуване значення струму короткого замикання:

$$I_{\text{кз}}^{\text{оч}} \geq K \cdot I_{\text{ум}}^{\text{пл}}, \quad (3.3)$$

де K – коефіцієнт кратності струму; для запобіжників із плавкими вставками $K = 3$.

$$I_{\text{кз}}^{\text{оч}} \geq K \cdot I_{\text{ум}}^{\text{пл}} = 3 \cdot 43,75 = 131,25 \text{ А.}$$

Визначимо повний опір живильної лінії до точки короткого замикання:

$$Z_{\text{л}} = \sqrt{(R_{\text{л}}^2 + X_{\text{л}}^2)}, \quad (3.4)$$

де $R_{\text{л}}$ – активний опір лінії, Ом;

$X_{\text{л}}$ – реактивний опір лінії, Ом.

Знаходимо активний опір лінії:

$$R_{\text{л}} = \frac{\rho \cdot l}{s}, \quad (3.5)$$

де ρ – питомий опір лінії, $\rho = 0,018 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

l – довжина лінії, $l = 1,5 \text{ м}$;

s – площа перетину лінії, $s = 14 \text{ мм}^2$.

Тоді,

$$R_{\text{л}} = \frac{\rho \cdot l}{s} = \frac{0,018 \cdot 1,5}{14} = 0,002 \text{ Ом.}$$

Визначимо реактивний опір лінії:

$$X_{л} = \frac{0,6 \cdot l}{1000}. \quad (3.6)$$

Тоді:

$$X_{л} = \frac{0,6 \cdot 1,50}{1000} = 0,0009 \text{ Ом.}$$

Підставимо отримані значення у формулу (3.4):

$$Z_{л} = \sqrt{(0,002^2 + 0,0009^2)} = 0,002 \text{ Ом.}$$

Визначимо струм короткого замикання за формулою:

$$I_{кз} = \frac{U_{\phi}}{(Z_{тр} + Z_{жл})}, \quad (3.7)$$

де U_{ϕ} — фазове напруження мережі, 220 В;

$Z_{т}$ — опір живильного трансформатора, 0,93 Ом;

$Z_{жл}$ — повний опір живильної лінії, 0,002 Ом.

Тоді:

$$I_{кз} = \frac{220}{(0,93 + 0,002)} = 236 \text{ А.}$$

Перевіряємо умову надійності робіт запобіжника:

$$I_{кз}^{оч} \leq I_{кз}. \quad (3.8)$$

$131,25 < 236$ - умова струмового захисту виконується.

Знаходимо напругу на корпусі:

$$U_{к} = I_{кз} \cdot R_{л}. \quad (3.9)$$

Тоді,

$$U_{к} = 236 \cdot 0,002 = 0,47 \text{ В.}$$

Отримали $U_{к} = 0,47 \text{ В}$, що менше припустимого (при тривалості проходження струму більше 1 с $U_{доп}$ дорівнює 36 В). Умова допустимої напруги виконується .

3.4 Висновки до 3 розділу

У третьому розділі введено у систему управління фрезерним верстатом з ЧПУ ПІД-регулятор, і це впровадження дало можливість знизити час встановлення з $tp = 5,1 \text{ с}$ до $tp = 3,87 \text{ с}$ та понизити значення перерегулювання з $\sigma = 23 \%$ до $\sigma = 11,6 \%$.

Також проведено експериментальні дослідження на фрезерному верстаті з ЧПУ та виконано обробку двох деталей: макету плати та кришки.

У підрозділі з охорони праці розглянуто основні питання з охорони праці у галузі автоматизації та розраховано занулення для фрезерного верстату з ЧПУ.

ВИСНОВКИ

В ході виконання атестаційної роботи розглянуті основні етапи формування та розвитку сучасних систем автоматизації управління верстатів з ЧПУ. Досліджено розвиток сучасних систем автоматизації управління виробництвом, методи створення та структуру керуючих програм. Розглянуто різні типи сучасних систем ЧПУ.

У другому розділі розглянуто основні методи керування верстатом з ЧПУ. Проведено розробку системи керування верстатом та перевірено її на стійкість.

Система, за результатами дослідження виявилась стійкою, але значення часу встановлення ($t_p = 5,1$ с) та перерегулювання ($\sigma = 23$ %) виявились занадто великими і тому зроблено припущення, що введення в систему управління ПІД-регулятора призведе до зниження значення часу встановлення та перерегулювання.

У третьому розділі проведена покращення системи управління верстатом з ЧПУ та проведено розробку системи з ПІД-регулятором.

Отримані значення часу встановлення $t_p = 3,87$ с та перерегулювання $\sigma = 11,6$ % дають можливість підтвердити припущення що введення в систему управління ПІД-регулятора дало можливість підвищити ці показники. Час встановлення знизився на 1,23 с, а перерегулювання знизилося на 11,4 %.

Далі, виконано експериментальні дослідження, а саме: розробку керуючої програми та виконання фрезерної обробки на верстаті з ЧПУ.

Розглянуто питання охорони праці в галузі автоматизації та проведено розрахунок занулення для верстату з ЧПУ.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Vladyslav Yevsieiev, Artem Bronnikov Analysis of the cyber-physical production systems implementation impact to achieve the goals of lean production //The II th International scientific and practical conference «Development of scientific and practical approaches in the era of globalization» (September 28-30, 2020). Boston, USA 2020. p.241. pp. 221-226. ISBN - 978-1-64945-867-4. (DOI: 10.46299/ISG.2020.II.II) (Google Scholar, Crossref)
2. Методичні вказівки з «Розробки й оформлення магістерської атестаційної роботи» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітні програми: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І.Ш. Невлюдов, В.В. Косенко, В.В. Євсєєв. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 55 с.
3. ДСТУ 3008-15. Документація. звіти у сфері науки і техніки. структура і правила оформлення, [Текст] – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29с.
4. What is Industry 4.0—the Industrial Internet of Things (IIoT)? [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www/ URL: https://www.epicor.com/en/resource-center/articles/what-is-industry-4-0/#2](http://www.epicor.com/en/resource-center/articles/what-is-industry-4-0/#2). – 01, 2018р – Заголовок з екрану.
5. Гурьянов А.В. Организация цифровых производств Индустрии 4. 0 на основе киберфизических систем и онтологий [Текст]/ А.В Гурьянов, Д.А. Заколдаев, А.В. Шукалов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – №2 – с. 268-277.
6. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution / K. Schwab // NY: Crown Business. – 2017 – 192 p.

7. Lee E.A. The past, present and future of cyber-physical systems: a focus on models / E.A Lee // *Sensors*. – 2015. – V.15. – N.3. – P. 4837–4869. (DOI: 10.3390/s150304837)
8. Meissner H. Analysis of control architectures in the context of Industry 4.0 / H. Meissner, R. Ilsen., J.C. Aurich // *Procedia CIRP*. – 2017. – V. 62. – P. 165–169. (DOI: 10.1016/j.procir.2016.06.113)
9. Balasubramaniyan S. Design and verification of cyberphysical systems using TrueTime, evolutionary optimization and UPPAAL / S. Balasubramaniyan , S. Srinivasan, F. Buonopane, B. Subathra // *Microprocessors and Microsystems*. – 2016. – V. 42. – P. 37–48. (DOI: 10.1016/j.micpro.2015.12.006)
10. Fang Zh. Performance and reliability improvement of cyber-physical systems subject to degraded communication networks through robust optimization / Zh. Fang, H. Mo, Y. Wang, M. Xie // *Computers and Industrial Engineering*. – 2017. – V. 144. – P. 166–174. (DOI: 10.1016/j.cie.2017.09.047)
11. Hwang G. Developing performance measurement system for Internet of Things and smart factory environment / G. Hwang, J. Lee, J. Park, T.-W. Chang // *International Journal of Production Research*. – 2017. – V. 55. – N 9. – P. 2590–2602. (DOI: 10.1080/00207543.2016.1245883)
12. Lee K.H. System of systems approach to formal modeling of CPS for simulation-based analysis / K.H. Lee, J.H. Hong, T.G. Kim // *ETRI Journal*. – 2015. – V. 37. – N 1. – P. 175–185. (DOI: 10.4218/etrij.15.0114.0863)
13. Ning H. Cybermatics: cyber-physical-social-thinking hyperspace based science and technology / H. Ning, H. Liu, J. Ma, L.T. Yang // *Future Generation Computer Systems*. – 2016. – V. 56. – P. 504–522. (DOI: 10.1016/j.future.2015.07.012)
14. Qu T. System dynamics analysis for an Internet-of-Things-enabled production logistics system / T. Qu, M. Thurer, J. Wang, Z. Wang // *International Journal of Production Research*. – 2017. – V. 55. – N 9. – P. 2622–2649. (DOI: 10.1080/00207543.2016.1173738)
15. Vogel-Heuser B. Fault handling in PLC-based Industry 4.0 automated production systems as a basis for restart and self-configuration and its evaluation / B.

Vogel-Heuser, S. Rosch, J. Fischer, Th. Simon // Journal of Software Engineering and Applications. – 2016. – V. 9. – N 1. – P. 1–43. (DOI: 10.4236/jsea.2016.91001)

16. Wang L. Combined strength of holons, agents and function blocks in cyber-physical systems / L. Wang, A. Haghghi // Journal of Manufacturing Systems. – 2016. – V. 40. – P. 25–34. (DOI: 10.1016/j.jmsy.2016.05.002)

17. Индустрия 4.0: AgTech и высокие технологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/ URL: https://livrezonpublisher.com/publication/industriya-40-glava-knigi-blef-tehnologii](http://www.livrezonpublisher.com/publication/industriya-40-glava-knigi-blef-tehnologii). – 09, 2019р. – Заголовок з екрану.

18. Industrial revolution – from industry 1.0 to industry 4.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.semanticscholar.org/paper/INDUSTRIAL-REVOLUTION-%E2%80%93-FROM-INDUSTRY-1.0-TO-4.0-Kharb/6679f323ecf979808a7ceae642f2ef5ece76bce4?p2df> – 05.2018 – Заголовок з екрану.

19. Lee J. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems / J. Lee, B. Bagheri, H.-A.Kao // Manufacturing Letters. – V. 3. – 2015. – P. 18-23. (DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001)

20. 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. (DOI: 10.1016/j.mfglet.2013.09.005)

21. Foundations for Innovation in Cyber-Physical Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nist.gov/system/files/documents/el/CPS-WorkshopReport-1-30-13-Final.pdf>. – 01.2013 – Заголовок з екрану.

22. 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. (DOI: 10.3182/20130522-3-BR-4036.00107)

23. Improving Machine Tool Interoperability Using Standardized Interface Protocols: MT Connect [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://escholarship.org/uc/item/4zs976kx>. – 07.2008 – Заголовок з екрану.

24. Популярно о системах ЧПУ для станков [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: https://kospas.ru/sistemy-snc](http://www.kospas.ru/sistemy-snc). 02, 2014р. – Заголовок з екрану.

25. ПИД-регулятор на примере «электрогитары» для станка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ap-impulse.ru/pid-regulyator-na-primere-elektrogitary-dlya-stanka-shag-64/> – 10, 2016р. – Заголовок з екрану.

26. Системы ЧПУ SINUMERIK 810D/840D: аппаратные и технологические возможности [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: https://sapr.ru/article/7552](http://www.sapr.ru/article/7552) – 7, 2000р. – Заголовок з екрану/

27. Siemens Sinumerik 840D. Система ЧПУ. Руководство, Характеристики, Описание, Инструкция [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: http://stanoks.net/index.php?option=com_content&view=article&id=959:siemens-sinumerik-840d-&catid=101:catalogcnc&Itemid=188](http://stanoks.net/index.php?option=com_content&view=article&id=959:siemens-sinumerik-840d-&catid=101:catalogcnc&Itemid=188) – 12, 2002 – Заголовок з екрану.

28. Продукция Heidenhain и ее предназначение [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: https://vseochpu.ru/chpu-heidenhain-opisanie/](https://vseochpu.ru/chpu-heidenhain-opisanie/) – 10, 2012 – Заголовок з екрану.

29. Система ЧПУ FANUC предназначение [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: https://cam-program.ru/cnc/cnc-fanuc/](https://cam-program.ru/cnc/cnc-fanuc/). – 07, 2018 – Заголовок з екрану.

30. CNC systems [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: https://www.fagorautomation.com/en/p/cnc/](https://www.fagorautomation.com/en/p/cnc/) – 04, 2013 – Заголовок з екрану.

31. Системы ЧПУ (CNC) [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: https://www.delta-electronics.info/CNC](https://www.delta-electronics.info/CNC) – 08, 2009 – Заголовок з екрану.

32. OKUMA — станки с интеллектом [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: https://www.informdom.com/metalloobrabotka/2012/3/okuma-stanki-s-intellektom.html](https://www.informdom.com/metalloobrabotka/2012/3/okuma-stanki-s-intellektom.html). – 06, 2003 – Заголовок з екрану.

33. 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-Фризиук Є.А.; ХНУРЕ, Кафедра Комп'ютерно-інтегровані технології, автоматизації та мехатроніка. – Харків, 2019. – 77 с.: CD.

34. Капля В. И. Алгоритм вычисления минимального времени одного такта работы шагового двигателя [Текст]/ В. И. Капля, А. Г. Пан, Т. В. Дягилева // ВолгГТУ Инженерный Вестник Дона.– 2015. – №2. – 77 – 84 с.

35. Трапецеидальный вал винт THSL-300-8D с гайкой для 3D-принтера [Электронный ресурс] / Режим доступа: www/ URL: <https://prom.ua/p1263645318-trapetseidalnyj-val-vint.html> – 03, 2017 – Заголовок з екрану.

36. 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.

37. Передаточные функции двигателя постоянного тока [Электронный ресурс] / Режим доступа: www/ URL: <https://studfile.net/preview/715035/page:7/> – 02.2014 – Заголовок з екрану.

38. Расчет коэффициентов передачи и постоянных времени силовых элементов электропривода [Электронный ресурс] / Режим доступа: www/ URL: <https://studfile.net/preview/5301313/page:3/> – 02.2016 – Заголовок з екрану.

39. Pedro Albertos. FeedbackandControlforEveryone / Pedro Albertos, Iven Mareels // Springer-Verlag BerlinHeidelberg. – 2010. – 318 p.

40. Краткое описание возможностей компьютерной системы для пространственного моделирования/механообработки Delcam ArtCAM Pro [Электронный ресурс] / Режим доступа: www/ URL: <http://artcam.ucoz.ru/> – 12, 2007 – Заголовок з екрану.

41. Функции и характеристики Mach3 [Электронный ресурс] / Режим доступа: www/ URL <https://ntma.com.ua/ru/mach3.html> – 11, 2010 – Заголовок з екрану.

42. Бадищук В.І. Охорона праці в галузі. Конспект лекцій [Текст] / В.І. Бадищук, І.В. Чихіра. – Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя. – Тернопіль. – 2016. – 103 с.

43. Безопасность производственных процессов: Справочник [Текст] / Под ред. С.В. Белова. - М.: Машиностроение. – 1985. - 448 с.

44. Козьяков А.Ф. Охрана труда в машиностроении [Текст] / А.Ф. Козьяков, Л.Л. Морозова. – М.: Машиностроение. – 1990. – 256 с.

45. Справочная книга по охране труда в машиностроении [Текст] / Под ред. О.Н. Русака. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. – 1989. – 541 с.

46. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці [Текст] / В.Ц. Жидецький, В.С. Джигерей, О.В. Мельников. – Львів: Афіша. – 2000. – 350 с.