

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра комп'ютеризованих систем управління

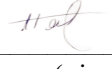
«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри
 Олександр ЧЕРНО

«12» червня 2026 р.

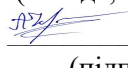
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

на тему: Система керування електроприводами подач фрезерного
верстата

Виконав: студент 4347ст3 групи
 Павло ПШЕНИЧНИЙ
(підпис)

Керівник роботи:

зав. каф. КСУ, д.т.н., професор
(посада, науковий ступінь, вчене звання)
 Олександр ЧЕРНО
(підпис)

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
 Кафедра комп'ютеризованих систем управління
 Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
 Спеціальність 174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
 ОПП «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри КСУ
 Олександр ЧЕРНО
 «29» квітня 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студенту Пшеничному Павлу Олександровичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Система керування електроприводами подач фрезерного верстата
 Керівник роботи Черно Олександр Олександрович, д.т.н., професор
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом вищого навчального закладу № 286-уч від «22» квітня 2026 року

2. Термін подання роботи: 12.06.2026 р.
3. Вихідні дані по роботі: Параметри електроприводів подач фрезерного верстату та вимоги якості керування: електродвигуни ВМН1401Р21F1А; максимальна швидкість 0,05 м/с; максимальне прискорення 1 м/с²; максимально-припустима помилка керування 0,05 мм; максимальне перерегулювання не більше 5%.
4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів)
Проектування системи автоматичного керування електроприводами подач фрезерного верстата
5. Перелік презентаційних матеріалів (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Аналіз структури та режимів роботи фрезерного верстата і постановка задачі проектування.
Побудова динамічної моделі системи керування електроприводами подач фрезерного верстата.
Синтез і аналіз системи автоматичного керування електроприводами подач фрезерного верстата.
Охорона праці.
6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Черно О.О., зав. каф. КСУ	09.02.2026	05.06.2026

7. Дата видачі завдання: «09» лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів проектування	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Основні технічні характеристики, принципи побудування й компоновки робота-маніпулятора і постановка задач проектування.	27.02.2026	Виконано
2.	Розрахунок і вибір електрообладнання, розробка функціональної та принципової електричної схеми системи керування роботом.	27.03.2026	Виконано
3.	Моделювання динаміки системи керування електроприводами робота МП-11 та визначення параметрів цифрових регуляторів.	29.05.2026	Виконано
4.	Охорона праці.	05.06.2026	Виконано

Студент

Керівник роботи

Пшеничний П.О.
 (підпис) (прізвище та ініціали)
Черно О.О.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У роботі виконано розробку комп'ютеризованої системи керування електроприводами подач фрезерного верстата. У межах роботи проведено аналіз об'єкта керування, розроблено функціональну та структурну схеми системи, а також визначено параметри її основних елементів.

На основі математичного опису електропривода побудовано динамічну модель системи керування та здійснено синтез коригуючих пристроїв. Виконано розрахунок перехідних процесів, досліджено показники якості функціонування системи та проведено оцінювання її стійкості. Отримані результати підтвердили відповідність розробленої системи заданим технічним вимогам щодо точності та динамічних характеристик.

Окремий розділ роботи присвячено питанням охорони праці під час експлуатації вертикально-фрезерного верстата. Розглянуто основні виробничі небезпеки та заходи, спрямовані на забезпечення безпечних умов праці.

Ключові слова: фрезерний верстат, коригуючі пристрої, електродвигун, електропривод автоматичне керування, динамічна модель, моделювання.

SUMMARY

The thesis deals with the development of a computerized control system for the feed drives of a milling machine. The work includes an analysis of the control object, the development of the functional and structural diagrams of the system, and the determination of the parameters of its main components.

Based on the mathematical description of the electric drive, a dynamic model of the control system was developed and the synthesis of compensating devices was carried out. The transient responses were calculated, the quality indicators of the system operation were investigated, and its stability was evaluated. The obtained results confirmed that the developed system satisfies the specified technical requirements in terms of accuracy and dynamic characteristics.

A separate section of the thesis is devoted to occupational safety issues during the operation of a vertical milling machine. The main industrial hazards and measures aimed at ensuring safe working conditions are considered.

Keywords: milling machine, compensating devices, electric motor, electric drive, automatic control, dynamic model, simulation.

ЗМІСТ

<u>ВСТУП</u>	7
<u>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА ЯК ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ПРОЄКТУВАННЯ</u>	9
<u>1.1. Призначення та область застосування фрезерних верстатів</u>	9
<u>1.2 Класифікація фрезерних верстатів</u>	11
<u>РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПОДАЧ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА</u>	25
<u>2.1. Розробка функціональної схеми системи автоматичного керування електроприводами подач фрезерного верстата</u>	25
<u>2.2. Розробка динамічної структурної схеми системи керування електроприводами подачі верстата</u>	27
<u>2.3. Визначення динамічних параметрів системи керування електроприводами подачі верстата</u>	29
<u>Висновки за розділом</u>	32
<u>РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПОДАЧ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА</u>	34
<u>3.1. Визначення бажаної передавальної функції системи автоматичного керування</u>	34
<u>3.2. Розрахунок передавальних функцій коригуючих пристроїв</u>	40
<u>3.3. Визначення дискретних передавальних функцій коригуючих пристроїв</u>	44
<u>Висновки за розділом</u>	48

<u>РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ</u>	50
<u>4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при налагодженні та обслуговуванні електроприводів фрезерного верстата ...</u>	50
<u>4.2. Розробка заходів з підвищення безпечності робіт під час експлуатації та налагодження автоматизованої системи керування електроприводами подач фрезерного верстата.....</u>	55
<u>ВИСНОВКИ</u>	60
<u>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</u>	61

ВСТУП

У сучасному машинобудівному виробництві важливе значення має підвищення точності, продуктивності та надійності технологічного обладнання. Досягнення цих показників значною мірою залежить від рівня автоматизації виробничих процесів та ефективності систем керування електроприводами, які забезпечують роботу металорізальних верстатів [1]. Серед різноманітного металообробного обладнання особливе місце займають фрезерні верстати, що використовуються для виготовлення деталей складної геометричної форми та обробки поверхонь із високими вимогами до точності. Якість виконання технологічних операцій значною мірою визначається характеристиками системи подачі, яка відповідає за переміщення робочих органів верстата відповідно до заданих параметрів. Стрімкий розвиток цифрових технологій, мікропроцесорної техніки та програмованих систем керування сприяє впровадженню сучасних електроприводів із замкненими контурами регулювання. Використання сервоприводів, датчиків зворотного зв'язку та цифрових регуляторів дозволяє підвищити динамічні характеристики системи, зменшити похибки позиціонування та забезпечити стабільність роботи обладнання в різних режимах експлуатації.

Важливим етапом розроблення та дослідження таких систем є математичне моделювання, яке дає можливість оцінити їхню поведінку без проведення дорогих експериментальних випробувань. Застосування середовища MATLAB Simulink дозволяє виконувати аналіз перехідних процесів, здійснювати синтез регуляторів та досліджувати вплив різних параметрів на якість керування.

Зарахунок цього, дослідження системи керування електроприводами подач фрезерного верстата є актуальним завданням, спрямованим на підвищення

ефективності роботи технологічного обладнання та вдосконалення процесів автоматизованого виробництва.

Мета роботи полягає у в розробці системи автоматичного керування електроприводами подач фрезерного верстата з використанням актуального електродвигуна ВМН1401Р21F1А та інструментів комп'ютерного моделювання, що забезпечує необхідну якість регулювання, точність позиціонування, динамічні показники і запас стійкості системи.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ПРОЄКТУВАННЯ

1.1. Призначення та область застосування фрезерних верстатів

Фрезерні верстати належать до найбільш поширених видів металорізального обладнання, що використовується в машинобудуванні, приладобудуванні, авіаційній, автомобільній та інших галузях промисловості. Їх основним призначенням є обробка поверхонь заготовок за допомогою багатолезового різального інструмента – фрези. Завдяки високій продуктивності, універсальності та можливості виконання широкого спектра технологічних операцій фрезерні верстати займають важливе місце серед сучасного технологічного обладнання [2].

Процес фрезерування полягає у зрізанні шару матеріалу з поверхні заготовки зубцями фрези, яка здійснює обертальний рух. При цьому заготовка або інструмент виконують поступальний рух подачі, що забезпечує формування необхідної геометрії оброблюваної поверхні. Особливістю фрезерування є переривчастий характер різання, оскільки кожний зубець фрези періодично входить у контакт із заготовкою та виходить із нього. Це дозволяє ефективно відводити тепло із зони різання та забезпечувати високу продуктивність процесу.

Важливою особливістю фрезерної обробки є можливість отримання поверхонь різної конфігурації в межах одного технологічного процесу. Це дозволяє скоротити кількість допоміжних операцій та підвищити ефективність виготовлення деталей. У багатьох випадках фрезерування застосовується як основний метод обробки, що забезпечує досягнення необхідних геометричних параметрів виробу.

Якість фрезерної обробки залежить від низки факторів, серед яких конструктивні особливості верстата, характеристики різального інструмента, режими різання та властивості матеріалу заготовки. Рациональне поєднання цих параметрів дає змогу досягти необхідної точності розмірів і знизити шорсткість обробленої поверхні. Це має особливе значення під час виготовлення деталей, що працюють в умовах підвищених навантажень або потребують високої точності взаємного розташування елементів.

Застосування фрезерних верстатів сприяє підвищенню продуктивності виробництва та більш раціональному використанню виробничих ресурсів. Можливість виконання різноманітних операцій на одному робочому місці дозволяє зменшити тривалість технологічного циклу та спростити організацію виробничого процесу. Саме тому фрезерні верстати залишаються одним із найбільш затребуваних видів металорізального обладнання на сучасних промислових підприємствах.

Таким чином, фрезерні верстати широко застосовуються для виготовлення деталей різного призначення та складності. Поєднання універсальності, продуктивності та достатньо високої точності обробки забезпечує їх важливе місце в технологічних процесах машинобудівного виробництва [3].

У сучасному виробництві фрезерні верстати застосовуються для виготовлення деталей різноманітної форми та складності. За їх допомогою виконують обробку площин, уступів, пазів, канавок, фасонних поверхонь, зубчастих коліс, різьбових поверхонь та інших конструктивних елементів. Завдяки використанню спеціального інструмента та систем числового програмного керування стало можливим виготовлення складних просторових поверхонь, що широко застосовуються в авіакосмічній та автомобільній промисловості.

Залежно від конструкції та оснащення фрезерні верстати можуть виконувати різні технологічні операції. До найбільш поширених належать фрезерування горизонтальних, вертикальних та похилих площин, обробка пазів і канавок, виготовлення шпонкових з'єднань, профільне фрезерування, нарізання зубців зубчастих коліс та обробка складних контурів. Універсальність обладнання дозволяє значно скоротити кількість технологічних переходів і підвищити ефективність виробництва.

Важливу роль фрезерні верстати відіграють у машинобудуванні. Більшість деталей машин та механізмів містять поверхні, які виготовляються саме методом фрезерування. До таких деталей належать корпуси редукторів, станини верстатів, важелі, кронштейни, зубчасті колеса, напрямні та інші елементи конструкцій. Висока точність і якість обробки забезпечують надійність роботи готових виробів та їх відповідність технічним вимогам.

У приладобудуванні фрезерні верстати використовуються для виготовлення деталей високої точності, що входять до складу вимірювальних приладів, електронного обладнання та систем автоматизації. При цьому особливе значення мають точність позиціонування робочих органів верстата та стабільність режимів обробки. Саме тому сучасні верстати оснащуються сервоприводами та цифровими системами керування, які забезпечують високу якість виконання технологічних операцій.

1.2 Класифікація фрезерних верстатів

Фрезерні верстати належать до найбільш поширених видів технологічного обладнання, яке використовується на машинобудівних підприємствах. Їх застосовують для обробки заготовок шляхом зрізання шару матеріалу багатолезовим інструментом – фрезою. Завдяки великій

кількості різновидів фрез та широким технологічним можливостям такі верстати дозволяють виконувати різноманітні операції: обробку площин, пазів, уступів, фасонних поверхонь, зубчастих коліс та інших елементів деталей.

Розвиток машинобудування призвів до появи великої кількості конструкцій фрезерних верстатів, які відрізняються між собою за призначенням, будовою та рівнем автоматизації. Для зручності вибору обладнання та його систематизації використовується класифікація за різними ознаками [4,5].

Однією з основних характеристик фрезерного верстата є положення шпинделя. Від його розташування залежить тип інструмента, який використовується під час роботи, а також перелік операцій, що можуть виконуватися на обладнанні.

У горизонтально-фрезерних верстатах вісь шпинделя розміщується паралельно поверхні робочого столу. Така конструкція дозволяє встановлювати циліндричні, дискові та кутові фрези. Основною сферою застосування цих верстатів є обробка горизонтальних площин, пазів і канавок.

Завдяки жорсткій конструкції горизонтально-фрезерні верстати можуть працювати зі значними навантаженнями. Це особливо важливо під час чорнової обробки, коли необхідно знімати великі припуски матеріалу. Крім того, на оправці можна одночасно встановлювати декілька фрез, що дає можливість виконувати кілька операцій за один прохід.

Разом з тим можливості таких верстатів дещо обмежені при обробці складних просторових поверхонь. Саме тому в сучасному виробництві вони часто поступаються більш універсальним моделям.

Вертикально-фрезерні верстати відрізняються тим, що шпиндель розташований перпендикулярно до поверхні столу. Таке конструктивне рішення значно розширює технологічні можливості обладнання.

На верстатах цього типу можуть використовуватися торцеві, кінцеві, фасонні та інші види фрез. Це дозволяє виконувати як просту обробку площин, так і виготовлення деталей складної конфігурації. Оператор має зручний доступ до зони різання, що полегшує налаштування та контроль процесу обробки.

Саме вертикально-фрезерні верстати отримали найбільше поширення на невеликих виробництвах, у ремонтних майстернях та навчальних лабораторіях. Їх популярність пояснюється універсальністю та відносною простотою експлуатації.

Універсальні верстати поєднують переваги горизонтальних і вертикальних моделей. У деяких конструкціях передбачена можливість повороту шпиндельної головки, що дозволяє змінювати положення інструмента залежно від технологічного завдання.

Наявність додаткових пристроїв значно розширює функціональні можливості обладнання. На таких верстатах можна виконувати широкий спектр робіт без використання спеціалізованого устаткування. Саме тому універсальні фрезерні верстати часто використовуються в інструментальному виробництві та експериментальних цехах.

Окрім положення шпинделя, важливою ознакою класифікації є конструкція самого верстата. Вона визначає жорсткість системи, допустимі навантаження та габарити деталей, які можуть оброблятися.

Особливістю консольно-фрезерних верстатів є наявність консолі, яка переміщується по вертикальних напрямних станини. На консолі встановлюється робочий стіл із механізмами подач.

Подібна конструкція довгий час вважалася найбільш поширеною у машинобудуванні. Вона забезпечує достатню універсальність та дозволяє виконувати широкий перелік операцій без складного переналагодження обладнання.

До переваг консольних верстатів належать відносна простота конструкції, зручність обслуговування та порівняно невисока вартість. Проте зі збільшенням маси заготовки жорсткість системи зменшується, що може негативно впливати на точність обробки.

У безконсольних конструкціях стіл встановлюється безпосередньо на напрямних станини. Завдяки цьому навантаження рівномірніше розподіляються по елементах конструкції, а жорсткість системи значно підвищується.

Такі верстати використовують для виготовлення великих і важких деталей, де особливо важливо забезпечити стабільність положення заготовки. Підвищена жорсткість дозволяє працювати з більшими режимами різання та досягати кращої якості поверхні.

Для обробки великогабаритних деталей застосовують поздовжньо-фрезерні верстати. Вони мають масивну конструкцію та значні розміри робочого столу. Під час роботи стіл здійснює поздовжній рух, тоді як шпіндельна головка може переміщуватися у вертикальному та поперечному напрямках.

Подібне обладнання використовується під час виготовлення станин, рам, корпусних деталей та інших виробів великих розмірів. У важкому машинобудуванні такі верстати є незамінними завдяки своїй потужності та надійності.

Окрему групу становлять карусельно-фрезерні верстати. Їх характерною особливістю є круглий робочий стіл, який під час роботи безперервно або періодично обертається. Така конструкція дозволяє організувати обробку декількох заготовок одночасно, що суттєво підвищує продуктивність обладнання.

Карусельні верстати найчастіше застосовуються в умовах серійного та масового виробництва, де важливе значення має скорочення часу на виконання технологічних операцій. Завдяки безперервності процесу

обробки забезпечується більш ефективно використання виробничих потужностей.

Залежно від характеру виконуваних операцій фрезерні верстати поділяють на універсальні, спеціалізовані та спеціальні.

Універсальні верстати призначені для виконання широкого спектра технологічних операцій. Вони можуть використовуватися для обробки деталей різної форми та розмірів без суттєвих змін конструкції обладнання.

Подібні верстати найбільш доцільно використовувати в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва, де номенклатура виробів часто змінюється. Їх основною перевагою є гнучкість та можливість швидкого переналагодження.

Спеціалізовані фрезерні верстати призначені для виконання певної групи технологічних операцій. До цієї категорії належать зубофрезерні, шпонково-фрезерні, різьбофрезерні та інші верстати.

Порівняно з універсальними моделями вони забезпечують вищу продуктивність і точність під час виконання конкретних операцій. Однак сфера їх використання є більш вузькою.

Спеціальні верстати розробляються для виготовлення конкретного виду деталей або виконання окремої технологічної операції. Найчастіше вони застосовуються у великосерійному та масовому виробництві.

Використання такого обладнання дозволяє максимально підвищити продуктивність праці та зменшити собівартість продукції. Водночас через вузьку спеціалізацію їх застосування економічно виправдане лише за великих обсягів виробництва.

Розвиток промисловості та впровадження цифрових технологій сприяли появі різних рівнів автоматизації фрезерного обладнання.

На верстатах з ручним керуванням усі робочі переміщення здійснюються оператором. Працівник самостійно встановлює режими різання, контролює подачу та виконує налаштування обладнання.

Головною перевагою таких верстатів є простота конструкції та невисока вартість. Проте якість обробки значною мірою залежить від досвіду оператора, а продуктивність залишається відносно невисокою.

Незважаючи на появу сучасних автоматизованих систем, ручні верстати й досі використовуються у ремонтних майстернях, навчальних закладах та невеликих виробництвах.

У напіваавтоматичних системах частина операцій виконується автоматично. Наприклад, може автоматично здійснюватися робоча подача або повернення інструмента у вихідне положення.

Оператор бере участь лише в установленні заготовки, запуску циклу обробки та контролі результатів роботи. Це дозволяє підвищити продуктивність та знизити вплив людського фактора на технологічний процес.

Автоматичні верстати виконують більшість операцій без безпосередньої участі людини. Після запуску циклу обладнання самостійно здійснює всі необхідні переміщення та обробку деталі відповідно до заданих параметрів.

Використання автоматичних систем особливо ефективно у великосерійному виробництві, де необхідно виготовляти значну кількість однотипних деталей.

Найвищий рівень автоматизації забезпечують верстати з числовим програмним керуванням. У таких системах усі переміщення інструмента та заготовки задаються за допомогою спеціальної програми.

Оператору необхідно лише підготувати керуючу програму, встановити заготовку та контролювати процес обробки. Основні дії виконуються автоматично відповідно до закладеного алгоритму.

Поява ЧПК стала одним із найважливіших етапів розвитку металообробного обладнання. Такі системи дозволили значно підвищити

точність виготовлення деталей, скоротити тривалість виробничого циклу та зменшити кількість браку.

Особливо ефективним використання верстатів з ЧПК є при виготовленні складних деталей, які мають криволінійні поверхні або потребують виконання великої кількості координованих переміщень інструмента.

Ще однією важливою характеристикою сучасних фрезерних верстатів є кількість координат, за якими може здійснюватися керування рухом інструмента.

Триосьові верстати забезпечують переміщення по координатах X , Y та Z . Саме такі системи є найбільш поширеними завдяки відносній простоті конструкції та достатнім технологічним можливостям для більшості виробничих задач.

Вони дозволяють виконувати обробку площин, пазів, отворів та нескладних просторових поверхонь.

У чотириосьових системах до трьох лінійних координат додається ще одна обертальна вісь. Це дає змогу обробляти деталь з різних сторін без її повторного встановлення.

Зменшення кількості переналагоджень позитивно впливає як на продуктивність, так і на точність виготовлення виробів.

П'ятиосьові верстати належать до найбільш складного та технологічно досконалого обладнання. Вони забезпечують одночасне керування трьома поступальними та двома обертальними координатами.

Завдяки цьому стає можливою обробка деталей складної геометричної форми за один цикл установа. Такі верстати широко застосовуються в авіаційній, космічній, медичній та автомобільній промисловості.

Хоча вартість п'ятиосьових систем є значно вищою, їх використання дозволяє отримати високу точність обробки та скоротити тривалість виробничого процесу.

Робота фрезерного верстата неможлива без приводу, який забезпечує рух основних механізмів обладнання.

За типом приводу розрізняють:

- *механічні;*
- *гідравлічні;*
- *електромеханічні;*
- *сервоприводні системи.*

У сучасному машинобудуванні найбільшого поширення набули електромеханічні та сервоприводні системи. Їх застосування забезпечує високу точність позиціонування, плавність руху та можливість автоматичного регулювання швидкості.

Сервоприводи широко використовуються у верстатах з ЧПК, оскільки вони дозволяють реалізувати складні алгоритми керування та підтримувати необхідні параметри обробки навіть за змінних навантажень.

Сучасні фрезерні верстати мають низку переваг порівняно з обладнанням попередніх поколінь. Насамперед це висока точність виготовлення деталей, можливість автоматизації технологічного процесу та скорочення часу виробництва.

Застосування цифрових систем керування дозволяє мінімізувати вплив людського фактора на результати обробки. Крім того, сучасні верстати можуть інтегруватися в автоматизовані виробничі комплекси, що є важливою складовою концепції цифрового виробництва.

Підвищення швидкості обробки, використання ефективних систем діагностики та можливість дистанційного контролю роблять таке обладнання одним із ключових елементів сучасного машинобудівного підприємства.

Найбільшого поширення набувають верстати з числовим програмним керуванням, оснащені сервоприводами та багатокоординатними системами керування. Саме вони забезпечують необхідну точність, продуктивність і гнучкість виробництва, що відповідає вимогам сучасного машинобудування.

1.3 Аналіз сучасних систем керування фрезерними верстатами

У сучасному машинобудуванні до якості обробки деталей висуваються дедалі вищі вимоги. Це стосується не лише точності розмірів готового виробу, але й шорсткості поверхні, повторюваності результатів та швидкості виготовлення. Досягнення таких показників неможливе без використання ефективних систем керування металорізальним обладнанням. Особливо це актуально для фрезерних верстатів, які застосовуються для виготовлення деталей різної складності в умовах одиничного, серійного та масового виробництва [6].

Робота фрезерного верстата передбачає виконання значної кількості координованих рухів. Під час обробки необхідно забезпечити точне переміщення інструмента або заготовки відповідно до заданої траєкторії, підтримувати потрібну швидкість різання та контролювати режими роботи приводу. Саме ці функції покладаються на систему керування.

Перші фрезерні верстати не мали складних засобів автоматизації. Усі переміщення здійснювалися вручну оператором. Для зміни положення столу використовувалися маховики та механічні передачі. Якість обробки в таких умовах значною мірою залежала від кваліфікації працівника, а продуктивність залишалася відносно низькою.

З розвитком електротехніки почали з'являтися електромеханічні системи керування. Використання електродвигунів дозволило автоматизувати окремі операції та підвищити продуктивність обладнання.

Проте такі системи ще не забезпечували достатньої точності під час виконання складних технологічних операцій.

Новий етап розвитку фрезерного обладнання розпочався після впровадження числового програмного керування. Його поява дала можливість автоматично виконувати переміщення виконавчих механізмів відповідно до заздалегідь підготовленої програми. Завдяки цьому значно скоротилася кількість помилок, пов'язаних із людським фактором, а якість обробки стала більш стабільною.

Сучасна система керування являє собою комплекс технічних та програмних засобів, які взаємодіють між собою для реалізації технологічного процесу. До її складу входять контролер, електроприводи, датчики зворотного зв'язку, виконавчі механізми та засоби взаємодії з оператором.

Центральним елементом системи є контролер числового програмного керування. Він виконує обробку інформації, що надходить із керуючої програми, та формує сигнали для приводів подачі й шпинделя. Під час роботи контролер безперервно аналізує параметри системи та коригує роботу обладнання відповідно до заданих умов.

Одним із найважливіших компонентів сучасного фрезерного верстата є приводи координатних переміщень. Вони забезпечують рух столу або інструмента вздовж необхідних осей. Найчастіше для цих цілей використовуються серводвигуни, які характеризуються високою точністю та швидкодією.

На відміну від звичайних електродвигунів, сервоприводи працюють із використанням зворотного зв'язку. Це означає, що система постійно отримує інформацію про фактичне положення виконавчого механізму та може оперативно реагувати на будь-які відхилення. Такий принцип роботи дозволяє підтримувати високу точність навіть під час виконання складних траєкторій руху.

Для отримання інформації про положення та швидкість рухомих елементів застосовуються різноманітні датчики. Найбільш поширеними є енкодери, які встановлюються на валах двигунів або безпосередньо на рухомих вузлах верстата. Отримані дані використовуються для формування сигналів зворотного зв'язку та подальшого коригування роботи системи.

Залежно від принципу роботи системи керування поділяються на розімкнені та замкнені. У розімкнених системах сигнал подається на виконавчий механізм без контролю кінцевого результату. Подібний підхід відрізняється простотою реалізації, однак не дозволяє компенсувати похибки, що виникають під час роботи обладнання.

Замкнені системи працюють за іншим принципом. У них фактичний стан об'єкта постійно порівнюється із заданим значенням. Якщо виникає різниця між необхідним та реальним положенням, система формує коригувальний вплив. Саме тому більшість сучасних фрезерних верстатів оснащуються замкненими контурами регулювання.

Важливе місце в системах автоматичного керування займають регулятори. Їх основним завданням є забезпечення необхідної точності та стійкості роботи приводу. На практиці найчастіше використовуються пропорційні, інтегральні та диференціальні регулятори, а також їх різні комбінації.

Особливого поширення набули ПІД-регулятори, які поєднують переваги всіх трьох складових. Використання такого способу регулювання дозволяє зменшити перехідні процеси, скоротити час встановлення заданого режиму та знизити величину статичної похибки.

У сучасних фрезерних верстатах можуть використовуватися декілька контурів регулювання одночасно. Один контур відповідає за контроль струму двигуна, інший — за регулювання швидкості, а третій — за точне

позиціонування робочого органу. Подібна структура дозволяє досягати високих показників точності та динаміки.

Окрему увагу слід приділити системам керування шпиндельними приводами. Від стабільності частоти обертання шпинделя безпосередньо залежить якість обробленої поверхні та продуктивність технологічного процесу. Сучасні перетворювачі частоти забезпечують плавне регулювання швидкості обертання та підтримання необхідного режиму роботи незалежно від зміни навантаження.

У промисловості широко використовуються системи числового програмного керування різних виробників. Найбільш відомими є рішення Fanuc, Siemens Sinumerik, Heidenhain та Mitsubishi. Кожна з цих систем має власні особливості, однак усі вони забезпечують високу точність позиціонування, підтримку багатокоординатної обробки та можливість інтеграції в автоматизовані виробничі комплекси.

Сучасні тенденції розвитку систем керування пов'язані з цифровізацією виробництва. Все більшого поширення набувають технології дистанційного моніторингу, автоматичного збору даних та прогнозування технічного стану обладнання. Це дозволяє своєчасно виявляти несправності та зменшувати кількість незапланованих простоїв.

Ще одним напрямком розвитку є впровадження елементів штучного інтелекту та адаптивного керування. Такі системи здатні аналізувати умови обробки в режимі реального часу та автоматично коригувати параметри роботи верстата для досягнення найкращих результатів.

Таким чином, сучасні системи керування фрезерними верстатами є складними технічними комплексами, які поєднують засоби програмного керування, електроприводи, датчики та алгоритми автоматичного регулювання. Їх використання дозволяє підвищити точність обробки, збільшити продуктивність обладнання та забезпечити стабільну якість виготовлення деталей. Подальший розвиток таких систем буде пов'язаний

із розширенням можливостей цифрового виробництва, впровадженням інтелектуальних алгоритмів та підвищенням рівня автоматизації технологічних процесів.

1.4. Мета і задачі проєктування

Для виконання подальших розрахунків необхідно задати вихідні параметри механічної частини привода подачі фрезерного верстата та характеристики обраного електродвигуна. Як об'єкт дослідження розглядається привід переміщення стола, параметри якого прийняті відповідно до технічного завдання та наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Механічними параметрами привода переміщення стола фрезерного верстата

Параметр, одиниця виміру		Позначення	Величина
Маса стола, кг		m_t	200
Максимальна маса заготовки, кг		$m_{w. max}$	500
Параметри гвинтової передачі	Довжина гвинта, м	l_{scr}	1,5
	Діаметр гвинта, м	d_{scr}	0,02
	Крок різьби, м	h_{scr}	0,004

З наведених даних видно, що під час розрахунків необхідно враховувати не лише масу стола, а й максимальну масу заготовки, яка переміщується разом із ним. Крім того, суттєвий вплив на характеристики привода мають параметри гвинтової передачі, зокрема діаметр гвинта та крок різьби.

Для забезпечення необхідних показників швидкодії та точності позиціонування в роботі використовується серводвигун BMH1401P21F1A [7]. Основні технічні характеристики двигуна наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Характеристики електродвигуна BMH1401P21F1A

Параметр, одиниця виміру	Позначення	Величина
Номінальна потужність, кВт	P_n	2,4
Номінальна частота обертання, об/хв	n_n	3000
Номінальний момент, Н·м	M_n	7,7
Номінальна напруга, В	U_n	400
Активний опір фази статора, Ом	R_a	0,15
Коефіцієнт моменту, Н·м/А	K_t	1,16
Коефіцієнт проти-ЕРС, В/(рад/с)	K_e	0,739
Електромагнітна постійна часу, мс	T_e	9,7
Момент інерції ротора, кг·м ²	J_r	0,018

Наведені параметри використовуються під час побудови математичної моделі електропривода, визначення передавальних функцій та дослідження роботи системи автоматичного керування в середовищі Simulink. На основі цих даних виконуються подальші розрахунки та оцінюються динамічні характеристики розроблюваної системи.

РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПОДАЧ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА

2.1. Розробка функціональної схеми системи автоматичного керування електроприводами подач фрезерного верстата

Функціональна схема системи автоматизованого керування електроприводами подач фрезерного верстата (рис. 2.1) являє собою узагальнену модель, що описує взаємодію основних вузлів і пристроїв, задіяних у формуванні, передачі та обробці керуючих сигналів, необхідних для здійснення переміщень за координатами x , y , та z . У схемі використано такі позначення: ВД — вентильний двигун, Е — енкодер.

Побудова функціональної схеми дає можливість простежити маршрут проходження сигналів у системі, визначити структуру замкнених контурів регулювання, точки підключення зворотних зв'язків та розподіл функцій між окремими елементами відповідно до рівнів керування. Для електропривода подачі фрезерного верстата така схема повинна забезпечувати узгоджену роботу системи числового програмного керування, задавальних пристроїв, контурів регулювання положення, швидкості та струму, силових перетворювачів, виконавчих двигунів, механізмів передачі руху на базі кульково-гвинтової пари, а також засобів контролю положення, до яких належать енкодери та інші датчики.

Принцип функціонування системи полягає в тому, що програма керування формує команду на переміщення у заданій координаті. Отримане завдання перетворюється на сигнал швидкості, який обробляється відповідним регулятором і надалі використовується для формування керуючої напруги силового привода. Після підсилення сигнал надходить до двигуна, який створює обертальний рух. Через механічну

передачу цей рух перетворюється на поступальне переміщення стола верстата або інструментального вузла, що забезпечує виконання технологічної операції фрезерування.

Контроль точності переміщення здійснюється за допомогою системи зворотного зв'язку. Інформація про фактичне положення виконавчого органа безперервно надходить від енкодера до регуляторів, де порівнюється із заданим значенням. На основі отриманої різниці автоматично формуються коригувальні впливи, що дозволяють оперативно зменшувати похибку та підтримувати необхідну точність роботи електропривода.

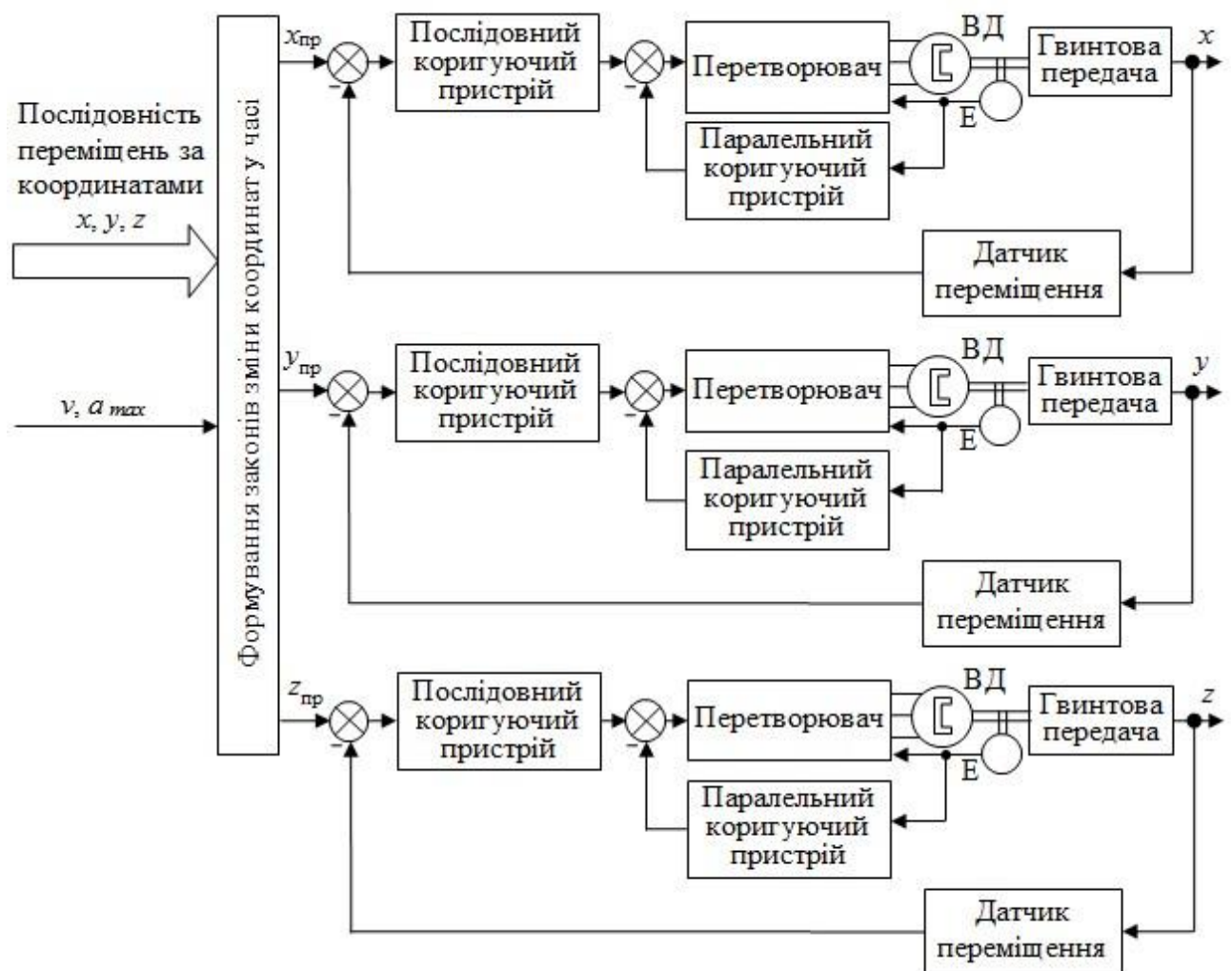


Рисунок. 2.1 – Функціональна схема системи автоматичного керування електроприводами подач фрезерного верстата

Конструкцією системи передбачено можливість ручного керування під час налагодження обладнання. Для цього можуть використовуватися електронний маховик або панель оператора. На період виконання налагоджувальних робіт автоматичні контури регулювання за потреби відключаються. Як виконавчі механізми застосовуються безщіточні двигуни постійного струму або серводвигуни типу BMH1401P21F1A, які забезпечують достатній крутний момент, високу точність відпрацювання команд і швидку реакцію на зміну керуючих впливів. Обмін даними між окремими елементами системи здійснюється через цифрові канали зв'язку, зокрема RS-485 [10] або EtherCAT [8]. При роботі в режимі інтерполяції час передачі та обробки сигналів не перевищує 1 мс, що є достатнім для узгодженого керування всіма координатами. Запропонована структура системи дозволяє реалізувати замкнене керування переміщеннями по трьох осях, забезпечуючи необхідну точність позиціонування, стійку роботу привода в перехідних режимах та можливість адаптації параметрів регуляторів до характеристик верстата і вимог конкретної операції обробки.

2.2. Розробка динамічної структурної схеми системи керування електроприводами подачі верстата

Побудова математичної моделі електропривода подач фрезерного верстата полягає у створенні формалізованого опису процесів, що відбуваються у виконавчій частині системи. Такий опис базується на сукупності математичних залежностей, які характеризують електричні та механічні процеси в приводі, а також відображають взаємозв'язок між його окремими елементами. Для розроблення моделі використовуються рівняння електромеханічного перетворення енергії, рівняння руху механічної системи та співвідношення, що визначають передачу енергії між її ланками. Як

виконавчий елемент у роботі застосовується серводвигун типу BMH1401P21F1A. Незважаючи на те, що він належить до класу синхронних двигунів із постійними магнітами, під час дослідження динаміки його характеристики можуть бути подані у вигляді спрощеної лінійної моделі, подібної до моделі двигуна постійного струму. Параметри моделі визначаються на основі технічних характеристик двигуна, наведених у документації виробника. Такий підхід дозволяє отримати математичний опис, придатний для подальшого аналізу та синтезу системи автоматичного керування. У результаті динамічні властивості серводвигуна можуть бути представлені двома передавальними функціями, структура яких відповідає класичній моделі двигуна постійного струму.

$$W_m(p) = \frac{k_m}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1}; W_t(p) = \frac{k_t \cdot (T_e p + 1)}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1};$$

$$U_a(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} + C_e \cdot \omega(t)$$

Де: $U_a(t)$ – напруга на обмотці, R_a – активний опір обмотки, L_a – індуктивність фази, $i_a(t)$ – струм якоря, C_e – коефіцієнт проти-ЕРС, $\omega(t)$ – кутова швидкість; $W_m(p)$ – передавальна функція двигуна за вхідною напругою; $W_t(p)$ – передавальна функція двигуна за моментом; k_m, k_t – коефіцієнти передачі двигуна відповідно за напругою та за моментом; T_e, T_m – електромагнітна та електро механічна постійні часу двигуна;

Складаємо динамічну структурну схему системи автоматичного керування електроприводом механізму подачі фрезерного верстата (рис. 2.2).

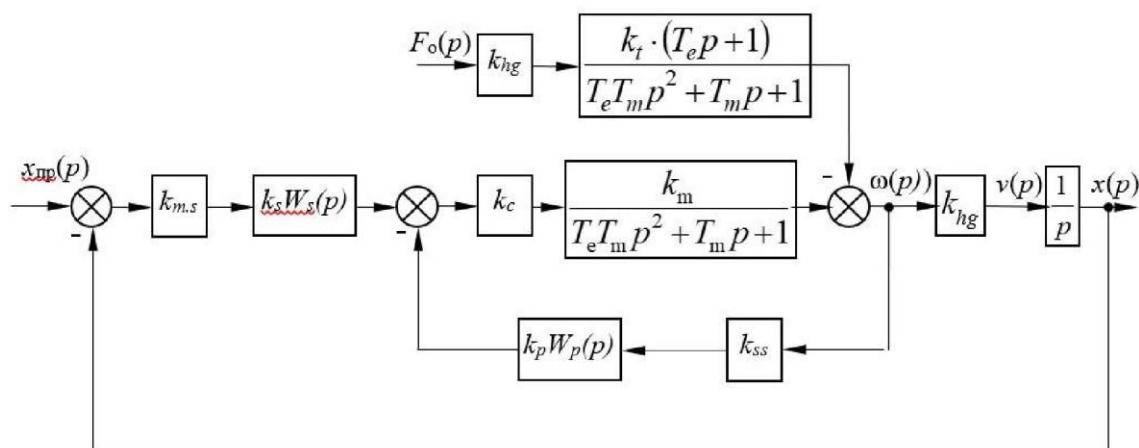


Рисунок.2.2 – Динамічна структурна схема система керування електроприводом

Позначення: ω – частота обертання двигуна; v – швидкість переміщення стола; $W_s(p), W_p(p)$ – передавальні функції пристроїв корекції; F_o – сила опору; k_{scr} – черв'ячної передачі; $k_{m.s}$ – датчика переміщення; k_c – перетворювача; k_{ss} – датчика швидкості; k_s, k_p – коригуючих пристроїв;.

2.3. Визначення динамічних параметрів системи керування електроприводами подачі верстата

Основні характеристики електродвигуна ВМН1401Р21F1А наведені в таблиці 2.1

Таблиця 2.1

Характеристики електродвигуна ВМН1401Р21F1А

Параметр, одиниця виміру	Позначення	Величина
Номінальна потужність, кВт	P_n	2,4
Номінальна частота обертання, об/хв	n_n	3000
Номінальний момент, Н·м	M_n	7,7
Номінальна напруга, В	U_n	400

Активний опір фази статора, Ом	R_a	0,15
Коефіцієнт моменту, Н·м/А	K_t	1,16
Коефіцієнт проти-ЕРС, В/(рад/с)	K_e	0,739
Електромагнітна постійна часу, мс	T_e	9,7
Момент інерції ротора, кг·м ²	J_r	0,018

Коефіцієнт перетворення двигуна за моментом:

$$k_t = \frac{R_a}{K_e K_t} = \frac{0,15}{0,739 \cdot 1,16} = 0,175(1/\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}))$$

Коефіцієнт перетворення двигуна за напругою:

$$k_m = \frac{1}{K_e} = \frac{1}{0,739} = 1,353(1/\text{В} \cdot \text{с}))$$

Дані гвинтової пари:

$l_{scr} = 1,5$ м – протяжність гвинта; $d_{scr} = 0,02$ м – діаметр гвинта; $h_{scr} = 0,004$ м – крок гвинта; $\eta_{hg} = 0,8$ – коефіцієнт корисної дії гвинтової передачі.

Передавальний коефіцієнт кулькової гвинтової пари:

$$k_{scr} = \frac{h_{scr}}{2\pi} = \frac{0,004}{2\pi} = 6,366 \cdot 10^{-4}(\text{м})$$

Обчислюємо масу і момент інерції гвинта:

$$m_{scr} = p_{st} l_{scr} \frac{\pi d_{scr}^2}{2\pi} = 7,8 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot \frac{\pi \cdot 0,02^2}{2\pi} = 3,676(\text{кг})$$

$$J_{scr} = \frac{1}{12} m_{scr} d_{scr}^2 = \frac{1}{12} \cdot 8,27 \cdot 0,02^2 = 1,225 \cdot 10^{-4} (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$$

де $\rho_{st} = 7,8 \cdot 10^3$ (кг/м³) – густина сталі.

Необхідно визначити мінімальне та максимальне значення валу двигуна, для здійснення наступних розрахунків:

$$J_{min} = J_r + J_{scr} + m_t k_{scr}^2 = 0,018 + 1,225 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 10^2 \cdot 6,366 \cdot 10^{-4} = 0,018 (\text{кг} \cdot \text{м}^2).$$

де $m_t = 2 \cdot 10^3$ кг – вага стола.

$$J_{max} = J_r + J_{scr} + (m_t + m_{wmax}) k_{scr}^2 = 0,018 + 1,225 \cdot 10^{-4} (2 \cdot 10^2 + 5 \cdot 10^2) \cdot 6,366 \cdot 10^{-4} = 0,019 (\text{кг} \cdot \text{м}^2).$$

де $m_{c.max} = 3 \cdot 10^3$ кг – маса заготовки (табл. 1.2).

Обчислення мінімального та максимального значення електромеханічної постійної часу: .

$$T_{min} = \frac{J_{min}}{K_e K_t} R_a = \frac{0,18}{0,739 \cdot 1,16} \cdot 0,15 = 3,185 \cdot 10^{-3} (с)$$

.

$$T_{max} = \frac{J_{max}}{K_e K_t} R_a = \frac{0,19}{0,739 \cdot 1,16} \cdot 0,15 = 3,221 \cdot 10^{-3} (с)$$

Оскільки зміна електромеханічної сталої часу в робочому діапазоні не перевищує 25 % від її найбільшого значення, вплив цієї зміни на

динамічні характеристики системи можна вважати незначним. Тоді застосовуємо: $T_m = T_{max} = 3.221 \cdot 10^{-3}(c)$.

Номінальна сила опору:

$$F_a = \frac{M_n}{k_{scr}} \eta_{scr} = \frac{7,7}{6,366 \cdot 10^{-4}} \cdot 0,8 = 9.676 \cdot 10^3 (H)$$

Висновки за розділом

У даному розділі виконано розроблення схеми мікропроцесорної системи керування приводами подач вертикально-фрезерного верстата. Запропонована система забезпечує керування переміщеннями за координатними осями та включає блок формування траєкторії руху, а також три незалежні замкнені контури регулювання. До складу кожного контуру входять засоби контролю положення та швидкості, коригувальні ланки, силовий ШІМ-перетворювач, виконавчий двигун постійного струму і механічна передача на базі черв'ячного редуктора.

Функції генерації координатних завдань і реалізації алгоритмів корекції покладено на мікроконтролер. Отримуючи команди від системи керування верхнього рівня, він обробляє вхідну інформацію та формує сигнали, необхідні для керування електроприводами відповідних координатних осей.

Для дослідження динамічних властивостей системи було сформовано її структурну модель. Під час побудови моделі враховано математичні описи електродвигуна постійного струму та коригувальних пристроїв, а також характеристики датчиків, силового перетворювача і

механічної передачі. На основі отриманої структури визначено основні параметри, що характеризують динаміку приводу робочого стола.

Розроблена модель може бути використана для аналізу всіх приводів подач верстата, оскільки в кожному з них застосовано однакові типи електродвигунів і черв'ячних редукторів. Це дає можливість використовувати єдиний підхід до розрахунку та дослідження характеристик усієї системи керування.

РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПОДАЧ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА

3.1. Визначення бажаної передавальної функції системи автоматичного керування

Метою синтезу системи автоматичного керування є визначення параметрів і структури коригувальних ланок, які забезпечують виконання встановлених вимог щодо якості регулювання [13, 3]. Оскільки точки підключення коригувальних пристроїв задані заздалегідь, подальше завдання полягає у визначенні їх передавальних функцій, тобто параметрів k_s , k_p , а також функцій $W_s(p)$ і $W_p(p)$.

Під час проєктування необхідно забезпечити виконання заданих показників точності та динамічних характеристик системи. Зокрема, допустиме значення похибки позиціювання не повинно перевищувати $\varepsilon_{max} = 0,05$ мм за умов руху з максимальною швидкістю $v_{max} = 0,05$ м/с, максимальним прискоренням $a_{max} = 1$ м/с² та навантаженням, що відповідає номінальному моменту двигуна. Крім того, величина перерегулювання повинна бути обмежена значенням σ_{max} .

Для оцінювання точності роботи системи розглядаються два характерні режими руху виконавчого механізму:

1. Рух із постійною швидкістю (v_{max}) при дії максимальної сили зовнішнього опору ($F_{o,max}$).

2. Рух за гармонічним законом $x_{np}(t) = X_s \sin(\omega_s t)$ де параметри гармонічного сигналу вибираються таким чином, щоб амплітудні значення швидкості та прискорення дорівнювали відповідно v_{max} і a_{max} .

Аналіз похибки виконується для усталених режимів роботи. Для першого типу необхідно, щоб статична похибка не зростала без обмежень, тому система повинна мати астатичні властивості. Враховуючи вимогу компенсації як швидкісної, так і моментної складових похибки, доцільно застосувати систему з астатизмом другого порядку.

За таких умов бажана передавальна функція розімкненого контуру повинна відповідати структурі, характерній для систем із другим порядком астатизму, і має бути подана у вигляді:

$$W_{des}(p) = \frac{k}{p^2} N(p)$$

де k – коефіцієнт підсилення розімкненої системи;– дробно-раціональна функція, що задовольняє умові $N(0)=1$. Тому перша низькочастотна асимптота типових бажаних ЛАЧХ має нахил -40 дБ/дек.

При діянні другого типу переміщення, швидкість і прискорення змінюються за наступними законами:

$$x_{pr}(t) = X_s \sin(\omega_s t) \quad (3.1)$$

$$v_{pr}(t) = X_s \omega_s \cos(\omega_s t) \quad (3.2)$$

$$\alpha_{pr}(t) = -X_s \sin \omega_s^2 (\omega_s t) \quad (3.3)$$

Підставивши значення максимальних амплітуд швидкості v_{max} та прискорення a_{max} у вирази (3.2) і (3.3), одержимо:

$$v_{max} = X_s \omega_s$$

$$\alpha_{max} = X_s \omega_s^2$$

Звідси можна визначити кутову частоту гармонічного сигналу та його амплітуду:

$$\omega_s = \frac{\alpha_{max}}{v_{max}} = \frac{1}{0,05} = 20(\text{с}^{-1}) \quad (3.4)$$

$$X_s = \frac{v_{max}^2}{\alpha_{max}} = \frac{0,05^2}{1} = 2,5 \cdot 10^{-3}(\text{м}) \quad (3.5)$$

При гармонічному вхідному впливі в системі виникає гармонічна складова похибки. Її амплітудне значення залежить від частоти сигналу і визначається відповідним співвідношенням.

$$\varepsilon_h(\omega_s) = \frac{X_s}{|1 + W_{des}(j\omega_s)|} \quad (3.6)$$

Враховуючи, що при низьких частотах $W_{des}(j\omega)$, одиницею в нерівності (3.6) можна знехтувати. Тоді дане рівняння можна переписати в наступному вигляді:

$$\varepsilon_h = \frac{X_s}{|W_{des}(j\omega_s)|} \quad (3.7)$$

Де $j = \sqrt{-1}$;

Рівняння, яке описує низькочастотну асимптоту логарифмічної амплітудно-частотної характеристики:

$$L_{des}(\omega) = 20\lg k - 40\lg \omega \quad (3.8)$$

$$20\lg |W_{des}(j\omega_s)| = 20\lg \frac{k}{\omega_s^2} \quad (3.9)$$

Виконавши підстановку $\omega = \omega_s$, отримаємо наступне рівняння:

$$|W_{des}(j\omega_s)| = \frac{k}{\omega_s^2}$$

Після підстановки виразу (3.9) у рівняння (3.7) маємо:

$$\varepsilon_h = \frac{X_s \cdot \omega_s^2}{k} \quad (3.10)$$

Із отриманого співвідношення (3.10) визначається мінімально допустиме значення коефіцієнта підсилення розімкненої системи:

$$k = \frac{X_s \cdot \omega_s^2}{\varepsilon_{max}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3} 20^2}{0,05} = 2 \cdot 10^4 (c^{-1}) \quad (3.11)$$

Значення першої та другої спрягаючих частот визначаються з урахуванням вимог до стійкості замкненої системи та необхідних показників якості перехідного процесу. Відповідно до критерію Найквіста та особливостей побудови асимптотичних логарифмічних амплітудно-частотних характеристик достатній запас стійкості забезпечується тоді, коли ЛАЧХ перетинає рівень 0 дБ із нахилом (-20) дБ/дек. При цьому довжина ділянки з таким нахилом повинна становити щонайменше одну декаду, тобто виконуватись умова ($\omega_2 / \omega_1 \geq 10$), а сама середньочастотна область має бути розташована приблизно симетрично відносно частоти зрізу [13].

За таких умов система зазвичай характеризується перерегулюванням у межах 20–30 %, а час установлення перехідного процесу може бути орієнтовно визначений за співвідношенням

$$t_{set} = (1..2) \frac{2\pi}{\omega_c}$$

де ω_c — частота зрізу системи.

Однак відповідно до вимог технічного завдання максимальне перерегулювання не повинно перевищувати 5 %. Для досягнення такого показника необхідно збільшити протяжність середньочастотної ділянки ЛАЧХ порівняно з типовим випадком. Тому приймаємо наступне значення відношення спрягаючих частот:

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = 80$$

що дозволяє підвищити запас стійкості та забезпечити необхідну якість перехідного процесу.

На основі отриманих параметрів побудована шукана асимптотична логарифмічна амплітудно-частотна характеристика системи керування, яка наведена на рис. 3.1.

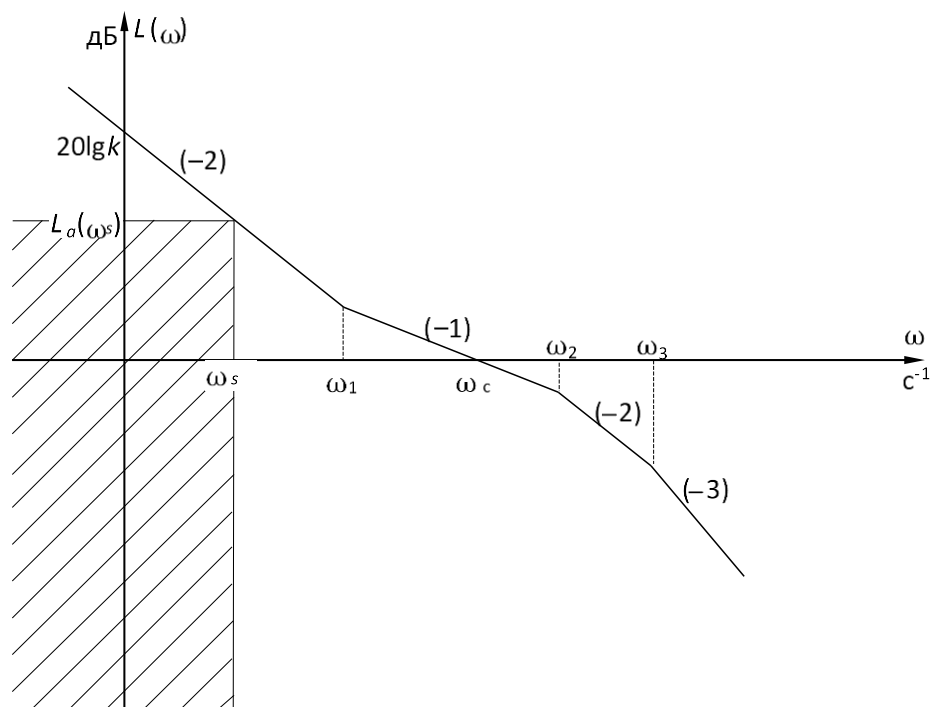


Рисунок 3.1 – Асимптотична бажана ЛАЧХ системи керування

Запишемо рівняння середньочастотної ділянки бажаної логарифмічної амплітудно-частотної характеристики:

$$L_2(\omega) = -20 \lg \frac{\omega}{\omega_c} \quad (3.12)$$

Підставивши $\omega = \omega_1$ і прирівнявши (3.12) до (3.8) отримаємо:

$$\omega_1 = \frac{k}{\omega_c}$$

Коефіцієнт обирають таким чином, щоб частота зрізу ω_c знаходилася приблизно в центральній частині середньочастотного інтервалу. При виконанні умови параметр α зазвичай приймають у межах від 20 до 40. Збільшення значення α сприяє підвищенню швидкодії системи, проте водночас призводить до зростання перерегулювання. З огляду на це приймаємо $\alpha = 20$, після чого визначаємо першу спрягаючу частоту:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k}{\alpha}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^4}{20}} = 31.623(\text{с}^{-1}). \quad (3.13)$$

Друга спрягаюча частота обчислюється за співвідношенням:

$$\omega_2 = 80 \cdot \omega_1 = 80 \cdot 20 = 2,53 \cdot 10^3(\text{с}^{-1}). \quad (3.14)$$

Характер зміни ЛАЧХ при частоті ω_2 , практично не впливає на точність відтворення сигналу та запас стійкості системи. Проте для зменшення впливу високочастотних завад доцільно забезпечити інтенсивніше зниження коефіцієнта підсилення в цій області. З цією метою вводиться додаткова точка зламу асимптотичної ЛАЧХ на частоті ω_3 :

$$\omega_3 = 10 \cdot \omega_2 = 10 \cdot 2,53 \cdot 10^3 = 2,53 \cdot 10^4(\text{с}^{-1}). \quad (3.15)$$

Побудована бажана асимптотична ЛЧХ (рис. 3.1) дозволяє сформулювати бажану передавальну функцію розімкненої системи:

$$W_{des}(p) = \frac{k}{p^2} \frac{T_1 p + 1}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} \quad (3.16)$$

де $T_i = \omega_i^{-1}$; $i = 1 \dots 3$.

Отримана передавальна функція використовується як вихідна модель для подальшого визначення структури коригувальних пристроїв та розрахунку їх параметрів. Розраховані значення сталих часу наведені в таблиці 3.1.:

Таблиця 3.1

Постійні часу, с		
T_1	T_2	T_3
0.032	$3.953 \cdot 10^{-4}$	$3.953 \cdot 10^{-5}$

3.2. Розрахунок передавальних функцій коригуючих пристроїв

Передавальні функції Передавальні функції коригувальних ланок визначаються з умови, що фактична передавальна функція системи керування повинна максимально відповідати раніше отриманій бажаній передавальній функції.

Відповідно до структурної схеми системи (рис. 2.2) передавальна функція розімкненого контуру може бути записана у вигляді

$$W(p) = k_{ms} W_s(p) \frac{\frac{k_c k_m}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1} \cdot \frac{1}{p}}{1 + \frac{k_c k_m}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1} \cdot \frac{1}{p} \cdot p \cdot W_p(p)} \cdot k_{scr} \quad (3.17)$$

або після відповідних перетворень:

$$W(p) = k_{ms} W_s(p) \frac{\frac{k_c k_m}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1}}{1 + \frac{k_c k_m}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1} \cdot W_p(p)} \cdot \frac{k_{scr}}{p} \quad (3.18)$$

Для вимірювання переміщення використовуються оптичні інкрементні енкодери, а для контролю швидкості — тахогенератори постійного струму з інтегрованими аналого-цифровими перетворювачами. Крім того, силові транзисторні перетворювачі мають цифровий інтерфейс керування. З огляду на це приймаємо такі значення коефіцієнтів передачі вимірювальних та керуючих елементів: $k_{m,s}=1 \text{ м}^{-1}$,

$$k_{s,s}=1 \text{ с/м}, k_c=1 \text{ В}.$$

Після підстановки зазначених значень вираз для передавальної функції набуває вигляду:

$$W(p) = W_s(p) \frac{\frac{k_m}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1}}{1 + \frac{k_m}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1} \cdot W_p(p)} \cdot \frac{k_{scr}}{p} \quad (3.19)$$

У якості паралельного коригувального пристрою обирається форсуюча ланка з передавальною функцією:

$$W_p(p) = k_p \cdot (\tau p + 1) \quad (3.20)$$

де τ – постійна часу, k_p – коефіцієнт підсилення.

Підставивши цей вираз у співвідношення (3.19), отримаємо:

$$W(p) = \frac{1}{p} W_s(p) \frac{k_m k_{hg}}{T_e T_m p^2 + (T_m + k_m k_p \tau) p + k_m k_p + 1},$$

$$W(p) = \frac{1}{p} W_s(p) \frac{k_m k_{scr}}{T_e T_m p^2 + (T_m + k_m k_p \tau) p + k_m k_p + 1} \quad (3.21)$$

або після спрощення

$$W(p) = \frac{k_m k_{scr}}{(k_m k_p + 1)} \cdot \frac{1}{p} W_s(p) \frac{1}{\frac{T_e T_m k_m}{k_m k_p + 1} p^2 + \frac{T_m + k_m k_p \tau}{k_m k_p + 1} p + 1} \quad (3.22)$$

Далі прирівнюємо отриману передавальну функцію розімкненої системи до бажаної передавальної функції, яка визначена рівнянням (3.16). У результаті зіставлення відповідних коефіцієнтів знаходимо необхідні параметри коригувальних пристроїв:

$$\frac{k_m k_{scr}}{(k_m k_p + 1)} \cdot \frac{1}{p} W_s(p) \frac{1}{\frac{T_e T_m k_m}{k_m k_p + 1} p^2 + \frac{T_m + k_m k_p \tau}{k_m k_p + 1} p + 1} =$$

$$= \frac{k}{p^2} \frac{T_1 p + 1}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} \quad (3.23)$$

$$k = \frac{k_m k_{scr}}{k_m k_p + 1} \quad (3.24)$$

Де k_s – коефіцієнт підсилення послідовного коригуючого пристрою.

Подамо знаменник останнього дробового виразу в рівнянні (3.21) у факторизованому вигляді $(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)$:

$$\frac{T_e T_m}{k_m k_p + 1} p^2 + \frac{T_m + k_m k_p}{k_m k_p + 1} p + 1 = T_2 T_3 p^2 + (T_2 + T_3) p + 1$$

Після розкриття дужок та порівняння отриманого результату з початковим виразом прирівнюємо коефіцієнти при однакових степенях змінної (p). У результаті одержуємо систему співвідношень:

$$\frac{T_e T_m}{k_m k_p + 1} = T_2 T_3 \quad (3.25)$$

$$\frac{T_m + k_m k_p \tau}{k_m k_p + 1} = T_2 + T_3$$

На основі рівняння (3.24) визначаємо k_p :

$$\begin{aligned} k_p &= \frac{1}{k_m} \left(\frac{T_e T_m}{T_2 T_3} - 1 \right) = \frac{1}{k_m} \left(\frac{3,221 \cdot 10^{-3} \cdot 9,7 \cdot 10^{-3}}{3,953 \cdot 10^{-4} \cdot 3,953 \cdot 10^{-5}} - 1 \right) = \\ &= 1,477 \cdot 10^3 \quad (3.26) \end{aligned}$$

Із співвідношення (3.25) знаходимо τ :

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1}{k_m k_p} ((T_2 + T_3)(k_m k_p + 1) - T_m) = \\ &= \frac{1}{k_m k_p} ((3,953 \cdot 10^{-4} + 3,953 \cdot 10^{-5})(1,353 \cdot 1,447 \cdot 10^3 \\ &+ 1) - 3,221 \cdot 10^{-3}) = \\ &= 4,334 \cdot 10^{-4} \quad (3.27) \end{aligned}$$

Скориставшись рівнянням (3.23), визначаємо k_s :

$$\begin{aligned} k_s &= \frac{k}{k_m k_{scr}} (k_m k_p + 1) = \frac{2 \cdot 10^4}{1,353 \cdot 6,366 \cdot 10^{-4}} (1,353 \cdot 1,477 \cdot 10^3 + 1) \\ &= 4,642 \cdot 10^{10} \quad (\text{В/м}) \quad (3.28) \end{aligned}$$

З виразу (3.22) отримаємо:

$$\frac{W_s(p)}{(T_2p + 1)(T_3p + 1)} = k_s \frac{T_1p + 1}{p \cdot (T_2p + 1)(T_3p + 1)}$$

Звідки визначається ще один параметр системи:

$$W_s(p) = k_s \frac{T_1p + 1}{p} \quad (3.29)$$

Таким чином, Таким чином, структура коригувальних пристроїв і значення їх параметрів визначаються рівняннями (3.20) та (3.26)–(3.29). Отримані результати дозволяють забезпечити відповідність передавальної функції розімкненої системи бажаній та виконати задані вимоги щодо точності і якості керування.

Оскільки коригувальні пристрої реалізуються програмно на базі мікроконтролера, їх неперервні передавальні функції необхідно подати в дискретному вигляді.

3.3. Визначення дискретних передавальних функцій коригуючих пристроїв

Для отримання дискретних передавальних функцій можуть використовуватися різні методи дискретизації, зокрема метод відображення диференціалів, метод інваріантності імпульсної характеристики, білінійне (z)-перетворення [14] та узгоджене (z)-перетворення [15]. У даній роботі для дискретизації обрано метод

відображення диференціалів, оскільки він є достатньо простим для реалізації та забезпечує прийнятну точність. Суть методу полягає у заміні оператора p виразом $(1 - z^{-1})/T$ – де $T = 1/f_d$ – період дискретизації, а f_d – частота дискретизації,

яку Частоту дискретизації зазвичай обирають щонайменше на порядок більшою за найбільшу спрягаючу частоту асимптотичної ЛАЧХ розімкненої системи. Приймаємо $f_d = 5 \cdot 10^4$ Гц. Тоді період дискретизації дорівнює $T = \frac{1}{5 \cdot 10^4} = 2 \cdot 10^{-5}$ с.

Після заміни оператора p відповідно до методу відображення диференціалів отримуємо дискретну передавальну функцію паралельного коригувального пристрою:.

$$W_{p.d} = W_p \cdot \left(\frac{1 - z^{-1}}{T} \right) = k_p \cdot \left(\tau_d \frac{1 - z^{-1}}{T} + 1 \right) \quad (3.30)$$

Дискретна передавальна функція послідовного коригувального пристрою має вигляд:

$$\begin{aligned} W_{s.d} &= W_s \cdot \left(\frac{1 - z^{-1}}{T} \right) = k_s \cdot \frac{T_1 \frac{1 - z^{-1}}{T} + 1}{\left(\frac{1 - z^{-1}}{T} \right)} \\ &= k_s \frac{T}{1 - z^{-1}} \cdot \left(T_1 \frac{1 - z^{-1}}{T} + 1 \right) \end{aligned} \quad (3.31)$$

Отримані дискретні передавальні функції можуть бути безпосередньо використані під час розроблення програмного забезпечення мікроконтролера, що реалізує закон керування системою.

3.4. Моделювання динаміки системи керування і визначення показників якості керування

Для дослідження перехідних процесів у системі керування та перевірки її роботи при типових входніх впливах в середовищі Simulink [12] була розроблена модель системи керування електроприводом подачі фрезерного верстата (рис. 3.6).

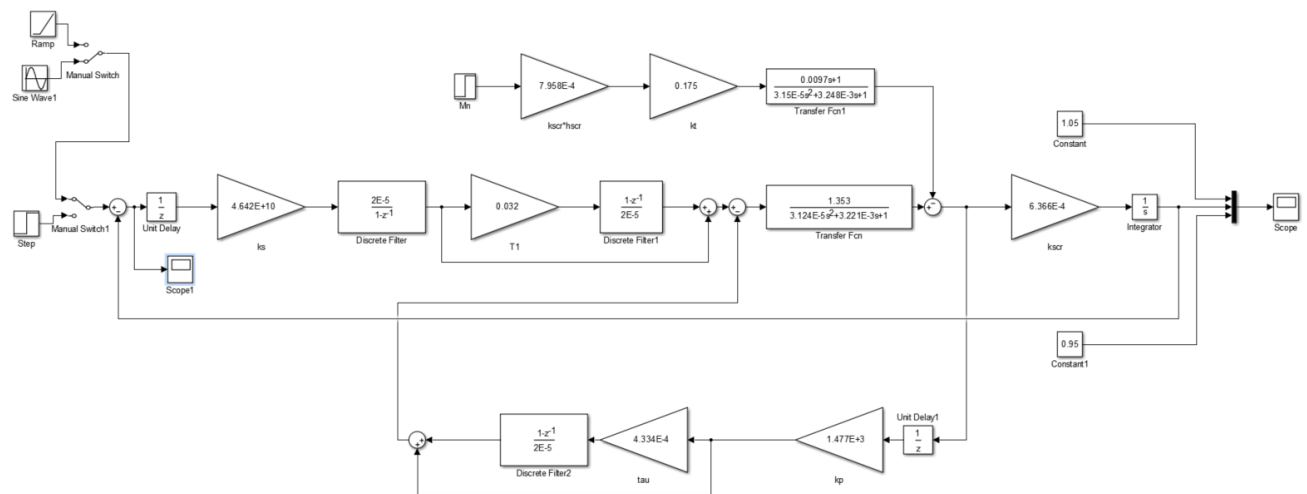


Рисунок 3.6 – Динамічна модель системи автоматичного керування електроприводом подачі фрезерного верстата, реалізована в середовищі MATLAB Simulink

Створена модель дозволяє аналізувати реакцію системи на різні види входніх сигналів: лінійно зростаючі, синусоїдальні та ступінчасті. На рис. 3.7 наведено графік зміни похибки при подачі лінійно зростаючого сигналу. У цьому випадку на осцилографі відображається сумарна похибка, яка включає швидкісну та моментну складові. Згідно з технічними вимогами її усталене значення не повинно перевищувати допустиму похибку керування ($\varepsilon_{\max}=0,05$) мм. Аналіз графіка показує, що після завершення перехідного процесу похибка прямує до нуля.

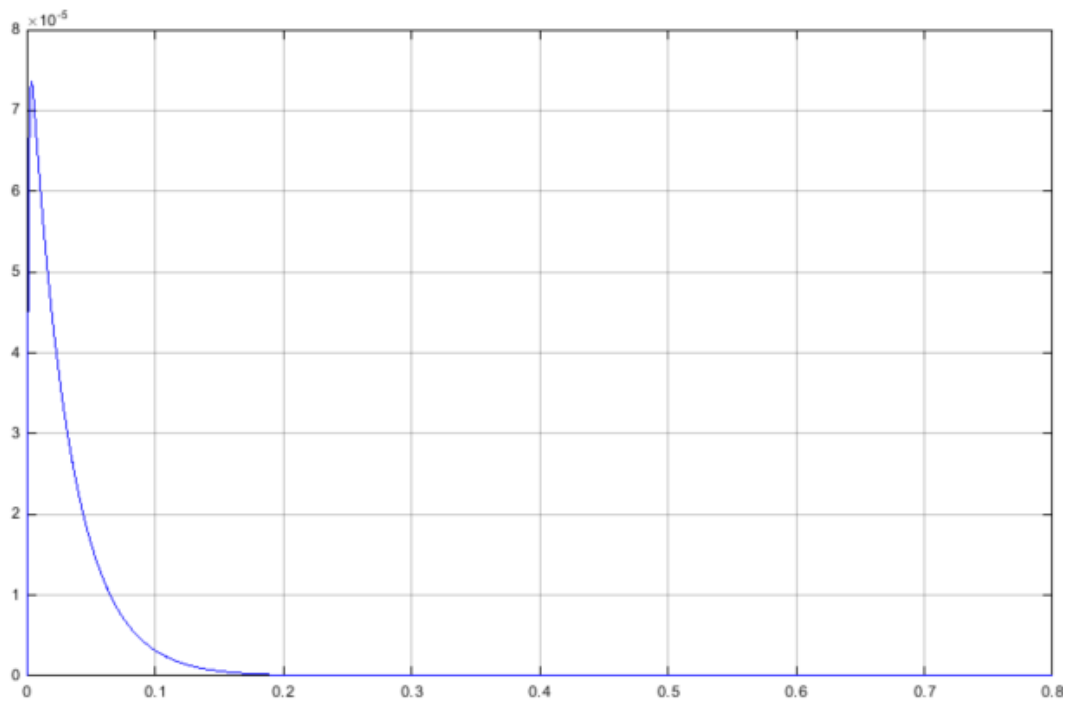


Рисунок 3.7 – Графік зміни помилки при лінійно-наростаючому входному сигналі

На рис. 3.8 показано зміну похибки при синусоїдальному сигналі завдання. Після завершення перехідного процесу спостерігаються усталені коливання, амплітуда яких відповідає гармонічній складовій похибки [17]. За результатами моделювання її значення становить приблизно 0,043 мм.

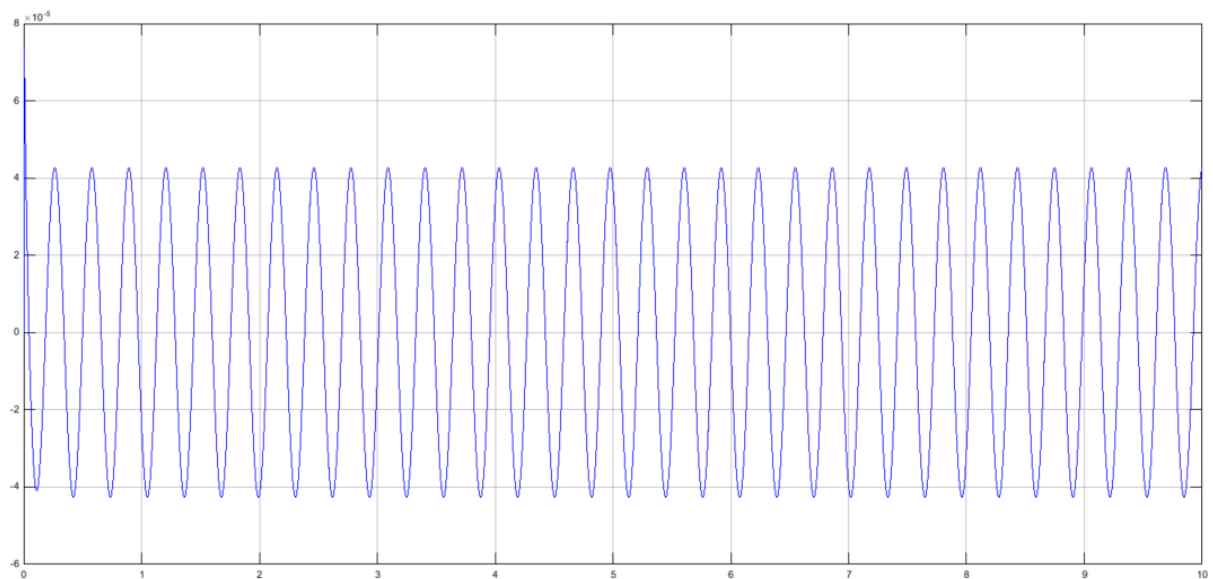


Рисунок 3.8 - Графік зміни помилки при синусоїдальному входному сигналі

Для оцінки динамічних характеристик системи на її вхід подається одиничний ступінчастий сигнал. Відповідна перехідна характеристика наведена на рис. 3.9.

За отриманою перехідною характеристикою визначено основні показники якості керування. Максимальне перерегулювання становить $\sigma_{max} = 4,41\%$, а час устанавлення перехідного процесу дорівнює $t_{set} = 3,12$ мс. Отримані значення відповідають вимогам, заданим під час синтезу системи, що підтверджує правильність обраних параметрів та працездатність розробленої системи керування.

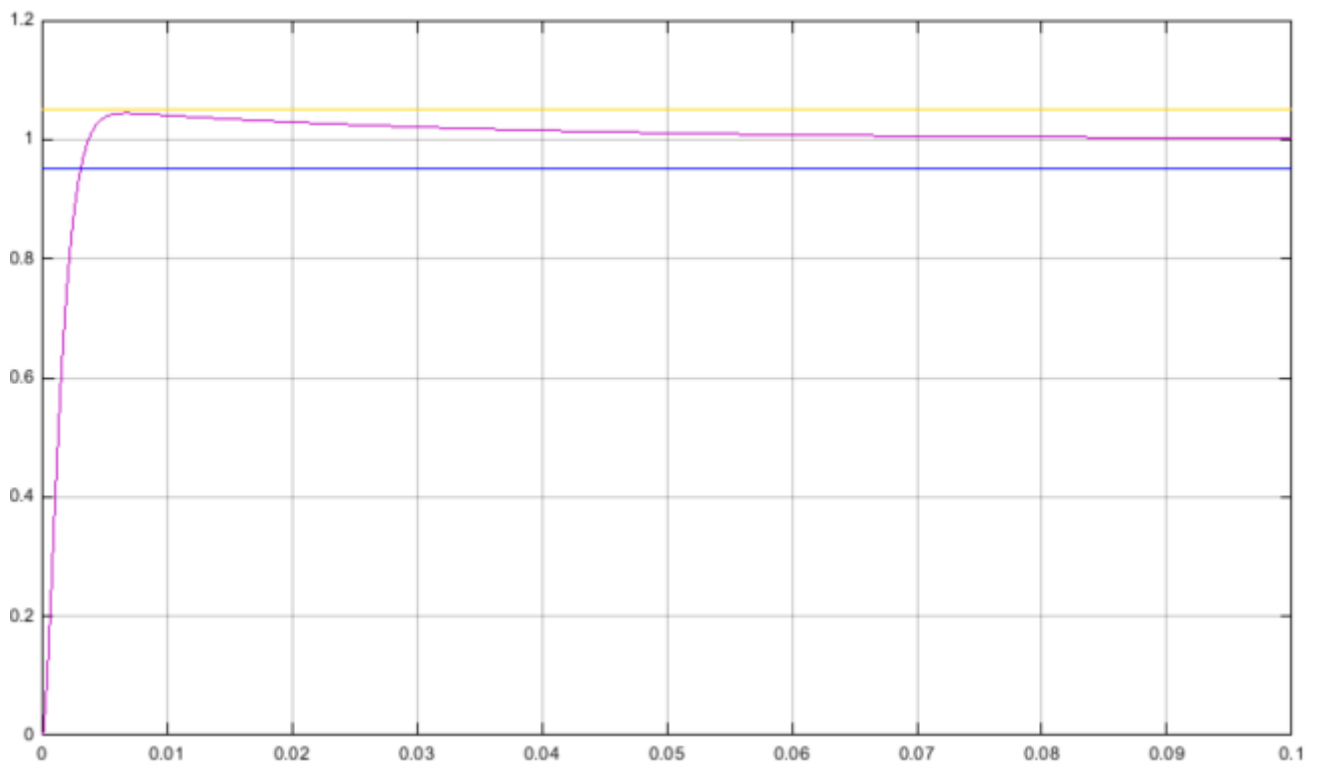


Рисунок 3.9 – Перехідна характеристика системи керування

Висновки за розділом

У ході моделювання було перевірено роботу системи керування електроприводом подачі фрезерного верстата в найбільш характерних

режимах. Для цього на вхід моделі подавалися лінійно зростаючий, синусоїдальний та ступінчастий сигнали, що дозволило оцінити як точність роботи системи, так і її динамічні властивості.

За перехідною характеристикою було визначено основні показники якості системи. Максимальне перерегулювання σ_{max} склало 4,41 %, а час перехідного процесу $t_{\text{п.п}} = 3,12$ мс. Отримані значення відповідають вимогам, які були задані на початку роботи.

Для забезпечення таких характеристик було виконано синтез коригувальних пристроїв та розраховано їх параметри. З урахуванням того, що система реалізується на базі мікроконтролера, передавальні функції коригувальних ланок були перетворені у дискретний вигляд методом відображення диференціалів.

Отримані результати показали, що система впевнено відпрацьовує задані сигнали. При лінійно зростаючому впливі усталена похибка відсутня, а при синусоїдальному сигналі амплітуда гармонійної складової похибки ε_h становить 0,043 мм, що менше допустимого значення 0,05 мм. Це свідчить про те, що вимоги до точності керування виконуються.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при налагодженні та обслуговуванні електроприводів фрезерного верстата

Виконання робіт, пов'язаних із налаштуванням, технічним обслуговуванням та експлуатацією електроприводів фрезерних верстатів, супроводжується впливом низки факторів, які можуть становити загрозу для здоров'я та безпеки працівників. Джерелом таких факторів є як саме технологічне обладнання, так і умови виробничого середовища, у яких здійснюються роботи [18].

Одним із найсуттєвіших ризиків є небезпека ураження електричним струмом. Під час роботи з силовими та керувальними електричними колами персонал контактує з елементами, що перебувають під напругою. Електроприводи верстатів зазвичай живляться від трифазної мережі напругою до 400 В, а наявність потужних силових модулів збільшує ймовірність виникнення аварійних режимів, зокрема коротких замикань, пошкодження ізоляції та випадкового дотику до струмоведучих частин.

Підвищена небезпека виникає під час монтажних і налагоджувальних операцій, коли необхідно виконувати підключення або переналаштування електрообладнання. У таких випадках працівник може працювати поблизу відкритих контактних з'єднань, клемних колодок та інших елементів електричної схеми. Додатковий ризик пов'язаний із використанням контрольно-вимірювальної апаратури, зокрема мультиметрів, осцилографів та тестерів. Порухення правил їх експлуатації або несправність приладів здатні призвести до появи небезпечних потенціалів, помилкових підключень чи виникнення струмів у вторинних колах.

Окрему увагу необхідно приділяти можливості накопичення електростатичних зарядів на металевих частинах обладнання. За відсутності ефективного заземлення або при пошкодженні системи захисного заземлення такі заряди можуть становити додаткову небезпеку як для працівників, так і для електронних компонентів системи керування.

З метою зниження рівня виробничого ризику необхідно забезпечити суворе виконання вимог електробезпеки, застосовувати справні засоби індивідуального захисту та використовувати інструмент, призначений для робіт в електроустановках. До таких засобів належать діелектричні рукавиці, ізолювальні килимки, захисне взуття та інструмент з електроізоляційним покриттям. Важливим елементом безпечної організації праці також є дотримання встановленого порядку проведення робіт та контроль технічного стану електрообладнання.

Не менш важливими є ризики механічного характеру, що виникають під час взаємодії працівника з рухомими вузлами верстатного обладнання та елементами системи електропривода. У процесі проведення налагоджувальних робіт, випробувань або технічного обслуговування можливе неконтрольоване переміщення робочих органів верстата, викликане помилками в налаштуваннях системи керування, збоями програмного забезпечення або випадковою подачею команди на запуск. За таких умов створюється небезпека травмування персоналу внаслідок зіткнення з рухомими деталями, потрапляння кінцівок у зони переміщення механізмів чи защемлення між конструктивними елементами обладнання.

Особливу увагу слід приділяти роботам, пов'язаним з обслуговуванням приводних механізмів, датчиків зворотного зв'язку та передавальних вузлів. Навіть після зупинки обладнання окремі деталі можуть зберігати запас механічної енергії, що здатне спричинити їх раптовий рух. Небезпеку також становлять обертові вали, муфти та інші

елементи трансмісії, контакт з якими може призвести до травм різного ступеня тяжкості.

Додатковим несприятливим фактором є вібрація, що виникає під час роботи високопродуктивних електроприводів і сервосистем. За тривалого впливу механічних коливань на організм працівника можуть розвиватися професійні захворювання, пов'язані з порушенням кровообігу та функціонування нервової системи верхніх кінцівок. Особливо це актуально для персоналу, який регулярно виконує діагностичні та ремонтні операції безпосередньо поблизу працюючого обладнання.

Практика експлуатації металообробних верстатів свідчить, що значна кількість виробничих травм пов'язана саме з недотриманням вимог безпеки під час роботи з рухомими механізмами. Для мінімізації ризику необхідно перед початком будь-яких робіт повністю відключати обладнання від джерел енергії, переводити систему керування в безпечний режим, використовувати штатні блокувальні пристрої та переконуватися у відсутності можливості самовільного запуску виконавчих механізмів

До групи шкідливих виробничих факторів, що супроводжують роботу електроприводів фрезерних верстатів, також належать акустичні навантаження, параметри мікроклімату, рівень освітленості робочих зон, а також можливі явища іонізації повітря поблизу силових електричних кіл і перетворювачів частоти.

Під час експлуатації сучасного фрезерного обладнання рівень шумового впливу нерідко перебуває в межах 80–90 дБ, особливо за умов інтенсивної роботи приводів та частих циклів прискорення і гальмування. Такий акустичний фон чинить негативний вплив на органи слуху, підвищує загальну втому працівника та при тривалому впливі може призводити до поступового зниження слухової чутливості. У зв'язку з цим перебування персоналу в зоні підвищеного шуму повинно супроводжуватися

використанням засобів індивідуального захисту органів слуху або обмеженням часу перебування в таких умовах.

Не менш важливим фактором є тепловий режим електрообладнання. Підвищення температури всередині електротехнічних шаф, яке може виникати внаслідок тривалої роботи під навантаженням або недостатнього повітрообміну, призводить не лише до погіршення умов праці, але й до прискореного зносу елементної бази. Найбільш чутливими до перегріву є електронні модулі керування, силові перетворювачі та клемні з'єднання. Перевищення допустимих температурних значень навіть на 10–15 °C суттєво скорочує термін служби обладнання та підвищує ймовірність відмов. Тому конструкція шаф повинна передбачати ефективні системи охолодження, зокрема примусову вентиляцію або термоконтроль.

Важливу роль відіграє також якість освітлення робочого місця. Недостатній рівень освітленості підвищує ризик помилок під час виконання монтажних і налагоджувальних операцій, зокрема при підключенні клемних з'єднань, заміні компонентів або зчитуванні інформації з індикаторних пристроїв. Для забезпечення безпечних умов праці освітленість у виробничих зонах має бути не нижчою за 500 лк, при цьому доцільним є застосування додаткового локального освітлення в області панелей керування.

Окремо слід відзначити можливі електрофізичні явища, що виникають у силових колах, зокрема поблизу високочастотних перетворювачів. За певних умов тут може спостерігатися локальна іонізація повітря з утворенням озону, який має подразнювальну дію на дихальні шляхи та слизові оболонки. Для зниження концентрації таких домішок необхідно забезпечувати ефективну вентиляцію та організовану систему повітрообміну в електротехнічних відсіках.

Окрім технічних і фізичних факторів, важливе значення мають також психофізіологічні навантаження, що виникають у процесі налаштування та

супроводу складних електромеханічних систем. Фахівець, який виконує обслуговування електроприводів фрезерного верстата, змушений одночасно контролювати значну кількість параметрів роботи обладнання, зокрема струмові навантаження, швидкісні режими та відхилення позиціонування. Така багатозадачність у поєднанні з високою відповідальністю призводить до накопичення розумової втоми, зниження концентрації уваги та погіршення точності прийняття рішень, особливо при тривалому безперервному виконанні робіт.

Найбільш виражено зазначені ефекти проявляються на етапах пусконаладження або під час ліквідації аварійних ситуацій, коли оператор працює в умовах дефіциту часу та підвищеного емоційного навантаження. Для зменшення впливу подібних факторів доцільним є впровадження автоматизованих систем контролю та діагностики, які знижують обсяг ручного аналізу параметрів, а також організація зміни персоналу при тривалих технологічних циклах.

Додатково слід враховувати вплив електромагнітних полів, що формуються в зоні роботи частотних перетворювачів та силових кабельних ліній із високочастотним широтно-імпульсним керуванням. Підвищений рівень електромагнітного випромінювання може становити потенційний ризик для осіб із кардіостимуляторами або іншими медичними імплантами, а також для працівників із підвищеною чутливістю до електромагнітних впливів.

З урахуванням зазначених аспектів, система охорони праці при експлуатації фрезерних верстатів з електроприводами повинна включати комплекс організаційних і технічних заходів. До них належать екранування джерел електромагнітного випромінювання, впровадження сучасних засобів автоматизації контролю, регулярні медичні огляди персоналу, а також систематичне проведення інструктажів щодо безпечної роботи з обладнанням підвищеної енергоємності

4.2. Розробка заходів з підвищення безпечності робіт під час експлуатації та налагодження автоматизованої системи керування електроприводами подач фрезерного верстата

Забезпечення безпечних Організація безпечних умов праці під час експлуатації та налаштування автоматизованих систем керування електроприводами подач фрезерного верстата є одним із визначальних елементів технологічної дисципліни в машинобудівному виробництві. З огляду на багатофакторний характер потенційних ризиків, що були розглянуті раніше, система забезпечення безпеки повинна формуватися на основі поєднання організаційних, технічних та інженерно-запобіжних рішень.

Першочергове значення має забезпечення електробезпеки персоналу. Для цього необхідно передбачити надійне захисне заземлення всіх струмопровідних і металевих елементів обладнання, включаючи корпуси електроприводів, шафи керування та панелі електроавтоматики. Додатково в колах живлення доцільно встановлювати пристрої захисного відключення (ПЗВ), які забезпечують автоматичне вимкнення системи у разі виникнення струмів витоку або аварійних режимів роботи.

Виконання монтажних, діагностичних і налагоджувальних операцій повинно здійснюватися виключно за умови повного знеструмлення обладнання та підтвердженої відсутності напруги в силових і допоміжних колах. З метою підвищення рівня безпеки слід застосовувати організаційні засоби блокування доступу до електротехнічних шаф, що унеможлиблюють їх відкривання без попереднього відключення живлення та фіксації механічного блокування.

Окремо рекомендується передбачити заходи щодо безпечного розряду накопиченої енергії в електронних елементах приводів. Це може

бути реалізовано шляхом використання вбудованих розрядних кіл, зокрема резисторів, які забезпечують контрольоване зниження залишкової напруги після вимкнення живлення. Такі рішення дозволяють мінімізувати ризик ураження електричним струмом під час обслуговування та підвищують загальний рівень безпеки експлуатації системи.

Для підвищення рівня безпеки під час проведення діагностичних і налагоджувальних робіт усі елементи схеми, призначені для контролю параметрів, повинні мати зрозуміле маркування та ідентифікацію. Проведення вимірювань дозволяється лише із застосуванням справних вимірювальних приладів і спеціального інструменту з електроізоляційним покриттям. Перед виконанням операцій, пов'язаних зі зміною налаштувань привода або коригуванням програмних параметрів системи керування, працівник повинен пройти відповідний інструктаж і бути офіційно допущеним до виконання робіт підвищеної небезпеки. Факт допуску підтверджується відповідними записами у виробничій документації.

Для виключення випадкового запуску обладнання доцільно застосовувати багаторівневу систему захисту. Її основу складає поєднання механічного блокування, програмного заборонення подачі команд на запуск та незалежного аварійного вимкнення. Такий підхід забезпечує додатковий контроль стану обладнання та значно знижує ймовірність помилкового пуску під час проведення сервісних операцій.

Безпечна робота механічних вузлів забезпечується використанням систем взаємного блокування між захисними пристроями та приводами подач. У разі відкриття захисних огорожень або доступу до робочої зони верстата система автоматично переводить механізми в безпечний режим, припиняючи подачу керувальних сигналів на виконавчі приводи. Для реалізації такого алгоритму можуть використовуватися кінцеві вимикачі або інші датчики контролю положення, сигнали яких обробляються контролером керування.

Додатковий рівень захисту створює механічна фіксація рухомих вузлів під час сервісного обслуговування. Блокування валів, гвинтових передач або інших виконавчих механізмів запобігає їх випадковому переміщенню та дозволяє безпечно виконувати ремонтні й регулювальні роботи. Проведення демонтажу, налаштування або заміни окремих елементів допускається лише після переведення обладнання в сервісний режим та активації всіх передбачених засобів блокування.

Для оперативного контролю технічного стану система керування повинна бути оснащена світловою індикацією основних режимів роботи. Відображення інформації про наявність живлення, готовність привода до роботи та активність механізмів подач дозволяє персоналу швидко оцінити поточний стан обладнання та уникнути помилкових дій.

Суттєву роль у забезпеченні безпеки відіграють засоби автоматичної діагностики. У разі виявлення несправностей, перевищення допустимих параметрів або виникнення аварійних режимів система повинна автоматично блокувати подальшу роботу, реєструвати інформацію про подію та повідомляти оператора про характер виявленої проблеми. Це дає можливість своєчасно реагувати на відхилення та запобігати розвитку небезпечних ситуацій.

Для зниження негативного впливу механічних коливань рекомендується застосовувати віброзахисні опори, демпфувальні елементи та інші технічні засоби, які зменшують передачу вібрації від приводів до несучих конструкцій.

Під час експлуатації сервоприводів, які переміщують вузли зі значною масою, доцільно використовувати програмні алгоритми керування розгоном і гальмуванням. Такі алгоритми забезпечують плавну зміну швидкості руху виконавчих механізмів, зменшують динамічні навантаження на кінематичні ланцюги та знижують ймовірність

виникнення ударних явищ, що можуть негативно впливати як на обладнання, так і на безпеку персоналу.

Важливою складовою системи охорони праці є підготовка обслуговуючого персоналу. Працівники, які виконують роботи з електроприводами та автоматизованими системами керування, повинні регулярно проходити навчання та перевірку знань з питань безпечної експлуатації обладнання. До програми підготовки доцільно включати не лише вивчення нормативних вимог, а й відпрацювання практичних навичок із розглядом характерних аварійних ситуацій та типових помилок, що допускаються під час обслуговування.

Особливу увагу необхідно приділяти забезпеченню належних санітарно-гігієнічних умов у виробничому приміщенні. Для підтримання безпечного повітряного середовища рекомендується застосовувати ефективні вентиляційні системи, які забезпечують видалення пилу, технологічних аерозолів та продуктів, що можуть утворюватися внаслідок роботи силового електрообладнання. Температура повітря в зоні експлуатації верстата повинна підтримуватися в межах від +15 до +25 °C, а відносна вологість не повинна перевищувати 70 %, що сприяє стабільній роботі електронних пристроїв та запобігає утворенню конденсату.

Для виконання монтажних, діагностичних і ремонтних робіт необхідно забезпечити достатній рівень освітлення. Робочі місця повинні мати освітленість не нижче 500 лк, а в місцях розташування клемних з'єднань, електронних модулів і панелей керування доцільно використовувати додаткові локальні джерела світла.

У виробничих умовах, де рівень шуму перевищує допустимі значення, персонал повинен застосовувати індивідуальні засоби захисту слуху. Використання протишумових навушників або вкладишів дозволяє зменшити негативний вплив акустичних навантажень і підтримувати належний рівень працездатності працівників протягом зміни.

При експлуатації частотних перетворювачів та іншого обладнання, що створює електромагнітні поля підвищеної інтенсивності, доцільно впроваджувати додаткові заходи захисту. До таких заходів належать екранування джерел випромінювання, раціональне планування виробничого простору та виділення окремих зон для технічного обслуговування електрообладнання. Особи, які працюють у таких умовах, повинні проходити попередні та періодичні медичні огляди відповідно до встановлених вимог.

Для зменшення психоемоційного навантаження процес налагодження та діагностики обладнання бажано максимально стандартизувати. Використання покрокових інструкцій, контрольних списків і цифрових алгоритмів виконання операцій дозволяє скоротити кількість помилок та підвищити ефективність роботи персоналу. Під час тривалих налагоджувальних робіт доцільно організовувати чергування працівників і використовувати засоби дистанційного моніторингу, які дають можливість контролювати технічний стан обладнання без постійної присутності біля верстата.

Застосування комплексу організаційних, технічних та санітарно-гігієнічних заходів забезпечує високий рівень безпеки під час експлуатації електроприводів фрезерного верстата. Впровадження таких рішень сприяє зниженню виробничих ризиків, підвищенню надійності роботи обладнання та створенню сприятливих умов для його тривалої безаварійної експлуатації.

ВИСНОВКИ

У межах цього проекту розроблено та досліджено систему автоматизованого керування електроприводами подач для фрезерних верстатів, ключовим елементом якої став серводвигун моделі BMH1401P21F1A.

На основі розрахованих параметрів електропривода створено його математичну модель, що дало змогу детально проаналізувати динамічні властивості системи. Завдяки уніфікації електромеханічної частини верстата, побудована модель є релевантною для всіх осей подач і не потребує структурних змін при масштабуванні. Архітектура мікропроцесорного керування базується на мікроконтролері, який координує взаємодію силових пристроїв, виконавчих механізмів, засобів зворотного зв'язку та контурів формування траєкторії.

Особливу увагу в роботі приділено забезпеченню високої якості регулювання, для чого було синтезовано дискретні передавальні функції, повністю готові до програмної реалізації на мікроконтролерній платформі.

Тестування системи в середовищі Simulink підтвердило її стійкість і відповідність сучасним стандартам металообробки. Перехідні процеси завершуються всього за $t_{п.п} = 3,122$ мс із максимальним перерегулюванням до $\sigma_{max} = 4,41\%$, а усталені похибки за швидкістю та моментом повністю відсутні при гармонійній похибці у $\varepsilon_h = 0,043$ мм. Створена САК є готовим підґрунтям для реального виробничого впровадження, чому також сприяє сформований комплекс заходів із техніки безпеки та охорони праці. В роботі також розглянуто питання охорони праці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Теряєв В.І. Електромеханічні системи автоматизації в металообробці: Навчальний посібник. К:КПІ. – 2024. – 337 с. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/items/b9e8343c-2707-48b4-a9da-bc38d372f9c9>
2. Фрезерний верстат: від деталей до майстерності: <https://cikavosti.com/frezernyj-verstat-vid-detalej-do-majsternosti/>
3. Чернишов О.В., інж. Шушура М.В. Фрезерний верстат. Устрій, налагодження і робота – Д: ДДТУ, 2019. – 8 с. Режим доступу: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/1/1/1-1-lr30.pdf>
4. Типи фрезерних верстатів та їх можливості: <https://mirtels.com.ua/ua/statti/typy-frezernykh-verstativ-ta-ikh-mozhlyvosti>
5. Класифікація верстатів фрезерної групи: <https://b2b.imperija.com/ua/klassifikatsiya-stankov-frezernoy-gruppy.html>
6. Веселовська Н. Р. д.т.н., доц. Аналіз сучасного стану верстатних комплексів – В:ВНАУ, 2019. – 8 с. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/60b5b348-29b7-4f57-9c63-6798efa56c61/content>
7. Характеристики електродвигуна ВМН1401Р21F1А: <https://www.se.com/il/en/product/BMH1401P21F1A/servo-motor-bmh-10-3-nm-4000-rpm-untapped-shaft-with-brake-ip65-ip67/?filter=business-1-industrial-automation-and-control&selectedNodeId=12367265027>
8. EtherCAT: <https://habr.com/ru/articles/516624/>

9. CANopen: <https://ru.wikipedia.org/wiki/CANopen>
10. RS-485: <https://trc.com.ua/ua/pidtrymka/osoblyvosti-vykorystanniinterfeisu-rs-485>
11. вертикально-фрезерний верстат моделі 65A60Ф1
https://stanki-katalog.ru/sprav_65a60f1.htm
12. Програмування ПЛК в CODESYS : навчальний посібник. Х: ФОП Панов А. М., 2019. 92 с.
<https://openarchive.nure.ua/entities/publication/04bdbfcabaf7-4278-aaf5-b19087556512>
13. Метод білінійного z-перетворення:
<https://studfile.net/preview/10086480/page:52/>
14. Метод узгодженого z-перетворення:
<https://studfile.net/preview/10086480/page:49/>
15. MATLAB Simulink: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Simulink>
16. Черно, О. О. Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Проектування системи автоматичного керування суднового вантажного маніпулятора» : у 2 ч. Частина 1. Теоретичні основи та методика проектування [Ел. ресурс] / О. О. Черно, А. П. Гуров, О. Г. Васильєв. – Миколаїв : НУК, 2018. – 31 с.
17. Інструкція з охорони праці № 131 під час роботи на фрезерних верстатах: <https://dnzkvpu.org.ua/news/14-47-09-03-09-2022/>