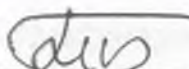


Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри


(підпис)

І. С. Білюк

«20» 12 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва спеціальності)

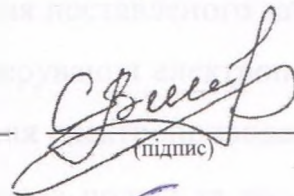
освітня програма Електромеханічні системи автоматизації та електропривод
(назва освітньої програми)

на тему: Система керування серводвигуном привода подачі верстата

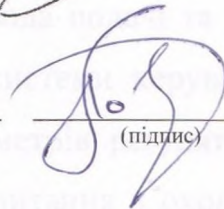
Виконав: студент групи 6371мз
Дзьонь Віктор Ігорович
(прізвище, ім'я, по батькові)


(підпис)

Керівник доц. каф. автоматики, к.е.н.,
Шевчук С. В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

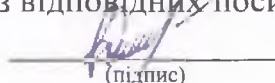

(підпис)

Рецензент доц. каф. СЕЕС, к.т.н.,
доц. Новогрецький С. М.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент


(підпис)

м. Миколаїв – 2024 року

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 87 с., 4 р., 25 рис., 11 табл., 1 дод., 12 джерел.

Ключові слова: векторне керування, моделювання, перехідна характеристика, привод подачі, синхронний електропривод.

Об'єкт дослідження – перехідні процеси в електроприводі подачі верстата на основі синхронного двигуна з постійними магнітами.

Мета роботи – синтез системи керування серводвигуном привода подачі верстата.

Методи дослідження – моделювання перехідних процесів в електроприводі подачі верстата на основі синхронного двигуна з постійними магнітами з використанням сучасної теорії автоматичного керування та електропривода, імітаційне моделювання в MATLAB, обробка та аналіз отриманих результатів.

У першому розділі розглянуто компонування, технічні характеристики та електрообладнання верстата 16A20Ф3. Проведено аналіз систем керування електроприводів подач верстатів. Розділ 2 містить вибір та обґрунтування методу наукового дослідження, алгоритм дослідження та метод розв'язання поставленого завдання. У розділі 3 наведено функціональну схему системи керування електропривода подачі. Обґрунтовано вибір елементів системи керування електропривода. Розроблено структурну схему системи керування електропривода подачі та розраховано параметри її елементів. Проведено моделювання системи керування електропривода подачі в MATLAB. Досліджено вплив параметрів регуляторів електропривода на якість керування. В розділі 4 розглянуті питання з охорони праці. Додаток містить слайди мультимедійної презентації.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ	6
1.1 Компонування та технічні характеристики верстата 16A20Ф3	6
1.2 Електрообладнання верстата 16A20Ф3	13
1.3 Аналіз систем керування електроприводів подач верстатів	15
1.4 Висновки до розділу 1	21
2 ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ І ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	23
2.1 Вибір та обґрунтування методу наукового дослідження.....	23
2.2 Розробка алгоритму дослідження.....	25
2.3 Вибір методів розв’язання поставленої задачі.....	27
2.4 Висновки до розділу 2	30
3 АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	31
3.1 Вибір та обґрунтування елементів системи керування електропривода	31
3.2 Побудова структурної схеми системи керування електропривода	47
3.3 Моделювання системи керування електропривода в MATLAB.....	63
3.4 Висновки до розділу 3	70
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	71
4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів.....	71
4.2 Розрахунок захисного заземлення.....	76
4.3 Заходи щодо техніки безпеки	79
4.4 Висновки до розділу 4	83
ВИСНОВКИ.....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	86
ДОДАТОК А. Мультимедійна презентація.....	88

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних високоточних металорізальних верстатах і автоматизованих оброблювальних центрах встановлюються два або більше електроприводів. Розрізняють приводи головного руху, руху подачі і допоміжних рухів. Приводи подач забезпечують точність і чистоту обробки деталі і одночасно продуктивність обладнання, оскільки від них залежить як точність взаємного позиціонування інструменту і оброблюваної деталі, так і швидкість переміщення інструменту при зміні операцій. До двигунів приводів подач пред'являються високі вимоги щодо широти діапазону регулювання частоти обертання, лінійності регулювальних характеристик, швидкодії, здатності витримувати високі перевантаження за струмом та моментом. В даний час на ринку приводів для комплектації верстатного привода можна зустріти приводи на крокових двигунах, двигунах постійного струму, частотно-регульований привод, а також вентильний сервопривод на основі синхронних машин із збудженням від постійних магнітів.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є синтез системи керування серводвигуном привода подачі верстата. Щоб досягти поставленої мети, слід розв'язати наступні завдання:

- 1) розглянути компоновання, технічні характеристики та електрообладнання верстата 16A20Ф3. Проаналізувати системи керування електроприводів подач верстатів;
- 2) скласти функціональну схему системи керування електропривода подачі. Обґрунтувати вибір елементів системи керування електропривода;
- 3) побудувати структурну схему системи керування електропривода подачі та виконати розрахунок параметрів її елементів;
- 4) провести моделювання системи керування електропривода подачі в MATLAB та дослідити вплив параметрів регуляторів на якість керування.

Об'єкт дослідження. Перехідні процеси в електроприводі подачі верстата на основі синхронного двигуна з постійними магнітами.

Предмет дослідження. Параметри регуляторів системи керування електропривода подачі верстата, які впливають на якість керування.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження виконані із залученням сучасної теорії електропривода, методів теорії автоматичного керування та комп'ютерного моделювання в MATLAB.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Компонування та технічні характеристики верстата 16A20Ф3

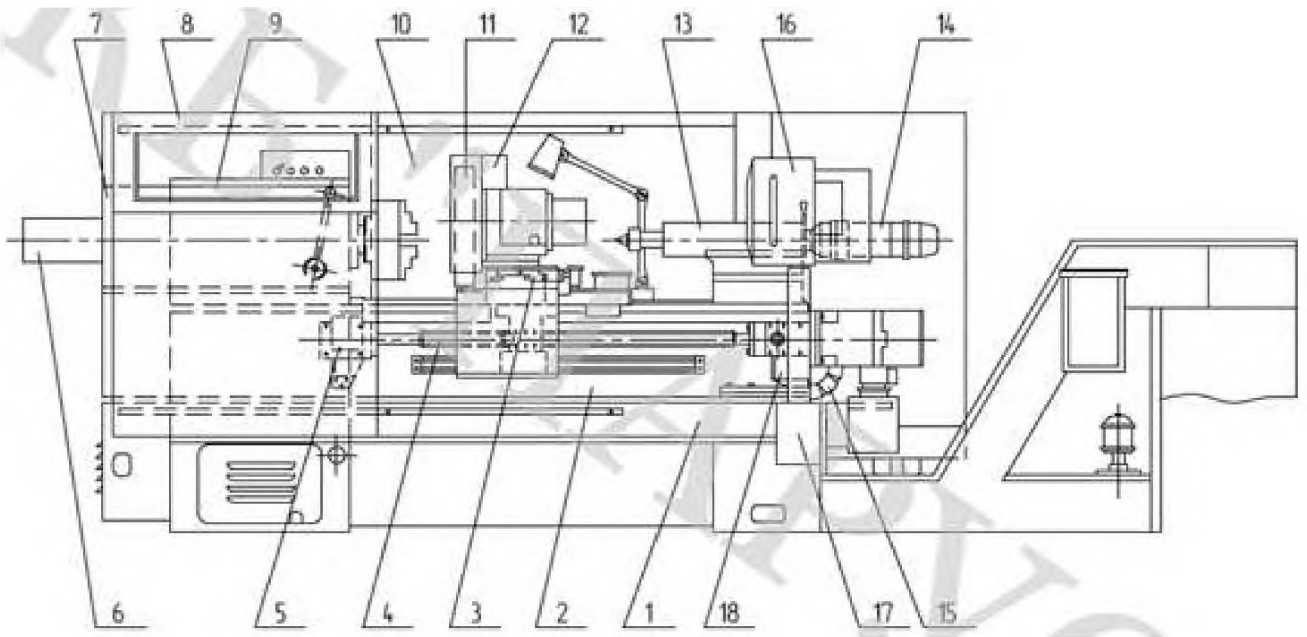
Металорізальні верстати являються розповсюдженими виробничими машинами, що призначені для механічної обробки заготовки з металу ріжучими інструментами. Шляхом зняття стружки заготовці задаються необхідна форма, розміри і чистота поверхні. В залежності від характеру робіт, що виконуються, виду застосовуваних інструментів і форми утворюваної поверхні металорізальні верстати підрозділяються на дев'ять груп, серед яких можна виділити верстати токарної групи.

Токарний верстат з ЧПК 16A20Ф3 призначений для токарної обробки у напівавтоматичному режимі зовнішніх і внутрішніх поверхонь деталей типу тіл обертання зі ступеневим і криволінійним профілем різної важкості.

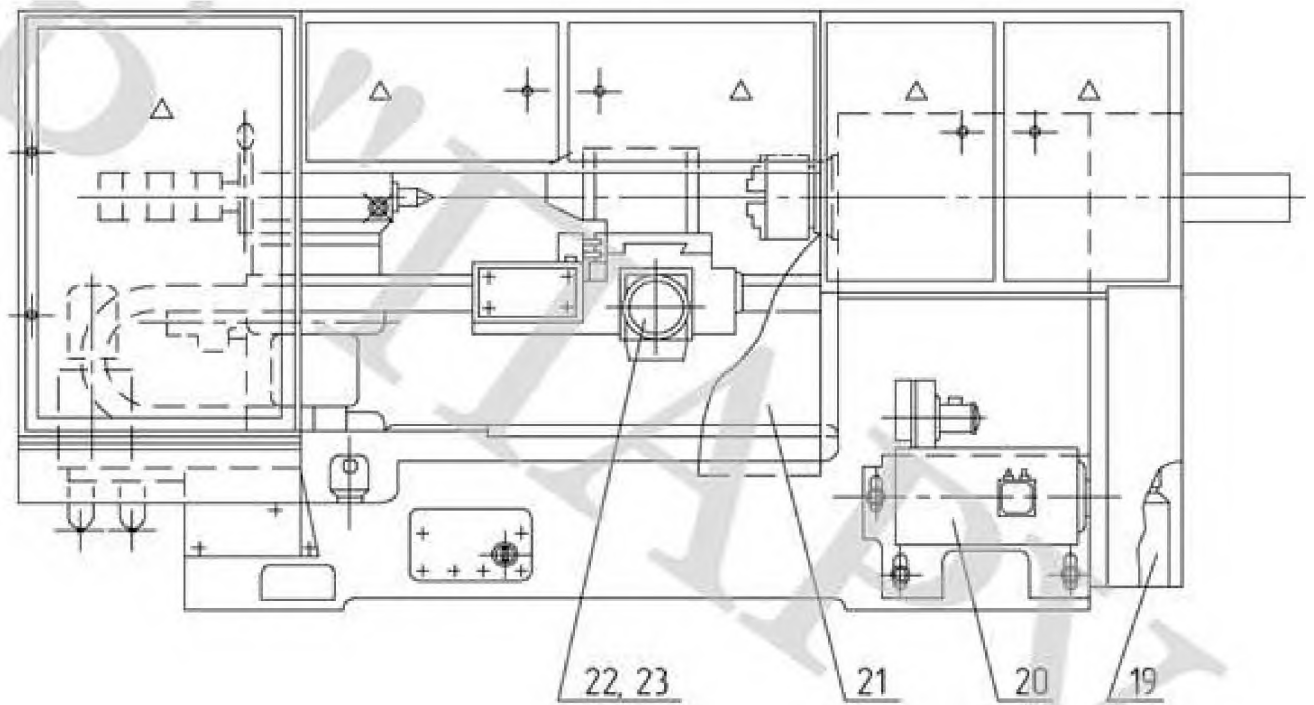
Загальний вигляд верстата моделі 16A20Ф3 і розташування складових частин показані на рисунках 1.1 та 1.2. Склад обладнання верстата приведений в таблиці 1.1. Основні технічні дані і характеристики верстата моделі 16A20Ф3 приведені в таблиці 1.2 [2].



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд верстата моделі 16A20Ф3



а)



б)

Рисунок 1.2 – Компонування верстата:

а – вид спереду, б – вид ззаду

Таблиця 1.1 – Перелік складових елементів верстата

Номер позиції на рисунку 1.2	Найменування
1	Основа з транспортером стружки
2	Станина
3	Супортна група
4	Передача гвинт-гайка кочення (ГГК) поздовжнього переміщення
5	Опора ліва гвинта поздовжнього переміщення
6	Патрон механізований з електромеханічним приводом
7	Огорожа нерухома
8	Огорожа рухома
9	Бабка шпindelьна
10	Шафи керування
11	Головка автоматична
12	Огорожа супортної групи
13	Бабка задня
14	Електромеханічний привод пінолі задньої бабки
15	Розводка комунікацій
16	Пульт керування
17	Кронштейн пульта керування
18	Опора права гвинта поздовжнього переміщення
19	Станція мастила шпindelьної бабки
20	Установка моторна
21	Огорожа задньої зони
22	Привод поперечного переміщення
23	Передача ГГК поперечного переміщення

Область застосування верстата: дрібносерійне і серійне виробництво.

Використовуються високоефективні технологічні способи обробки елементарних поверхонь:

- обробка широкими різцями із поперечною подачею;
- обточування фасонними різцями зовнішніх і внутрішніх поверхонь;
- застосування різьбонарізних голівок і т.д.

Застосовується концентрація обробки заготовки декількома інструментами одночасно: двома і більше різцями, різцями і свердлом і т.п. Поєднання вказаних та інших прийомів дозволяє швидко і точно вести обробку, компенсує витрати на налагодження автомата і скорочує трудові витрати на виготовлення партії деталей.

Особливості конструкції:

- високоміцна станина, що виконана литтям із чавуну марки СЧ20 з термообробленими шліфованими напрямними забезпечують довготривалий строк служби і підвищену точність обробки;
- привод головного руху, який включає в себе головний двигун 11 кВт і шпиндельну бабку забезпечує найбільший обертальний момент до 800 Н·м;
- високоточний шпиндель з отвором 55 мм (на замовлення 64 мм), який дозволяє оброблювати деталі із пруткового матеріалу, зона обробки може бути оснащена як лінійною наладкою, так і револьверною головкою, в залежності від вимог покупця;
- надійний захист кулько-гвинтових пар забезпечує довговічність роботи механізмів переміщення по координатам X і Z, верстат оснащується системами ЧПК і електроприводами, як вітчизняного виробництва, так і виробництва зарубіжних фірм.

Таблиця 1.2 – Технічна характеристика верстата моделі 16A20Ф3

Найменування параметра	Значення
Клас точності верстата по ГОСТ 8-82	П
Найбільший діаметр виробу, встановлюваного над станиною, мм	500
Найбільший діаметр оброблюваного виробу, мм:	
– над станиною	320
– над супортом	200
Найбільша довжина оброблюваного виробу, мм	750
Найбільша довжина встановлюваного виробу в центрах, мм	1000
Діаметр циліндричного отвору в шпинделі, мм	55
Найбільший хід супорта, мм:	
– поперечний	210
– поздовжній	905
Максимальна рекомендована швидкість робочої подачі мм/хв:	
– поздовжньої	2000
– поперечної	1000
Мінімальна швидкість робочої подачі, мм/хв:	
– поздовжньої	10
– поперечної	5
Кількість керованих координат	2
Кількість одночасно керованих координат	2
Найбільше зусилля поздовжньої подачі, Н (кг)	10000 (1000)
Точність позиціювання, мм	0,01
Повторюваність, мм	0,003
Діапазон частот обертання шпинделя, хв ⁻¹	20...2500
Максимальна швидкість швидких переміщень, м/хв:	
– поздовжніх	15
– поперечних	7,5

Продовження таблиці 1.2

Найменування параметра	Значення
Найбільший крутний момент на шпинделі не менше, Нм (кгм)	800 (80)
Межі частот обертання шпинделя в трьох перемикальних вручну діапазонах:	
– I	20-285
– II	60-830
– III	175-2500
Габаритні розміри верстата, мм:	
– довжина	3700
– довжина (з транспортером відводу стружки)	5160
– ширина	2260
– висота	1650
Маса верстата (без транспортера відводу стружки), кг	4000

Кінематична схема верстата моделі 16A20Ф3 показана на рисунку 1.3. В якості привода головного руху використовують електродвигун $M1$ ($N=11$ кВт, $n=1460$ об⁻¹).

Від двигуна $M1$ через клинопасну передачу з діаметрами шківів $D=115$ мм і $D=257$ мм обертання передається на вал I шпиндельної бабки, а потім через зубчаті колеса 1 і 3 на вал II. Далі забезпечується три діапазони частоти обертання шпинделя (20-285; 60-830; 175-2500 об/хв). В межах кожного діапазону частота обертання регулюється безступінчасто шляхом зміни частоти обертання електродвигуна $M1$.

Датчик різьбонарізання (ДР) зв'язаний зі шпинделем непроміжною зубчатою парою $z=61-61$, здійснює зв'язок між шпинделем і ходовим гвинтом, виходячи із умови, що за один оберт шпинделя різець повинен переміститися на величину кроку нарізуваної різьби. Зубчаті колеса 9 та 10 служать для обертання датчика ВЕ-178А різьбонарізання.

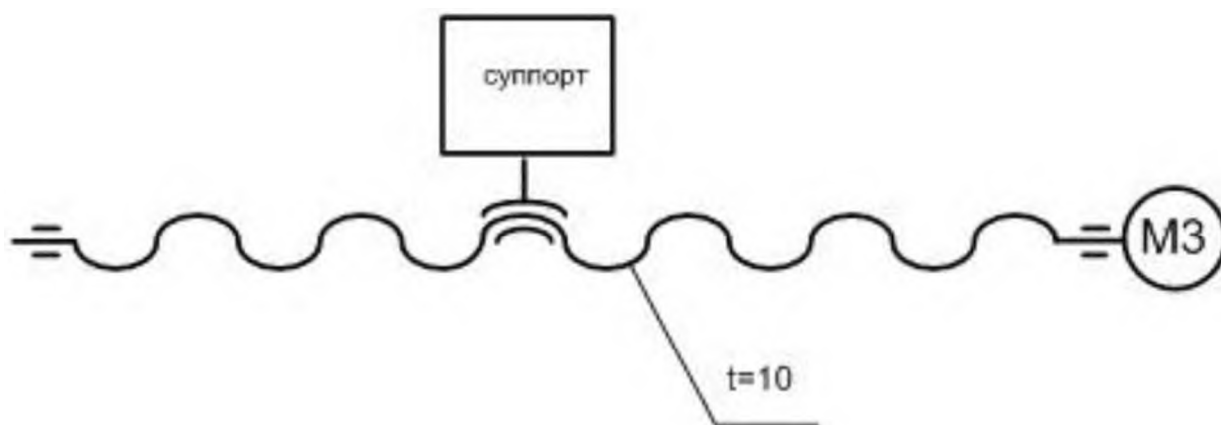


Рисунок 1.4 – Кінематична схема поздовжньої подачі

1.2 Електрообладнання верстата 16А20Ф3

Електрообладнання включає в себе:

- пристрій числового програмного керування (ПЧПК) для керування циклом обробки деталі;
- електропривод асинхронний глибоко регульований комплектний для керування приводами подач і приводом головного руху;
- електродвигуни для керування приводами різцетримача, патрона, охолодження, пінолі, мастила напрямних, мастила шпиндельної бабки, транспортера стружковидалення;
- фотоімпульсні датчики контролю переміщення по осях і різьбонарізання;
- апарати захисту, керування і сигналізації;
- інші апарати і пристрої, які здійснюють комутацію, під'єднання електричних ланцюгів і керування механізмами.

В таблиці 1.3 приведені основні технічні параметри електрообладнання верстата 16А20Ф3 [3].

Таблиця 1.3 – Технічна характеристика електрообладнання

Найменування параметра	Значення
Вид струму живлячої мережі	змінний
	трифазний
Напруга, В	380
Частота струму, Гц	50
Напруга ланцюга керування, В	110; 24
Напруга ланцюга місцевого освітлення, В	24
Кількість електродвигунів на верстаті	7
Тип електродвигуна головного руху	4АБ2П132М4ПБ
Номінальна потужність електродвигуна головного руху, кВт	11
Номінальна частота обертання електродвигуна головного руху, хв ⁻¹	1500 або 1000 (НРБ)
Діапазон регулювання частоти обертання електродвигуна головного руху	1500...4500 або 1000...3500 (НРБ)
Тип електродвигунів приводів подач: – поздовжньої – поперечної	4АХБ2П100 4АХБ2П100
Номінальний крутний момент електродвигунів приводів подач, Н·м (кг·м): – поздовжньої – поперечної	23 (2,3) 17 (1,7)
Сумарна потужність всіх електродвигунів, кВт	21,4
Сумарна споживана потужність, кВт (з урахуванням приводів і ПЧПК)	24

Електрообладнання верстата працює від мережі трифазного змінного струму з напругою 380 В (+10 %; мінус 15 %) і частотою 50 Гц (+2 %; мінус 2 %) з глухозаземленою нейтраллю.

Всі металеві частини верстата (станина, корпуси електродвигунів, каркас шаф, пульт керування і т.д.), які можуть опинитися під напругою вище 42 В – заземлені. Токарний верстат з ЧПК 16A20Ф3 оснащений комплектним електроприводом “Розмір 2М-5-21/11”. Дві серії імпульсних сигналів Sin і Cos з фазовим зсувом 90 ел. градусів несуть інформацію про величину і напрям переміщення. За один оберт валу двигуна видається 2000 або 1000 імпульсів в залежності від виконання привода. Сигнал нуль-мітки НМ видається два рази за один оберт валу двигуна та використовується в ПЧПК для формування міток початку відліку. Пульт керування змонтовано на поворотному кронштейні, який закріплений на основі верстата обертається оператором при налагодженні верстата в зручне для нього положення, в залежності від довжини оброблюваного виробу. На пульті змонтовані панелі з органами керування верстатом, а також клавіатура ПЧПК (на відкидній панелі), обчислювальний блок і оперативний запам'ятовувальний пристрій зовнішньої пам'яті ПЧПК “Електроніка НЦ-31” або блок відображення символічної інформації ПЧПК 2Р22 або ПЧПК МС2101. Органи керування на панелях, робота з клавіатурою описана в супровідній документації на ПЧПК і інструкціях по програмуванню.

1.3 Аналіз систем керування електроприводів подач верстатів

Приводи подач є одними із основних вузлів, що визначають точність і продуктивність верстатів з ЧПК. У зв'язку з тим, що ПЧПК практично безінерційно формує сигнали керування приводом, як в режимі руху по заданій траєкторії, так і в режимі позиціонування (зупинки в заданій координаті), вирішальне значення для забезпечення точності визначають характеристики і параметри привода подачі з урахуванням особливостей кінематичного ланцюга привода [3].

По мірі вдосконалення ПЧПК, підвищення точності датчиків положення, збільшення жорсткості і точності механічних вузлів верстата підвищуються вимоги до швидкодії і точності приводів подачі. Слід виділити три типи електроприводів, розроблених спеціально для механізмів подачі верстатів з ЧПК:

- електроприводи постійного струму з високомоментними двигунами, які мають збудження від постійних магнітів;
- електроприводи змінного струму з синхронними (вентильними) двигунами, які мають ротор з постійними магнітами;
- електроприводи змінного струму з асинхронними двигунами з короткозамкненою обмоткою ротора.

Порівняння вищенаведених видів приводів подачі показує:

- електроприводи постійного струму через наявність в них двигуна постійного струму із складним і малонадійним щітково-колекторним вузлом поступають по точності, швидкодії і надійності іншим двом варіантам привода;
- електроприводи з синхронним (вентильним) двигуном мають найкращі технічні характеристики;
- електроприводи з асинхронним двигуном також являються найбільш перспективними. Асинхронні двигуни, незначно поступаючись синхронним (вентильним) двигунам за масогабаритними показниками, мають значно низьку вартість і трудомісткість виготовлення. В асинхронних двигунах використовується більш дешева і технологічна короткозамкнена обмотка ротора. В синхронних (вентильних) двигунах використовується ротор з магнітами із рідкоземельних матеріалів.

Використання електроприводів з синхронним (вентильним) двигуном дозволяє значно спростити конструкцію механізму подачі і усунути необхідність використання редуктора в кінематичному ланцюзі. У сучасних механізмах подачі верстатів з ЧПК вал двигуна через муфту приєднується до вала гвинта кульково-гвинтової пари (КГП), а гайка КГП жорстко з'єднана з виконавчим органом верстата (координатний стіл, супорт, револьверна голівка і т.п.).

Привод подачі має два датчики зворотного зв'язку – за швидкістю (тахогенератор) і за положенням (круговий чи лінійний). В перспективних цифрових еле-

ктроприводах подачі датчик швидкості відсутній, так як швидкість обчислюється, як відношення шляху до часу (обчислення здійснюється безпосередньо у цифровій системі керування). Тахогенератор завжди встановлюється на вал двигуна (деякі двигуни подачі виготовляються із вбудованим тахогенератором, і/або круговим датчиком положення, та/або електромагнітним гальмом для механічної фіксації нерухомої координати). Існують три варіанта реалізації зворотного зв'язку за положенням в залежності від установки датчика (датчиків) положення в кінематичному ланцюзі привода. На рисунку 1.5 приведені слідкувальні приводи із напівзамкненим, замкненим та гібридним контуром зворотного зв'язку за положенням [4]. На рисунку прийняті наступні позначення: 1 – основний блок ПЧПК, 2 – вузол керування приводом, 3 – блок привода, 4 – двигун подачі, 5 – тахогенератор, 6 – стіл верстата, 7 – круговий датчик зворотного зв'язку за шляхом, 8 – лінійний датчик зворотного зв'язку за шляхом, 9 – завдання переміщення, 10 – блок програмного або апаратного порівняння, 11 – завдання додаткового переміщення, 12 – блок підсумовування.

У верстатах нормальної точності, які забезпечують точність позиціювання ± 10 мкм, можливе застосування напівзамкненого контуру зворотного зв'язку за положенням. В цьому випадку круговий датчик положення встановлюється на вал двигуна, а КГП не охоплена зворотним зв'язком. Це призводить до того, що похибка КГП переноситься на виріб. Систематичну складову цієї похибки, яка повторюється стабільно, можна компенсувати за допомогою заздалегідь програмованих компенсуючих сигналів.

У прецизійних верстатах безпосередньо на виконавчому механізмі подачі (координатний стіл) верстата встановлюється високоточний лінійний датчик. Така структура являється замкненою за положенням. При даній схемі зазори в кінематичному ланцюзі і пружні деформації впливають на коливання привода.

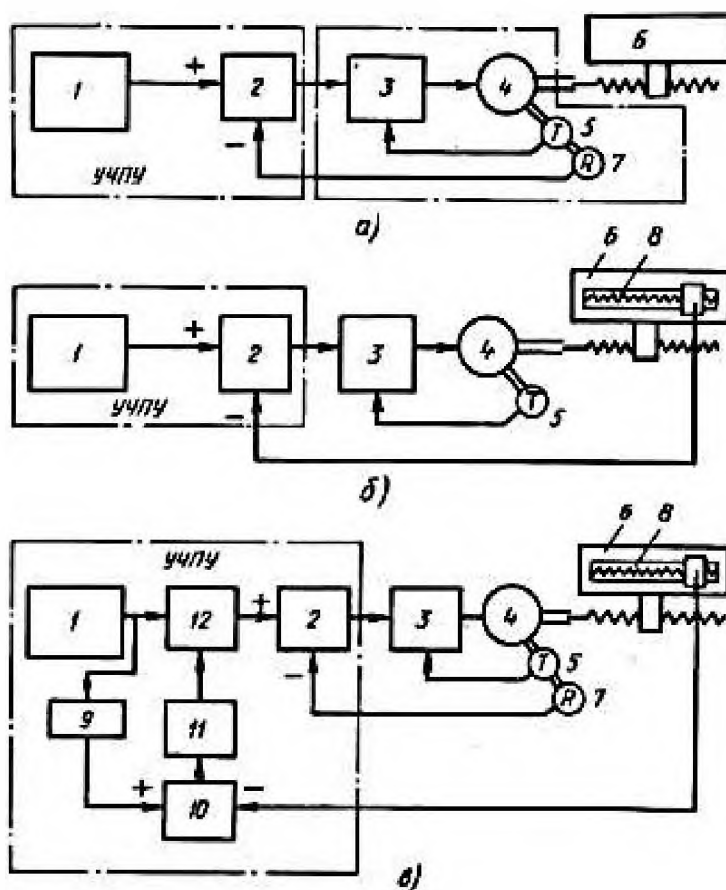


Рисунок 1.5 – Слідкувальні приводи:

- а – з напівзамкненим контуром зворотного зв'язку за положенням,
 б – те саме з замкненим контуром,
 в – з гібридною схемою зворотного зв'язку

В деяких випадках, особливо у важких верстатах з довгими кінематичними ланцюгами, застосовують гібридну схему зворотного зв'язку за положенням. В даній схемі використовують два датчика: круговий, який встановлений на вал двигуна, і лінійний, встановлений на стіл верстата. При цьому круговий датчик використовується для позиціонування, а лінійний – для автоматичної корекції похибок кінематичного ланцюга.

В приводах подачі із ступінчатим регулюванням традиційно застосовують нерегульовані асинхронні двигуни змінного струму з короткозамкненим ротором.

Головними перевагами цього двигуна є його простота, висока надійність (що пояснюється відсутністю частин, що труться між собою), відносно високі ме-

ханічні характеристики, низька вартість і здатність споживати електроенергію безпосередньо із промислової мережі без додаткових перетворювачів.

Приводи подачі із безступінчатим регулюванням можна підрозділити на крокові та слідкуючі. Це розділення обумовлено типом двигунів, що використовуються в них.

Основою крокового привода являється кроковий двигун (КД). За принципом дії він являється синхронним двигуном. Відмінність від класичного синхронного двигуна заключається в тому, що магнітне поле переміщується у повітряному зазорі дискретно (кроками). Внаслідок цього рух ротора представляє собою послідовність елементарних кроків.

У слідкуючих приводах подачі широко використовується два типи двигунів: високомоментні двигуни постійного струму і синхронні (вентильні) електродвигуни. Асинхронні двигуни із частотним регулюванням швидкості поки не знаходять широкого застосування в приводах подачі.

Високомоментні двигуни мають малу чутливість до динамічних збурень за навантаженням, власну стійкість в перехідних режимах і достатню механічну міцність (завдяки значним розмірам якоря та великому діаметру валу). Це дозволяє встановлювати їх безпосередньо на гвинт, що дозволяє частково або повністю виключити коробку передач [4].

В останній час високомоментні двигуни витісняються безколекторними синхронними (вентильними) електродвигунами, що перевершують їх практично за всіма техніко-економічними показниками.

Вентильним називається двигун, в якому комутація секцій (фаз) обмотки статора здійснюється за допомогою напівпровідникового комутатора, який керується сигналами датчика положення ротора. Комутатор разом із датчиком положення ротора виконує ті ж функції, що і колектор в двигуні постійного струму.

В порівнянні із високомоментними синхронні двигуни мають багато переваг. Забезпечується висока надійність двигуна та менший рівень шуму завдяки відсутності щітково-колекторного вузла. Момент інерції ротора в 2...5 разів менше, ніж у високомоментного двигуна, тому забезпечується більший діапазон регулю-

вання за рахунок підвищеної максимальної частоти обертання. Двигун має кращі масогабаритні показники та більш високий ККД.

В порівнянні із асинхронним двигуном з частотним регулюванням вентильний двигун має наступні переваги: кращий ККД зважаючи на відсутність втрат на ковзання; малий момент інерції ротора; висока швидкодія і краща керованість.

У підтвердження вищесказаного проведено порівняльний аналіз параметрів трьох основних типів електродвигунів. Результати порівняння зведено в таблицю 1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняльна характеристика електродвигунів

Параметр	Асинхронний двигун	Двигун постійного струму	Синхронний двигун
Потужність, кВт	7,5	8,3	7,5
Швидкість, об/хв	2900	3200	3000
Охолодження	індивідуальне	індивідуальне	конвекцією
Довжина, мм	400	625	390
Повна маса, кг	66	105	38,6
Маса ротора, кг	17	29	8,2
Момент інерції, $J_d \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	280	496	87,4
Номінальний момент, M_H , Н·м	24,7	24,7	24
Максимальний момент, Н·м	$1,8 \cdot M_H$	$1,6 \cdot M_H$	$3,0 \cdot M_H$
Максимальне прискорення, с^{-2}	1588	797	8238

До недоліків вентильного двигуна слід віднести його відносно високу вартість та складність конструкції у порівнянні із асинхронними двигунами.

1.4 Висновки до розділу

1.4.1 Розглянуто компонування, технічні характеристики та електрообладнання верстата 16A20Ф3. Встановлено, що токарний верстат з ЧПК 16A20Ф3 оснащений асинхронним приводом “Розмір 2М-5-21/11” та системою ЧПК “Електроніка НЦ-31”, які зібрано на застарілій елементній базі і зняті з виробництва.

1.4.2 Проведено аналіз систем керування електроприводів подач верстатів. Виявлено, що до електроприводів подач пред’являються наступні вимоги:

- мінімальні розміри електродвигуна при високому обертовому моменті;
- висока максимальна швидкість;
- значна перевантажувальна здатність привода в режимах короткочасного і повторно-короткочасного навантаження;
- широкий діапазон регулювання;
- висока стабільність характеристик;
- висока швидкодія при розгоні і гальмуванні, підключенні і відключенні навантаження;
- висока рівномірність руху при різному навантаженні на всіх швидкостях;
- зручність конструктивної установки двигуна на верстаті і вбудовування керуючих перетворювачів у шафи, ніші шаф і ніші верстатів.

Здійснено порівняльний аналіз основних типів електроприводів, розроблених спеціально для механізмів подачі верстатів з ЧПК та встановлено, що електроприводи з синхронним (вентильним) двигуном мають найкращі технічні характеристики.

1.4.3 Складено план модернізації електропривода поздовжньої подачі (переміщення по осі Z) токарного верстата 16A20Ф3, який містить:

- заміну асинхронного електродвигуна на синхронний (вентильний);
- встановлення сучасного комплектного електропривода подачі;
- заміну системи ЧПК “Електроніка НЦ-31”.

При встановленні сучасних систем керування приводом та ЧПК досягаються наступні переваги:

- підвищення надійності роботи верстата;
- розширення технологічних можливостей для роботи сучасним ріжучим інструментом;
- покращення ремонтпридатності;
- можливість діагностики, складання і установки керуючих програм з віддаленого комп'ютера;
- можливість включення верстата в єдину комп'ютерну мережу для контролю його навантаження і простоїв.

2 ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ І ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Вибір та обґрунтування методу наукового дослідження

Метод (від грецького *methodos* – шлях до чого-небудь) – в найбільш загальному випадку означає засіб досягнення мети, спосіб дослідження явища, який означає планомірний підхід до їх наукового пізнання та встановлення істини. Науковий метод – це спосіб пізнання явищ дійсності в їх взаємозв'язку та розвитку, спосіб досягнення поставленої мети і завдань дослідження і відповідає на запитання: «Як пізнавати?».

Методика дослідження – це система правил використання методів, прийомів та способів для проведення будь-якого дослідження. Свідоме застосування науково-обґрунтованих методів слід розглядати як найсуттєвішу умову отримання нових знань.

Кожний метод наукового пізнання слід розглядати як систему регулятивних принципів практичної і теоретичної діяльності людини. Методів пізнання об'єктивної дійсності відомо дуже багато. Правильний вибір методів дослідження потребує знання їх класифікації.

Досить поширеним є поділ основних типів методів за двома ознаками: мети і способу реалізації.

За першою ознакою виділяються так звані первинні методи, що використовуються з метою збору інформації, вивчення джерел, спостереження, опитування та ін. Вторинні методи використовуються з метою обробки та аналізу отриманих даних – кількісний та якісний аналіз даних, їх систематизація, шкалювання та ін.

Візуальні, або графічні, методи – графи, схеми, діаграми, картограми та ін. дають змогу отримати синтезоване уявлення про досліджуваний об'єкт і водночас наочно показати його складові, їхню питому вагу, причинно-наслідкові зв'язки, інтенсивність розподілу компонентів у заданому об'ємі. Ці методи тісно пов'язані з комп'ютерними технологіями.

У прикладних аспектах гуманітарних наук доцільно використовувати математичні методи. Математичний апарат теорії ймовірностей дає можливість вивчати масові явища в соціології, лінгвістиці. Математичні методи відіграють важливу роль при обробці статистичних даних, моделюванні.

Сучасна методологія вкладає новий зміст у традиційне уявлення про теоретичні (математичні) та емпіричні (експериментальні) методи дослідження в природних і технічних науках.

Складовою частиною наукових досліджень є експеримент.

Експеримент представляє собою науково поставлений дослід або спостереження явища або процесу в точно враховуваних умовах, що дозволяють стежити за ходом експерименту, керувати ним, відтворювати його щоразу при повторенні цих умов.

Серед відомих методів дослідження складних електромеханічних систем можна виділити фізичне, імітаційне, аналогове та математичне моделювання.

Метод фізичного моделювання передбачає дослідження на моделі, яка відтворює основні геометричні, фізичні, динамічні та функціональні характеристики та властивості оригіналу (але не обов'язково всі властивості) та має великі можливості з визначення різноманітних якостей електромеханічних систем ті їх елементів.

Метод математичного моделювання ґрунтується на здатності математично описувати рівняннями різні за природою явища (процеси) та виявляти різні функціональні зв'язки між елементами системи.

Аналогове моделювання базується на однаковому для моделі та натури математичному описі та використовується для імітації на основі аналогової фізичної системи по її елементам. При цьому кожному з фізичних елементів натури в моделі відповідає певний еквівалент. У якості моделей використовуються електричні кола, складені з пасивних та активних елементів.

При математичному моделюванні застосовуються аналітичні та статистичні моделі. Аналітичні моделі більш грубі, враховують менше число факторів, завжди

потребують деяких припущень та спрощень. Проте вони більше пристосовані для пошуку оптимальних рішень.

Комп'ютерна модель (або чисельна) – комп'ютерна програма, яка реалізує абстрактну модель деякої системи. Комп'ютерні моделі використовуються для отримання нових знань про об'єкт, що моделюється або для приблизної оцінки поведінки математичних систем, які досить складні для аналітичного дослідження. Комп'ютерне моделювання є одним з ефективних методів вивчення складних систем. Комп'ютерні моделі простіші та їх зручніше досліджувати в силу можливості проводити обчислювальні експерименти в тих випадках, коли реальні експерименти немає можливості проводити через фінансові труднощі або фізичні перешкоди. Для підтримки математичного моделювання розроблені системи комп'ютерної математики, наприклад, Maple, Mathematica, Mathcad, MATLAB, VisSim та інші. В даній роботі використовується програма Simulink пакету MATLAB.

2.2 Розробка алгоритму дослідження

Методологія – це система базисних принципів, методів, методик, способів і засобів їх реалізації в організації та побудові науково-практичної діяльності. Вона включає в себе методи теоретичного та емпіричного пізнання і являє собою алгоритм пошуку і досягнення мети.

Основне призначення методики дослідження полягає у тому, щоб на основі відповідних принципів (вимог, умов, обмежень тощо) забезпечити успішне вирішення визначених мети і завдань наукового дослідження.

Алгоритм дослідження представлено в табличній формі (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Алгоритм дослідження

Система керування серводвигуном привода подачі верстата	
Складання індивідуального календарного плану роботи	
Пошук літератури за темою, її аналіз, складання бібліографії	
Підготовка теоретичної частини	Опис компонування, технічних характеристик та електрообладнання верстата 16A20Ф3
	Аналіз систем керування електроприводів подач верстатів
	Побудова функціональної схеми системи керування електропривода подачі. Вибір та обґрунтування елементів системи керування електропривода
	Розробка структурної схеми системи керування електропривода подачі та розрахунок параметрів її елементів
Опис процесу дослідження	Моделювання системи керування електропривода подачі в MATLAB
	Дослідження впливу параметрів регуляторів електропривода на якість керування
Узагальнення результатів моделювання	Аналіз і узагальнення результатів досліджень
	Інтерпретація отриманих результатів дослідження
	Формулювання висновків
Узагальнення науково-теоретичних результатів	
Розробка заходів з охорони праці	

Алгоритм складено на підставі головних завдань дослідження і наочно відображає його послідовність: мотивацію; формулювання проблеми дослідження; пошук теоретичної основи розв'язання проблеми; розв'язання проблеми. Він розкриває процедуру дослідження і встановлює логічну послідовність виконання структурних розділів і підрозділів кваліфікаційної роботи.

2.3 Вибір методів розв'язання поставленої задачі

Кваліфікаційна робота не передбачає проведення експериментальних досліджень, має теоретичний характер, тому основним методом для відображення отриманих результатів є моделювання.

Моделювання як метод наукового пізнання виникло в зв'язку з необхідністю вирішення завдань, які з тих чи інших причин не можуть бути вирішені безпосередньо. Вони виникають у випадках, коли об'єкт або недосяжний для дослідника, або він ще не існує і потрібно обрати оптимальний варіант його створення, або дослідження реального об'єкта вимагає багато часу та економічно не вигідне тощо. Таким чином, модель виконує функцію проміжної ланки між дослідником та об'єктом пізнання. Метод моделювання передбачає, що об'єкт вивчається не безпосередньо, а шляхом дослідження іншого об'єкта, який є аналогом першого.

Модель (від лат. *modulus* – міра) – це певний умовний образ об'єкта дослідження, котрий замінює останній і перебуває з ним у такій відповідності, яка дозволяє отримати нове знання. Модель будується для того, щоб відобразити характеристики об'єкта (елементи, взаємозв'язки, структурні та функціональні властивості), суттєві з точки зору мети дослідження. Отже, моделювання пов'язане зі спрощенням, огрубінням прототипу, абстрагуванням від ряду його властивостей, ознак, сторін.

Характерною ознакою моделей можна вважати їх спрощеність стосовно оригіналу або реальної життєвої ситуації, яку моделюють. Спрощеність моделей є неминучою, тому що оригінал лише в обмеженій кількості відношень відображується в моделі.

Отже, моделювання з точки зору наукового дослідження – це метод опосередкованого пізнання за допомогою штучних або природних систем, які зберігають певні особливості об'єкта і, таким чином, заміщуючи його, дають змогу отримати нове знання про оригінал.

У системному аналізі моделі є дуже важливим компонентом дослідження та проектування нових систем. Не менш важливий і прагматичний аспект моделювання, при якому модель розглядається як засіб керування системою.

Модель є цільовим відображенням об'єкта-оригіналу, що виявляється у множинності моделей одного й того ж об'єкта, тобто для різної мети або завдань дослідження можна будувати різні моделі, тому мета або завдання дослідження визначають, які саме ознаки системи мають бути відображені в моделі. Процес дослідження реальних систем, що охоплює побудову моделі, дослідження її властивостей і перенесення одержаних відомостей на реальну систему, називають моделюванням.

Основна функція моделі – це її використання як засобу пізнання. До конкретизованих (похідних від основної) функцій належать: засіб наукового осмислення дійсності, засіб спілкування, засіб навчання і тренування, інструмент прогнозування, засіб постановки та проведення експерименту.

Головними рівнями дослідження та моделювання систем є мікро- та макро-рівень. Мікрорівневе моделювання системи пов'язане з детальним описом кожного компонента системи, дослідженням її структури, функцій, взаємозв'язків, тощо.

Макрорівневе моделювання полягає в ігноруванні детальної структури системи та вивченні лише загальної поведінки системи як єдиного цілого.

Для детальнішого опису систем використовують моделі складу та моделі структури. Модель складу системи відображає, з яких елементів і підсистем складається система, а модель структури застосовується для відображення відношень між елементами та зв'язків між ними.

Модель структури описує суттєві зв'язки між елементами та підсистемами. При використанні графічних моделей будову систем подають у вигляді так званих

структурних схем. Структурні схеми наглядні та містять інформацію про велику кількість властивостей системи.

Залежно від форми подання об'єкта моделювання поділяють на реальне та абстрактне.

При реальному моделюванні використовують можливість дослідження характеристик на реальному об'єкті чи на його частині, а при натурному – проводять дослідження на реальному об'єкті з подальшим обробленням результатів експерименту на основі теорії подібності.

Метод фізичного моделювання передбачає дослідження на моделі, що відтворює основні геометричні, фізичні, динамічні і функціональні властивості “оригіналу” і володіє великими можливостями по визначенню різних якостей електро-механічних систем та їх елементів.

Абстрактне моделювання має різні види: наочне, символічне, математичне. Метод математичного моделювання заснований на здатності математично описувати рівняннями різноманітні за природою явища (процеси) і виявляти різні функціональні зв'язки між елементами системи.

При математичному моделюванні застосовують аналітичні та статистичні моделі. Аналітичні моделі більш грубі, враховують менше число чинників, завжди вимагають деяких припущень і спрощень, проте вони більш пристосовані для пошуку оптимальних рішень. Статистичні методи в порівнянні з математичними громіздкі і погано осяжні.

Дослідження математичної моделі дає змогу отримати характеристики реального об'єкта чи системи. Вигляд математичної моделі залежить як від природи системи, так і від завдань дослідження. Математична модель системи містить, як правило, опис множини можливих станів системи та закон переходу з одного стану в інший. Математичне моделювання охоплює імітаційне, інформаційне, структурне, ситуаційне тощо.

На етапі вибору математичної моделі встановлюються: лінійність і не лінійність об'єкта, процесу або системи, динамічність або статичність, стаціонарність або не стаціонарність, а також ступінь детермінованості досліджуваного об'єкта чи

процесу. При математичному моделюванні свідомо відволікаються від конкретної фізичної природи об'єктів, процесів або систем і, в основному, зосереджуються на вивченні кількісних залежностей між величинами, що описують ці процеси.

На базі складених диференційних рівнянь проводиться математичне моделювання системи керування електропривода. За допомогою програми Simulink досліджуються перехідні характеристики системи при зміні задавальних параметрів.

Слід зазначити, що метод моделювання – вивчення явищ за допомогою моделей – сьогодні має особливе значення для вирішення складних фізичних завдань, чому значною мірою сприяє зростанню продуктивності обчислювальної техніки. Саме тому в представленій роботі як основа використано метод моделювання.

2.4 Висновки до розділу 2

2.4.1 Для дослідження автоматизованого електропривода в роботі обрано математичне моделювання, яке сьогодні є одним з ефективних методів вивчення складних систем.

2.4.2 На підставі головних завдань дослідження розроблено алгоритм дослідження, який наочно відображає його послідовність: мотивацію; формулювання проблеми дослідження; пошук теоретичної основи розв'язання проблеми; розв'язання проблеми.

2.4.3 Моделювання є основним методом для отримання результатів, оскільки робота має теоретичний характер. На базі складеної математичної моделі системи керування електропривода в програмі Simulink проводиться математичне моделювання та досліджуються перехідні процеси.

3 АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Вибір та обґрунтування елементів системи керування електропривода

3.1.1 Побудова функціональної схеми системи керування електропривода подачі

Розглянемо побудову системи векторного керування синхронним двигуном із постійними магнітами (СДПМ).

Область застосування таких систем: високоякісний електропривод подачі металорізальних верстатів. Основні характеристики контуру регулювання швидкості: діапазон регулювання – не менше 10000, смуга пропускання – не менше 100 Гц [5].

Функціональна схема системи векторного керування СДПМ приведена на рисунку 3.1. На схемі прийняті наступні умовні позначення: φ_z – сигнал завдання положення; РП – регулятор положення. ПП-регулятор, який відпрацьовує сигнал помилки за положенням; ω_z – сигнал завдання швидкості; РШ – регулятор швидкості. ПП- або ПІД-регулятор, який відпрацьовує із сигналу помилки за швидкістю сигнал завдання моменту; PC_q – регулятор струму q -складової. П- або ПІ-регулятор, який відпрацьовує із сигналу помилки за струмом сигнал завдання напруги по осі q ; PC_d – регулятор струму d -складової. П- або ПІ-регулятор, який відпрацьовує із сигналу помилки за струмом сигнал завдання напруги по осі d ; БКПЗ – блок компенсації перехресних зв'язків; ПН – перетворювач напруги; ПК1 – перетворювач координат, який здійснює переведення вектора напруги статора із рухомої системи координат dq в нерухому систему координат; ВМ – векторний модулятор; ПК2 – перетворювач координат, який здійснює переведення струму статора із трифазної нерухомої системи координат в двохфазну, а потім в рухому систему dq [6].

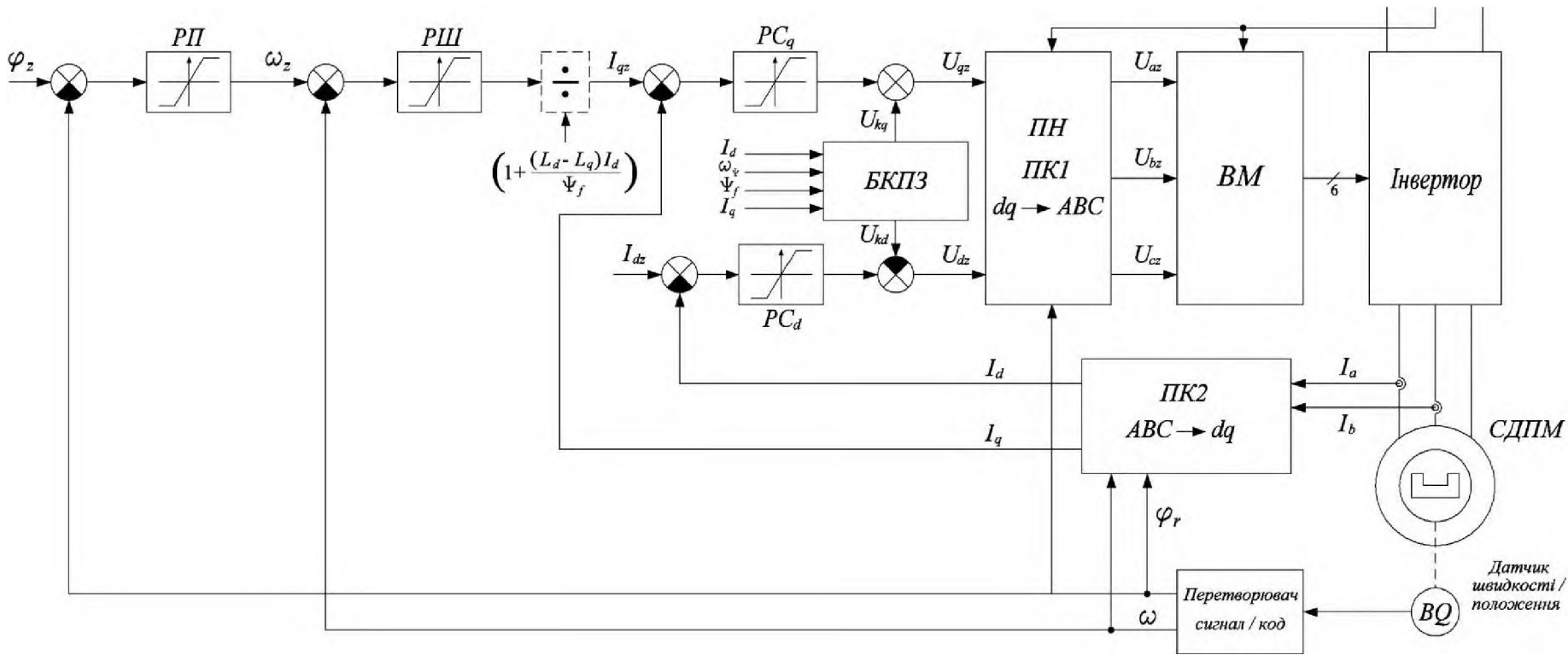


Рисунок 3.1 – Функціональна схема системи векторного керування електропривода подачі

Перетворювач напруги реалізує функції обмеження максимального значення заданої напруги, зворотного перетворення координат і компенсацію запізнювання, яке вноситься системою керування.

Алгоритм роботи обмежувача напруги організований таким чином, що у всіх режимах роботи привода величина заданої вихідної напруги інвертора не перевищувала б його максимальне значення з урахуванням фактичного значення вхідної напруги інвертора U_d та обмежень, пов'язаних з не ідеальністю силових ключів.

При роботі привода в умовах обмеження напруги канал осі d має пріоритет над каналом осі q , тобто в першу чергу забезпечується бажаний рівень поточкозчеплення, а вже потім формується необхідний електромагнітний момент. Така логіка забезпечує коректне функціонування привода у другій зоні регулювання швидкості.

Нульове завдання струму по осі d забезпечує мінімізацію струму статора при заданій величині моменту навантаження. В цьому випадку струм статора у всіх режимах роботи привода направлений перпендикулярно магнітній осі ротора (по осі q) у відповідності з векторною діаграмою двигуна, яка зображена на рисунку 3.2.

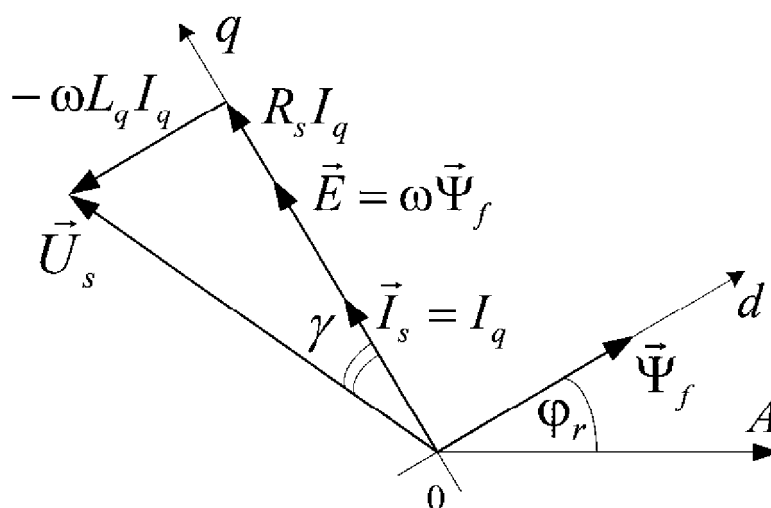


Рисунок 3.2 – Векторна діаграма СДПМ

Перетворювач координат $ABC \rightarrow dq$ виконує перетворення фазних струмів статора із природної трифазної системи координат (A, B, C) в ортогональну синхронну систему координат (d, q) за рівняннями

$$I_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[I_A \cdot \sin\left(\varphi_r + \frac{\pi}{3}\right) + I_B \cdot \sin(\varphi_r) \right];$$

$$I_q = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[I_A \cdot \cos\left(\varphi_r + \frac{\pi}{3}\right) + I_B \cdot \cos(\varphi_r) \right],$$

де φ_r – кутове положення ротора, яке отримується з датчика положення.

Векторний модулятор перетворює напругу статора, задану в системі координат (α, β) , в імпульси керування ключами інвертора напруги на основі метода векторного формування ШІМ [5].

Блок компенсації перехресних зв'язків формує сигнали, які компенсують вплив перехресних зв'язків. Струми координат регулюються за допомогою вироблених регуляторами струмів напруг координат.

Статорна напруга координати $(d$ або $q)$ являє собою суму двох складових, одна із котрих залежить від струму даної координати, а інша від складової струму ортогональної даній координаті.

Таким чином, регулювання I_q викликає збурювальний вплив в каналі регулювання I_d . Відповідно регулювання I_d викликає збурення в каналі регулювання I_q .

Регулятор струму кожної координати виробляє складову статорної напруги, яка залежить тільки від струму регульованої координати (U_q або U_d), а складова, яка залежить від іншої (ортогональної) складової струму (U_{qk} або U_{dk}), додається в напругу координати безпосередньо у відповідності з наступними рівняннями

$$U_{dk} = \frac{-1}{k_{ПЧ}} \cdot L_q \omega \cdot I_q;$$

$$U_{qk} = \frac{1}{k_{ПЧ}} \cdot \omega \cdot (L_d \cdot I_d + \Psi_f).$$

3.1.2 Вибір елементів функціональної схеми

На підставі вимог, що пред'являються до електропривода здійснюється вибір комплектного електропривода.

Комплектний електропривод має наступні складові частини:

- електродвигун;
- силовий трансформатор (або струмообмежуючий реактор);
- силовий тиристорний перетворювач для живлення двигуна, який складається із силових тиристорів з системою охолодження, захисних запобіжників, розрядних, фільтруючих і захисних R, L, C $\square$ ланцюгів;
- для привода постійного струму – тиристорний перетворювач для живлення обмотки збудження при регульованому магнітному потоці двигуна постійного струму (або вбудоване джерело збудження, або апаратуру для підключення обмотки збудження до мережі постійної напруги при нерегульованому потоці двигуна);
- систему імпульсно-фазового керування, пристрій виділення аварійного режиму, контролю запобіжників і захисту від перенапруг;
- комутаційну і захисну апаратуру в ланцюгах постійного та змінного струму (автоматичні вимикачі, лінійні контактори, рубильники);
- згладжувальний реактор в ланцюзі постійного струму (при необхідності);
- пристрій динамічного гальмування (при необхідності);
- шафа високовольтного введення (при необхідності);
- систему керування електроприводом;
- комплект апаратів, приладів і пристроїв, які забезпечують оперативне керування, контроль стану і сигналізацію електропривода;
- вузли живлення обмотки збудження тахогенератора та електромеханічного гальма.

При виборі моделі частотного перетворювача слід виходити з конкретної задачі, котру повинен вирішувати електропривод:

- типу і потужності електродвигуна;

- точності та діапазону регулювання швидкості;
- точності підтримання моменту обертання на валу двигуна.

При роботі із стандартним асинхронним двигуном перетворювач слід обирати з відповідною потужністю. При виборі перетворювача для роботи із спеціальними двигунами (двигуни з гальмами, синхронні двигуни, високошвидкісні і т.д.) слід керуватися, перш за все, номінальним струмом перетворювача, який повинен бути більший за номінальний струм двигуна [7]

$$I_{\text{ПЧ}} \geq I_{\text{н}};$$

$$U_{\text{ПЧ}} \geq U_{\text{н}},$$

де $I_{\text{н}}$, $U_{\text{н}}$ – номінальні значення струму і напруги двигуна;

$I_{\text{ПЧ}}$, $U_{\text{ПЧ}}$ – номінальні значення струму і напруги перетворювача.

Для підвищення точності підтримання моменту і швидкості на валу двигуна в найбільш досконалих перетворювачах реалізоване векторне керування, яке дозволяє працювати з повним моментом двигуна в області нульових частот, підтримувати швидкість при змінному навантаженні без датчиків зворотного зв'язку, точно контролювати момент на валу двигуна.

3.1.2.1 KEB COMBIVERT сервопривід, що застосовується в промисловому обладнанні, верстатах та оброблювальних центрах. Складається із синхронного електродвигуна з датчиком положення ротора і перетворювача частоти із проміжною ланкою постійного струму.

Перетворювач частоти працює за принципом широтно-імпульсної модуляції і призначений виключно для безступінчатого регулювання швидкості обертання трифазних двигунів змінного струму.

F5-A – перетворювач частоти, в математичному забезпеченні котрого закладені алгоритми керування синхронним двигуном на постійних магнітах в режимі полеорієнтованого керування в замкненому контурі зворотного зв'язку (33) за швидкістю і положенням. Загальний вигляд перетворювача частоти приведено на рисунку 3.3.



Рисунок 3.3 – Перетворювач частоти 13.F5.A1D-39FA

В якості датчиків зворотного зв'язку для перетворювачів частоти F5-A можуть використовуватися: інкрементальний енкодер, Sin/Cos датчик, резольвер (синусно-косинусний обертовий трансформатор), датчик з HIPERFACE інтерфейсом і датчик з ENDAT інтерфейсом. Додатково можуть підключатися: абсолютний фотодатчик, тахогенератор, ініціатор. Перетворювач частоти F5-A може працювати і без датчика зворотного зв'язку в режимі безсенсорного векторного керування. Характеристики перетворювача частоти приведені в таблиці 3.1.

Характерною особливістю цієї серії являється можливість здійснювати позиціонування на заздалегідь встановлені точки з точністю по позиції ± 1 інкремент датчика і утримувати досягнуту позицію в межах перевантажувальної спроможності двигуна. Необхідні при цьому рампі розгону / гальмування розраховуються приводом самостійно.

Таблиця 3.1 – Характеристики перетворювача частоти 13.F5.A1D-39FA

Параметр	Значення
Основні атрибути	
Країна виробник	Німеччина
Виробник	Karl E. Brinkmann
Тип робочої величини	Частота
Номінальний струм, А	12
Ступінь захисту IP	21
Додаткові атрибути	
Корпус, мм	D 76x191x144
Максимальний струм, А	21,6
Частота ШІМ, кГц	4/16
Напруга живлення, В	3ф, 400 (305...500)
Фільтр ЕМС	зовнішній, монтаж під ПЧ (опція)
Номінальна потужність, кВт	5,5
Гальмівний транзистор	присутній

На відміну від простих перетворювачів частоти без зворотного зв'язку, в котрих, в кращому випадку реалізований зворотний зв'язок за струмом, який дозволяє в невеликих межах компенсувати зміну швидкості обертання електродвигуна при зміні навантаження. Перетворювачі частоти для сервоприводів мають кілька контурів замкненого зворотного зв'язку:

- зворотний зв'язок за струмом – дозволяє контролювати навантаження на сервосистему і його зміну. Обмежує струм в обмотках, що дозволяє скоротити витрати електроенергії та нагрів електродвигуна;
- зворотний зв'язок за швидкістю – дозволяє з високою точністю підтримувати швидкість обертання вала електродвигуна при змінному навантаженні, у всьому діапазоні робочих швидкостей.

Окрім основної функції – регулювання і стабілізації частоти обертання, більшість сучасних сервосистем мають розширені функціональні можливості:

- позиціонування – сервопривід розраховує необхідні прискорення і швидкість пересування виходячи із заданої позиції і поточного положення, а також навантаження, що прикладається до вала електродвигуна. Ця функція може бути реалізована коли в перетворювачі частоти, крім контуру зворотного зв'язку за швидкістю, присутній контур зворотного зв'язку за положенням;

- утримання при нульовій швидкості (утримання позиції) – вал сервомотора залишається нерухомим при прикладанні до нього змінного навантаження. За рахунок контуру зворотного зв'язку за положенням, при виникненні розузгодження між заданою позицією і поточним положенням, перетворювач частоти повертає ротор в задане положення, компенсуючи прикладене навантаження;

- регулювання швидкості з контролем крутильного моменту – дозволяє при необхідності, обмежити крутильний момент на валу електродвигуна. Серво-система підтримує задану швидкість поки крутильний момент на валу не перевищує заданого значення. При перевищенні заданого крутильного моменту швидкість знижується до повної зупинки. Дана функція застосовується в механізмах розмотування і намотування, для виключення можливості пошкодження перемотуваного матеріалу. Точність підтримання крутильного моменту може бути до 1 % від номінального;

- розгін і гальмування із заданим прискоренням або по заданій кривій – з високою точністю підтримується заданий час розгону і гальмування, або прискорення. При необхідності виключення поштовхів, можлива реалізація розгону і гальмування по S-кривій;

- гальмування із завданням зусилля гальмування – вал сервомотора не обертається, при прикладанні зовнішнього крутильного моменту, вал повертається створюючи необхідне зусилля гальмування. Дана функція дозволяє реалізувати гальмо із регульованим зусиллям замість використання магнітно-порошкових муфт, які володіють достатньо низькою стабільністю;

- позиціонування за програмою – сервопривід послідовно переміщується в задані точки. Перехід в наступну точку може відбуватися за зовнішнім сигналом або за таймером;

- синхронізація за швидкістю – завдання швидкості розраховується пропорційно до додаткового датчика швидкості підключеного до окремого входу;
- синхронізація за положенням – завдання швидкості і положення ротора сервомотора розраховується по даним від додаткового датчика підключеного до окремого входу або від сигналів переміщення іншого сервопривода.

Силовa частина перетворювача частоти, яка зображена у вигляді блок-схеми на рисунку 3.4, складається головним чином із мережевого випрямляча, проміжної ланки постійного струму та інвертора на виході. Мережевий випрямляч складається із одно- або трифазної мостової схеми. Однофазне виконання обмежене діапазоном невеликих потужностей. Випрямляч перетворює напругу змінного струму мережі в напругу постійного струму, котра згладжується конденсатором, який знаходиться в ланцюзі постійного струму. Таким чином, в ідеальному варіанті (інвертор не навантажений) фільтрувальний конденсатор заряджається до напруги

$$U_{zk} = \sqrt{2} \cdot U_n,$$

де U_n – номінальна напруга перетворювача, В.

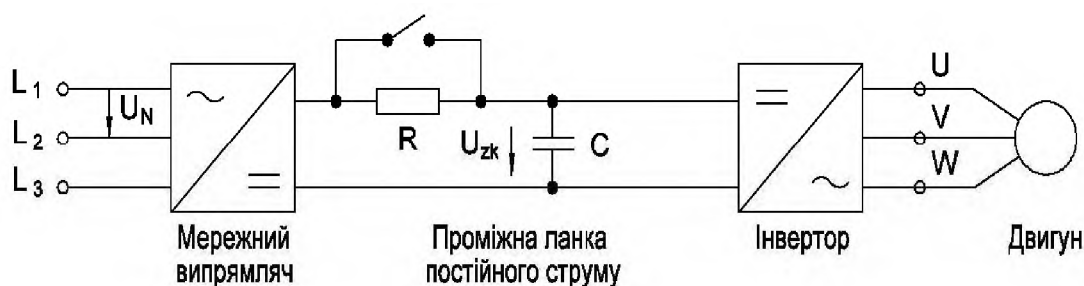


Рисунок 3.4 – Блок-схема силової частини інвертора

При заряді фільтрувального конденсатора короткочасно протікають дуже великі струми, що може призвести до спрацювання вхідних запобіжників і навіть до виходу із ладу мережевого випрямляча. Тому зарядний струм конденсатора повинен бути обмежений до допустимого значення. Це досягається включенням послідовно з конденсатором струмообмежувального баластного резистора. Після за-

ряду конденсатора цей резистор шунтується, наприклад, контактами реле і тому працює тільки при вмиканні інвертора.

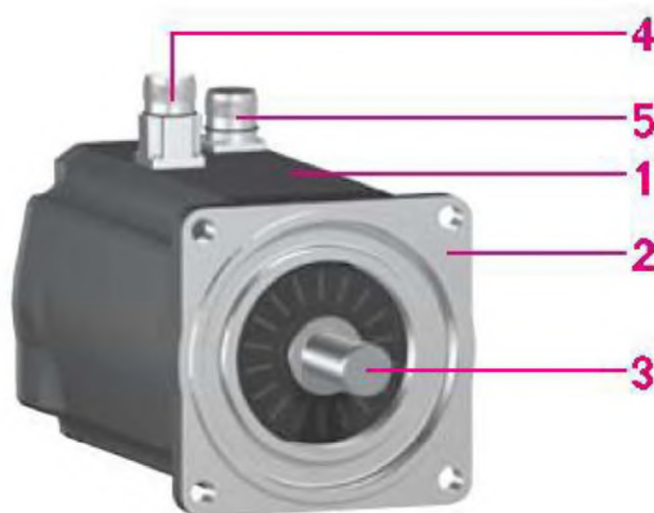
Так як для згладжування пульсацій напруги проміжної ланки постійного струму необхідна велика ємність конденсатора, то він на протязі деякого часу після відключення інвертора від мережі зберігає високу напругу.

Основною функцією перетворювача частоти являється отримання змінної за частотою та амплітудою вихідної напруги для керування трифазним синхронним двигуном. І ця функція покладається на інвертор, підключений на виході. Він формує трифазну вихідну напругу, використовуючи принцип широтно-імпульсної модуляції, завдяки чому досягається синусоїдальна форма струму в трифазному синхронному двигуні.

3.1.2.2 Серводвигун на постійних магнітах з електронною комутацією обмоток (вентильні двигуни) для застосувань з високими вимогами по якості керування рухом і по точності переміщення. Серводвигуни серії SM поєднують в собі компактну конструкцію, розмір, вагу, високий номінальний момент і перевантажувальну здатність. Основою синхронних серводвигунів являються ротор на базі рідкоземельних (NdFeB) постійних магнітів і статор з трифазною обмоткою для синусоїдальної комутації. Загальний вигляд двигунів серії SM зображено на рисунку 3.5.

Серводвигун складається із трифазного статора і 6-10-полюсного ротора (в залежності від моделі) з магнітами із сплаву NdFeB (неодим, залізо, бор), а також включає в себе наступні конструктивні елементи:

- корпус із лакофарбовим покриттям чорного кольору RAL 9005;
- фланець з 4 отворами для осьового кріплення;
- кінець вала: гладкий або із шпонкою (в залежності від моделі);
- прямий штировий герметичний роз'єм із гвинтовим з'єднанням для підключення силового кабелю;
- прямий штировий герметичний роз'єм із гвинтовим з'єднанням для підключення кабелю керування (датчика положення ротора).



1 – корпус; 2 – фланець; 3 – вал; 4 – роз’їм для підключення силового кабелю; 5 – роз’їм для підключення кабелю керування

Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд і складові частини серводвигуна

Серводвигуни оснащуються датчиком положення ротора з високою роздільністю, однообертовим SinCos Hiperface (SKS36).

Опційно двигуни можуть оснащуватися надійним електромагнітним утримуючим гальмом. Основні технічні характеристики двигуна приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики серводвигуна D3.SM9-31A1A

Параметр	M_0 , Н·м	M_H , Н·м	n_H , хв ⁻¹	I_0/I_H
Значення	28	21,2	1500	9/7,3

Серводвигуни даної серії мають наступні особливості:

- широкий ряд номінальних швидкостей;
- клас ізоляції обмоток F;
- штатний датчик зворотного зв’язку: резольвер;
- ступінь захисту від води та пилу IP 65;
- фланцеве кріплення;

- захист від перегріву (датчик порогового типу на 145 °C);
- радіальні підшипники із високотемпературним мастилом;
- робоча температура мінус 20...+40 °C.

3.1.2.3 Однообертовий датчик положення ротора SinCos Hiperface, який вбудований в серводвигун і зображений на рисунку 3.6, є стандартним вимірювальним пристроєм, повністю адаптованим до перетворювача частоти КЕВ із платою зворотного зв'язку: «F»: Вхід (Hiperface); Вихід (TTL); «I»: Вхід (Hiperface); Вихід (TTL).

Датчики зворотного зв'язку HIPERFACE поєднують в собі переваги інкрементальних і абсолютних енкoderів. Коли пристрій вмикається, і виконується комутація із зовнішнім лічильником контролера через інтерфейс RS-485, визначається абсолютне положення ротора. Від цього абсолютного значення, контролер продовжує відраховувати імпульси в інкрементальному режимі, використовуючи аналогові синусно/косинусні сигнали. Використання синусних і косинусних сигналів забезпечує високу роздільність, яка необхідна для регулювання швидкості ротора (розрахунок тангенса в контролері). Основні технічні характеристики енкodера приведені в таблиці 3.3.

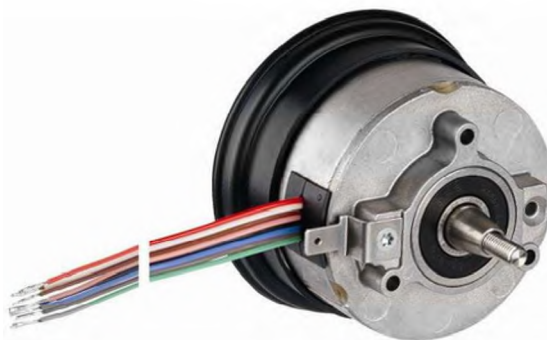


Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд енкodера

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики датчика зворотного зв'язку

Параметр	Значення
Роздільність для контуру положення зовнішнього пристрою (стійка ЧПК, керуючий контролер), роз'єм ХЗВ, інкр./оберт	512; 1024; 2048
Кількість sin/cos, період/оберт	128
Абсолютний діапазон вимірювання, оберт	1
Форма сигналу	Sin
Напруга живлення, В	7-12
Метод вимірювання	Оптичний, висока роздільність
Роздільність для внутрішнього контуру швидкості і положення, інкр./оберт	65 536 (Версія ПЗ 4.2)
	до 1 048 576 (Версія ПЗ 4.4)
Інтерфейс	Hiperface
Рекомендована напруга живлення, В	8
Струм, мА	Мах. 60 (без навантаження)
Діапазон робочих температур, °С	-20...+110

Застосування даного датчика з інтерфейсом передачі даних забезпечує:

- автоматичну ідентифікацію параметрів серводвигуна перетворювачем;
- автоматичну ініціалізацію контурів регулювання, спрощуючи таким чином введення в дію пристроїв керування переміщенням.

Датчик виконує наступні функції:

- видає абсолютне положення ротора серводвигуна, що дозволяє здійснювати синхронізацію;
- вимірює швидкість серводвигуна сумісно з підключеним перетворювачем.

3.1.2.4 Пристрій числового програмного керування NC-210 застосовується в машинобудуванні, верстатобудуванні, металообробній, деревообробній та інших галузях промисловості.

ПЧПК використовують як комплектувальний виріб при створенні комплексів “пристрій – об’єкт керування”, наприклад, технологічних комплексів, установок, високоавтоматизованих верстатів і оброблювальних центрів таких груп, як фрезерно-свердлильно-розточувальні, токарно-карусельно-револьверні, лазерні, деревообробні і т.д. Загальний вигляд ПЧПУ NC-210 показаний на рисунку 3.7.



Рисунок 3.7 – Загальний вигляд ПЧПК

ПЧПК повинен експлуатуватися в закритих приміщеннях із дотриманням наступних вимог до умов експлуатації:

а) режим роботи:

- температура навколишнього середовища від 5 до 40 °С;
- відносна вологість повітря від 40 до 80 % при 25 °С;

б) режим зберігання:

- температура навколишнього середовища від 5 до 50 °С;
- відносна вологість повітря не більше 80 % при 25 °С.

Технічні характеристики ПЧПК приведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Основні технічні параметри ПЧПК NC-210

Параметр	Значення
Кількість керованих координат, включаючи шпиндель	5
Кількість каналів датчика переміщень	4
Кількість каналів ЦАП (14 розрядів)	5
Кількість каналів електронного штурвала	1
Кількість каналів датчика дотику	1
Кількість дискретних каналів вх./вих.	32/24 або 64/48
Дисплей: – тип – буфер кадру в складі ОЗП – інтерфейс	LCD TFT 10.4”, 640x480, кольоровий, плоский екран; 8 MB; LCD 24 bit;
Ємність пам'яті: – ОЗП (пам'ять ПЧПК+ буфер кадру) – ЗП	SDRAM: (56+8) MB; Flash Disk:DOM 32/64/128 MB
Клавіатура: – клавіатура ПЧПК – інтерфейс	79 клавіш; EXT_KB
Інтерфейси зовнішніх пристроїв введення/виведення: – послідовний інтерфейс – інтерфейс Keyboard&Mouse – інтерфейс VGA CRT – інтерфейс LAN – інтерфейс USB	RS232(COM1) клавіатура/миша CRT монітор Ethernet: 10/100 Мбіт/с 2 канали USB
Номінальна напруга живлення	220 В, 50 Гц
Споживана потужність (без периферії)	60 ВА, не більше

Продовження табл. 3.4

Параметр	Значення
Споживаний струм (без периферії)	250 мА, не більше
Степінь захисту оболонкою:	
– лицьова панель	IP54
– кожух	IP20
Габаритні розміри (корпус А):	439х340х140 мм
Маса	9,7 кг, не більше

В зоні експлуатації ПЧПК повинні бути прийняті міри, що виключають потрапляння на зовнішні поверхні та всередину ПЧПК пилу, вологи, мастила, стружки, охолоджувальної рідини, парів та газів в концентраціях, що пошкоджують метал та ізоляцію, в тому числі, під час технічного обслуговування.

Вібрація в робочій зоні виробничого приміщення, що впливає на ПЧПК вздовж його вертикальної вісі, не повинна мати частоту вище 25 Гц і амплітуду переміщення більше 0,1 мм.

Живлення ПЧПК повинно здійснюватись однофазною напругою змінного струму 220 плюс 22/ мінус 33 В, частотою 50 плюс 1 Гц.

Підключення ПЧПК до промислової мережі повинне здійснюватись тільки через розв'язувальний трансформатор потужністю не менше 300 ВА.

Підвід живлячої мережі до ПЧПК повинен бути проведений із дотриманням вимог МЭК 550-77 по захисту її від електромагнітних перешкод, переривань і провалів напруги.

3.2 Побудова структурної схеми системи керування електропривода

3.2.1 Математичний опис елементів системи керування

При побудові математичної моделі синхронного двигуна з постійними магнітами приймемо наступні припущення:

- відсутнє насичення магнітного ланцюга, втрати в сталі, ефект витіснення струму;
- обмотки статора симетричні;
- індуктивність розсіювання не залежить від положення ротора в просторі.

Рівняння синхронної машини з постійними магнітами також розглянемо в ортогональній синхронній системі координат (d, q) , вісь d котрої орієнтована по магнітній осі ротора. Модель СДПМ приведена на рисунку 3.8. В цьому випадку вони приймають наступний вигляд [8]:

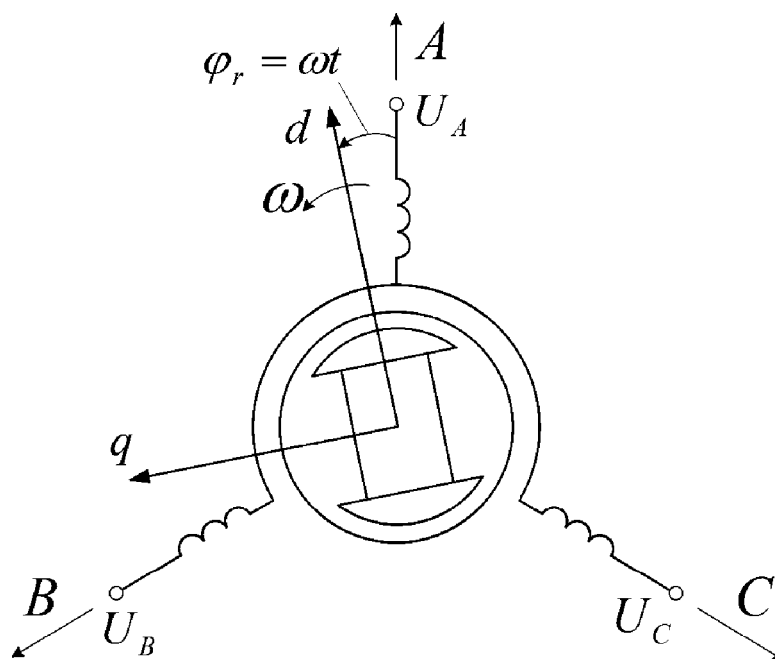


Рисунок 3.8 – Модель СДПМ

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \cdot \omega + R_s \cdot I_d; \\
 U_q &= \frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \cdot \omega + R_s \cdot I_q; \\
 \Psi_d &= L_d \cdot I_d + \Psi_f; \\
 \Psi_q &= L_q \cdot I_q; \\
 M &= \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot (\Psi_d \cdot I_q - \Psi_q \cdot I_d); \\
 \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot (M - M_c - \beta \cdot \Omega);
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

$$\Omega = \frac{\omega}{Z_p},$$

де I_d, I_q , – струми статора по осях d і q , А;

U_d, U_q , – напруги статора по осях d і q , В;

M, M_c – електромагнітний та навантажувальний моменти, Н·м;

ω – частота обертання ротора, рад/с;

J – момент інерції ротора, кг·м²;

β – коефіцієнт в'язкого тертя (коефіцієнт демпфірування), (Н·м·с)/рад;

Ψ_d, Ψ_q, Ψ_f – потокозчеплення статора по осях d та q , потокозчеплення створюване постійним магнітом, Вб;

L_d, L_q – індуктивності обмотки статора по поздовжній, поперечній осях ротора, Гн.

Записуючи систему рівнянь 3.1 відносно I_d та I_q отримаємо

$$\begin{aligned}\frac{dI_d}{dt} &= \frac{1}{L_d} (U_d - R_s \cdot I_d + \omega \cdot L_q \cdot I_q); \\ \frac{dI_q}{dt} &= \frac{1}{L_q} (U_q - R_s \cdot I_q - \omega \cdot L_d); \\ \omega &= Z_p \cdot \Omega \cdot I_d - \omega \cdot \Psi_f; \\ \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot (M - M_c - \beta \cdot \Omega); \\ \omega &= Z_p \cdot \Omega; \\ M &= \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot [\Psi_f \cdot I_q + (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q].\end{aligned}\tag{3.2}$$

Для окремого випадку неявнополісної конструкції ротора двигуна

$$L_d = L_q = L_s.$$

Структурна схема синхронного двигуна з постійними магнітами в осях d, q зображено на рисунку 3.9.

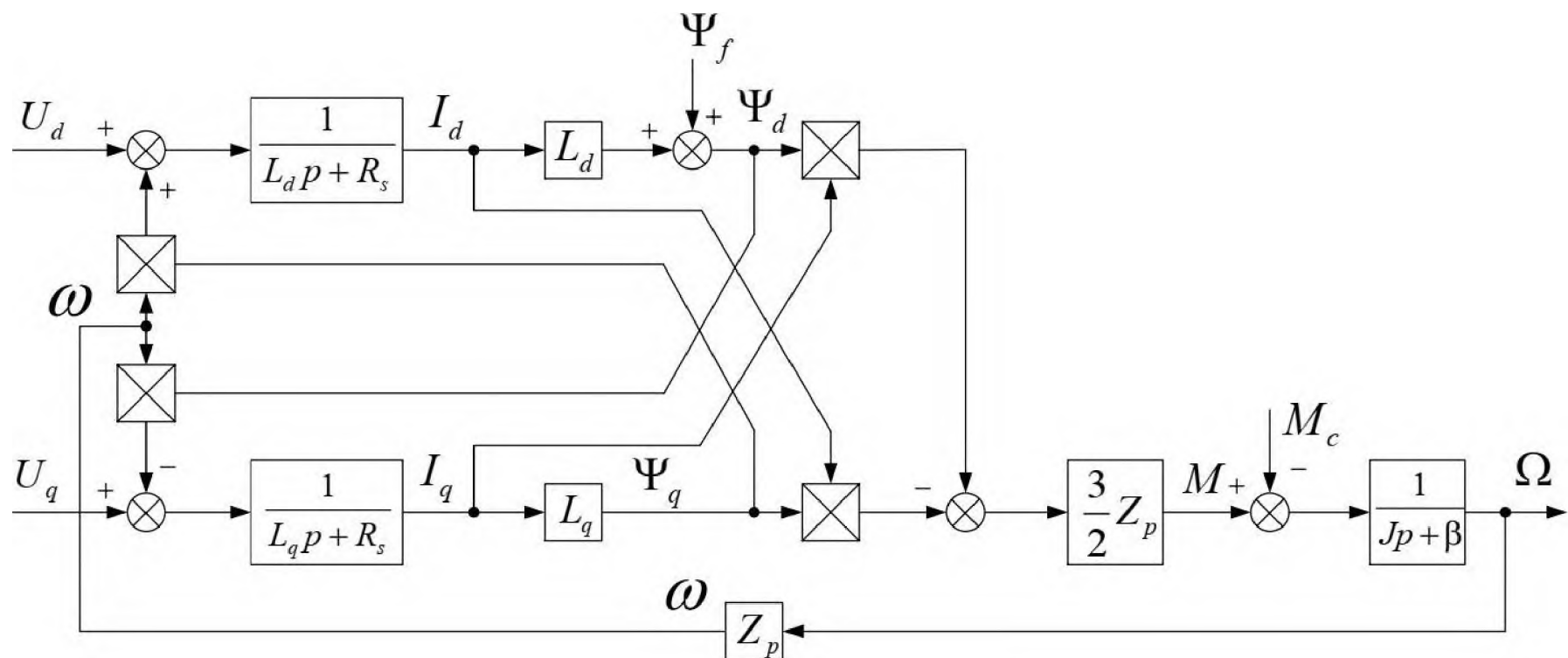


Рисунок 3.9 – Структурна схема синхронного двигуна

3.2.2 Побудова структурної схеми

3.2.2.1 Синтез регуляторів струму

Структурна схема контуру струму по осі d представлена на рисунку 3.10 [8].

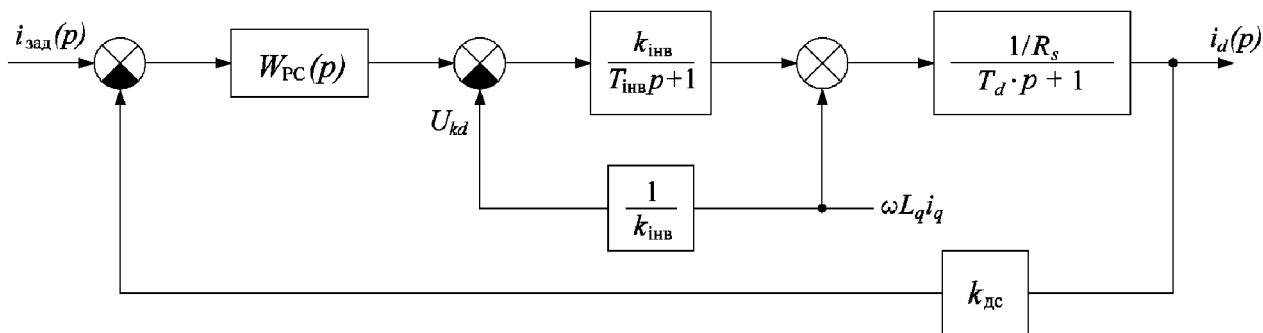


Рисунок 3.10 – Структурна схема контуру струму по осі d

На рисунку 3.10 прийняті наступні позначення: $U_{kd} = \frac{-1}{k_{\text{инв}}} \cdot \omega \cdot L_q \cdot I_q$ – сигнал компенсації впливу нелінійного перехресного зв'язку; $k_{\text{инв}}$ – коефіцієнт передачі перетворювача; $T_{\text{инв}}$ – стала часу перетворювача; $T_d = L_s/R_s$ – стала часу статормого ланцюга по осі d ($L_d = L_s$).

Враховуючи, що вплив перехресних зв'язків повністю скомпенсований, виконаємо налаштування контуру на модульний оптимум з малою некомпенсованою сталою часу $T_{\mu\text{C}} = T_{\text{инв}}$. Для цього приймаємо ПІ-регулятор струму з передавальною функцією виду:

$$W_{\text{PC}}(p) = \frac{R_s \cdot (T_d \cdot p + 1)}{2 \cdot k_{\text{инв}} \cdot k_{\text{дс}} \cdot T_{\mu\text{C}} \cdot p} = \frac{L_s}{2 \cdot k_{\text{инв}} \cdot k_{\text{дс}} \cdot T_{\mu\text{C}}} + \frac{R_s}{2 \cdot k_{\text{инв}} \cdot k_{\text{дс}} \cdot T_{\mu\text{C}}} \cdot \frac{1}{p}.$$

Передавальна функція замкненого контуру струму з цим регулятором має вигляд:

$$W_{\text{КС}}(p) = \frac{1/k_{\text{ДС}}}{2 \cdot T_{\mu\text{С}}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\mu\text{С}} \cdot p + 1}.$$

Синтез регулятора струму по осі q виконується аналогічним чином з врахуванням наступних умов:

$$U_{kq} = \omega \cdot (L_d \cdot I_d + \Psi_f),$$

$$T_q = \frac{L_q}{R_s},$$

$$W_{\text{РС}}(p) = \frac{R_s \cdot (T_q \cdot p + 1)}{2 \cdot k_{\text{ІНВ}} \cdot k_{\text{ДС}} \cdot T_{\mu\text{С}} \cdot p} = \frac{L_s}{2 \cdot k_{\text{ІНВ}} \cdot k_{\text{ДС}} \cdot T_{\mu\text{С}}} + \frac{R_s}{2 \cdot k_{\text{ІНВ}} \cdot k_{\text{ДС}} \cdot T_{\mu\text{С}}} \cdot \frac{1}{p}.$$

3.2.2.2 Синтез регулятора швидкості

Структурна схема контуру швидкості зображена на рисунку 3.11 [8].

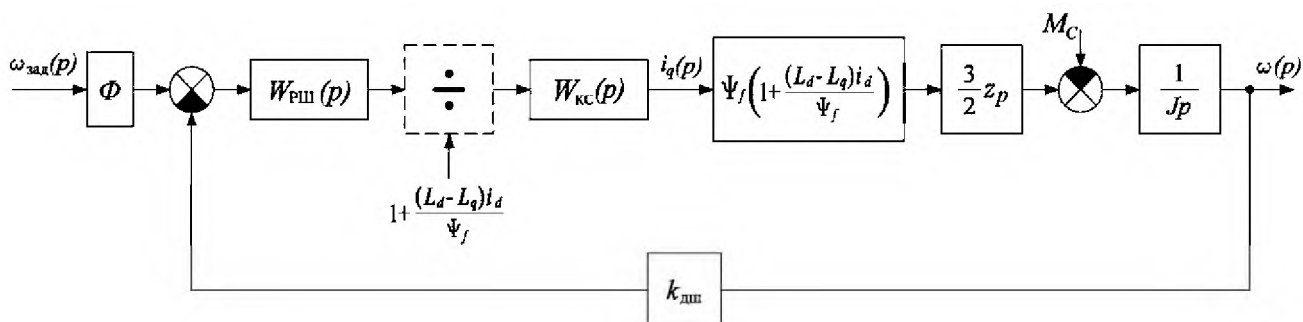


Рисунок 3.11 – Структурна схема контуру швидкості

Контур швидкості налаштовується на симетричний оптимум ($T_{\mu\text{Ш}} = 2 \cdot T_{\mu\text{С}}$) і передавальна функція ПІ-регулятора швидкості має вигляд:

$$W_{\text{РШ}}(p) = \frac{k_{\text{ДС}} \cdot J}{3 \cdot T_{\mu\text{Ш}} \cdot \Psi_f \cdot z_p \cdot k_{\text{ДШ}}} + \frac{k_{\text{ДС}} \cdot J}{12 \cdot T_{\mu\text{Ш}}^2 \cdot \Psi_f \cdot z_p \cdot k_{\text{ДШ}}} \cdot \frac{1}{p}.$$

Передавальна функція замкненого контуру швидкості з цим регулятором має вигляд:

$$W_{\text{кш}}(p) = \frac{1/k_{\text{дш}}}{8 \cdot T_{\mu\text{ш}}^2 \cdot p^2 + 4 \cdot T_{\mu\text{ш}} \cdot p + 1}.$$

На вході контуру швидкості встановлюється фільтр з передавальною функцією виду:

$$W_{\text{ф}}(p) = \frac{1}{4 \cdot T_{\mu\text{ш}} \cdot p + 1}.$$

3.2.2.3 Синтез регулятора положення

Структурна схема контуру положення приведена на рисунку 3.12 [8].

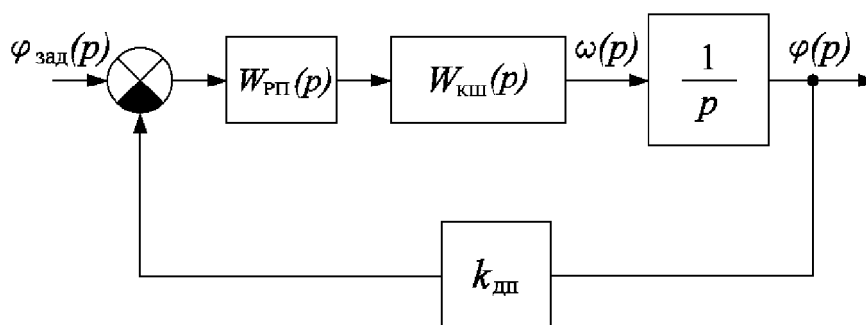


Рисунок 3.12 – Структурна схема контуру положення

Контур положення реалізується на базі замкненого контуру швидкості і оптимізується на модульний оптимум (МО).

Для оптимізації контуру положення на МО обирається ПІ-регулятор з передавальною функцією

$$W_{\text{рп}}(p) = k_{\text{рп}} \cdot \frac{T_{\text{рп}} \cdot p + 1}{T_{\text{рп}} \cdot p},$$

де $k_{\text{рп}}$ – коефіцієнт підсилення регулятора;

$$k_{\text{РП}} = \frac{k_{\text{ДШ}}}{k_{\text{М}} \cdot k_{\text{П}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_{\mu\text{П}}},$$

де $k_{\text{М}} = \varphi / \varphi_{\text{дв}}$ – коефіцієнт передачі механізму, значення і розмірність якого залежать від обраних одиниць вимірювання кута повороту вихідного валу φ ;

$k_{\text{П}} = k_{\text{ОП}} \cdot k_{\text{ДП}}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за положенням;

$k_{\text{ДП}}$ – коефіцієнт передачі датчика положення. Значення коефіцієнта передачі датчика положення $k_{\text{П}}$ визначається роботою конкретного пристрою перетворення аналогового значення кута повороту в дискретне значення.

Передавальна функція за керуванням оптимізованого на МО з ПІ-РП замкненого контуру положення:

$$W_{\text{П}}(p) \approx \frac{\frac{1}{k_{\text{П}}}(4 \cdot T_{\mu\text{П}} \cdot p + 1)}{32 \cdot T_{\mu\text{П}}^3 \cdot p^3 + 8 \cdot T_{\mu\text{П}}^2 \cdot p^2 + 4 \cdot T_{\mu\text{П}} \cdot p + 1}.$$

де $T_{\mu\text{П}} = 4 \cdot T_{\mu\text{Ш}}$ – стала часу регулятора, с.

На вході контуру положення встановлюється фільтр з передавальною функцією виду:

$$W_{\text{Ф}}(p) = \frac{1}{4 \cdot T_{\mu\text{П}} p + 1}.$$

Узагальнена лінеаризована структурна схема слідкувального синхронного привода приведена на рисунку 3.13 [8].

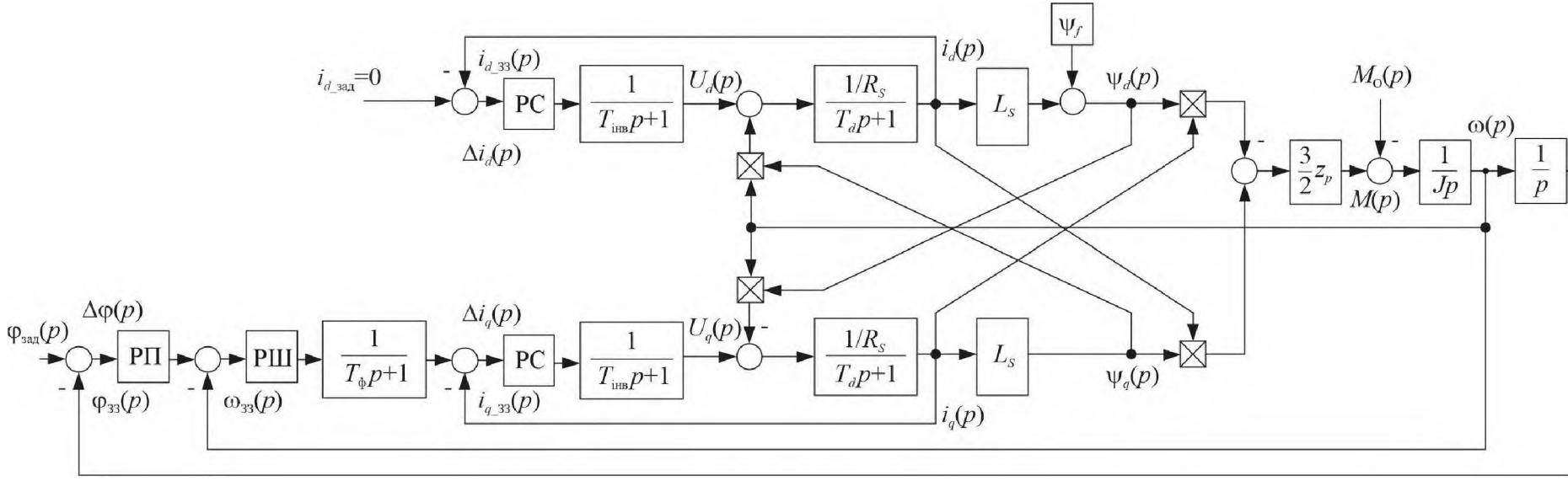


Рисунок 3.13 – Лінеаризована структура схеми підключувального синхронного привода

3.2.3 Розрахунок параметрів елементів

Характеристики досліджуваного об'єкта керування приведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Характеристики синхронного двигуна

Параметр	Значення
Тривалий момент при нульовому навантаженні, M_0 , Н·м	27,8
Максимальний момент, $M_{\max}$, Н·м	90,1
Номінальний момент, $M_{\text{ном}}$, Н·м	21,2
Номінальна частота обертання, $n_{\text{ном}}$, хв ⁻¹	1500
Максимальна частота обертання, $n_{\max}$, хв ⁻¹	4000
Струм при нульовій швидкості, I_0 , А	9
Номінальний струм, $I_{\text{ном}}$, А	7,3
Постійна електромагнітного моменту(при 75°C), k_t , Н·м/А	2,93
Постійна двигуна, k_e , В·с/рад	1,95
Активний опір обмотки статора (міжфазний) при 75°C, R_1 , Ом	1,85
Індуктивність обмотки статора (міжфазна), L_1 , Гн	$19,4 \cdot 10^{-3}$
Момент інерції ротора, J_d , кг·м ²	$17,94 \cdot 10^{-4}$
Кількість пар полюсів, p_0	5

У відповідності з вихідними даними розрахуємо параметри елементів силового ланцюга [9].

Модуль жорсткості природньої механічної характеристики, β , Н·м·с ,

$$\beta = \frac{k_t^2}{R_1},$$

$$\beta = \frac{2,93^2}{1,85} = 4,64 \text{ Н·м·с.}$$

Електромагнітна стала часу, T_e , с,

$$T_e = \frac{L_1}{R_1},$$

$$T_e = \frac{19,4 \cdot 10^{-3}}{1,85} = 10,49 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Електромеханічна стала часу, T_m , с,

$$T_m = \frac{J_d}{\beta},$$

$$T_m = \frac{17,94 \cdot 10^{-4}}{4,64} = 0,39 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Діюче значення номінальної лінійної ЕРС обертання, $E_{л.ном}$, В,

$$E_{л.ном} = U_{л.ном} - I_{ном} \cdot R_1,$$

де $U_{л.ном}$ – лінійна номінальна напруга; $U_{л.ном} = 400$ В.

$$E_{л.ном} = 400 - 7,3 \cdot 1,85 = 386,5 \text{ В.}$$

Номінальний електромагнітний момент, $M_{е.ном}$, Н·м,

$$M_{е.ном} = k_t \cdot I_{ном},$$

$$M_{е.ном} = 2,93 \cdot 7,3 = 21,4 \text{ Н·м.}$$

Номінальна кутова швидкість ідеального холостого ходу, $\omega_{0ном}$, с⁻¹,

$$\omega_{0ном} = \frac{U_{л.ном}}{k_t},$$

$$\omega_{0ном} = \frac{400}{2,93} = 136,5 \text{ с}^{-1}.$$

Номінальне падіння швидкості, $\Delta\omega_{\text{НОМ}}$, с^{-1} ,

$$\Delta\omega_{\text{НОМ}} = \frac{M_{\text{е.НОМ}}}{\beta},$$

$$\Delta\omega_{\text{НОМ}} = \frac{21,4}{4,64} = 4,6 \text{ с}^{-1}.$$

Номінальна кутова швидкість, $\omega_{\text{НОМ}}$, с^{-1} ,

$$\omega_{\text{НОМ}} = \omega_{0\text{НОМ}} - \Delta\omega_{\text{НОМ}},$$

$$\omega_{\text{НОМ}} = 136,5 - 4,6 = 131,9 \text{ с}^{-1}.$$

Діюче значення потокозчеплення по поздовжній осі d , Ψ_{1d} , Вб,

$$\Psi_{1d} = \frac{E_{\text{л.НОМ}}}{p_0 \cdot \omega_{\text{НОМ}}},$$

$$\Psi_{1d} = \frac{386,5}{5 \cdot 131,9} = 0,586 \text{ Вб}.$$

Потокозчеплення постійних магнітів на роторі, Ψ_f , Вб,

$$\Psi_f = \frac{2}{3} \cdot \frac{k_t}{p_0},$$

$$\Psi_f = \frac{2}{3} \cdot \frac{2,93}{5} = 0,391 \text{ Вб}.$$

Номінальна споживана трифазним СДПМ активна потужність, $P_{1\text{НОМ}}$, Вт,

$$P_{1\text{НОМ}} = U_{\text{л.НОМ}} \cdot I_{\text{НОМ}},$$

$$P_{1\text{НОМ}} = 400 \cdot 7,3 = 2920 \text{ Вт}.$$

Номінальна корисна потужність, $P_{\text{НОМ}}$, Вт,

$$P_{\text{НОМ}} = M_{\text{НОМ}} \cdot \omega_{\text{НОМ}},$$

$$P_{\text{НОМ}} = 21,2 \cdot 131,9 = 2796 \text{ Вт.}$$

Номінальний ККД СДПМ, η ,

$$\eta = \frac{P_{\text{НОМ}}}{P_{1\text{НОМ}}},$$

$$\eta = \frac{2796}{2920} = 0,96.$$

Сумарний момент інерції привода, J_{Σ} , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$,

$$J_{\Sigma} = J_{\text{м}} + J_{\text{д}}$$

де $J_{\text{м}}$ – момент інерції механічної схеми, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

$$J_{\text{м}} = m_{\text{с}} \cdot \rho^2,$$

де $m_{\text{с}}$ – маса супорта; $m_{\text{с}}=60 \text{ кг}$;

ρ – радіус приведення швидкості кінематичної передачі, м.

$$\rho = \frac{h \cdot z_{\text{р}}}{2 \cdot \pi},$$

де h – крок гвинта; $h=10^{-2} \text{ м/об}$;

$z_{\text{р}}$ – число заходів гвинта; $z_{\text{р}}=6$.

$$\rho = \frac{10^{-2} \cdot 6}{2 \cdot \pi} = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$J_{\text{м}} = 60 \cdot (9,5 \cdot 10^{-3})^2 = 5,47 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

$$J_{\Sigma} = 5,47 \cdot 10^{-3} + 17,94 \cdot 10^{-4} = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Амплітудне номінальне значення фазної напруги обмотки статора, $U_{\text{ф.н}}$, В,

$$U_{\text{ф.н}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{ф}},$$

де U_{ϕ} – фазна напруга статора; $U_{\phi}=220$ В.

$$U_{\phi.H} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 \text{ В.}$$

Коефіцієнт передачі перетворювача частоти, k_{iHB}

$$k_{iHB} = \frac{U_{\phi.H} \cdot k_{cx}}{U_{33}},$$

де k_{cx} – коефіцієнт трифазної мостової схеми перетворювача [9], $k_{cx}=1,35$;

U_{33} – напруга зворотного зв'язку, $U_{33}=10$ В.

$$k_{iHB} = \frac{311 \cdot 1,35}{10} = 42.$$

Стала часу перетворювача частоти, T_{iHB} , с,

$$T_{iHB} = 0,001 \text{ с.}$$

Розраховуємо параметри регулятора струму.

Стала часу статорного ланцюга по осі d ($L_d = L_s$), T_e , с,

$$T_e = T_d = 10,49 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом.

Задаємося умовами обмеження параметрів системи і приймаємо

$$\begin{aligned} U_{3C.\max} &\leq 10 \text{ В}, \\ I_{3C} &= (2 \div 3)I_{\text{НОМ}}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

З урахуванням умов (3.3) розраховуємо коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом:

$$\begin{aligned} k_{\text{ДС}} &\leq \frac{U_{3C.\max}}{I_{3C}} = \frac{U_{3C.\max}}{(2 \div 3)I_{\text{НОМ}}}; \\ k_{\text{ДС}} &= \frac{10}{(2 \div 3) \cdot 7,3} = 0,45 \div 0,68 \text{ В/А}. \end{aligned}$$

Приймаємо $k_{\text{ДС}}=0,55 \text{ В/А}$.

$$\begin{aligned} W_{\text{РС}}(p) &= \frac{R_s \cdot (T_d \cdot p + 1)}{2 \cdot k_{\text{ІНВ}} \cdot k_{\text{ДС}} \cdot T_{\mu\text{С}} \cdot p} = \frac{L_s}{2 \cdot k_{\text{ІНВ}} \cdot k_{\text{ДС}} \cdot T_{\mu\text{С}}} + \frac{R_s}{2 \cdot k_{\text{ІНВ}} \cdot k_{\text{ДС}} \cdot T_{\mu\text{С}}} \cdot \frac{1}{p}, \\ W_{\text{РС}}(p) &= \frac{19,4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 42 \cdot 0,55 \cdot 0,001} + \frac{1,85}{2 \cdot 42 \cdot 0,55 \cdot 0,001} \cdot \frac{1}{p}. \end{aligned}$$

Отже, коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора струму $k_{\text{РС}}=0,42$, а інтегральна складова $T_{\text{РС}}=0,025 \text{ с}$.

Розраховуємо параметри регулятора швидкості.

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю

$$\begin{aligned} k_{\text{ДШ}} &= \frac{U_{33}}{\omega_{\text{НОМ}}} \\ k_{\text{ДШ}} &= \frac{10}{131,9} = 0,076 \text{ В} \cdot \text{с}. \end{aligned}$$

Контур швидкості налаштовується на симетричний оптимум ($T_{\mu\text{Ш}} = 2 \cdot T_{\mu\text{С}}$):

$$W_{\text{РШ}}(p) = \frac{k_{\text{ДС}} \cdot J_{\Sigma}}{3 \cdot T_{\mu\text{Ш}} \cdot \Psi_f \cdot z_p \cdot k_{\text{ДШ}}} + \frac{k_{\text{ДС}} \cdot J_{\Sigma}}{12 \cdot T_{\mu\text{Ш}}^2 \cdot \Psi_f \cdot z_p \cdot k_{\text{ДШ}}} \cdot \frac{1}{p},$$

$$W_{\text{РШ}}(p) = \frac{0,55 \cdot 7,3 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 2 \cdot 0,001 \cdot 0,391 \cdot 5 \cdot 0,076} + \frac{0,55 \cdot 7,3 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot (2 \cdot 0,001)^2 \cdot 0,391 \cdot 5 \cdot 0,076} \cdot \frac{1}{p}.$$

Отже, коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора швидкості $k_{\text{РШ}}=4,5$, а інтегральна складова $T_{\text{РШ}} = 17,8 \cdot 10^{-4}$ с.

Розраховуємо параметри регулятора положення.

Для оптимізації контуру положення на МО обирається ПІ-регулятор з передавальною функцією

$$W_{\text{РП}}(p) = k_{\text{РП}} \cdot \frac{T_{\text{РП}} \cdot p + 1}{T_{\text{РП}} \cdot p}$$

де $k_{\text{РП}}$ – коефіцієнт підсилення регулятора;

$$T_{\text{РП}}=4 \cdot T_{\mu\text{П}};$$

$$k_{\text{РП}} = \frac{k_{\text{ДШ}}}{k_{\text{М}} \cdot k_{\text{П}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_{\mu\text{П}}},$$

де $k_{\text{М}}$ – коефіцієнт передачі механізму;

$k_{\text{П}} = k_{\text{ДП}}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за положенням;

$k_{\text{ДП}}$ – коефіцієнт передачі датчика положення.

$$k_{\text{М}} = \frac{h}{2 \cdot \pi \cdot i},$$

де h – крок гвинта; $h=10^{-2}$ м/об;

i – передавальне число редуктора; $i=1$.

$$k_{\text{М}} = \frac{10^{-2}}{2 \cdot \pi} = 0,0015 \text{ м.}$$

$$k_{\text{ДП}} = \frac{U_{33}}{l_{\text{max}}}$$

де l_{max} – максимальне поздовжнє переміщення; $l_{\text{max}}=0,908$ м.

$$k_{\text{ДП}} = \frac{10}{0,908} = 11,01 \text{ В/м.}$$

$$k_{\text{РП}} = \frac{0,076}{0,0015 \cdot 11,01} \cdot \frac{1}{2 \cdot 4 \cdot 0,001} = 575,23.$$

Інтегральна складова ПІ-регулятора положення, $T_{\text{РП}}$, с,

$$T_{\text{РП}} = \frac{T_{\text{РПІ}}}{k_{\text{РП}}},$$

$$T_{\text{РП}} = \frac{4 \cdot 4 \cdot 0,001}{575,23} = 2,78 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

3.3 Моделювання системи керування електропривода в MATLAB

3.3.1 Побудова імітаційної моделі в MATLAB

На рисунку 3.14 зображено імітаційну модель, що побудована в середовищі MATLAB. Для оцінки якісних показників роботи САК в динамічних режимах аналізується її реакція на ступінчасту одиничну дію. При цьому перехідна характеристика повинна знаходитися в межах заданої області, параметри якої визначають вимоги технологічного агрегату.

Перехідна характеристика оцінюється сукупністю параметрів, які називаються показниками якості. До них відносяться [10]:

- перерегулювання σ – відношення максимального відхилення керованої змінної щодо її сталого значення;
- коливальність μ – число максимумів або мінімумів перехідної характеристики за час регулювання;
- тривалість перехідного процесу t_n – це час, після закінчення якого відхилення керованої змінної щодо сталого значення стає і залишається по абсолютній величині менше заданого значення Δ , визначуваного вимогами, що пред'являються до САК;
- час досягнення першого максимуму $t_{\max}$ – момент часу, в який керована змінна досягає свого максимального значення;
- час встановлення $t_{1\max}$ – проміжок часу після закінчення якого керована змінна вперше досягає свого сталого значення.

3.3.2 Побудова динамічних характеристик та аналіз показників якості керування

За допомогою імітаційної моделі виконаємо моделювання перехідних процесів, котрі відповідають роботі електропривода поздовжньої подачі. Пуск двигуна здійснюється на холостому ході при заданій напрузі 1 В до номінальної швидкості $\omega=131,9$ рад/с, з цією швидкістю виконується підведення інструмента до заготовки, різання заготовки починається, коли навантаження збільшується до номінального значення $M_H=21,2$ Н·м.

Графіки перехідних процесів за моментом, швидкістю та положенням представлено на рисунках 3.15, 3.16 та 3.17 відповідно.

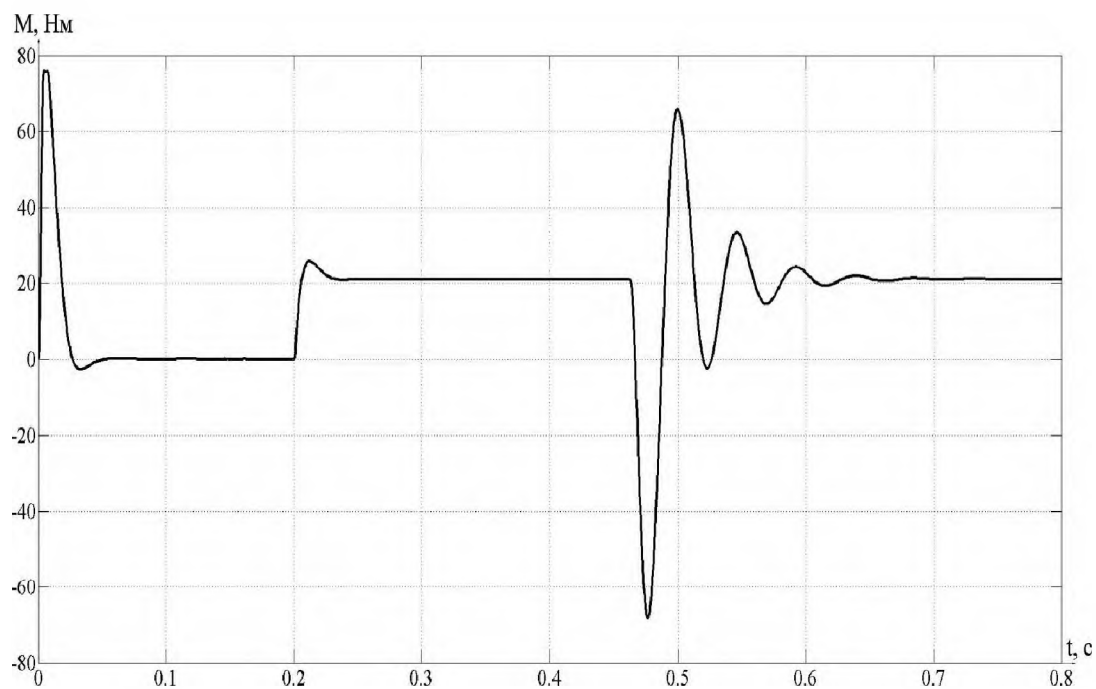


Рисунок 3.15 – Перехідна характеристики електропривода за моментом

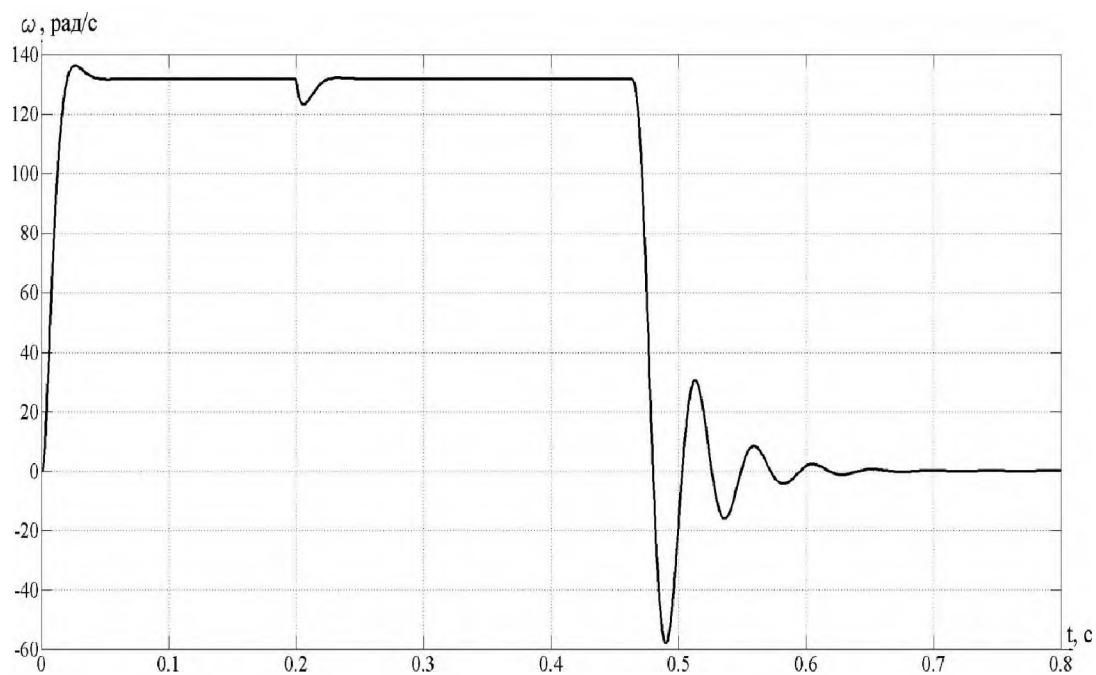


Рисунок 3.16 – Перехідна характеристики електропривода за швидкістю

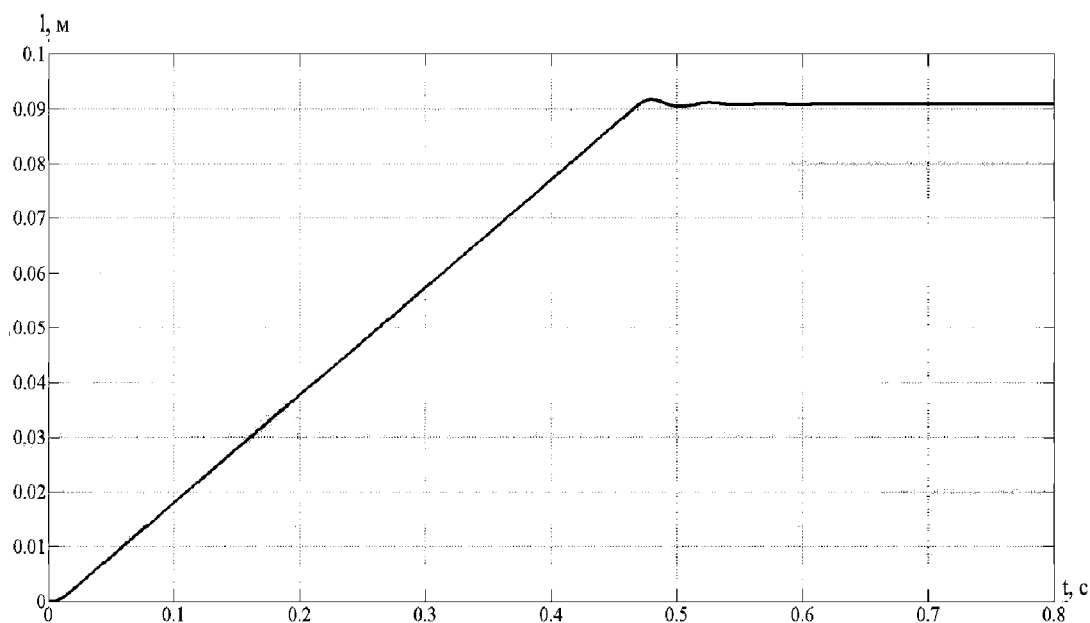


Рисунок 3.17 – Перехідна характеристики електропривода за положенням

Оскільки очевидно, що отримані перехідні характеристики не задовольняють необхідним умовам роботи електропривода, то виконаємо параметричну оптимізацію регуляторів струму, швидкості та положення.

Під час проведення параметричної оптимізації були прийняті наступні міри:

- коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора струму збільшено в 4 рази
($k_{PC} = 0,42 \cdot 4 = 1,68$);
- коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора швидкості збільшено в 1,5 рази
($k_{PШ} = 4,5 \cdot 1,5 = 6,75$);
- коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора положення зменшено в 4 рази
($k_{PP} = 575,23/4 = 143,8$).

Для більш наглядної оцінки роботи електропривода та аналізу перехідних характеристик, промодельємо роботу системи при заданій напрузі $U=1$ В. Отримані характеристики показані на рисунках 3.18, 3.19 та 3.20.

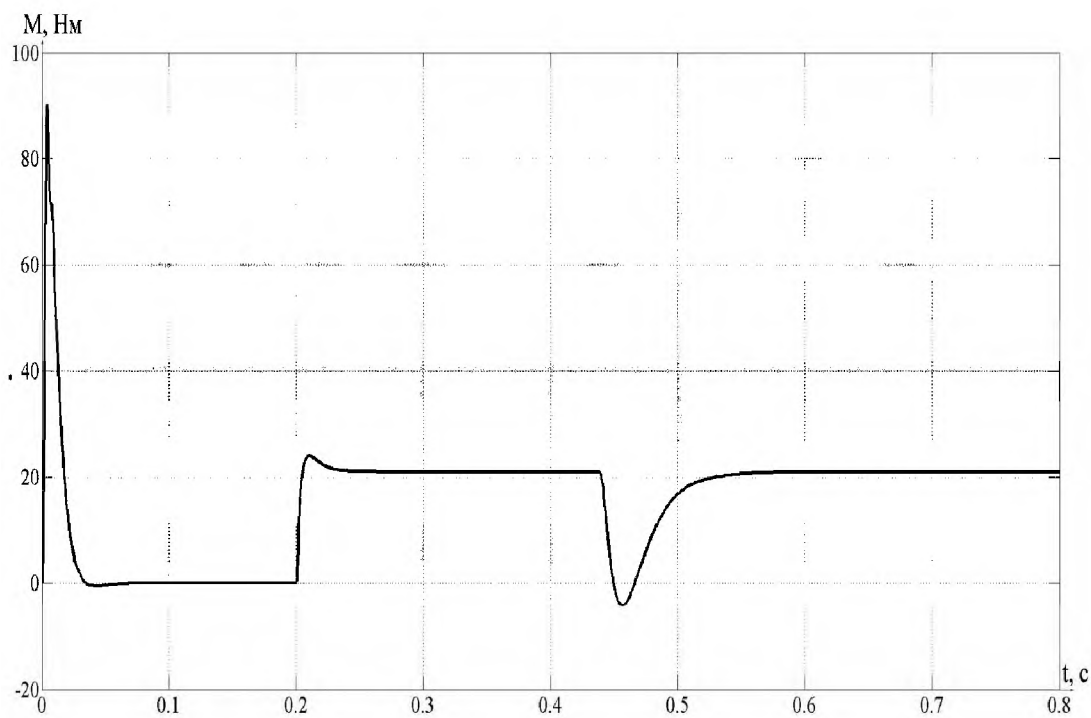


Рисунок 3.18 – Перехідна характеристика привода за моментом після параметричної оптимізації

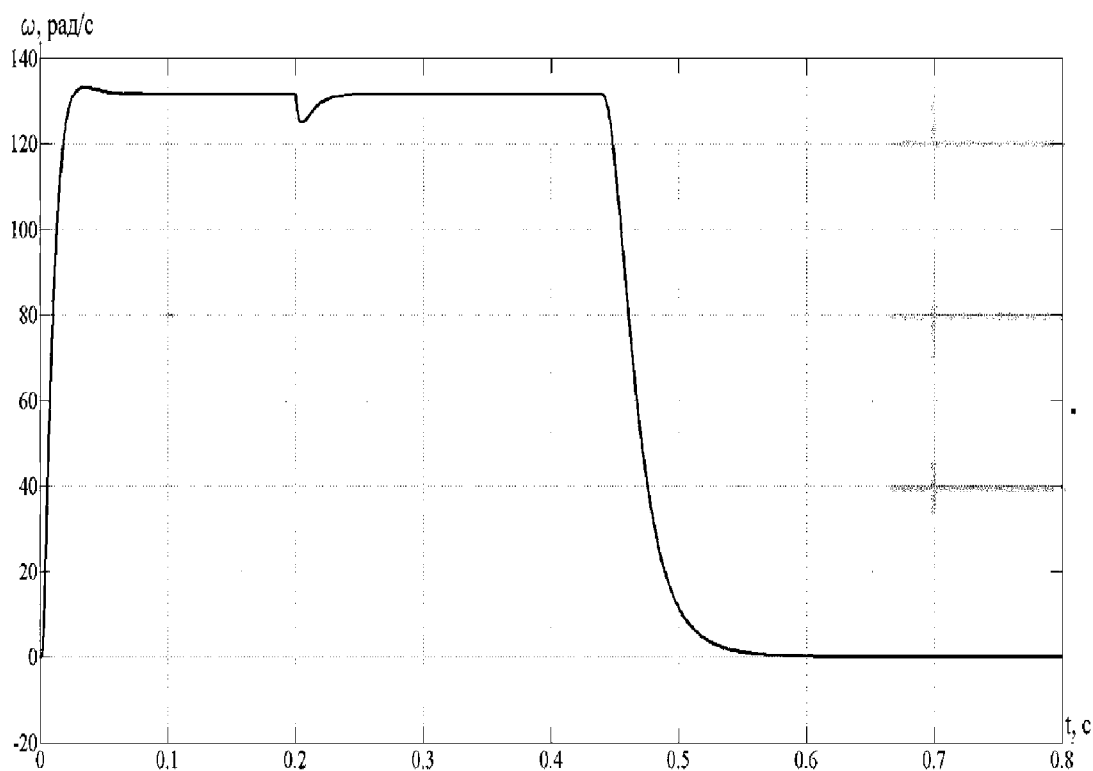


Рисунок 3.19 – Перехідна характеристика привода за швидкістю після параметричної оптимізації

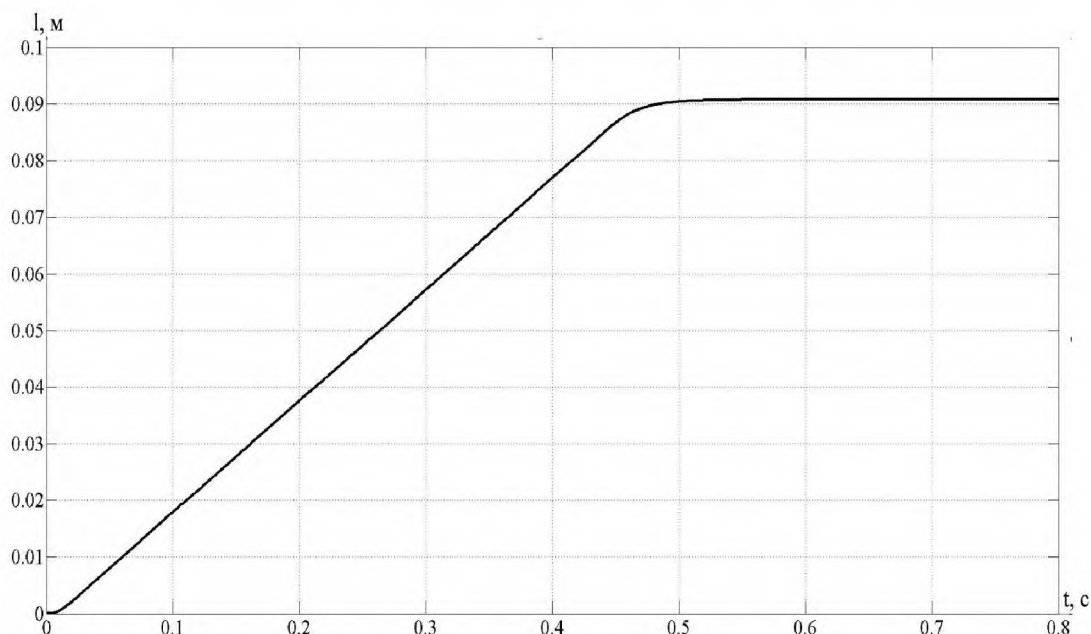


Рисунок 3.20 – Перехідна характеристика привода за положенням після параметричної оптимізації

Запас стійкості САК оцінюють по величині перерегулювання, σ

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y_{\text{уст}}}{y_{\text{уст}}} \cdot 100\%.$$

З графіків, які зображено на рисунках 3.18-3.20 були визначені наступні показники якості перехідного процесу (таблиця 3.5). Очевидно, що показники якості керування задовольняють умовам плавного пуску електропривода та забезпечують безаварійну роботу.

Таблиця 3.5 – Показники якості

Параметр	Відносне перерегулювання $\square$, %	Час встановлення t_p , с	Час наростання t_H , с	Усталена похибка $\varepsilon_{\text{уст}}$, %
Кутова швидкість	1,7	0,023	-	0
Переміщення	0	-	-	0,9

3.4 Висновки до розділу 3

3.4.1 Побудовано функціональну схему електропривода подачі на основі системи векторного керування синхронним двигуном із постійними магнітами. Основною областю застосування таких систем є високоякісний електропривод подач металорізальних верстатів. Векторне керування дозволяє працювати з повним моментом двигуна в області нульових частот, підтримувати швидкість при змінному навантаженні без датчиків зворотного зв'язку, точно контролювати момент на валу двигуна.

3.4.2 Обрано сервопривод KEB COMBIVERT, який застосовується у верстатах та оброблювальних центрах. Сервопривод складається із синхронного електродвигуна з датчиком положення ротора і перетворювача частоти. В якості системи ЧПК обрано NC-210, який призначено для створення комплексів “пристрій – об’єкт керування”, таких як високоавтоматизовані верстати і оброблювальні центри.

3.4.3 Побудовано структурну схему на базі функціональної схеми з використанням моделі синхронного двигуна з постійними магнітами. Виконано розрахунок параметрів регуляторів системи керування електропривода за умови налаштування контуру швидкості на симетричний оптимум, контурів струму та положення – на технічний оптимум.

3.4.4 За допомогою імітаційної моделі виконано моделювання перехідних режимів, котрі відповідають роботі електропривода поздовжньої подачі. Виконано аналіз результатів та доведено, що показники якості керування задовольняють умовам плавного пуску електропривода та забезпечують безаварійну роботу.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів

В процесі трудової діяльності оператор здійснює процес обробки деталі за допомогою ЧПК. При цьому він здійснює введення, відлагодження і коригування програми, керує електроагрегатами, вмикає і вимикає верстат, здійснює контроль за ходом технологічної операції. Налагодження і переналагодження верстата здійснюється наладчиком.

В процесі експлуатації верстата на робочого впливає ряд джерел небезпечних та шкідливих факторів. За характером та природою дії всі небезпечні та шкідливі фактори поділяють на 4 групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні. До фізичних факторів належать: підвищені або понижені: температура, вологість, атмосферний тиск; підвищена швидкість руху повітря; недостатня освітленість; машини, механізми або їх елементи, що рухаються або обертаються; конструкції, що руйнуються; елементи середовища, нагріті до високих температур; устаткування, що має підвищений тиск або розрідження; підвищені рівні електромагнітного, іонізуючого та акустичного випромінювання; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електричної напруги; перебування на висоті; невагомість і ряд інших [11].

Хімічні фактори – це хімічні елементи, речовини та сполуки, які перебувають у різному агрегатному стані (твердому, рідкому та газоподібному) і поділяються залежно від шляхів проникнення та характеру дії на організм людини. Існують три шляхи проникнення хімічних речовин в людський організм через:

- органи дихання;
- шлунково-кишковий тракт;
- шкіряні покрови та слизові оболонки.

За характером дії виділяють токсичні, подразнювальні, задушливі, сенситізуючі, канцерогенні, мутагенні речовини та такі, що впливають на репродуктивну функцію.

Біологічні фактори поділяються на макроорганізми (рослини та тварини) і мікроорганізми (бактерії, віруси, спірохети, грибки, простіші).

До психофізіологічних факторів належать фізичні (статичні та динамічні) і нервово-психічні перенавантаження (емоційні, аналізаторів, монотонність праці).

До небезпечних механічних факторів відносяться рухомі елементи конструкції верстата (револьверна голівка, піноль), супорт з встановленим в ньому ріжучим інструментом, стружка і осколки, які вилітають в процесі різання ріжучого інструменту.

Основними небезпечними механічними факторами, які виникають в процесі токарної обробки деталі, являються:

- стружка “сталевий в’юн”, яка має гострі краї і підвищену температуру;
- шпиндель, який обертається з патроном і закріпленою заготівкою;
- гострі крайки заготівки, вістря різця;
- рухомі елементи конструкції верстата, що потребують огорожі (шків і ремінні передачі, ходовий гвинт і вал, які розподіляють рух в супорті);
- падаюча заготівка.

Для безпечної експлуатації верстата і захисту обслуговуючого персоналу передбачені захисні пристрої, які призначені для огорожі рухомих механізмів, включаючи можливість допуску до них. Зона різання має захисний пристрій, який включає в себе щиток з оглядовим вікном із міцного скла, що захищає людину від вильоту стружки, бризок МОР і масел.

Процес обробки метала пов’язаний з виділенням пилу. Нетоксичний пил зазвичай чинить подразнювальну дію на слизову оболонку людини, а при потрап-лянні в легені – специфічні захворювання. Для усунення цього небезпечного фактора використовується витяжна вентиляція.

Джерелом вібрацій являється робота електродвигунів, зубчастих передач, а також сам процес різання.

Норми вібрації приведені в ДСН 3.3.6.039-99 “Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації”.

Підвищений рівень вібрації чинить шкідливий вплив на нервову ендокринну, м'язову, кістково-м'язову, серцево-судинну системи. При деяких частотах страждають внутрішні органи, виникають спазми судин, виникає вібраційна хвороба.

Захист від вібрації здійснюється шляхом демпфування, тобто встановленням верстата на спеціальні віброопори. Зниження вібрації досягається також за рахунок збільшення жорсткості системи ВПД (верстат, пристрій, інструмент, деталь).

Шум несприятливо впливає на організм людини, викликає психічні і фізіологічні порушення, які знижують працездатність і створюють передумови для загальних і професійних захворювань і виробничого травматизму.

Процес різання, робота електродвигунів, механізмів і систем верстата супроводжуються виникненням акустичних коливань на ультразвукових і інфразвукових частотах. При обробці і контролі якості деталі, що виготовляється, ультразвукові установки не використовуються.

Всі джерела шуму можна згрупувати в конструкторські і технологічні. Конструкторські джерела шуму діють при роботі верстата на холостих режимах. До них відносяться електродвигуни, підшипники кочення, зубчасті передачі і незрівноважені частини, що обертаються. Технологічні джерела пов'язані із самим процесом різання. На рівень технологічного шуму чинить вплив режим різання, конструктивні особливості і ступінь зношення ріжучого інструменту.

Октавні рівні звукового тиску і рівні на робочому місці оператора при роботі верстата під навантаженням не повинні перевищувати значення, що вказані в ГОСТ 12.1.003 – 88 “ССБТ. Шум. Общие требования безопасности”.

Вибір відповідного класу точності виготовлення деталей верстата і балансування деталей, що обертаються, централізована циркуляційна система мастила дозволяє покращити шумові характеристики верстата.

Виробниче приміщення (механічний цех), в якому здійснюється технологічний процес, характеризується наявністю струмопровідних підлог і можливістю одночасного дотику металевих конструкцій, з'єднаних із землею, і елементів еле-

кстрообладнання, які знаходяться під напругою. У відповідності з ПУЕ механічний цех з такими умовами відноситься до приміщень особливо небезпечних за ураженням електричним струмом. Таким чином, елементи обладнання, які нормально не знаходяться під напругою, повинні заземлюватися або занулюватися при номінальній напрузі від 220 В змінного струму і від 110 В постійного струму у відповідності до ГОСТ 12.1.030-81 “ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление”.

Електрофікованим обладнанням, окрім металооброблювальних верстатів, є вантажопідйомні пристрої, освітлювальна установка загального освітлення, вентиляційні установки загальнообмінної вентиляції.

Живлення електроспоживачів здійснюється від трифазної чотирьохпровідної мережі з глухозаземленою нейтраллю напругою 380/220 В безпосередньо через понижувальні трансформатори і випрямлячі.

У верстаті 16А20Ф3 здійснюється недоступність струмоведучих частин, за допомогою їхньої надійної ізоляції та розміщенням в недоступних місцях.

Електроустановки огорожені. Забезпечується ізоляція робочого місця.

Для нормальної роботи персоналу необхідна правильна організація освітлення. Нормальне освітлення сприяє тому, що людина тривалий час зберігає здатність стійкої роботи без втоми, так як від освітлення залежить швидкість, з якою око розрізняє предмети.

Робота на верстаті пов'язана із напругою зору під час контролю установки виробу і ріжучого інструменту, проміру деталі, а також при контролі роботи системи ЧПК.

Умови роботи вимагають не тільки достатнього освітлення, але і раціонального напрямку світла, відсутність різких тіней і відблисків, що викликають осліплювану дію та знижують працездатність.

Для освітлення виробничого приміщення використовуються відкриті світильники типу ВД (відкриті, денні). Верстат має вбудований місцевий світильник, що має лампу розжарювання. Світильник забезпечує спрямованість світлового потоку для освітлення зони різання і контролю якості обробки поверхонь (60°) та

необхідну освітленість. Зона різання освітлюється зліва і зверху, що виключає напрям світла в очі.

Контроль освітленості на робочому місці здійснюється у відповідності з ДБН В.2.5-28-2006 “Природне і штучне освітлення”.

Нормовані значення коефіцієнта природної освітленості на робочих поверхнях при природному і сумісному освітленні за ДБН В.2.5-28-2006 “Природне і штучне освітлення” приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Нормовані значення коефіцієнта природної освітленості

Характер зорової роботи	Розряд зорової роботи	Штучне		Природне		Сумісне	
		освітл., лк		КПО, %		КПО, %	
		комб.	загальне	верхнє	бокове	верхнє	бокове
Високо- точн.	2	1000	300	5	2	2-3	0,7-1,2

Верстат з ЧПК обслуговують оператор та наладчик. Налагодження та переналагодження здійснює наладчик, а підналагодження, оперативну роботу та контроль за роботою – оператор.

Функції оператора при експлуатації верстата зводяться до установки, закріпленню та вивірці пристосувань та інструменту на верстаті, установці програмно-носія і заготовок, заміні інструменту, зняттю деталей і спостереження за ходом роботи верстата.

Робота оператора пов’язана із робочою позою стоячи, непостійною ходьбою і супроводжується тимчасовим незначним фізичним навантаженням і енергозатратами в межах 121-150 ккал/год (140-150 Вт). У відповідності до ГОСТ 12.1.005-88 вона відноситься до легкої фізичної роботи. Основні вимоги до робочого місця при виконанні роботи стоячи приведені у ГОСТ 12.2.033-78 “ССБТ. Рабочее место при выполнении работы стоя. Общие эргономические требования”.

При роботі оператора відсутні статичні навантаження, що пов’язані із утриманням вантажів. У зв’язку із роботою в позі стоячи і недостатньою ходьбою на

оператора діє гіподинамія та підвищене навантаження на ноги. Для профілактики передбачені виробнича гімнастика, зміна робочої пози в процесі роботи, загальні міри по зниженню утомлюваності та монотонності праці.

За напруженістю праці робота оператора характеризується підвищеною відповідальністю за технологічний процес і підвищеним нервово-емоціональним навантаженням при установці, закріпленню, вивірці пристосувань та установці програмоносія. Режим праці верстатника фізіологічно обґрунтований. Робота здійснюється у дві зміни. Нічна зміна виключається. Тривалість робочого дня складає 8 годин. Крім обідньої перерви тривалістю одну годину, в першій та другій половині дня передбачаються двадцятихвилинні перерви на відпочинок та фізіологічні потреби.

4.2 Розрахунок захисного заземлення

За таблицями додатка визначаємо питомий опір чорнозему $\rho=200$ Ом·м та кліматичний коефіцієнт для глинозему середньої вологості $\varphi=1,3$ [12].

Розрахунковий питомий опір ґрунту, ρ_p , Ом·м, відповідно дорівнює:

$$\rho_p = \rho \cdot \varphi,$$
$$\rho_p = 200 \cdot 1,3 = 260 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

Визначаємо опір розтікання струму одиночного заземлювача, $R_{од}$, Ом,

$$R_{од} = \frac{\rho_p}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right),$$

де l – довжина заземлювача; $l=2,4$ м;

d – діаметр заземлювача; $d=0,05$ м;

t – відстань від поверхні землі до середини заземлювача, м.

$$t = 0,5 \cdot l + h,$$

де h – заглиблення заземлювача; $h=0,8$ м.

$$t = 0,5 \cdot 2,4 + 0,8 = 2 \text{ м},$$

$$R_{од} = \frac{260}{2 \cdot \pi \cdot 2,4} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 2,4}{0,05} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2 + 2,4}{4 \cdot 2 - 2,4} \right) = 84 \text{ Ом}.$$

Визначаємо орієнтовану кількість вертикальних заземлювачів, n' , шт,

$$n' = \frac{R_{од}}{R_n},$$

де R_n – найбільший допустимий опір заземлюючого пристрою; $R_n=4$ Ом.

$$n' = \frac{84}{4} = 21 \text{ шт}.$$

При відомій кількості заземлювачів і відношенню відстані між заземлювачами до їхньої довжини за таблицею додатка [12] визначаємо коефіцієнт використання заземлювачів $\eta=0,48$.

Визначаємо уточнену кількість заземлювачів, n , шт,

$$n = \frac{R_{\text{од}}}{R_{\text{н}} \cdot \eta},$$

$$n = \frac{84}{4 \cdot 0,48} = 43,75 \approx 44 \text{ шт.}$$

Розраховуємо довжину з'єднувальної шини, L , м,

$$L = 1,05 \cdot a \cdot n,$$

де a – відстань між заземлювачами; $a=2,4$ м.

$$L = 1,05 \cdot 2,4 \cdot 44 = 110,9 \text{ м.}$$

Розраховуємо опір розтікання з'єднувальної шини з урахуванням коефіцієнта її використання, $R_{\text{ш}}$, Ом,

$$R_{\text{ш}} = \frac{\rho_{\text{р}}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \eta_{\text{ш}}} \cdot \ln \frac{2 \cdot L^2}{b \cdot h},$$

де $\eta_{\text{ш}}$ – коефіцієнт використання шини; $\eta_{\text{ш}}=0,22$;

b – ширина шини, $b=0,8$ м.

$$R_{\text{ш}} = \frac{260}{2 \cdot \pi \cdot 110,9 \cdot 0,22} \cdot \ln \frac{2 \cdot 110,9^2}{0,8 \cdot 0,8} = 17,9 \text{ Ом.}$$

Обчислюємо опір розтікання струму всього заземлюючого пристрою, R , Ом,

$$R = \frac{1}{\frac{\eta_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}} + \frac{n \cdot \eta}{R_{\text{од}}}},$$

$$R = \frac{1}{\frac{0,22}{17,9} + \frac{44 \cdot 0,48}{84}} = 3,79;$$

$$R \leq R_{\text{н}};$$

$$3,79 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом.}$$

4.3 Заходи щодо техніки безпеки

При роботі на металорізальних верстатах передбачаються наступні заходи щодо техніки безпеки [2, 13].

До роботи на металорізальних верстатах мають допуск особи, які пройшли медичний огляд, мають спеціальні виробничі знання та пройшли інструктаж за ТБ. Допуск до самостійної роботи здійснюється після оформлення протокольного рішення та атестації працівника. Робітника не допускають до роботи на верстаті, попередньо не ознайомивши його з правилами техніки безпеки.

До роботи на верстаті можна допускати тільки кваліфікованих працівників, які вивчили конструктивні і технологічні особливості верстата та правила технічної експлуатації, пройшли спеціальний інструктаж, здали екзамен заводській кваліфікаційній комісії та отримали спеціальне посвідчення на право роботи на даному верстаті.

Перед кожним вмиканням верстата необхідно переконатися, що пуск нікому не загрожує небезпекою, так як недбалість в даному випадку може призвести до летального результату. Якщо по будь-якій причині зона різання верстата не огорожена захисними кожухами, що захищають від стружки та МОР (мастильно-охолоджувальна рідина), необхідно використовувати засоби індивідуального захисту (захисні окуляри ЗП-64 ГОСТ 12.4.013, щитки для захисту обличчя ГОСТ 12.4.023-76). Для уникнення травм осіб, які не мають відношення до роботи, що виконується на верстаті, їх потрібно не допускати до робочого місця, а також не дозволяти прибиральнику прибирати біля верстата під час його роботи. Працювати на верстаті в рукавицях або рукавчиках, а також із забинтованими пальцями без гумових напальчників не дозволяється через наявність у верстаті частин, що обертаються. Під час роботи не брати та не подавати через верстат під час роботи будь-які предмети.

Перед початком роботи необхідно ретельно провести огляд всіх вузлів та механізмів верстата, а також для уникнення нещасних випадків перевірити наявність, справність і надійність:

- заземлюючи пристроїв;
- пристроїв кріплення інструменту.

При роботі на верстаті необхідно строго дотримуватися наступних вимог:

- до установки заготовки в шпиндель необхідно перевірити стан посадочних поверхонь інструменту і шпинделя; не допускається робота з пошкодженнями на посадочних поверхнях;
- обробка заготовки здійснюється при повністю закритому кожусі;
- вмикати шпиндель можна, тільки впевнившись в тому, що різець надійно і правильно закріплений;
- перед пуском верстата перевіряти надійність закріплення деталі, що обробляється;
- забороняється експлуатація верстата в умовах вібрацій, що можуть виникнути при обробці внаслідок невдало обраних режимів різання, характеристики шпинделя або поганого кріплення деталі;
- забороняється установка, зняття та вимір деталі при обертовому шпинделі;
- при установці, знятті і вимірі деталі супорт повинен бути виведений в крайнє положення;
- не допускається працювати з відкритими покриттями та дверима шаф, в яких знаходиться електрообладнання;
- не допускається працювати при відсутності заземлення;
- після завершення роботи верстат відключити від мережі ввідним автоматом;
- строго дотримуватись порядку та правил ввімкнення і пуску верстата;
- періодично перевіряти правильність роботи всіх блоків регулювальних пристроїв.

Металорізальний верстат вміщує обертові і рухомі частини, а також електрообладнання, які при роботі представляють небезпеку для людини, тому обов'язково потрібно вимикати верстат і вимикати електрообладнання вхідним вимикачем:

- при відході від верстата навіть на короткий час;

- тимчасовому припиненні роботи;
- падінні тиску оливи, повітря;
- при появі стороннього шуму;
- прибиранні, змащуванні, чистці верстата;
- виявленні несправностей в обладнанні;
- підтягування гайок, болтів і сполучних деталей верстата;
- поломці інструменту;
- установці і зніманні деталі.

Експлуатація металорізальних верстатів пов'язана із застосуванням електричної енергії. При перериванні подачі, падінні тиску оливи, повітря, при появі стороннього шуму, виявленні несправності в обладнанні, поломці інструменту необхідно відключити електрообладнання. Відкривати станції керування і шафи з електрообладнанням, а тим більш самостійно здійснювати профілактичні та ремонтні роботи, особам, які не мають відповідної кваліфікації, категорично забороняється. Вище вказані роботи дозволяється виконувати лише штатним електриком.

Ураження людини електричним струмом можливе як при випадковому дотику безпосередньо до струмоведучих частин, так і до металевих неструмоведучих елементів електрообладнання (корпусу електричних машин, ванн, світильників і т.д.), які можуть бути під напругою в результаті будь-якої аварійної ситуації (замикання фази на корпус, пошкодження ізоляції і т.п.).

Захисне заземлення і занулення є найбільш розповсюдженими, доволі ефективними і простими засобами захисту від ураження електричним струмом при появі напруги на металевих неструмоведучих частинах (металевих корпусах обладнання).

Захисне заземлення – це навмисне електричне з'єднання з землею або з її еквівалентом металевих неструмоведучих частин, котрі можуть опинитись під напругою. Призначення захисного заземлення – усунення небезпеки ураження людей електричним струмом при появі напруги на конструктивних частинах електрообладнання, тобто при замиканні на корпус. Принцип дії захисного заземлення

— зниження до безпечних значень напруг дотику та кроку, зумовлених замиканням на корпус.

Занулення — це навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним провідником металевих неструмоведучих частин, котрі можуть опинитися під напругою. Це основний засіб захисту від ураження людей струмом у випадку дотику до корпуса електрообладнання та до металевих конструкцій, котрі опинились під напругою внаслідок пошкодження ізоляції або однофазового короткого замикання в електроустановках напругою до 1000 В в мережі з заземленою нейтраллю.

Електроенергія широко застосовується на промислових підприємствах для силових, нагрівальних установок, технологічного обладнання та освітлення. Причинами, які порушують нормальну роботу установки, можуть бути коротке замикання, перевантаження проводів мережі, виникнення великих перехідних опорів.

Вимикачі, в котрих за умовами експлуатації виникає переривання струму, закривають кожухами, що передбачають виникнення пожежі від іскріння або електричної дуги. Розподільні пристрої небезпечні у пожежному відношенні при короткому замиканні. Електроосвітлення представляє пожежну небезпеку при перегріві проводів і займанні їхньої ізоляції. Електролампи можуть мати на колбі значну температуру, що досягає 200 °С і вище. При такій температурі можливе загоряння горючого пилю, що осів на колбі, а також на поряд розташованих предметах.

Горючими компонентами при холодній обробці металів різанням являються промаслене дрантя, полімерна ізоляція силових та освітлювальних кабелів, мінеральні масла в період їх заміни в станції мастила.

Електроустановки являються не тільки джерелами запалювання, але і джерелами розповсюдження горіння і горючими компонентами.

Основними причинами пожеж при холодній обробці металів різанням є короткі замикання в електрообладнанні і проводці, самозаймання промасленого дрантя та одягу, порушення протипожежного режиму і правил поводження з горючими рідинами.

При виникненні пожежі на працівників можуть впливати первинні і вторинні небезпечні фактори пожежі (НФП): полум'я та іскри, підвищена температура навколишнього середовища, токсичні продукти горіння і термічного розкладання, дим, понижена концентрація кисню, електричний струм, що виникає в результаті виносу високої напруги на струмоведучі частини конструкцій, вогнегасні речовини.

Пожежна безпека забезпечується системою запобігання пожежі, протипожежним захистом і організаційно-технічними заходами у відповідності з ГОСТ 12.1.004-85 “Пожежна безпека. Загальні вимоги” і Правилами пожежної безпеки в Україні, ДНАОП 0.00-31.99.

Застосовувані засоби пожежогасіння повинні максимально обмежити розміри пожежі і забезпечити її гасіння. В даний час найбільш ефективними вогнегасними речовинами є:

- вода;
- вода з добавками поверхнево активних речовин;
- піна;
- порошкові склади;
- негорючі гази;
- суміші вуглеводнів (галони, хладони).

4.4 Висновки до розділу 4

4.4.1 Проведено аналіз шкідливих і небезпечних факторів, що впливають на людину при експлуатації верстата.

4.4.2 Виконано розрахунок захисного заземлення.

4.4.3 Надано рекомендації щодо техніки безпеки.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі магістра представлені результати, які узагальнюють теоретичні дослідження системи керування серводвигуном привода подачі верстата.

1. Розглянуто компонування, технічні характеристики та електрообладнання верстата 16A20Ф3. Виявлено, що електрообладнання верстата включає комплектний електропривод змінного струму “Розмір-2М-5-21/1” та систему ПЧК “Електроніка НЦ-31”, які мають обмежені можливості, порівняно низьку надійність і на сьогодні морально застарілі.

Здійснено порівняльний аналіз основних типів сучасних електроприводів для механізмів подачі верстатів з ЧПК. Встановлено, що електроприводи з синхронним (вентильним) двигуном мають найкращі технічні характеристики: широкий діапазон регулювання; стабільність характеристик; високу швидкодію при розгоні і гальмуванні, різкій зміні навантаження.

2. Побудовано функціональну схему електропривода подачі на основі системи векторного керування синхронним двигуном із постійними магнітами. На заміну встановленому у верстаті приводу змінного струму “Розмір-2М-5-21/1” обрано сервопривод KEB COMBIVERT. Цей комплектний електропривод застосовується для швидкодійних механізмів подачі металообробних верстатів, які вимагають точних переміщень і регулювання швидкості обертання в широкому діапазоні.

3. Складено математичний опис системи векторного керування електропривода на основі моделі синхронного двигуна з постійними магнітами для рухомої системи координат, яку орієнтовано за магнітною віссю ротора. Виконано синтез системи керування електропривода із синхронним двигуном та здійснено синтез регуляторів привода на основі принципу підпорядкованого регулювання з використанням методу компенсації нелінійних перехресних зв'язків.

4. Виконано моделювання системи керування електропривода подачі в MATLAB. Досліджено перехідні характеристики при пуску та гальмуванні електропривода, при накиданні навантаження. Виконано аналіз результатів та підтверджено високі динамічні показники системи. Встановлено, що показники якості керування задовольняють умовам плавного пуску електропривода та забезпечують безаварійну роботу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Станок токарный патронно-центровой с числовым программным управлением модели 16А20Ф3. Руководство по эксплуатации. 16А20Ф3 РЭ / Московский станкостроительный завод «Красный пролетарий» им. А. И. Ефремова – М.: ВНИИТЭМР. 1990. – 56 с.
2. Металлорежущие системы машиностроительных производств: учебное пособие для ВУЗов / ред. О. В. Таратынов. – 2-е изд., дополн. и перераб. – М.: МГИУ, 2006. – 488 с.
3. Иванов, В. М. Электроприводы с системами числового программного управления: учебное пособие / В. М. Иванов. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 152 с.
4. Виноградов, А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – Иваново: ГОУВПО, 2008. – 298 с.
5. Калачев, Ю. Н. Векторное регулирование(заметки практика) / Ю.Н. Калачев. – М.: ЭФО, 2013. – 66 с.
6. Бородай, Г. В. Конспект лекций по дисциплине «Современные комплектные электроприводы технологических комплексов» / Г. В. Бородай. – Краматорск: ДГМА, 2012. – 50 с.
7. Исследование синхронного следящего привода: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов» / Л. С. Удут, Н. В. Гусев, М. А. Нечаев, М. Сливенко; ТПУ. – Томск, 2009. – 44 с.
8. Фіраго, Б. І. Розрахунок характеристик і показників трифазних вентильних двигунів змінного струму / Б. І. Фіраго. – Мінськ: БНТУ, 2010. – 5 с.

9. Лазарева, Т. Я. Основы теории автоматического управления: учебное пособие для ВУЗов / Т. Я. Лазарева, Ю. Ф. Мартемьянов. – 2-е изд. перераб. и доп. – Тамбов: ТГТУ, 2004. – 352 с.
10. Кепич, Т. Ю. Охорона праці в галузі: навчальний посібник/ Т. Ю. Кепич, М. В. Лавренюк, І. Ю. Семенова. – Київ: КНУ ім. Тараса Шевченка, 2013. – 255 с.
11. Дементій, Л. В. Охорона праці в механічних та складальних цехах / Л. В. Дементій, С. А. Гончарова. – Краматорськ: ДДМА, 2005. – 312 с.
12. Полукаров, О. І. Охорона праці в галузі (конспект лекцій) / О. І. Полукаров. – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – 95 с.

ДОДАТОК А

Мультимедійна презентація

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Навчально-науковий
Інститут автоматики та електротехніки

Кваліфікаційна робота магістра

на здобуття ступеня магістра
на тему:

«Система керування серводвигуном привода подачі верстата»

Студент магістратури:

Дзьонь В. І.

Керівник кваліфікаційної роботи
магістра:

доц. каф. автоматики, к.е.н.
Шевчук С. В.

Миколаїв 2024

Рисунок А.1 – Слайд 1 мультимедійної презентації

Мета роботи. Об'єкт і предмет дослідження

Мета роботи	Синтез системи керування серводвигуном привода подачі верстата.
Об'єкт дослідження	Перехідні процеси в електроприводі подачі верстата на основі синхронного двигуна з постійними магнітами.
Предмет дослідження	Параметри регуляторів системи керування електропривода подачі верстата, які впливають на якість керування.

Завдання дослідження

- 1 Розглянути компонування, технічні характеристики та електрообладнання верстата 16A20Ф3. Проаналізувати системи керування електроприводів подач верстатів.
- 2 Скласти функціональну схему системи керування електропривода подачі. Обґрунтувати вибір елементів системи керування електропривода.
- 3 Побудувати структурну схему системи керування електропривода подачі та виконати розрахунок параметрів її елементів.
- 4 Провести моделювання системи керування електропривода подачі в MATLAB та дослідити вплив параметрів регуляторів на якість керування.

Рисунок А.3 – Слайд 3 мультимедійної презентації

Загальний вигляд верстата 16A20Ф3



Рисунок А.4 – Слайд 4 мультимедійної презентації

Загальна характеристика об'єкта керування

Технічні характеристики верстата

Найменування параметра	Значення
Найбільший хід супорта, мм: – поперечний – поздовжній	210 905
Максимальна рекомендована швидкість робочої подачі мм/хв: – поздовжньої – поперечної	2000 1000
Мінімальна швидкість робочої подачі, мм/хв: – поздовжньої – поперечної	10 5
Кількість керованих координат	2
Кількість одночасно керованих координат	2
Найбільше зусилля поздовжньої подачі, Н (кг)	10000 (1000)
Точність позиціонування, мм	0,01
Повторюваність, мм	0,003
Максимальна швидкість швидких переміщень, м/хв: – поздовжніх – поперечних	15 7,5

Технічні характеристики електрообладнання

Найменування параметра	Значення
Вид струму живлячої мережі	змінний трифазний
Напруга, В	380
Частота струму, Гц	50
Тип електродвигунів приводів подач: – поздовжньої – поперечної	4АХ52П100 4АХ52П100
Номинальний крутний момент електродвигунів приводів подач, Н·м (кг·м): – поздовжньої – поперечної	23 (2,3) 17 (1,7)

Рисунок А.5 – Слайд 5 мультимедійної презентації

6

Кінематична схема верстата 16A20Ф3

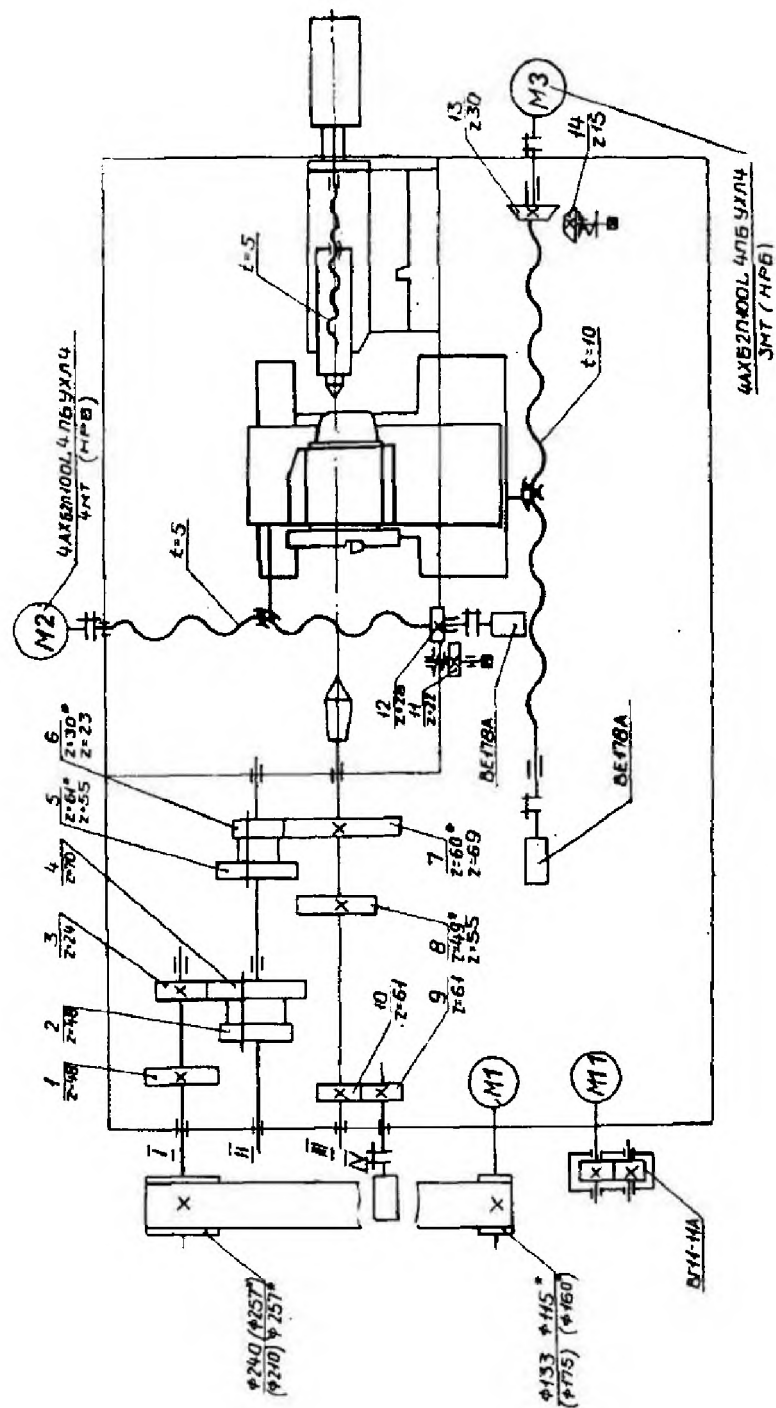


Рисунок А.6 – Слайд 6 мультимедійної презентації

Порівняльна характеристика електродвигунів

Параметр	Асинхронний двигун	Двигун постійного струму	Синхронний двигун
Потужність, кВт	7,5	8,3	7,5
Швидкість, об/хв	2900	3200	3000
Охолодження	індивідуальне	індивідуальне	конвекцією
Довжина, мм	400	625	390
Повна маса, кг	66	105	38,6
Маса ротора, кг	17	29	8,2
Момент інерції, $J_d \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	280	496	87,4
Номінальний момент, M_n , Н·м	24,7	24,7	24
Максимальний момент, Н·м	1,8 M_n	1,6 M_n	3,0 M_n
Максимальне прискорення, с^{-2}	1588	797	8238

Рисунок А.7 – Слайд 7 мультимедійної презентації

8

Функціональна схема системи векторного керування електропривода подачі

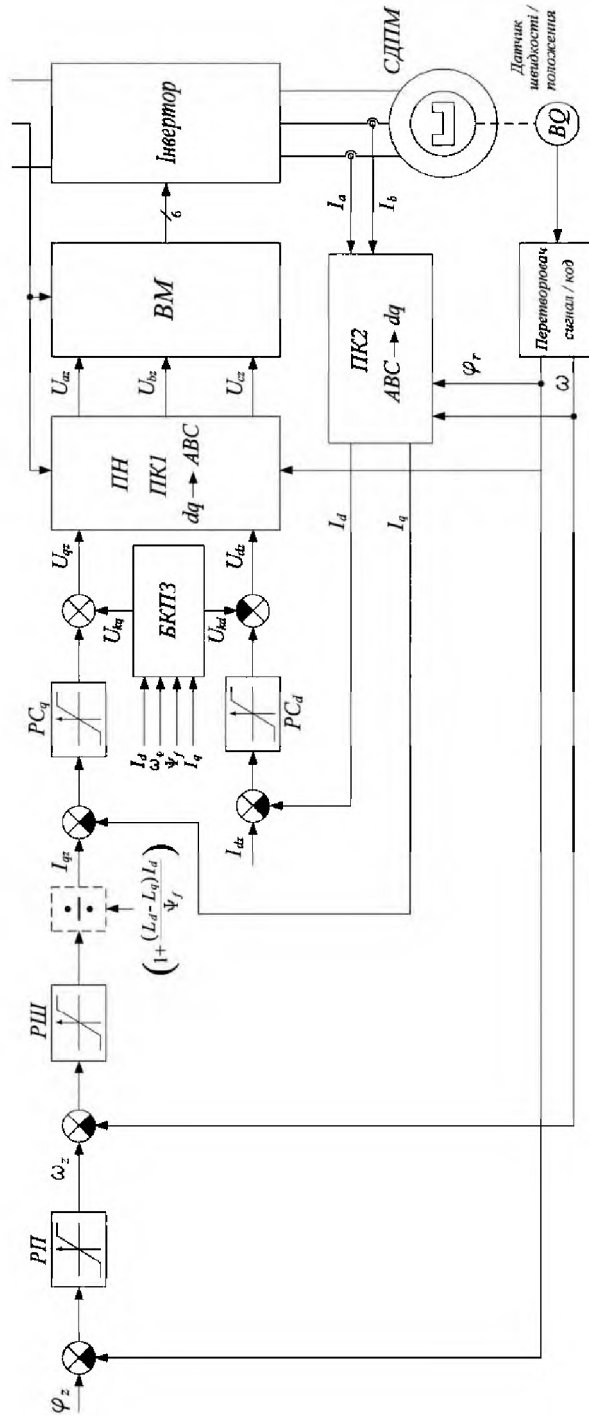


Рисунок А.8 – Слайд 8 мультимедійної презентації

9

Лінеаризована структурна схема слідкувального синхронного привода

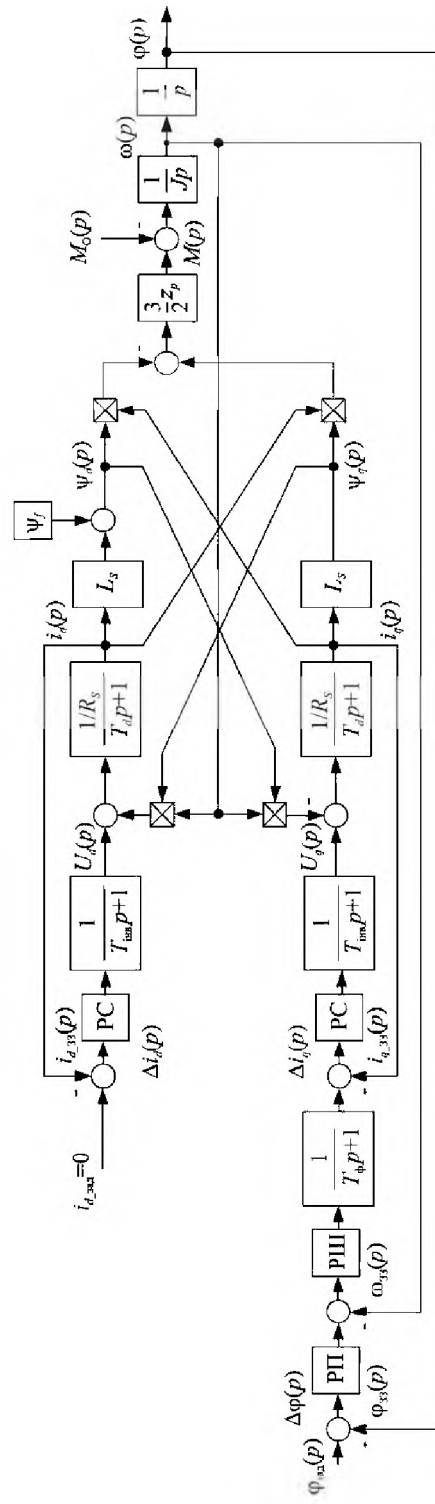


Рисунок А.9 – Слайд 9 мультимедійної презентації

Модель электропривода в MATLAB

10

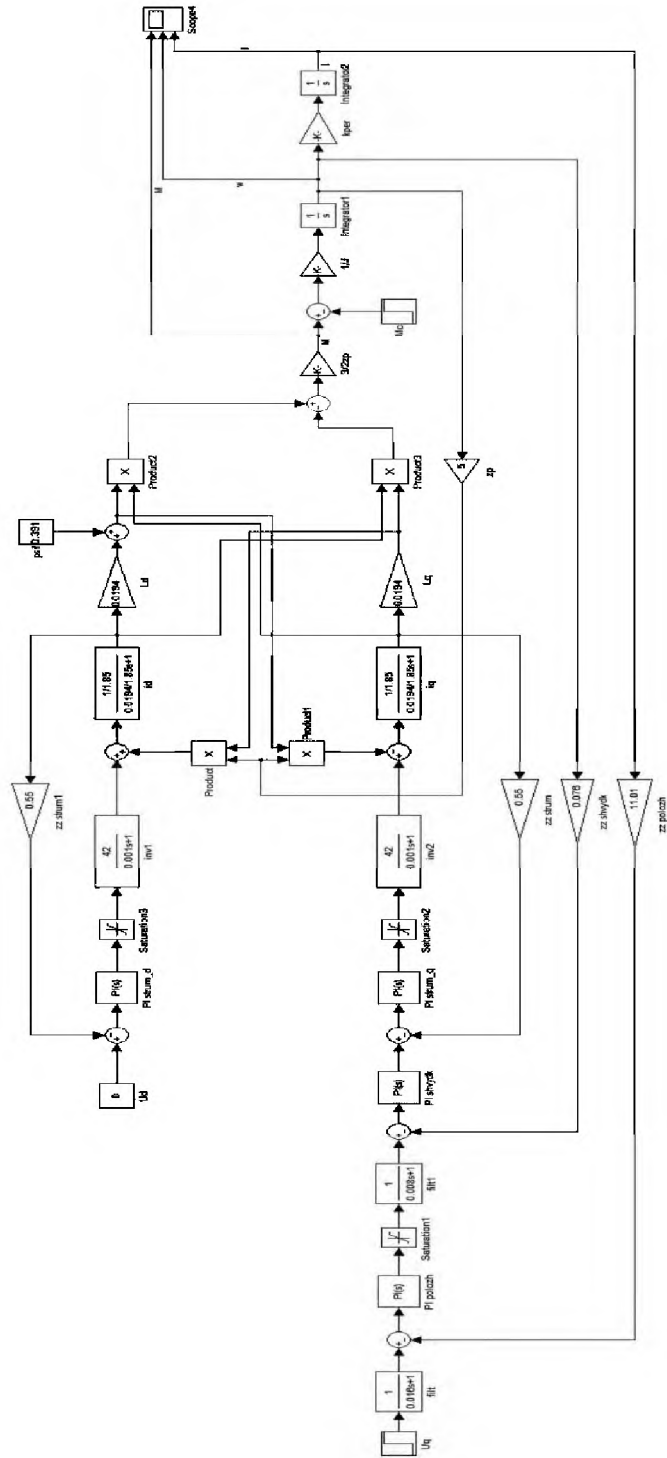
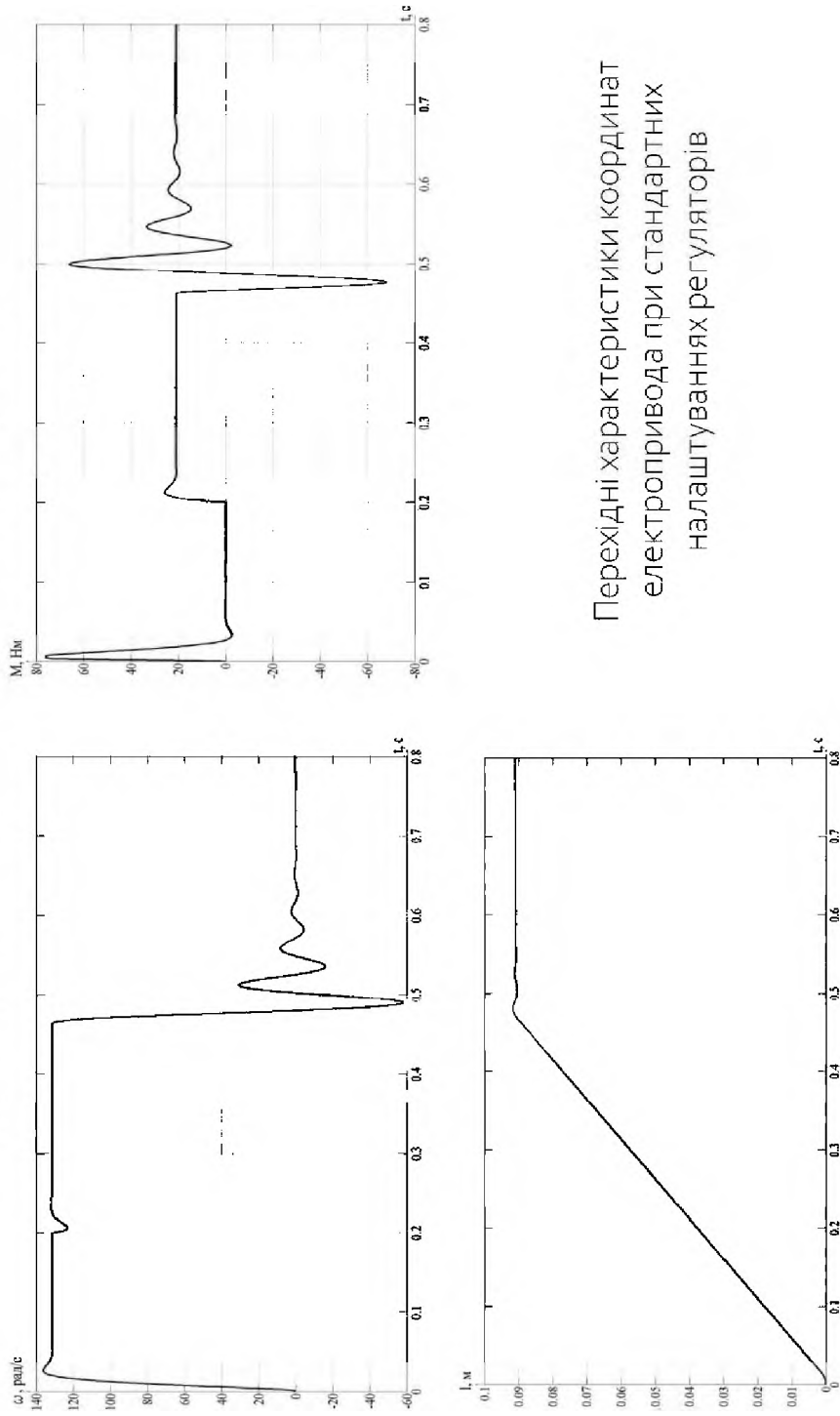


Рисунок А.10 – Слайд 10 мультимедійної презентації

Дослідження динаміки електропривода

11

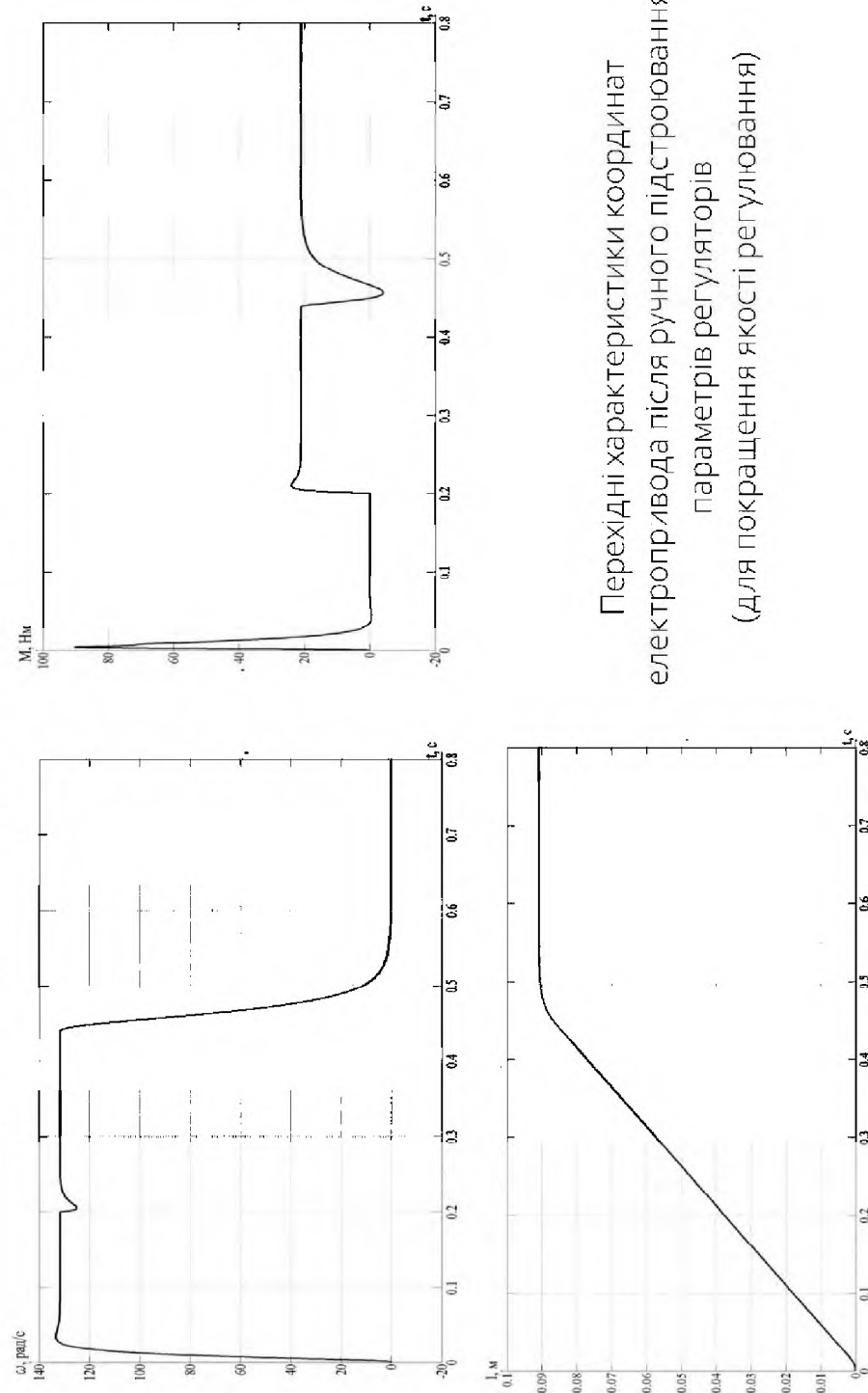


Перехідні характеристики координат
електропривода при стандартних
налаштуваннях регуляторів

Рисунок А.11 – Слайд 11 мультимедійної презентації

Дослідження динаміки електропривода

12



Перехідні характеристики координат
електропривода після ручного підстроювання
параметрів регуляторів
(для покращення якості регулювання)

Рисунок А.12 – Слайд 12 мультимедійної презентації

Висновки

- 1** Розглянуто компонування, технічні характеристики та електрообладнання верстата 16А20Ф3. Виявлено, що електрообладнання верстата включає комплектний електропривод змінного струму "Розмір-2М-5-21/1" та систему ПЧК "Електроніка НЦ-31", які мають обмежені можливості, порівняно низьку надійність і на сьогодні морально застарілі. Здійснено порівняльний аналіз основних типів сучасних електроприводів для механізмів подачі верстатів з ЧПК. Встановлено, що електроприводи з синхронним (вентильним) двигуном мають найкращі технічні характеристики: широкий діапазон регулювання; стабільність характеристик; високу швидкість при розгоні і гальмуванні, різкій зміні навантаження.
- 2** Побудовано функціональну схему електропривода подачі на основі системи векторного керування синхронним двигуном із постійними магнітами. На заміну встановленому у верстаті приводу змінного струму "Розмір-2М-5-21/11 обрано сервопривод KEB COMBIVERT. Цей комплектний електропривод застосовується для швидкодіючих механізмів подачі металообробних верстатів, які вимагають точних переміщень і регулювання швидкості обертання в широкому діапазоні.

Висновки

- 3 Складено математичний опис системи векторного керування електропривода на основі моделі синхронного двигуна з постійними магнітами для рухомої системи координат, яку орієнтовано за магнітною віссю ротора. Виконано синтез системи керування електропривода із синхронним двигуном та здійснено синтез регуляторів привода на основі принципу підпорядкованого регулювання з використанням методу компенсації нелінійних перехресних зв'язків.
- 4 Виконано моделювання системи керування електропривода подачі в MATLAB. Досліджено перехідні характеристики при пуску та гальмуванні електропривода, при накиданні навантаження. Виконано аналіз результатів та підтверджено високі динамічні показники системи. Встановлено, що показники якості керування задовольняють умовам плавного пуску електропривода та забезпечують безаварійну роботу.

Дякую за увагу!