

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА

(підпис)

“ ____ ” _____ 2025 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи автоматизації,

електропривод та електромобільність»

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

на тему: Автоматизований електропривод металообробного центру

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕП-12

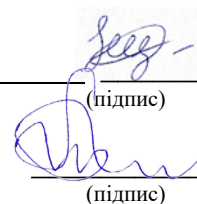
(шифр групи)

_____ Іванніков Максим Русланович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник _____ доц., к.т.н. Теряєв Віталій Іванович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові)


(підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Рецензент _____ доц. Реуцький М.О.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2025 р.

**Пояснювальна записка
до дипломного проекту**

на тему: Автоматизований електропривод металообробного центру

Київ – 2025 р.

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва)

Освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА

(підпис)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Іаннікову Максиму Руслановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Автоматизований електропривод металообробного центру

керівник проекту _____ Теряєв Віталій Іванович, к.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проекту 10.06.2025 р. _____

3. Вихідні дані до проекту: технологічний металообробний центр IP-500, напруга живлення 380 В, частота мережі 50 Гц, максимальний діаметр розточування 160 мм, діапазон робочих подач 1 – 2000 мм/хв, швидкі переміщення 10 м/хв, двигун головного руху 14 кВт, маса верстату 11370 кг.

4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. 1. Огляд універсальних металорізальних верстатів різного технологічного призначення. 2. Визначення потрібної потужності електродвигуна. 3. Вибір типу електродвигуна та силового обладнання. 4. Розробка математичної моделі електроприводу (рівняння, структурна схема). Розрахунок

параметрів елементів електроприводу 5. Синтез системи автоматичного керування.
6. Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи.
Аналіз результатів. 7. Спецчастина. Автоматизація електроприводу поворотного
механізму. 8. Розробка (опис) схеми керування та силової схеми перетворювального
пристрою

5. Перелік графічного матеріалу: (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Загальний вид установки, Схема електрична
принципова силова. Структурна схема та результати моделювання.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 1.04.2025 р.

Календарний план

Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Обсяг, с	Термін виконання	Позначки про виконання
1. Аналітичний огляд універсальних металорізальних верстатів різного технологічного призначення 1.1. Призначення та класифікація металорізальних верстатів 1.2. Огляд сучасних металорізальних верстатів (області застосування, технічні характеристики, системи електроприводу, способи керування) 1.3. Опис металообробного центру, взятого за основу для модернізації 1.4. Розробка вимог до систем електроприводу і автоматизації Висновки до розділу 1	25	20.04.25	
2. Визначення потрібної потужності електродвигуна	10	30.04.25	
3. Вибір типу електродвигуна та силового обладнання	10	1.05.25	
4. Розробка математичної моделі електроприводу (рівняння, структурна схема). Розрахунок параметрів елементів електроприводу	10	15.05.25	
5. Синтез системи автоматичного керування 5.1. Обґрунтування принципу керування електроприводом 5.2. Структурно-параметричний синтез системи керування 5.3. Розрахунок параметрів регуляторів і зворотних зв'язків	10	20.05.25	

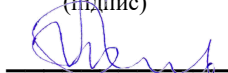
6. Дослідження статичних і динамічних режимів системи електроприводу (шляхом моделювання). Аналіз результатів	10	25.05.25	
7. Спецчастина. Автоматизація електроприводу ТОВ (опціонально)	5	31.05.25	
8. Розробка (опис) схеми керування та силової схеми перетворювального пристрою	5	5.06.25	
Оформлення пояснювальної записки та графічної частини. Підготовка презентації		10.06.25	
Разом	70-90		

Студент


 (підпис)

Максим ІВАННІКОВ

Керівник проекту



Віталій ТЕРЯЄВ

РЕФЕРАТ

Дипломний проект складається з пояснювальної записки на 83 сторінках, 29 рисунків, 6 таблиць, 3 додатків.

В даному дипломному проекті здійснена модернізація металообробного токарно-розточувального центру IP-500 шляхом переходу на асинхронний привод з векторним керуванням для головного електроприводу. Проведено розрахунки зусиль різання для вибору двигуна. Розроблено математичну модель електроприводу та розраховано параметри його елементів.

Створено модель в програмному середовищі MatLab/Simulink для моделювання характеристик двигуна та дослідження статичних та динамічних режимів.

Результати проведених досліджень підтверджують правильність технічних рішень, прийнятих в процесі проектування.

ТОКАРНО-ОБРОБЛЮВАЛЬНИЙ ЦЕНТР, АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД,
РЕГУЛЬОВАНИЙ, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ,
РОЗРОБКА, ДОСЛІДЖЕННЯ

					141.ЕП1207.010.БР			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат				
Розроб.		Іванніков М. Р.			Автоматизований електропривод металообробного центру Реферат		Літ.	Арк.
Керівн.		Теряєв. В. І.						7
Реценз.							КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, каф. АЕМС-ЕП гр. ЕП-12	
Н. Контр.		Теряєв. В. І.						
Зав. каф		Ковбаса С. М.						

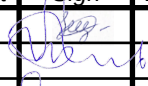
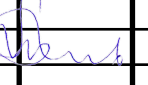
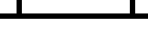
SUMMARY

The diploma project consists of pages of the The diploma project consists of an explanatory note of 83 pages, 29 figures, 6 tables, and 3 posters A1.

This diploma project presents the modernization of the IR-500 metal-cutting turning and boring machining center by switching to an asynchronous drive with vector control. Calculations were carried out to select the appropriate motor. A mathematical model of the electric drive was developed, and the parameters of its components were calculated.

A model was created in the MatLab/Simulink software environment to simulate motor characteristics and study static and dynamic operating modes.

METAL-CUTTING MACHINING CENTER, ASYNCHRONOUS MOTOR, ELECTRIC DRIVE, ADJUSTABLE, FREQUENCY CONVERTER, MATHEMATICAL MODEL, LOAD DIAGRAM

					141.EP0210.009.BW				
	<i>letter</i>	<i>№ of document</i>	<i>Sign</i>	<i>Date</i>			<i>Page</i>	<i>Pages</i>	
<i>Devel.</i>		<i>M. Ivannikov</i>			<i>Automated electric drive of metalworking centre</i>				
<i>Checked</i>		<i>V. Teriaiev</i>						<i>7</i>	
<i>Recension</i>									
<i>N. contr.</i>		<i>V. Teriaiev</i>							
<i>Approved</i>		<i>S. Kovbasa</i>			<i>Abstract</i>		<i>NTUU "I. Sikorskiy KPI", FEA department AEMS-ED gr. EP-12</i>		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД УНІВЕРСАЛЬНИХ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ	12
1.1 Призначення та класифікація металорізальних верстатів	12
1.2 Огляд сучасних металорізальних верстатів (області застосування, технічні характеристики, системи електроприводу, способи керування).....	15
1.3 Опис металообробного центру, взятого за основу для модернізації ..	23
1.4 Розробка вимог до систем електроприводу і автоматизації.....	34
1.5 Висновки до розділу 1	36
2 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА.....	38
2.1 Загальні відомості. Функціональна схема	38
2.2 Побудова навантажувальної діаграми та розрахунок потужності.....	39
2.3 Розрахунок статичних моментів.....	41
2.4 Розрахунок динамічних моментів	42
3 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ	45
3.1 Вибір електродвигуна	45
3.2 Вибір перетворювача частоти	46
3.3 Вибір силового автомату	48
4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ.	51
4.1 Розрахунок параметрів двигуна.....	51
4.2 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна.....	52
4.3 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення	53
5 СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	58
5.1 Обґрунтування принципу керування електроприводом	58
5.2 Структурно-параметричний синтез системи керування.....	58
5.3 Розрахунок параметрів регуляторів і зворотних зв'язків	60

6 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ .	65
7 СПЕЦЧАСТИНА. КОНТУР СТАБІЛІЗАЦІЇ ПОТУЖНОСТІ	73
8 ОПИС СХЕМИ КЕРУВАННЯ ТА СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ.....	77
ВИСНОВКИ.....	80
Перелік використаних джерел	82

ВСТУП

Сучасне машинобудування та металообробка є ключовими галузями промисловості, що визначають технологічний прогрес та конкурентоспроможність виробництва. Центральне місце у цих процесах займають металорізальні верстати – високотехнологічне обладнання, призначене для точної та ефективної обробки металевих заготовок шляхом зняття матеріалу. Від їх продуктивності, точності та надійності безпосередньо залежить якість кінцевої продукції, продуктивність виробництва та економічна ефективність підприємств.

З розвитком технологій, універсальні металорізальні верстати, що застосовуються для широкого спектру операцій, постійно вдосконалюються. Особливе значення набувають оброблювальні центри з числовим програмним керуванням (ЧПК), такі як багатоцільовий горизонтально-фрезерний обробний центр IP-500. Вони дозволяють досягати високого рівня автоматизації, мінімізувати вплив людського фактору та забезпечувати стабільно високу якість обробки складних деталей. Електроприводи цих верстатів, хоч і були передовими у свій час, мають низку недоліків: обмежений діапазон регулювання швидкості, значні витрати на обслуговування (щітки, колектори), низьку енергоефективність та складність інтеграції в сучасні цифрові системи керування. Такий стан справ стримує розвиток виробництва, знижує конкурентоспроможність продукції та призводить до невиправданих експлуатаційних витрат.

У зв'язку з цим, актуальність дипломного проекту полягає у необхідності модернізації існуючого металорізального верстату шляхом заміни двигунів постійного струму на сучасні асинхронні двигуни (АД) з частотним перетворювачем (ПЧ). Таке технічне переоснащення дозволяє значно покращити динамічні характеристики верстата, розширити діапазон регулювання швидкості, підвищити точність обробки, суттєво зменшити енергоспоживання та витрати на обслуговування, а також забезпечити повну інтеграцію приводу в сучасні цифрові

системи ЧПК. Векторне керування асинхронними двигунами є ключовим підходом, який забезпечує високу якість регулювання кутової швидкості та моменту.

Об'єктом дослідження є електричний привод головного руху металорізального верстата.

Предметом дослідження є оптимізація процесів електромеханічного перетворення енергії у асинхронному електроприводі з частотним перетворювачем з метою підвищення ефективності та функціональності металорізальних верстатів.

Метою дипломного проекту є розробка та обґрунтування технічних рішень для модернізації електричного приводу металорізального верстата шляхом заміни електроприводу постійного струму на привод змінного струму з частотним регулюванням, що дозволить підвищити його продуктивність, надійність та енергоефективність.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД УНІВЕРСАЛЬНИХ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

1.1 Призначення та класифікація металорізальних верстатів

Металорізальні верстати — це машини, призначені для обробки металевих заготовок шляхом знімання шару матеріалу. Вони забезпечують високу точність, чистоту обробки та продуктивність. Металорізальні верстати широко застосовуються у машинобудуванні, приладобудуванні, енергетиці, аерокосмічній та інших галузях. Класифікація верстатів здійснюється за різними ознаками: за видом механічної обробки, ступенем спеціалізації, автоматизації, розташуванням і кількістю робочих органів, а також за точністю обробки [1].

Металорізальні верстати класифікують за такими ознаками.

За рівнем спеціалізації:

- 1) універсальні, що застосовуються для обробки деталей широкої номенклатури;
- 2) спеціалізовані, призначені для обробки однотипних деталей, подібних за конфігурацією, але різних за розмірами;
- 3) спеціальні, що використовуються для обробки деталей одного типорозміру.

За точністю:

- 1) нормальної точності – клас Н;
- 2) підвищеної точності – клас П;
- 3) високої точності – клас В;
- 4) особливо високої точності – клас А;
- 5) прецизійні – клас С.

За рівнем автоматизації:

- 1) неавтоматизовані; 2) напівавтомати; 3) автомати.

За масою:

1) легкі – до 1 т; 2) середні – до 10 т; 3) важкі – понад 10 т.

Залежно від виконуваних робіт і застосовуваних різальних інструментів:

- 1) токарні;
- 2) свердлувальні й розточувальні;
- 3) шліфувальні, полірувальні, довідні;
- 4) комбіновані;
- 5) зубо– й різьбообробні;
- 6) фрезерні;
- 7) стругальні, довбальні й протяжні;
- 8) розрізні;
- 9) різні.

Групи поділяють на типи, а типи розділяють за розмірами верстатів або розмірами оброблюваних заготовок.

Токарна група верстатів ділиться на:

- 1) автомати і напіваавтомати одношпиндельні;
- 2) автомати і напіваавтомати багатошпиндельні;
- 3) револьверні;
- 4) центрувально-відрізні;
- 5) карусельні;
- 6) токарні і лобові;
- 7) багаторізцеві;
- 8) спеціалізовані;
- 9) різні.

Металорізальні верстати в залежності від призначення поділяються на дев'ять основних груп.

1. Токарні — всі різновиди верстатів токарної групи;

2. Свердлильні й розточувальні — верстати для виконання свердлильних операцій і розточування;
3. Шліфувальні, полірувальні, доводочні — металорізальні верстати для виконання доводочних, шліфувальних, заточувальних і полірувальних технологічних операцій;
4. Комбіновані — металорізальні пристрої спеціального призначення;
5. Різьбо- і зубообробні — верстати для обробки елементів різьбових і зубчастих з'єднань;
6. Фрезерні — верстати для виконання фрезерних робіт;
7. Довбальні, стругальні та протяжні — металорізальні верстати різних модифікацій відповідно для стругання, довбання й протягання;
8. Розрізні — обладнання для виконання відрізних робіт, в тому числі пили;
9. Різні — приклади таких металорізальних агрегатів — без центрів обдирні, пилконасичні й інші.

Види робіт, які можна виконувати на токарних верстатах, показані на рисунку 1.1.

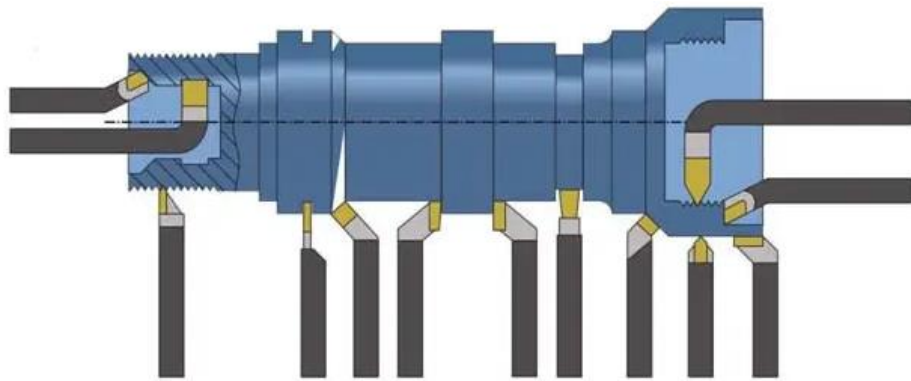


Рисунок 1.1 – Види робіт які можна виконувати на металорізальних верстатах: поздовжнє точіння; торцеве точіння; внутрішнє розточування; точіння конуса; проточка канавки; точіння між центрами

1.2 Огляд сучасних металорізальних верстатів

Сучасні металорізальні верстати є високотехнологічними пристроями для точного та ефективного знімання металу. Залежно від типу обробки вони поділяються на токарні, фрезерні, свердлильні, шліфувальні та інші. Виробники вдосконалюють конструкції, впроваджують ЧПК, серводвигуни, енергозберігаючі електроприводи.

Такі верстати застосовуються у серійному, масовому та одиничному виробництві для виготовлення деталей будь-якої складності. Нижче подано приклади технічних характеристик, систем керування та електроприводів сучасних верстатів.

1.2.1 Види автоматів у металообробці

Автомати в металообробці – це верстати, які здатні виконувати цикл обробки деталі без постійної участі оператора. Вони використовуються для серійного та масового виробництва.

Автоматами називаються верстати, у яких автоматизовані всі робочі та допоміжні рухи, потрібні для виконання технологічного циклу обробки деталі. До обов'язків робітника, що обслуговує верстат, входять періодичне завантаження заготовками, час від часу контроль розмірів і якості оброблених деталей, під налагодження верстата, а також загальне спостереження за його роботою. Токарні автомати поділяються на одношпиндельні і багатошпиндельні, застосовуються для виготовлення деталей з прутка, але в деяких випадках зі штучних заготовок.

Основні види токарних автоматів включають [3]:

- Автомати поздовжнього точіння (рис. 1.2)



Рисунок 1.2 - Приклад автомату поздовжнього точіння

- Одношпиндельні токарні автомати (рис. 1.3), призначені для обробки деталей нескладної конфігурації з прутка, штучних заготовок або каліброваного матеріалу. Можуть бути з кулачковим або програмним керуванням;



Рисунок 1.3 - Приклад одношпиндельного токарного верстату TNM 42

- Багатошпиндельні токарні автомати (рис. 1.4). Забезпечують одночасну обробку кількох деталей на різних шпинделях, що значно підвищує продуктивність;



Рисунок 1.4 - Приклад багатшпіндельного токарного верстату TORNOS BS

- Токарні автомати поздовжнього точіння (рис. 1.5). Застосовуються для виготовлення довгих і тонких деталей високої точності. Характеризуються рухомою головною бабкою, що подає матеріал у зону обробки;

-



Рисунок 1.5 - Приклад верстату поздовжнього точення

- Револьверні автомати, оснащені револьверною головкою з набором інструментів, що дозволяє виконувати послідовно різні операції обробки;

- Фрезерні автомати:

а) Вертикальні фрезерні автомати: Інструмент розташований вертикально. Застосовуються для обробки площин, пазів, контурів;

б) Горизонтальні фрезерні автомати: Інструмент розташований горизонтально. Ефективні для обробки кількох площин деталі за одне встановлення, особливо при використанні поворотних столів;

- Свердлильні автомати. Призначені для виконання операцій свердління, розсвердлювання, зенкерування та нарізання різьби в автоматичному режимі;

- Шліфувальні автомати. Використовуються для чистової обробки поверхонь деталей з високою точністю та якістю. Можуть бути круглошліфувальні, плоскошліфувальні, внутрішньошліфувальні тощо;

- Відрізні автомати. Служать для автоматичної відрізки заготовок заданої довжини від прутка або профілю.

1.2.2 Токарні оброблювальні центри (ТОЦ)

Токарні оброблювальні центри (ТОЦ) є високопродуктивними верстатами з числовим програмним керуванням (ЧПК), які поєднують у собі можливості токарних верстатів та інших операцій обробки, таких як фрезерування, свердління та нарізання різьби. Це досягається завдяки наявності приводного інструменту та можливості обертання заготовки навколо осі С.

Основні характеристики та види ТОЦ:

1) За кількістю шпинделів:

- а) Одношпиндельні ТОЦ: Мають один головний шпиндель для закріплення та обертання заготовки.

- б) Двошпиндельні ТОЦ: Оснащені головним та протишпинделем. Протишпиндель використовується для перехоплення деталі з головного шпинделя та обробки її з іншого боку, що скорочує час циклу та підвищує точність.

2) За наявністю осі Y:

- а) ТОЦ без осі Y: Дозволяють виконувати токарні операції, а також фрезерування та свердління по осях X та Z з обертанням осі С.

б) ТОЦ з віссю Y: Мають додаткову вісь Y, яка дозволяє переміщувати приводний інструмент у поперечному напрямку відносно осі обертання заготовки. Це значно розширює можливості обробки, дозволяючи виконувати складніші фрезерні операції поза віссю деталі.

3) **За конструкцією:**

а) Горизонтальні ТОЦ: Найбільш поширений тип. Забезпечують хороше видалення стружки та зручність обслуговування.

б) Вертикальні ТОЦ: Використовуються для обробки великих та важких деталей.

4) **За наявністю приводного інструменту:**

а) ТОЦ з приводним інструментом: Дозволяють виконувати фрезерні, свердлильні та інші операції за допомогою обертового інструменту, встановленого в револьверній головці.

б) ТОЦ без приводного інструменту: Призначені лише для токарних операцій.

Вибір типу автомата або ТОЦ залежить від конкретних виробничих завдань, необхідної продуктивності, складності деталей та економічної доцільності. ТОЦ є більш універсальними верстатами порівняно з традиційними токарними автоматами, оскільки вони здатні виконувати кілька технологічних операцій за одне встановлення деталі, що підвищує точність та скорочує час обробки.

1.2.3 Електричні приводи автоматичних металорізальних верстатів

У металорізальних верстатах використовується кілька основних систем приводу, кожна з яких має свої характеристики:

1) **З двигунами постійного струму**

а) Діапазон регулювання: широкий до 10000, плавне регулювання швидкості.

b) Точність стабілізації швидкості: висока, до 1-10%, особливо при використанні систем зворотного зв'язку.

c) Точність позиціонування: Досить висока при використанні сервоприводів.

d) Особливості: Високий пусковий момент, але складніша конструкція та обслуговування порівняно з двигунами змінного струму.

2) З асинхронними двигунами

a) Діапазон регулювання: обмежений без використання частотних перетворювачів. З частотними перетворювачами діапазон розширюється до 10000.

b) Точність стабілізації швидкості: Залежить від типу керування. При векторному керуванні досягається висока точність до 1-10%.

c) Точність позиціонування: висока, до 1 мкм, при використанні в складі сервоприводів зворотних зв'язків (енкодери, резольвери).

d) Особливості: проста та надійна конструкція, менше обслуговування. Часто використовуються для головного приводу.

3) З синхронними двигунами

a) Діапазон регулювання: широкий, абсолютна точність регулювання швидкості.

b) Точність стабілізації швидкості: абсолютна жорстка механічна характеристика, що визначається частотою живлення.

c) Точність позиціонування: найвища серед електричних приводів, особливо при використанні прецизійних енкодерів.

d) Особливості: висока енергоефективність, компактні розміри, але складніше керування порівняно з асинхронними двигунами. Широко використовуються в верстатах з ЧПК для приводів подач.

4) З лінійними двигунами

a) Діапазон регулювання: широкий діапазон швидкостей.

b) Точність стабілізації швидкості: обмежена точністю вимірювання.

с) Точність позиціонування: достатньо висока при використанні лінійних датчиків положення, забезпечують безпосереднє лінійне переміщення без використання механічних передач (гвинт-гайка, рейкова передача), що усуває люфти та підвищує точність.

d) Особливості: складність отримання низької швидкості, низький ККД.

1.2.4 Гідравлічні приводи:

1) Діапазон регулювання до 100000. Широкий діапазон плавного регулювання швидкості та зусиль.

2) Точність стабілізації швидкості: може бути досягнута висока точність при використанні сервоклапанів та систем зворотного зв'язку.

3) ККД: у цілому мають 80%

4) Точність позиціонування: залежить від типу гідросистеми та керуючої апаратури. Сучасні сервогідравлічні системи забезпечують досить високу точність в межах декількох мкм.

5) Особливості: здатність розвивати великі зусилля, плавне регулювання, але можуть бути менш точними у позиціонуванні порівняно з електричними сервоприводами та потребують складної гідравлічної системи (насоси, клапани, трубопроводи).

6)

1.2.5 Пневматичні приводи:

1) Діапазон регулювання: обмежений до 500, складніше досягти плавне регулювання швидкості

2) Точність стабілізації швидкості: нижча порівняно з електричними та гідравлічними приводами у зв'язку з нежорсткістю робочого тіла.

3) Точність позиціонування: зазвичай невисока, використовуються в основному для фіксованих допоміжних переміщень (затискання, фіксація).

4) Особливості: простота конструкції та обслуговування, низька вартість, безпечність робочої середовища, але обмежені можливості щодо точності та зусилля, необхідність у магістралі стисненого повітря.

Вибір системи приводу залежить від конкретних вимог до верстата, необхідної точності обробки, швидкості переміщень, величини зусиль та економічних міркувань. У сучасних металорізальних верстатах з ЧПК найчастіше використовуються електричні сервоприводи (асинхронні та синхронні) завдяки їх високій точності, швидкодії та можливості програмованого керування. Лінійні двигуни знаходять застосування у високоточних та високошвидкісних верстатах. Гідравлічні приводи використовуються там, де потрібні значні зусилля. Пневматичні приводи зазвичай застосовуються для допоміжних функцій.

1.3. Опис металообробного центру IP-500

IP-500 багатоцільовий горизонтально-фрезерний обробний центр [4]. Призначення, область застосування верстата IP-500 з числовим програмним керуванням (ЧПК), автоматичною зміною інструмента (АЗІ) та зміною оброблюваних деталей - свердлильно-фрезерно-розточувальні роботи. Призначений для високопродуктивної обробки корпусних деталей масою до 700 кг з конструкційних матеріалів - від легких сплавів до високоміцних сталей.

Широкий діапазон частоти обертання шпинделя та швидкостей подач дозволяє виконувати свердління, зенкерування, розгортання, розточування точних отворів, пов'язаних координатами, фрезерування по контуру з лінійною та круговою інтерполяцією, нарізання різьби мітчиками.



Рисунок 1.6 – Багатоцільовий верстат IP-500

Принцип роботи та особливості конструкції верстата IP-500. Наявність поворотного столу, який встановлюється з високою точністю ($\pm 5''$ через 5°),

розширює технологічні можливості верстата, дозволяє обробляти співвісні отвори консольним інструментом. Підвищений ступінь точності верстата IP-500 (клас П) забезпечує обробку отворів за 7–8 квалітетами точності з шорсткістю поверхні Ra 2,5 мкм. Високий рівень автоматизації допоміжних функцій (автоматична зміна інструмента та оброблюваних деталей) дозволяє інтегрувати верстат в автоматизовану лінію з керуванням від ЕОМ.

Усі вузли верстата IP-500 змонтовані на жорсткій Т-подібній станині, яка є загальною основою. Лобова безконсольна шпиндельна бабка розташована всередині порталної стійки. Пристрій автоматичної зміни інструмента з інструментальним магазином барабанного типу змонтовано на верхньому торцю стійки.

Усі базові деталі мають ребристу конструкцію, що забезпечує максимальну жорсткість та вібростійкість під час високопродуктивної обробки й гарантує тривале збереження точності. Жорсткий шпиндель діаметром під переднім підшипником 105 мм з конусом №50 виготовлено з цементованої сталі з високою твердістю поверхні (HRC 62). Шпиндель змонтовано в окремому корпусі на прецизійних роликових і упорно-радіальних кулькових підшипниках, що забезпечує оптимальну точність, жорсткість і вібростійкість. Гідромеханічний пристрій затискання інструмента в шпинделі гарантує надійність і швидкодію кріплення ріжучого інструмента з зусиллям до 1250 кг.

Привод шпинделя здійснюється через двоступеневу коробку швидкостей від двигуна постійного струму потужністю 14 кВт. У діапазоні 21–174 об/хв на шпинделі забезпечується постійний момент, а в діапазоні 182–3000 об/хв — постійна потужність. Автоматична орієнтація шпинделя з керуванням від ЧПК та механічною фіксацією розширює технологічні можливості, дозволяє виконувати серії технологічних циклів, де потрібно відвести різець від робочої поверхні, не пошкоджуючи виріб.

Переміщення рухомих вузлів по осях X , Y , Z здійснюється від високомоментних електродвигунів з постійними магнітами, що через пружні муфти високої жорсткості безпосередньо з'єднані з прецизійними кульковими гвинтовими парами, які мають високу вантажопідйомність, жорсткість і довговічність. Силове утримання вузлів під час різання здійснюється слідкувальним приводом, що виключає необхідність у затискних пристроях.

Сучасні електроприводи подач забезпечують постійний (до 0,2 с) час розгону та гальмування, а отже, мінімальний час обробки запрограмованих переміщень. Позиціювання здійснюється одночасно по трьох координатних осях X , Y , Z .

У рухомих вузлах застосовано систему комбінованих напрямних, що складається з прецизійних роликів опор кочення, встановлених з попереднім натягом, та антифрикційного полімерного матеріалу з низьким коефіцієнтом тертя й високими демпфуючими властивостями, що гарантує високу точність позиціювання та стійкість верстата при різанні на максимальних режимах обробки. Напрямні виготовлено з високоякісної загартованої сталі та шліфовано з високою точністю і чистотою поверхні.

Телескопічний захист, встановлений на всіх координатних переміщеннях, захищає напрямні та кулькові гвинтові пари від попадання стружки та мастильно-охолоджувальної рідини, забезпечуючи тривале збереження точності верстата. Безпосередньо кулькові гвинти й накладні напрямні обладнані спеціальними засобами для захисту від стружки та бруду.

Вбудований поворотний індексований стіл переміщується по окремій станині, яка кріпиться на загальній основі (станині верстата). Поворотний стіл має 72 позиції з кроком 5° . Установлення столу відбувається в автоматичному режимі. Застосування як індексуючого елемента спеціальної муфти з торцевими зубцями в поєднанні з гідравлічним пристроєм затискання столу гарантує точність повороту та надійність фіксації. Для встановлення й кріплення деталей на поверхні плити-супутника передбачена сітка різьбових отворів.

Пристрій автоматичної зміни інструментів, розташований поза робочою зоною, складається з обертового інструментального магазину барабанного типу з кодованими гніздами місткістю на 30 інструментів і маніпулятора. Вибір інструмента в будь-якій послідовності з подальшою гідромеханічною фіксацією магазину здійснюється під час механічної обробки.

Цикл зміни інструмента відбувається в такому порядку:

1. Магазин обертається для пошуку інструмента;
2. Маніпулятор піднімається, захоплює інструмент за оправку та, висуваючись уздовж осі, витягує оправку з гнізда, далі опускається вниз і назад;
3. Шпиндельна бабка піднімається у позицію зміни інструмента, автооператор наприкінці ходу захоплює відпрацьований інструмент;
4. Відбувається заміна: оператор рухається вперед, повертається на 180° , рухається назад;
5. Шпиндельна бабка опускається у робочу позицію, а автооператор переносить відпрацьований інструмент у його гніздо в магазині;
6. Автооператор опускається, щоб не заважати обертанню магазину під час пошуку наступного інструмента.

Оскільки основна частина цих дій відбувається під час обробки, безпосередньо на зміну інструмента в шпинделі витрачається лише 6 секунд.

Магазин приводиться в обертання високомоментним електродвигуном М4 ($N = 2,8 \text{ кВт}$, $n = 1500 \text{ хв}^{-1}$) з збудженням від постійних магнітів через зубчасту пару. Номери гнізд магазину закодовані; в корпусі магазину встановлено упори, що впливають на кінцеві вимикачі, які здійснюють підрахунок поворотів під час пошуку потрібного гнізда. Двозахватний автооператор має механізми повороту, вертикального переміщення та висування, що працюють від гідросистеми верстата (відповідні гідроциліндри на схемі не показані). Поворот здійснюється від рейкової передачі $m = 3 \text{ мм}$. Контроль крайніх положень збірних вузлів і керування циклом

автоматичної зміни інструментів здійснюється безконтактними кінцевими вимикачами.

Пристрій зміни плити-супутника. Автоматична зміна плит-супутників забезпечує роботу верстатів в автоматичному режимі, виключаючи з технологічного циклу обробки час на установку й зняття деталей.

Накопичувач столів-супутників. Окреме гідромеханічне поворотне (на 180°) пристрій, встановлене праворуч від верстата, слугує для завантаження-розвантаження, орієнтації та фіксації плити-супутника на поворотному столі верстата.

Робота гідравлічних механізмів на верстаті забезпечується аксіально-поршневым насосом змінної продуктивності з автоматичним регулюванням витрати оливи ($Q_{\max} = 46$ л/хв, $P_{\max} = 60$ кг/см²), що гарантує швидкодію виконавчих органів (автоматичної зміни інструментів) і зменшує нагрівання робочої рідини. Керування гідроциліндрами всіх робочих органів допоміжних рухів здійснюється за допомогою блочної гідроапаратури. У гідросистему верстата вбудовано гідроаккумулятор з еластичним мішком, що забезпечує врівноваження шпиндельної бабки. Олива в гідросистемі охолоджується в теплообміннику з повітряним охолодженням.

Пневмосистема верстата призначена для обдування повітрям конусів, шпинделя й інструмента, базових плиток поворотного столу та базових поверхонь столів-супутників під час їхньої автоматичної зміни.

Робота пневмосистеми здійснюється автоматично з керуванням від системи ЧПУ шляхом перемикання повітророзподільників.

Змащення всіх тертьових деталей верстата й підшипників шпинделя — автоматичне, централізоване, дозоване від окремої установки; шестерень і підшипників головного приводу — безперервне циркуляційне від окремого насоса, розташованого в гідростанції.

У верстаті передбачено подачу рідкої й розпиленої змащувально-охолоджувальної рідини в зону різання та злив її в окремо розташований бак за сигналом із ЧПУ. Зона різання має огороження для захисту оператора й навколишнього середовища від розбризкування емульсії.

Пристрій автоматичного прибирання стружки виключає витрати робочого часу на ручне прибирання стружки й полегшує умови праці верстатника.

Загальний вид горизонтального фрезерного центру IP-500 та перелік його складових частин представлений на рисунку 1.7. Кінематична схема верстату представлена на рисунку 1.8.

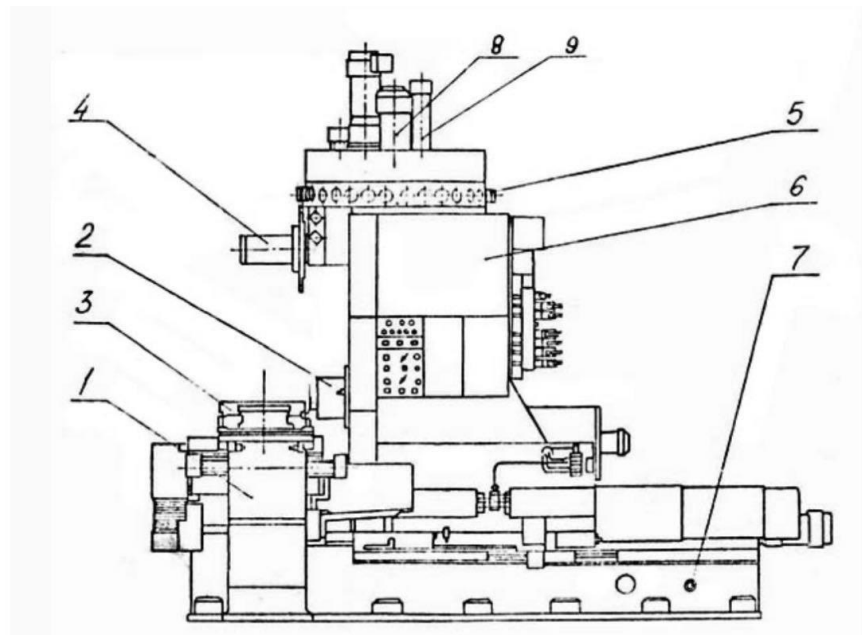
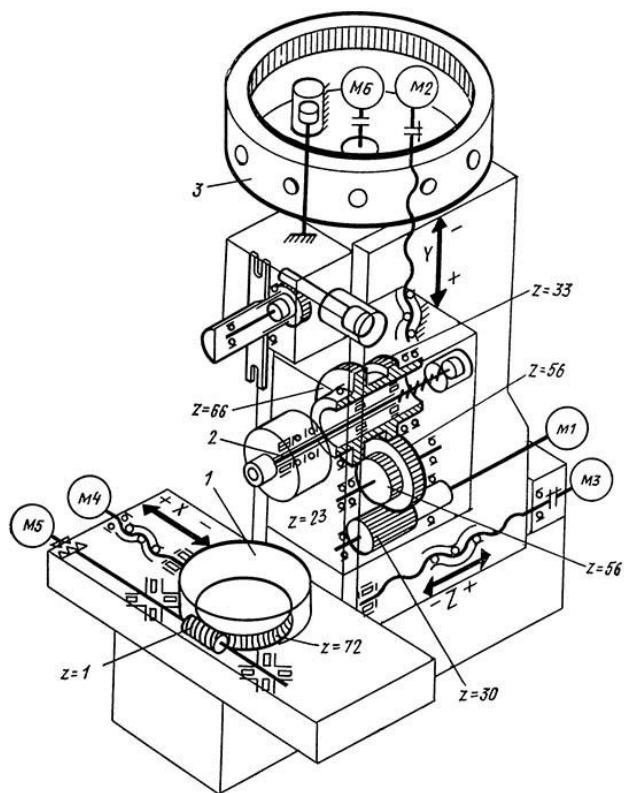
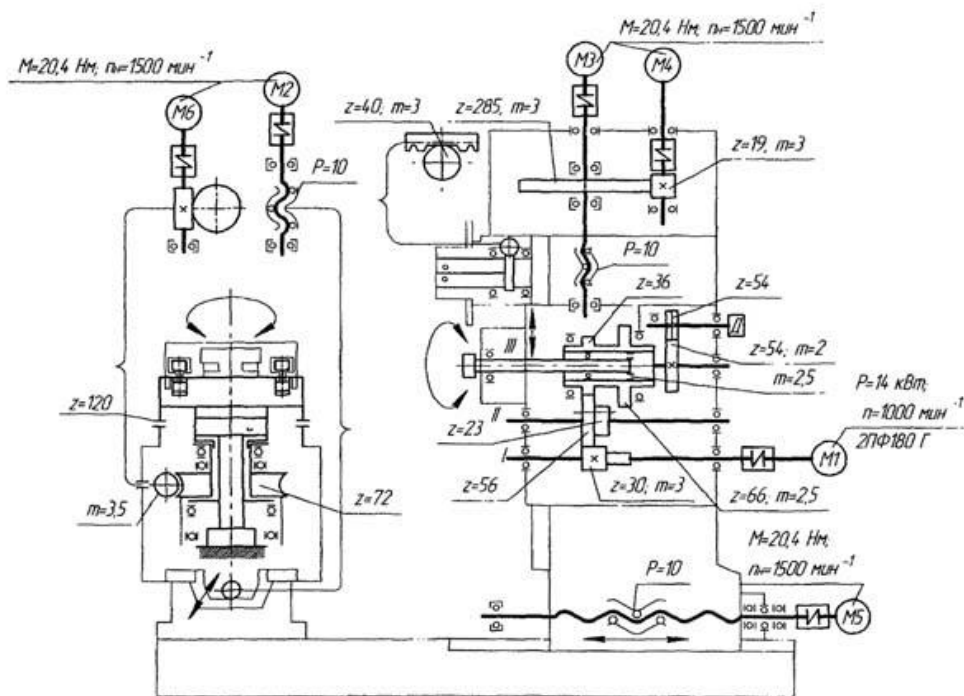


Рисунок 1.7 – Розташування складових частин фрезерного центру IP-500: 1-пристрій автоматичної зміни столів-супутників; 2-шпиндельна бабка; 3-стіл; 4-маніпулятор (автооператор); 5-інструментальний магазин; 6-стійка; 7-станина



a)



б)

Рисунок 1.8 – Кінематична схема верстату

Шпиндельна бабка розташована не збоку, як у горизонтально-розточувального верстата, а в прорізі (вікні) стійки. Бабка переміщується вертикально по напрямних, що охоплюють її з двох бокових сторін. Така компоновка, разом із масивною порталною стійкою, посиленою ребрами жорсткості, забезпечує високу жорсткість шпиндельного вузла та точність його лінійних переміщень.

З метою проектно-конструкторської розробки автоматизованого електропривода шпинделя фрезерного верстата IP-500 розглянемо функціональну та кінематичну схеми автоматизованої електромеханічної системи. Існуюча система електроприводу виконана за схемою тиристорний перетворювач (керований випрямляч) – двигун постійного струму (ТП-Д) з підпорядкованим регулюванням координат – струму та швидкості.

На функціональній схемі (рис. 1.10) показані: РШ, РС – регулятори швидкості і струму — послідовні коректуючі ланки, які виконують функції керуючого пристрою електропривода; ТП – тиристорний перетворювач, призначений для створення керуючої дії, яка прикладається до електродвигуна М; ПП – передаточний пристрій, який здійснює передачу механічної енергії від електродвигуна до шпинделя верстата, а також узгоджує їх швидкості й змінює напрямок обертання; ДШ, ДС – датчики швидкості та струму.

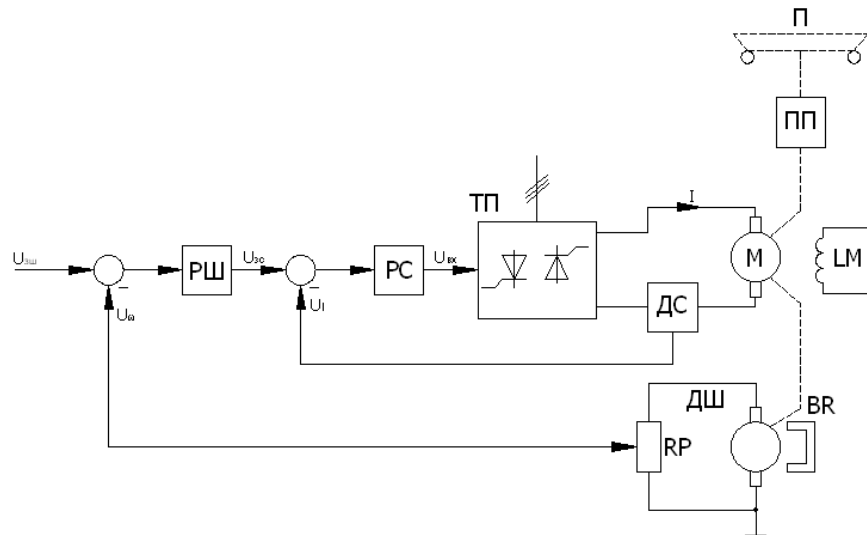


Рис. 1.9 – Функціональна схема головного електроприводу

Обертання шпинделя здійснюється від електродвигуна постійного струму. Зміна частоти обертання шпинделя забезпечується регулюванням швидкості двигуна та двоступінчастою коробкою швидкостей. Для перемикання механічних діапазонів використовується рухомий блок зубчастих коліс $z=23$ та $z=56$, який може входити в зачеплення з шестернями $z=36$ або $z=66$, закріпленими на спільній ступиці та з'єднаними зі шпинделем зубчастою муфтою, розміщеною в отворі ступиці. Блок переміщається гідроциліндром, займаючи два положення для першого або другого діапазону.

- Перший діапазон: 21,2–1000 об/хв при великому сталому крутному моменті 700 Н·м.

- Другий діапазон: 1000–3150 об/хв при сталій потужності 14 кВт.

Зміна напрямку обертання досягається реверсуванням електродвигуна.

Рухи подачі й поворот стола здійснюються від високомоментних електродвигунів постійного струму M2, M3, M4, M5, M6.

На поворотний стіл можна встановлювати заготовки масою до 700 кг. Обертаючи стіл, можна змінювати кутове положення заготовки відносно шпинделя та обробляти її з чотирьох боків за один раз. Для зменшення витрат часу є двопозиційний поворотний стіл.

Обробка ведеться із закріпленням заготовок у супутниках. Поки один супутник з деталлю обробляється на основному поворотному столі, на іншому супутнику вже встановлюють наступну деталь. Після закінчення обробки супутник автоматично пересувається праворуч на двопозиційний стіл, який повертається на 180° , і супутник із новою деталлю займає робочу позицію. Оброблена деталь знімається, а замість неї встановлюється наступна.

Різальні інструменти, закріплені поза верстатом в уніфікованих оправках, під час налаштування розміщуються в гніздах інструментального магазину, що знаходиться зверху на стійці. Над кожним гніздом є номер (у верстаті застосована система кодування гнізд). Для передачі інструментів з магазину у шпиндель та назад використовується двозахватний автооператор.

Основні рухи верстата:

1. Головний рух — обертання шпинделя з інструментом, забезпечене двигуном М1 постійного струму (типу 2ПФ-80Г), потужність 14 кВт, номінальна частота обертання 1000 об/хв, напруга 220 В. Частота обертання змінюється регулюванням двигуна та коробкою швидкостей.
2. Рухи подач:
 - Вісь Х — переміщення стола з заготовкою
 - Вісь Y — вертикальне переміщення шпиндельної бабки
 - Вісь Z — горизонтальне переміщення стійки

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики верстата IP-500

Параметри	IP-500ПМФ4
Клас точності (ГОСТ 8-82)	П
Розміри робочої поверхні стола, мм	500×500
Переміщення по осі Х, мм	800
Переміщення по осі Y, мм	500

Переміщення по осі Z, мм	500
Поворотний стіл (ось B)	5° (72 поз.)
Найб. діаметр свердління в сталі, мм	40
Найб. діаметр розточування, мм	160
Найб. діаметр торцевої фрези, мм	160
Точність позиціонування X/Y, мм	0,018 / 0,015
Точність позиціонування Z, мм	0
Робоча подача X/Y/Z, мм/хв	1–2000
Швидкі переміщення X/Y/Z, м/хв	8–10
Макс. зусилля подачі X/Z, Н	8000
Макс. зусилля подачі Y, Н	4000
Відстань шпиндель–стіл, мм	50–550
Система ЧПУ	2C45-65
Кількість керованих координат	3
Лінійна/кругова інтерполяція	3/3
Макс. навантаження на стіл, кг	700
Кількість різбових отворів	25
Діаметр різбових отворів, мм	M20
Зусилля затиску стола, кН	40
Частота обертання шпинделя, об/хв	21,2–3000
Кількість швидкостей	89
Макс. крутний момент, Нм	700
Конус шпинделя 7:24	50
Кількість інструментів	30
Час зміни інструмента, с	6
Час зміни інструмента, с	16,2–21,2
Макс. діаметр інструмента, мм	125

Макс. діаметр інструмента, мм	160
Макс. довжина інструмента, мм	300
Маса оправки з інструментом, кг	20
Час зміни столів-супутників, с	45
Кількість електродвигунів	12
Головний двигун, кВт	14
Двигуни подач (X/Y/Z/B), магазин, кВт	2,8
Гідронасос, кВт	5,5
Вентилятор гідростанції, кВт	0,12
Вентилятор шпинделя, кВт	0,12
Насос змазки шпиндельної бабки, кВт	1,1
Насос змазки напрямних, кВт	0,02
Насос охолоджуючої рідини, кВт	0,12
Сумарна потужність, кВт	35
Габарити (довжина×ширина), мм	4450×4655
Габарити (висота), мм	3100
Маса, кг	11370

1.4. Розробка вимог до систем електроприводу і автоматизації

Вимоги до систем електроприводу та автоматизації для модернізації головного приводу горизонтального фрезерного центра IP-500 з переходом на систему **перетворювач частоти (ПЧ) - асинхронні двигун (АД)** з векторним керуванням:

1. Заміна електроприводів постійного струму (двигунів типу 2ПФ) на сучасні АД з ПЧ.

2. Реалізація векторного керування для забезпечення високого динамічного моменту, точності регулювання швидкості та позиціонування.

3. Сумісність із системою ЧПУ (наприклад, Siemens, Fanuc, Heidenhain) — інтеграція команд управління через цифровий інтерфейс (Profibus, EtherCAT, Modbus).

Вимоги до приводу головного руху (шпиндель):

- Частотний діапазон шпинделя: **21–3150 об/хв.**
- Потужність двигуна: **14–18 кВт** (АС двигун, з ПЧ).
- Регулювання моменту: **у всьому діапазоні швидкостей** (особливо на малих обертах — для різання на низьких швидкостях).
- Перехід між діапазонами швидкості **без механічного перемикавання (по можливості).**
- Реверсивність обертання шпинделя під контролем ПЧ.
- Передбачити інтерфейс для управління ПЧ із ЧПУ: завдання швидкості, моменту, сигналів стану.

Вимоги до приводів подачі (X, Y, Z, B):

- Двигуни подачі: АД з ПЧ, потужністю **2,8–3 кВт** кожен.
- Робочі подачі: 1–2000 мм/хв.
- Швидкі переміщення: 8000–10,000 мм/хв.
- Зусилля подач: до **8 кН** (стіл, стойка), **4 кН** (шпиндельна бабка).
- Вимоги до точності: реалізація **замкнутого контуру по швидкості та положенню** (векторне керування + зворотний зв'язок із енкодерів).

Вимоги до допоміжних механізмів:

- Поворотний стіл: АД + ПЧ, високий момент на низьких швидкостях.
- Магазин інструментів: ПЧ + АД, можливість позиційного контролю.
- Синхронізація циклів із ЧПУ, без втручання оператора.

Вимоги до автоматизації:

- Центральна система ЧПУ керує всіма приводами через **цифровий зв'язок.**

- Інтеграція ПЧ через **систему верхнього рівня** (команди, статуси, аварії).
- Облік сигналів кінцевих вимикачів, датчиків положення, гідро- й пневмосистем.
- Візуалізація стану ПЧ, сигналізація несправностей на панелі оператора.

Енергетичні та економічні вимоги:

- Зниження споживання енергії завдяки ПЧ (економія до 20–30% порівняно зі старими системами).
- Плавний пуск без ударних навантажень на механіку.
- Менше обслуговування (виключення щіток, колекторів, редукторів діапазонів).

Безпека і надійність:

- Аварійне гальмування у разі збою.
- Захист двигунів і ПЧ від перевантаження, перегріву, коротких замикань.
- Модульність: заміна одного блоку без повного демонтажу.

1.5 Висновки

1. У результаті проведеного аналітичного огляду встановлено, що металорізальні верстати є невід’ємною частиною сучасного машинобудування та інших галузей промисловості. Їх класифікація охоплює широкий спектр характеристик — від типу обробки, рівня спеціалізації й точності, до масогабаритних параметрів та ступеня автоматизації. Особливе місце посідають токарні верстати, які представлені численними різновидами для виконання точних та складних операцій.

2. Проаналізовано багатоцільовий горизонтально-фрезерний обробний центр IP-500, призначений для високопродуктивної обробки корпусних деталей масою до 700 кг з конструкційних матеріалів. Верстати даного типу відрізняються високим рівнем автоматизації, що дозволяє інтегрувати їх в автоматизовані лінії з керуванням від ЕОМ.

3. В даній бакалаврській роботі буде здійснюватися модернізація шляхом переходу на асинхронний привод з векторним керуванням, так як в існуючому

верстаті головний привод шпинделя - з високомоментним двигуном постійного струму зі збудженням від постійних магнітів.

4. На основі аналізу технологічних операцій розроблені вимоги до електроприводу і системи автоматизації технологічного оброблювального центру.

2.ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА

2.1. Загальні відомості. Функціональна схема

Фрезерно-розточувальні верстати відносяться до металорізальної групи та призначені для обробки плоских і фасонних поверхонь, отворів, пазів та інших елементів заготовок. Основним рухом верстата, завдяки якому інструмент здійснює різання металу, є обертання фрези або різця, встановленого в шпинделі. Головний електропривод верстата забезпечує обертання шпинделя, долаючи опір різанню, а також сили тертя в опорах та кінематичних ланках.

В даному проекті здійснюється модернізація електроприводу головного руху з переходом на асинхронний двигун з векторним керуванням. Для цього потрібно обґрунтувати вибір потужності електродвигуна, який працює у повторно-короткочасному режимі.

Вихідні параметри для проведення розрахунків:

- вид металообробки – розточування внутрішнє поздовжнє;
- діаметр заготовки $D_d = 160 \text{ мм} = 0,16 \text{ м}$;
- ширина заготовки $H_d = 500 \text{ мм} = 0,5 \text{ м}$;
- максимальний діаметр обробки $D_p = 160 \text{ мм} = 0,16 \text{ м}$ (приймаємо рівним діаметру заготовки);
- к.к.д. механічної передачі $\eta = 0,98$;
- передаточне відношення редуктора $i = 5$;
- планшайба встановлена в підшипнику кочення з коефіцієнтом тертя $f = 0,01$;
- сумарний момент інерції редуктора та планшайби $J_p = 0,95 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;
- попереднє значення моменту інерції електродвигуна $J_d = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;
- режим роботи електропривода - повторно-короткочасний.

Цикл роботи верстату:

- розгін планшайби з прискоренням $a_p = 12 \text{ рад/с}^2$ на холостому ході;

- робота з усталеною швидкістю $\omega_{уст} = 30$ рад/с на протязі $t_{уст} = 5$ хв;
- гальмування із сповільненням $a_c = -20$ рад/с² на холостому ході;
- пауза протягом $t_n = 5$ хв для зміни заготовки.

2.2. Побудова навантажувальної діаграми та вибір електродвигуна

Вихідними даними для побудови навантажувальної діаграми електропривода є моменти M або потужність P , яку повинен розвивати двигун на робочих стадіях технологічного процесу, а також тривалість роботи t_p і пауз t_n , причому сума останніх являє собою тривалість циклу $t_{ц}$.

Методика побудови навантажувальної діаграми електропривода включає наступні етапи:

- визначення моментів на валу планшайби в режимах холостого ходу, різання з максимальними параметрами, пуску та гальмування;
- побудову діаграм швидкості та потужності для типового циклу роботи верстату;
- визначення величини еквівалентного моменту або потужності електродвигуна з урахуванням втрат.

Навантажувальна діаграма будується для найважчого циклу роботи верстату. Під найважчим циклом роботи розуміється режим обробки заготовки максимального діаметру при максимальній швидкості, подачі, глибині різання, максимальної твердості оброблюваних матеріалів і з мінімальними паузами.

Корисним зусиллям, яке долає електропривод головного руху металорізального верстату, є основна складова зусилля різання F_z . Вся решта зусиль, а саме опір руху в напрямних, тертя в підшипниках і редукторі, а також динамічні зусилля є додатковими.

При обертальному русі планшайби карусельних верстатів, а також ряду інших (токарних, розточувальних, фрезерних, свердлильних і шліфувальних верстатів)

корисна складова моменту різання безпосередньо на шпінделі:

$$M_p = F_z \frac{D_p}{2}, \text{ Н}$$

де F_z – тангенційна складова зусилля різання, Н; D_p – діаметр різання (в токарних, розточувальних верстатах це діаметр заготовки в місці торкання різця; у фрезерних свердлильних, шліфувальних верстатах – діаметр інструменту).

Відповідний момент, приведений до валу електродвигуна, дорівнює:

$$M_{p.пр} = \frac{M_z}{i} = \frac{F_z D_p}{2i}, \text{ Н}\cdot\text{м},$$

де i – загальне передаточне відношення кінематичного ланцюга від валу електродвигуна до планшайби.

Розрахунок зусилля різання [6]. Розподіл зусиль різання при точінні показаний на рис. 2.1. На рисунку позначені: v – лінійна швидкість різання, м/хв; t – глибина різання, мм; s – подача, мм/об; F – зусилля різання, прикладене до ріжучої крайки, Н; F_z – тангенціальна складова, що долається головним електроприводом; F_x – осьова сила (долається електроприводом поздовжньої подачі); F_y – радіальна сила, нормальна до оброблюваної поверхні (долається електроприводом поперечної подачі).

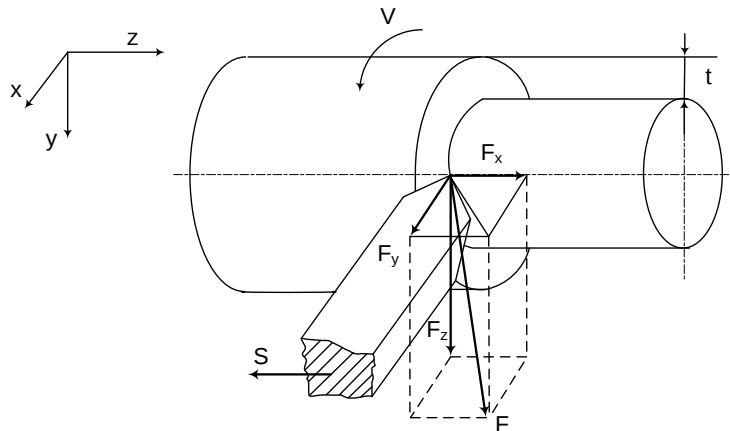


Рис. 2.1 - Розподіл зусиль різання при поздовжньому точінні

Повне зусилля, яке прикладається до ріжучої кромки інструменту, може бути розкладене на три складові (див. рис. 2.1):

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}, \text{ Н,}$$

де F_z - головна дотична сила, яка діє у напрямку головного руху (сила різання, яку долає шпиндель верстату);

F_y - радіальна сила, яка діє нормально до оброблюваної поверхні (сила, яку долає поперечна подача);

F_x - осьова сила, яка діє паралельно до оброблюваної поверхні (сила, яку долає поздовжня подача).

Головне зусилля різання розраховується за емпіричною формулою

$$F_z = 9.8 \cdot C_{Fz} \cdot t^{X_{Fz}} \cdot s^{Y_{Fz}} \cdot v^n \cdot K_{пз} = 9.8 \cdot 300 \cdot 0.015^{1.0} \cdot 0.01^{0.75} \cdot 144 \cdot 1 = 200,82 \text{ (Н)} \quad (2.1)$$

де $t = 15$ мм – максимальна глибина різання; $s = 10$ мм – максимальна величина подачі; $v = 144$ м/хв - окружна швидкість різання; C_{Fz} , X_{Fz} , Y_{Fz} , n - коефіцієнт та показники ступеня, які залежать від різновиду та режиму металообробки ; $K_{пз}$ - загальний поправочний коефіцієнт, який враховує зміни умов металообробки (особливості геометрії різця, його спрацьованість, умови охолодження, стан поверхні заготовки).

2.3 Розрахунок статичних моментів.

Момент різання на шпинделі ($D_p = D_\delta$)

$$M_p = F_z \frac{D_p}{2} = \frac{200,82 \cdot 0,16}{2} = 16,06 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \quad (2.2)$$

Повний статичний момент опору, обумовлений зусиллям різання та тертям в силовому підшипнику:

$$M_{c\Sigma} = M_p + M_{тр} = M_p + 0,1M_p = 16,06 + 0,1 \times 16,06 = 17,66 \text{ Нм}, \quad (2.3)$$

де коефіцієнт 0,1 враховує тертя у підшипнику.

2.4 Розрахунок динамічних моментів

1. Статичний момент на валу планшайби в режимі холостого ходу

$$M_{c\Sigma_{х.х}} = M'_{тр} = 0,1M_{c\Sigma} = 0,1 \cdot 16,06 = 1,61 \text{ Нм} \quad (2.4)$$

2. Момент на валу планшайби при розгоні

$$M_{розг} = J_{\Sigma} a_p = 48,75 \cdot 12 = 585 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.5)$$

де $J_{\Sigma} = J_p i^2 + J_d i^2 = 0,955^2 + 15^2 = 48,75 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – сумарний момент інерції механічної частини, приведений до валу планшайби; $i = 5$ – попереднє значення передаточного відношення редуктора.

1. Момент при сповільненні

$$M_{спов} = J_{\Sigma} \cdot a_c = 48,75 \cdot (-20) = -975 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.6)$$

2. Час розгону до усталеної швидкості та час сповільнення, відповідно, дорівнюють

$$t_p = \frac{\omega_{уст}}{a_p} = \frac{144}{12} = 12 \text{ с}; \quad t_c = \frac{\omega_{уст}}{a_c} = \frac{144}{20} = 7,2 \text{ с}. \quad (2.7)$$

3. Потужність на валу планшайби в режимі пуску

$$P_p = \omega_{cp} \cdot (M_{розг} + M_{c\Sigma_{хх}}) = 77 \cdot (585 + 1,61) = 45,1 \text{ кВт}, \quad (2.8)$$

$$\text{де } \omega_{cp} = \omega_{уст} / 2 = 144 / 2 = 77; \quad (2.9)$$

- в режимі сповільнення

$$P_c = \omega_{cp} \cdot (M_{спов} - M_{c\Sigma_{хх}}) = 77 \cdot (975 - 1,61) = 74,95 \text{ кВт} \quad (2.10)$$

- в режимі різання (усталеному)

$$P_{уст} = \omega_{уст} \cdot M_{c\Sigma} = 144 \cdot 17,66 = 2,5 \text{ кВт} \quad (2.11)$$

2.5 Побудова навантажувальної діаграми

Навантажувальна діаграма для головного електропривода, побудована у відповідності з проведеними розрахунками, показана на рис. 2.2

Еквівалентна потужність електропривода визначається за формулою:

$$P_{екв} = \sqrt{\frac{P_p^2 \cdot t_p + P_{уст}^2 \cdot t_{уст} + P_c^2 \cdot t_c}{t_{цик}}} = \sqrt{\frac{45,1^2 \cdot 12 + 2,5^2 \cdot 300 + 74,95^2 \cdot 7,2}{12 + 300 + 7,2}} = 14,46 кВт \quad (2.12)$$

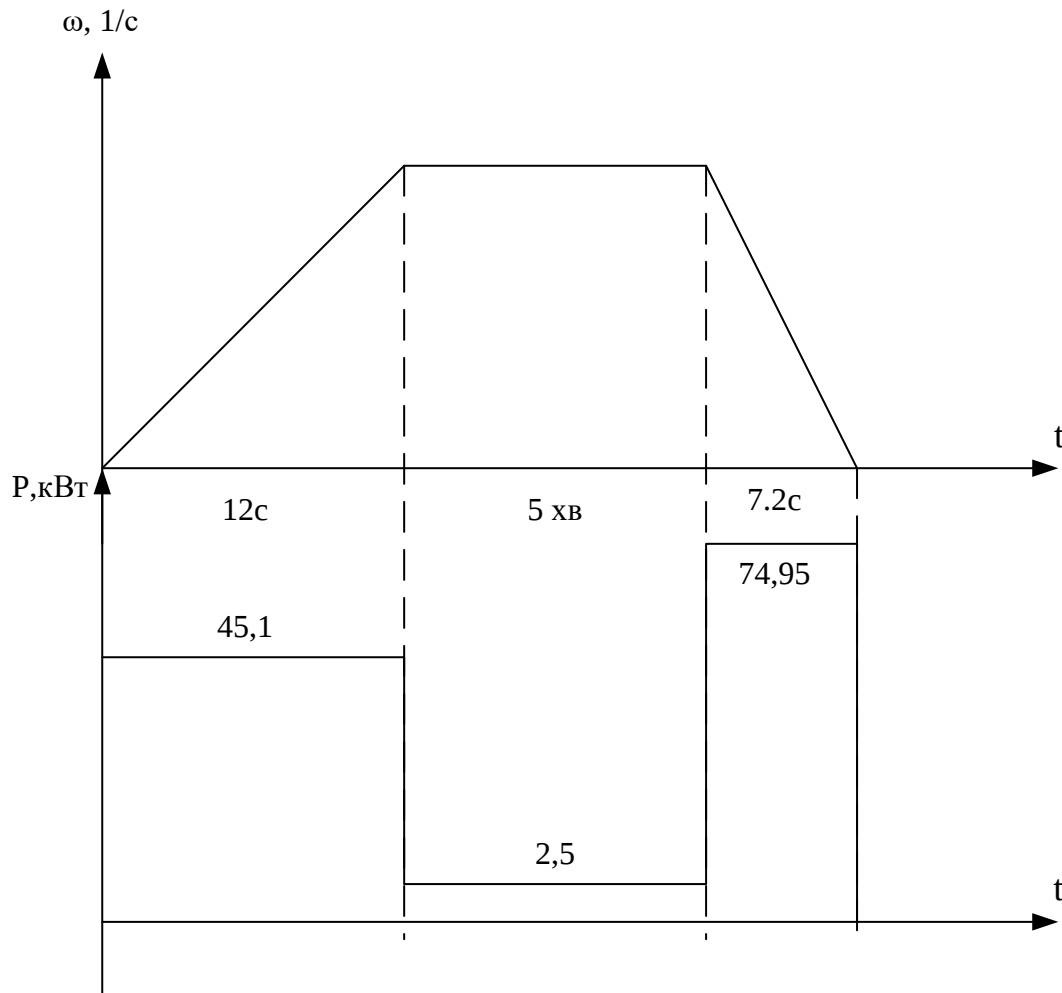


Рис. 2.2 - Навантажувальна діаграма

Необхідна номінальна потужність електродвигуна з урахуванням ККД

редуктора дорівнює:

$$P_n = P_{\text{екв}} / \eta = 14,46 / 0,98 = 14,75 \text{ кВт} \quad (2.13)$$

Висновок до розділу 2

У цьому розділі проведено енергосиловий розрахунок головного приводу фрезерувально-розточувального верстата на основі заданих параметрів режиму металообробки з метою визначення потужності електродвигуна:

1. Обчислено крутні моменти двигуна для статичних та динамічних режимів роботи;
2. Визначено необхідну потужність двигуна приводу для забезпечення потрібних характеристик механізму.

Це дає змогу здійснити вибір електродвигуна і необхідного силового електрообладнання для подальшого проєктування електроприводу головного руху ТОЦ.

3 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

3.1 Вибір електродвигуна

Вибір електродвигуна є ключовим етапом у проектуванні приводу подачі горизонтально-фрезерного верстата. Від правильного підбору залежить ефективність, надійність та довговічність роботи механізму. У цьому розділі розглядаються основні критерії вибору двигуна на основі технічних параметрів, умов експлуатації та результатів енергосилового розрахунку. Мета — обрати оптимальний двигун, який забезпечить стабільну та економічну роботу верстата.

Розглянемо двигун від компанії ABB M2BAX 160MLB 4, технічні характеристики занесені у таблицю 3.1

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики двигуна ABB M2BAX 160MLB 4

Параметр	Позначення	Значення
Потужність	P	15 кВт
Частота обертання умовна (фактична)	n	1500 (1468) об/хв
Напруга	U	400 В
Частота струму	f	50 Гц
ККД	η	88,7%
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi$	0,81
Сила струму номінальна	I_n	29,5 А
Співвідношення пускового струму до номінального	I_p/I_n	8,0
Момент інерції	J	0,1 кг·м ²
Обертаючий момент	T_p	97,71 Н·м
Ступінь захисту від пилу та води		IP55
Режим роботи		S1
Клас ізоляції обмотки		F (до 150°C)

Спосіб охолодження двигуна		IC411
Рівень звукового тиску	L _{pv}	66 дБ
Вага	m	126 кг

3.2 Вибір перетворювача частоти

Перетворювач частоти VFD – (Variable Frequency Drive) – це електронний пристрій, який встановлюється між джерелом живлення і асинхронним електродвигуном. Його основне призначення полягає в тому, щоб **змінювати частоту та напругу** змінного струму, що подається на двигун.

Основні складові перетворювача частоти:

- **випрямляч** : Перетворює вхідний змінний струм (AC) на постійний струм (DC). Зазвичай використовуються діодні або тиристорні мости;
- **ланка постійного струму (DC Link)**: Згладжує пульсації постійного струму за допомогою конденсаторів та інколи дроселів. Це своєрідний "буфер" енергії;
- **інвертор (Inverter)**: Перетворює постійний струм назад у змінний струм, але вже з потрібною частотою та напругою. Ключовими елементами інвертора є силові напівпровідникові прилади, такі як IGBT (біполярні транзистори з ізольованим затвором) або MOSFET;
- **система керування (Control Unit)**: Мікропроцесор обробляє сигнали від датчиків, задані параметри та керує роботою інвертора, формуючи вихідну частоту та напругу.

Основна причина використання перетворювача частоти з асинхронним двигуном – це **можливість регулювання швидкість його обертання**. Але це далеко не єдина перевага:

1. **Плавне регулювання швидкості:** На відміну від простих способів регулювання (наприклад, за допомогою редукторів або механічних варіаторів), перетворювач забезпечує безступінчасте та точне керування швидкістю двигуна. Це критично важливо для багатьох технологічних процесів, де потрібна точна продуктивність.

2. **Економія енергії:** Зниження швидкості обертання двигуна часто призводить до значного зменшення споживання енергії. Наприклад, у відцентрових насосах та вентиляторах потужність обернено пропорційна кубу швидкості. Тому навіть невелике зниження швидкості може дати суттєву економію.

3. **Плавний пуск та зупинка:** Перетворювач забезпечує плавний розгін двигуна, що зменшує пускові струми та механічні навантаження на двигун, редуктор та інші елементи системи. Плавна зупинка також запобігає гідравлічним ударам у трубопроводах або ривкам у конвеєрних системах.

4. **Захист двигуна:** Перетворювачі частоти зазвичай мають вбудовані функції захисту двигуна від перевантаження по струму, перенапруги, зниженої напруги, перегріву тощо. Це підвищує надійність та продовжує термін служби двигуна.

5. **Покращення технологічних процесів:** Точне регулювання швидкості дозволяє оптимізувати багато виробничих процесів, підвищити якість продукції, знизити кількість браку.

6. **Керування моментом:** Сучасні векторні перетворювачі частоти дозволяють точно керувати не тільки швидкістю, але й моментом двигуна, що важливо для приводів з високими вимогами до динаміки та точності.

Отже, перетворювач частоти є ключовим елементом для повноцінного використання асинхронного двигуна, особливо коли потрібне гнучке та ефективне керування його роботою.

Для даного двигуна вибираємо перетворювач виробника ABB ACS880-01-034A-5. Технічні характеристики в табл.3.2

Таблиця 3.2- Технічні характеристики ACS880-01-034A-5

Параметр	Значення
Номінальна потужність (Pn)	18,5 кВт
Номінальний струм (In)	34 А
Вхідна напруга	3-фазна, 380–500 В
Вихідна частота	0–500 Гц
Перегрузочна здатність	150% протягом 1 хвилини
Тип управління	DTC, скалярне, векторне
Клас захисту	IP21
Розміри (Ш×В×Г)	203×580×274 мм
Вага	~17 кг
Аналогові входи / виходи	2 / 2
Дискретні входи / виходи	6 / 3 (2 PNP, 1 релейний)
Інтерфейси зв'язку	RS-485, Profibus DP, EtherNet/IP, Modbus/TCP, Profinet
Робоча температура	від –15 °С до +55 °С
Температура зберігання	від –40 °С до +70 °С
Вбудований гальмівний блок	Так
ЕМС-фільтр	Опціонально
Тип двигунів	Асинхронні, синхронні з ПМ, індукційні серводвигуни, синхронні з реактивним ротором

3.3 Вибір силового автомату

- вихідна потужність ПЧ: $P_{\text{вих}} = 18.5 \text{ кВт} = 18500 \text{ Вт}$
- вихідний струм ПЧ: $I_{\text{вих}} = 34 \text{ А}$
- напруга мережі (стандартна для України): $U_{\text{лн}} = 400 \text{ В}$ (трифазна)

3.3.1 Розрахунок вхідного струму перетворювача частоти:

Формула для потужності в трифазній мережі: $P_{\text{вх}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I \cdot \cos \varphi$

Якщо ми знаємо вихідну потужність ПЧ, то вхідна потужність ($P_{\text{вх}}$) буде дорівнювати вихідній потужності, розділений на ефективність ПЧ: $P_{\text{вх}} = P_{\text{вих}} / \eta_{\text{ПЧ}}$

Тоді вхідний струм можна розрахувати як: $I_{вх} = P_{вх} / (\sqrt{3} \cdot U_{лін} \cdot I \cdot \cos\varphi_{вх})$
або $I_{вх} = (P_{вих} / \eta_{ПЧ}) / (\sqrt{3} \cdot U_{лін} \cdot I \cdot \cos\varphi_{вх})$

3.3.2 Дані для розрахунку :

- **Ефективність перетворювача:** Сучасні перетворювачі частоти мають високу ефективність, зазвичай 0.95 - 0.98. Візьмемо середнє значення: **0.97**.
- **Коефіцієнт потужності на вході ($\cos\varphi_{вх}$):** Для перетворювачів частоти без активної корекції коефіцієнта потужності (APFC) він може бути в діапазоні 0.85 - 0.95. Візьмемо типове значення: **0.9**.

3.3.3 Виконаємо розрахунок:

1. **Розрахунок вхідної потужності ПЧ:** $P_{вх} = 18500 \text{ Вт} / 0.97 \approx 19072 \text{ Вт}$
2. **Розрахунок вхідного струму ПЧ:** $I_{вх} = 19072 / (\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.9) = 30.59 \text{ А}$

Вибір силового вхідного автомата: Згідно з розрахунком, номінальний вхідний струм перетворювача становить приблизно **30.6 А**.

Для силового автомата, який захищає вхід перетворювача частоти, зазвичай обирають номінал, що дорівнює або трохи перевищує розрахунковий вхідний струм, щоб уникнути помилкових спрацьовувань при пускових струмах і забезпечити належний захист.

- **Номінал струму:** Виходячи з 30.6 А, можна розглядати автомат на **32 А** або **35 А**.
- **Характеристика спрацьовування:** Будемо використовувати автомат типу **С**, оскільки він забезпечує захист від перевантажень і коротких замикань, дозволяючи при цьому пусковим струмам перетворювача не викликати помилкових спрацьовувань.
- **Кількість полюсів:** **Триполюсний (3Р)** для трифазної мережі.

Було обрано автоматичний вимикач SIEMENS 3VL1703-1DD33-0AA0, технічні характеристики приведені в таблиці 3.3 [9].

Таблиця 3.3- Технічні характеристики вимикача SIEMENS 3VL1703-1DD33-0AA0

Характеристика	Значення
Модель	Siemens 3VL1703-1DD33-0AA0
Виробник	Siemens
Номінальний струм (I_r)	25...32 A
Кількість полюсів	3-полюсний
Номінальна напруга (U_e)	415 В AC
Вимикаюча здатність (I_{cu})	55 кА
Характеристика спрацьовування	Захист лінії (Line protection)

Висновки до розділу 3

В даному розділі було здійснено вибір двигуна та перетворювача на основі розрахунків, представлених в попередніх розділах:

1. Вибрано синхронний серводвигун фірми ABB M2BAX 160MLB 4. Параметри цього двигуна задовольняють умовам, представленим в рівняннях (2.13);

2. Вибрано перетворювач частоти ACS880-01-034A-5 та силовий вимикач SIEMENS 3VL1703-1DD33-0AA0, що підходить по характеристикам в даному технологічному застосуванні;

Отримані дані дають змогу здійснити розрахунок параметрів та синтез системи векторного керування електропривода.

4. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

4.1 Розрахунок параметрів двигуна

За результатами енергосилового розрахунку було здійснено вибір трифазного асинхронного двигуна АВВ М2ВАН 160МВ 4 в якості привідного. Оскільки параметри двигуна, необхідні для проведення математичного моделювання (опір ротора та статора й інші параметри Г-подібної схеми заміщення), виробником не надаються, у довідниковій літературі [10] було знайдено двигун такої ж потужності з схожими параметрами (4А180S4У3). Паспортні дані цього двигуна при з'єднанні обмоток статора у зірку, наведені в табл. 4.1. Синхронна частота обертання 1500 об/хв.

Таблиця 4.1 – Паспортні дані двигуна 4А180S4У3

Параметри	Номінал
Номінальна потужність	$P_{2n} = 15 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 380 \text{ В}$
Число пар полюсів	$p_n = 2$
Момент інерції	$J_d = 0.19 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.88$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0.88$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2.3$
Номінальне ковзання	$s_n = 0.02$
Критичне ковзання	$s_k = 0.14$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\overline{x_1}' = 0.08 \text{ Ом}$

Активний опір статора	$\overline{R_1}' = 0.047 \text{ Ом}$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$\overline{x_2}'' = 0.13 \text{ Ом}$
Приведений активний опір ротора	$\overline{R_2}'' = 0.038 \text{ Ом}$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\overline{x_\mu} = 4 \text{ Ом}$

4.2 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна

Кутова частота напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (4.1)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{2} = 157 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (4.2)$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_n = \omega_{xx} (1 - s_n) = 157 \cdot (1 - 0.02) = 153.94 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (4.3)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{15000}{153.94} = 97.44 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4.4)$$

Критичний момент двигуна (по перевантажувальній здатності λ з каталогу):

$$M_k = \lambda \cdot M_n = 2.3 \cdot 97.44 = 224.12 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4.5)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

$$U_n = U_{1n} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ В}, \quad (4.6)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{15000}{3 \cdot 220 \cdot 0.88 \cdot 0.88} = 29.35 \text{ А}. \quad (4.7)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 \text{ В}, \quad (4.8)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 29.35 = 41.5 \text{ А} \quad (4.9)$$

Амплітудне значення потокозчеплення статора в режимі холостого ходу при $R_1 = 0$:

$$\Psi_{1XX} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{311}{314} = 0,99 \text{ Вб} \quad (4.10)$$

4.3 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення

Математична модель АД отримана для Т-подібної схеми заміщення, що показана на рис. 4.1, в той час як приведені каталожні параметри відповідають Г-подібній схемі заміщення, рис. 4.2. Для перерахунку параметрів з Г-подібної схеми в Т-подібну використовується методика [11], яка наведена нижче:

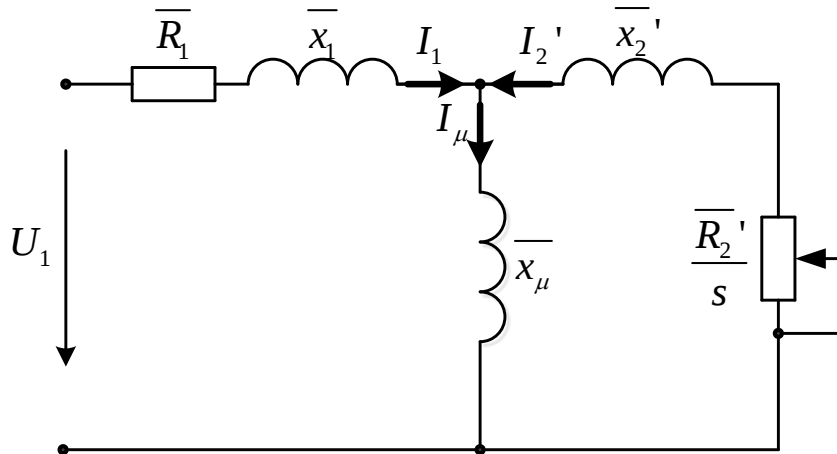


Рисунок 4.1 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

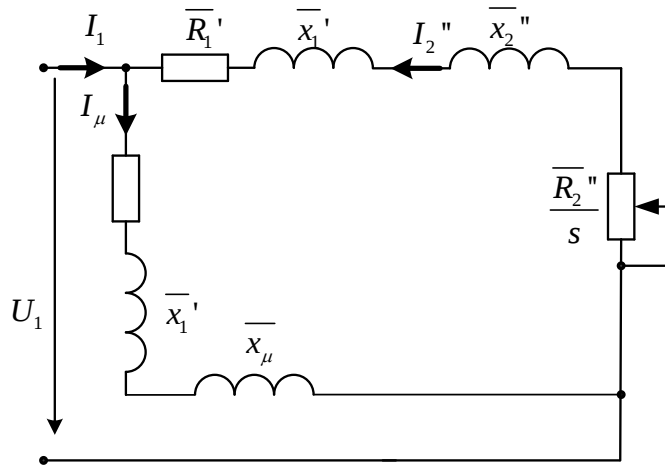


Рисунок 4.2 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Коефіцієнт перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами заміщення:

$$c_1 = \frac{\overline{x}_\mu + \sqrt{\overline{x}_\mu^2 + 4 \cdot \overline{x}_1' \cdot \overline{x}_\mu}}{2 \cdot \overline{x}_\mu} = \frac{2.3 + \sqrt{2.3^2 + 4 \cdot 0.08 \cdot 2.3}}{2 \cdot 2.3} = 1.02 \quad (4.11)$$

Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення.

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\overline{x}_1 = \frac{\overline{x}_1'}{c_1} = \frac{0.08}{1.02} = 0.0785 \quad (4.12)$$

$$\overline{R}_1 = \frac{\overline{R}_1'}{c_1} = \frac{0.047}{1.02} = 0.046, \quad (4.13)$$

$$\overline{x}_2' = \frac{\overline{x}_2''}{c^2} = \frac{0.13}{1.02^2} = 0.125, \quad (4.14)$$

$$\overline{R}_2' = \frac{\overline{R}_2''}{c^2} = \frac{0.038}{1.02^2} = 0.037. \quad (4.15)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях запишемо

як:

$$x_1 = \overline{x}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.0785 \cdot \frac{220}{29.35} = 0.59 \text{ Ом}, \quad (4.16)$$

$$R_1 = \overline{R}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.046 \cdot \frac{220}{29.35} = 0.35 \text{ Ом}, \quad (4.17)$$

$$x_2' = \overline{x_2} \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.125 \cdot \frac{220}{29.35} = 0.94 \text{ Ом}, \quad (4.18)$$

$$R_2 = \overline{R_2} \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.037 \cdot \frac{220}{29.35} = 0.274 \text{ Ом}, \quad (4.19)$$

$$x_\mu = \overline{x_\mu} \cdot \frac{U_n}{I_n} = 2.3 \cdot \frac{220}{29.35} = 29.99 \text{ Ом}. \quad (4.20)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{0.59}{314} = 0.0019 \text{ Гн}, \quad (4.21)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2'}{\omega_0} = \frac{0.94}{314} = 0.003 \text{ Гн}. \quad (4.22)$$

Індуктивність намагнічуючого контуру

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{29.99}{314} = 0.0954 \text{ Гн}. \quad (4.23)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.0954 + 0.0019 = 0.0973 \text{ Гн}, \quad (4.24)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.0954 + 0.003 = 0.0984 \text{ Гн}. \quad (4.25)$$

На основі проведених розрахунків обчислюємо значення параметрів $\alpha, \alpha_1, \beta, \gamma, \sigma, \mu_1$:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.274}{0.0984} = 2.7838 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \quad (4.26)$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0.3455}{0.0973} = 3.55 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \quad (4.27)$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2} \right) = 0.0973 \cdot \left(1 - \frac{0.0954^2}{0.0973 \cdot 0.0984} \right) = 0.0047 \text{ Гн} \quad (4.28)$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0.0954}{0.0984 \cdot 0.0047} = 203.48 \frac{1}{\text{Гн}} \quad (4.29)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta = \frac{0.3455}{0.0047} + 2.7838 \cdot 0.0954 \cdot 203.48 = 126.574 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \quad (4.30)$$

$$\mu_1 = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0.0954}{0.0984} = 1.4545 \quad (4.31)$$

Таблиця 4.2 – Параметри двигуна 4A180S4Y3

Параметри	Номінали	Параметри	Номінали
P_{2n} , кВт	15	R_1 , Ом	0.35
ω_{xx} , рад / с	157	R_2 , Ом	0.274
ω_n , рад / с	153.94	L_1 , Гн	0.097
M_n , Нм	97.44	L_2 , Гн	0.0984
M_k , Нм	224.12	L_m , Гн	0.0954
λ	2.3	α , Ом / Гн	2.78
I_{na} , А	41.5	α_1 , Ом / Гн	3.55
ψ_{1XX} , Вб	0.99	σ , Гн	0.0163
η	0.88	β , 1 / Гн	203.48
$\cos \varphi$	0.88	γ , Ом / Гн	126.57
J_d , кг · м ²	0.19	μ_1 , Гн	1.45

Висновок до розділу 4:

В данному розділі було:

1. Здійснено підбір аналога асинхронного двигуна фірми АВВ. В якості прототипу обрано двигун вітчизняного виробництва зі схожими параметрами 4A180S4Y3.
2. Було проведено розрахунки необхідних даних двигуна для подальшого застосування їх в математичному моделюванні.

5. СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

5.1. Обґрунтування принципу керування електроприводом

Для досягнення високої динаміки та точності регулювання положення в електромеханічних системах доцільно використовувати векторне керування асинхронним двигуном, яке базується на амплітудно-фазовому (векторному) принципі. Такий підхід дозволяє роздільно керувати потокозбуджуючою та моментною складовими струму, що забезпечує поведінку асинхронного двигуна, подібну до двигуна постійного струму [12].

Векторне керування реалізується в обертовій системі координат d-q, що пов'язана з вектором магнітного потоку ротора. Це дозволяє спростити математичну модель та побудову регуляторів [13]. Зазвичай використовується триконтурна каскадна структура регулювання: внутрішній контур відповідає за струм у координатах d та q, середній — за швидкість, а зовнішній — за положення ротора або момент.

Крім того, така структура сприяє зменшенню енергоспоживання, оскільки забезпечує точне підтримання магнітного потоку при мінімальному струмі збудження [14].

5.2. Структурно-параметричний синтез системи керування

Повний алгоритм векторного керування швидкістю АД з використанням спостерігача магнітного потоку зниженого порядку, містить [11]:

– спостерігач магнітного потоку АД

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\psi}} &= -\alpha \hat{\psi} + \alpha L_m i_d, \\ \dot{\varepsilon} &= \omega_0 = p_n \omega + \alpha L_m \frac{i_q}{\hat{\psi}} \end{aligned} \quad (5.1)$$

– регулятор потокозчеплення (оціненого)

$$\begin{aligned} i_d^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_{\psi 1} \tilde{\psi} - x_{\psi}), \\ \dot{x}_{\psi} &= k_{\psi i} \tilde{\psi}, \end{aligned} \quad (5.2)$$

де $(k_{\psi 1}, k_{\psi i}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора модуля вектора потокозчеплення ротора; $\tilde{\psi}$ – похибка відпрацювання оціненого значення модуля вектора потокозчеплення;

– регулятор струму за віссю d (польової складової струму статора)

$$\begin{aligned} u_d &= \sigma (\gamma i_d^* - \omega_0 i_q - \alpha \beta |\hat{\psi}| + \dot{i}_d^* - k_{id1} \tilde{i}_{d0} - x_d), \\ \dot{x}_d &= k_{iid} \dot{i}_d, \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$i_d^* = \frac{1}{\alpha L_m} \left[\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^* - k_{\psi 1} \left[-(\alpha + k_{\psi 1}) \tilde{\psi} + \alpha L_m \dot{i}_d - x_{\psi} \right] - \dot{x}_{\psi} \right] \quad (5.4)$$

де $\tilde{i}_d = i_{1d} - i_{1d}^*$ – похибка відпрацювання струму за віссю d, $(k_{id1}, k_{iid}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора струму i_{1d}

– регулятор кутової швидкості

$$\begin{aligned} i_q^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} (-k_{\omega} \tilde{\omega} + \dot{M}_c + v \omega^* + \dot{\omega}^*), \\ \dot{M}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega}, \end{aligned} \quad (5.5)$$

де $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$ – похибка відпрацювання кутової швидкості, $(k_{\omega 1}, k_{\omega i}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора швидкості;

– регулятор струму за віссю q (моментної складової струму статора)

$$\begin{aligned} u_q &= \sigma \left[\gamma i_q^* + \omega_0 i_d + \beta p_n \omega \psi^* + \dot{i}_{q1}^* - k_{iq1} \tilde{i}_q - x_q - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} \tilde{i}_q \right], \\ \dot{x}_q &= k_{iiq} \tilde{i}_q, \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$i_{q1}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[-k_{\omega} (-k_{\omega} \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q) + \dot{M}_c + v \dot{\omega}^* + \ddot{\omega}^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_q^*. \quad (5.7)$$

де $\tilde{i}_q = i_{1q} - i_{1q}^*$ – похибка відпрацювання струму i_{1q} , $(k_{iq1}, k_{i1q}) > 0$ – коефіцієнти ПІ-регулятора струму i_{1q} .

5.3. Розрахунок параметрів регуляторів і зворотних зв'язків [11]

Задане значення максимального відхилення швидкості при дії постійного моменту навантаження. $\tilde{\omega} = 3.9$ рад/с (2% від ω_n). З цього випливає що налаштування пропорційної складової регулятора швидкості повинне бути

$$k_{\omega} = \frac{M_c}{J\tilde{\omega}} = \frac{97.44}{0.19 \cdot 3.9} = 131.5 \text{ с}^{-1} \quad (5.8)$$

Прийнято, що помилка відпрацювання швидкості не повинна мати перерегулювань, тому $k_{\omega i} = \frac{k_{\omega}^2}{2}$.

Для визначення налаштувань контуру регулювання струму знайдено значення частоти недемпфованих коливань контуру регулювання швидкості $\omega_{0\omega} = \sqrt{k_{\omega i}} = 92.98$ рад / с та прийнято коефіцієнт розділення $\varepsilon = 5$, звідки випливає, що частота недемпфованих коливань контурів регулювання струму дорівнює $\omega_{0i} = \varepsilon \omega_{0\omega} = 5 \cdot 92.98 = 465$ рад/с. Тому налаштування інтегральної складової регуляторів струму буде $k_{ii} = \omega_{0i}^2 = 465^2$. Задаючись тим, що коефіцієнт згладжування коливань може бути прийнятим $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2}$ (іншими словами, тут дозволяється перерегулювання), то коефіцієнт пропорційної складової регуляторів струму $k_i = \sqrt{2k_{ii}} = \sqrt{2 \cdot 465^2} = 465 \cdot \sqrt{2} \approx 658 \text{ с}^{-1}$.

Схема векторного керування асинхронним двигуном, набрана в середовищі Matlab, наведена на рисунку 5.1.

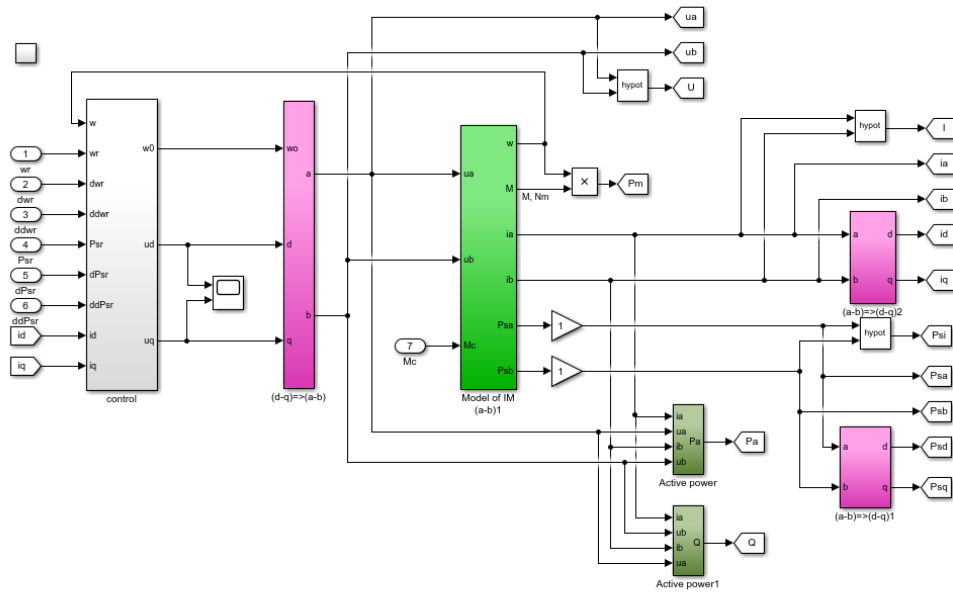


Рисунок 5.1 – Схема векторного керування асинхронним двигуном в середовищі Matlab

Моделювання включало пуск приводу на холостому ході, накидання і скидання навантаження на усталеній швидкості, гальмування. Результати моделювання представлені на рисунку 5.2.

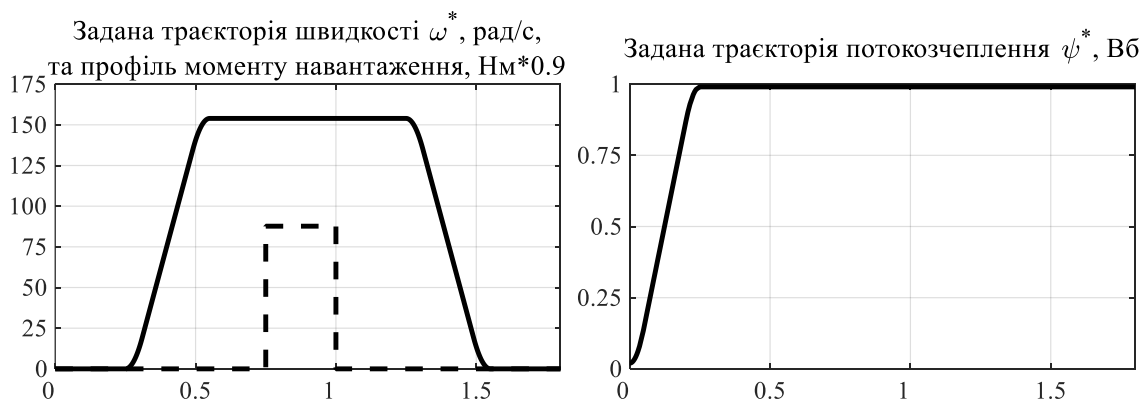


Рисунок 5.2 – Завдання швидкості, потокозчеплення та моменту двигуна

На рис. 5.3 зображено графіки відпрацювання траєкторії швидкості, потокозчеплення та моменту двигуна.

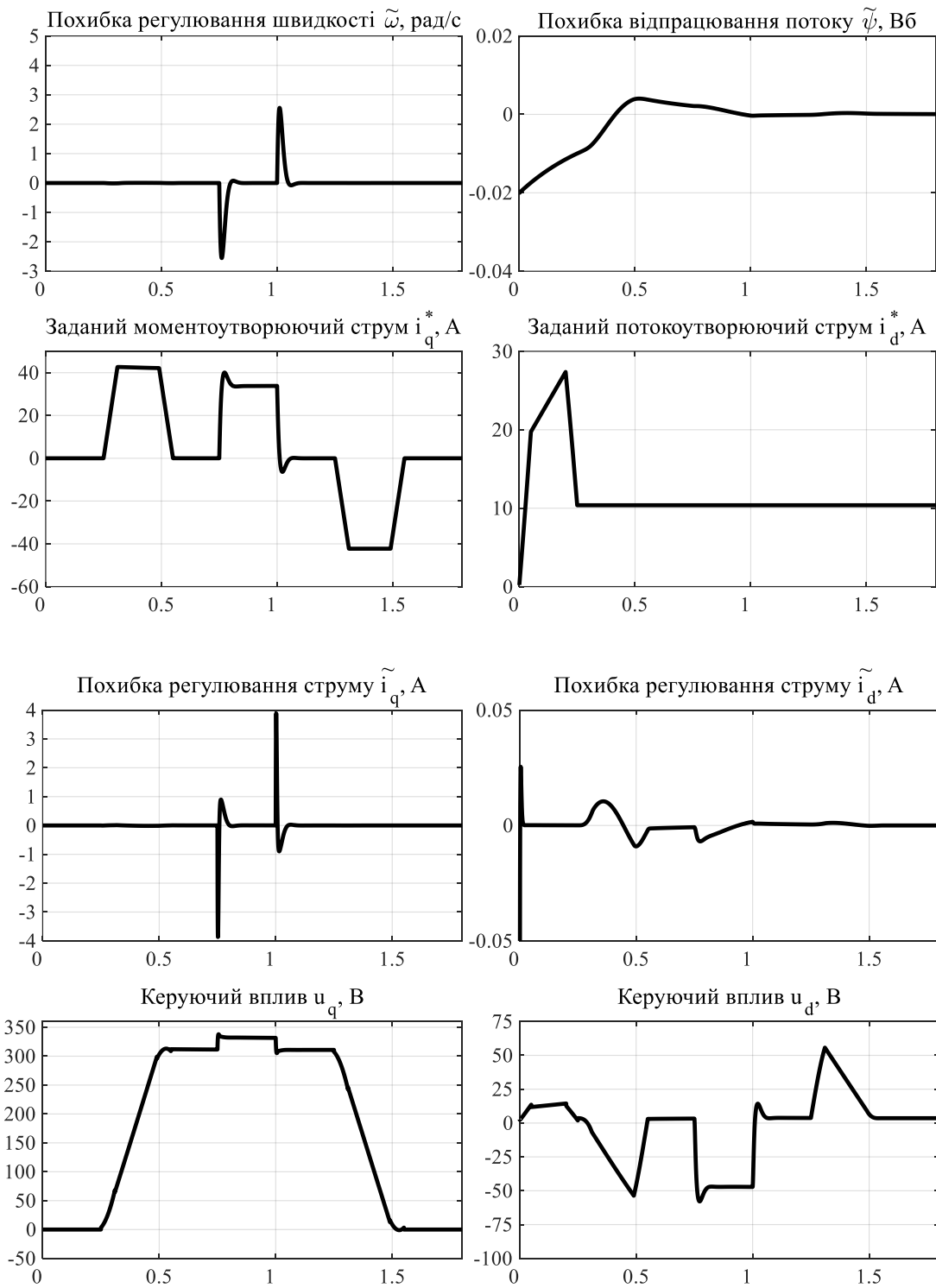


Рисунок 5.3 – Графіки перехідних процесів при векторному керуванні швидкістю

АД

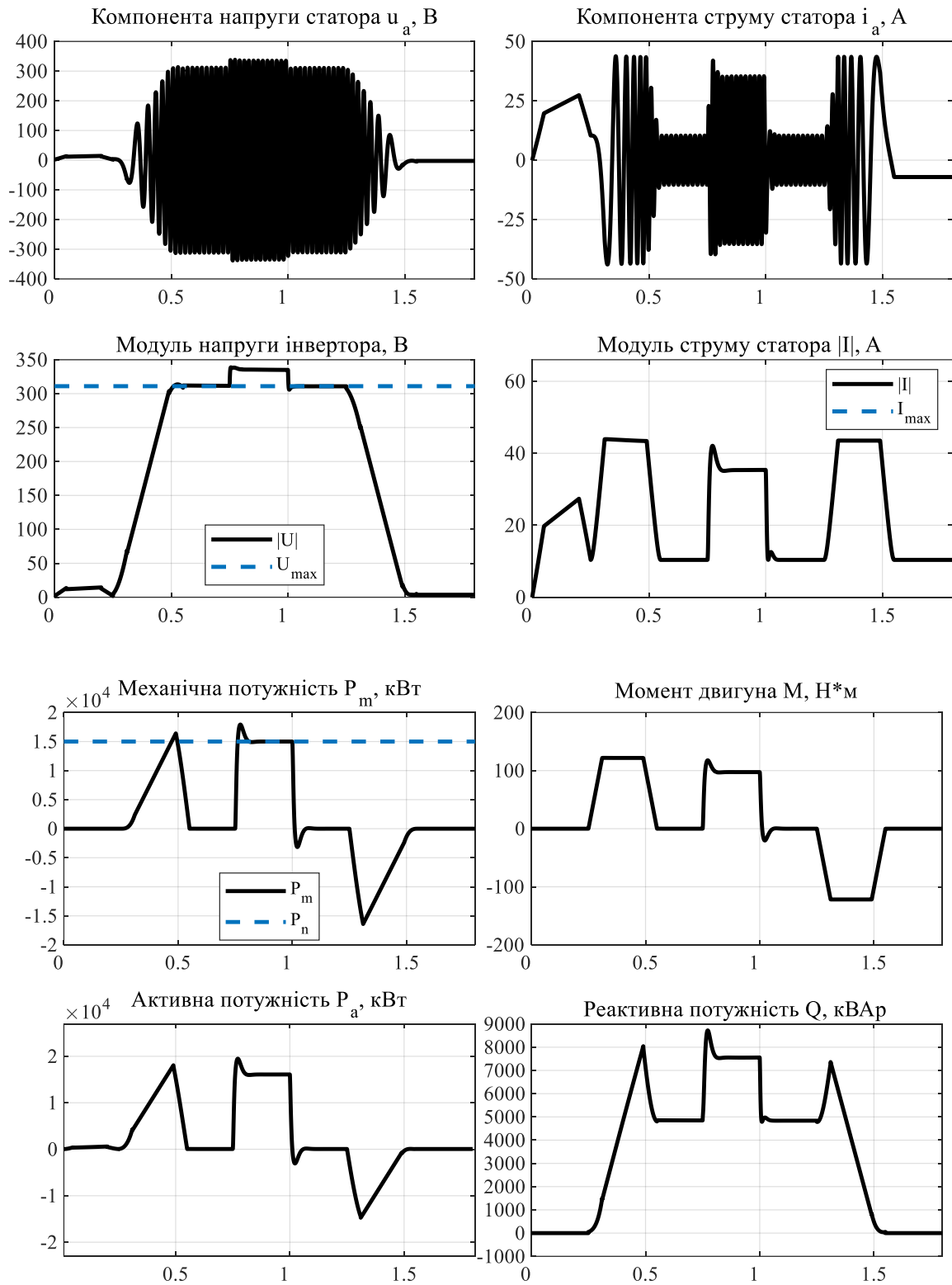


Рисунок 5.4 – Графіки перехідних процесів при прямому векторному керуванні швидкістю АД

На рисунку 5.3 спочатку розглянемо поведінку швидкості та модуля потокозчеплення. Якщо оцінити графік помилок у регулюванні швидкості, можна побачити, що там присутня динамічна похибка під час розгону та сповільнення двигуна початкове значення похибки потокозчеплення становить 0.02 Вб і швидко зменшується до нуля з невеличким перерегулюванням. Початкова похибка відпрацювання потокозчеплення виникає через визначення початкових умов, які включають ділення на задане потокозчеплення у початковий момент часу в алгоритмі керування. Можна зробити висновок, що швидкість та потокозчеплення відпрацьовують асимптотично.

Якщо розглянути графіки струмів i_q^* та i_d^* , видно, що струм i_d^* формує потокозчеплення двигуна, яке досягає сталого значення згідно з поставленим завданням. Це стає можливим завдяки форсуванню збудження, який показує різке зростання струму при досягненні номінального значення потокозчеплення. Також помітно, порівнявши графік моменту двигуна з графіком струму i_q^* на рис. 5.3 з рис. 5.4, що струмова складова i_q^* за формою майже повністю відтворює його, тому струм i_q^* виступає як його визначальна складова. Також майже нульова похибка струму свідчить про полеорієнтування.

З рис. 5.2 і 5.3 видно, що при навантаженні відбувається збільшення струму та моменту двигуна, а також зростає напруга u_q , що встановлює значення струму i_q . Напруга u_d виконує роль керування впливу на зменшення, мета якої полягає в компенсації появи струму i_d , що виникає при навантаженні. При цьому параметр i_d^* залишається незмінним, що також підтверджується графіком його похибки.

Висновок до 5 розділу:

В даному розділі було обґрунтовано вибір принципу керування, описано алгоритм векторного керування та розраховано параметри регуляторів і зворотних зв'язків. Було створено математичну модель векторного керування асинхронного двигуна та промодельовано перехідні процеси, які підтвердили високу якість розробленого електроприводу.

6. ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Дослідження статичних характеристик електродвигуна є ключовим для розуміння його поведінки та забезпечення ефективної роботи. Ці дослідження дозволяють точно проектувати системи, оптимізувати енергоспоживання, розробляти надійніші системи керування та прогнозувати потенційні несправності, що є критично важливим для підвищення продуктивності та надійності будь-якого електромеханічного обладнання. Без глибокого розуміння цих характеристик неможливо досягти максимальної ефективності та безпеки експлуатації.

Механічна характеристика асинхронного двигуна може бути побудована двома основними способами – за формулою Клосса, або з використанням динамічної моделі АД.

Формула Клосса записується у вигляді:

$$M = \frac{2M_k(1+q)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2q} \quad (6.1)$$

де

$$q = \frac{2 \cdot R_1}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} = \frac{2 \cdot 0.3455}{\sqrt{0.3455^2 + (0.58 + 0.94)^2}} = 0.4418 \quad (6.2)$$

$$s = \frac{\omega_{xx} - \omega}{\omega_{xx}} \quad (6.3)$$

Значення критичного моменту M_k та ковзання s_k можуть бути визначені за параметрами двигуна, використовуючи наступні вирази:

$$M_k = \frac{3p_n U_n^2}{2\omega_{0n} \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_k^2} \right)} \quad (6.4)$$

$$s_k = \pm \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}} \quad (6.5)$$

де $x_k = x_1 + x'_2$ – індуктивний опір короткого замикання, знак «+» застосовують для розрахунку значень критичного моменту та ковзання в рушійному режимі, а знак «-» в генераторному.

Рушійний режим:

$$\begin{aligned} M_k &= \frac{3p_n U_n^2}{2\omega_{0n} \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x'_2)^2} \right)} = \\ &= \frac{3 \cdot 2 \cdot 220^2}{2 \cdot 314 \cdot \left(0.3455 + \sqrt{0.3455^2 + (0.58 + 0.94)^2} \right)} = 242.018 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned} \quad (6.6)$$

$$s_k = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}} = \frac{0.2740}{\sqrt{0.3455^2 + (0.58 + 0.94)^2}} = 0.175 \quad (6.7)$$

Генераторний режим:

$$\begin{aligned} M_k &= \frac{3p_n U_n^2}{2\omega_{0n} \left(R_1 - \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x'_2)^2} \right)} = \\ &= \frac{3 \cdot 2 \cdot 220^2}{2 \cdot 314 \cdot \left(0.3455 - \sqrt{0.3455^2 + (0.58 + 0.94)^2} \right)} = -381.14 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned} \quad (6.8)$$

$$s_k = -\frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}} = -\frac{0.274}{\sqrt{0.3455^2 + (0.58 + 0.94)^2}} = -0.1752 \quad (6.9)$$

Для визначення номінального ковзання можна скористатись формулою:

$$s_n = \frac{s_k}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}} = \frac{0.1752}{2.3 + \sqrt{2.3^2 - 1}} = 0.04 \quad (6.10)$$

Критичні точки, а відповідно і природна характеристика також можуть бути розраховані за наближеними формулами. Для цього визначають коефіцієнт розсіювання:

$$\sigma_1 = \frac{L_{1\sigma}}{L_m} = \frac{0.0019}{0.0954} = 0.0196 \quad (6.11)$$

$$\sigma_2 = \frac{L_{2\sigma}}{L_m} = \frac{0.003}{0.0954} = 0.0313 \quad (6.12)$$

$$\sigma' = 1 - \frac{1}{(1 + \sigma_1)(1 + \sigma_2)} = 1 - \frac{1}{(1 + 0.0196)(1 + 0.0313)} = 0.0490 \quad (6.13)$$

Коефіцієнт потужності АД:

$$\cos \varphi = \frac{1 - \sigma'}{1 + \sigma'} = \frac{1 - 0.0490}{1 + 0.0490} = 0.9066 \quad (6.14)$$

Критичне ковзання:

$$s_k = \frac{R_2}{\sigma' \omega_{0n} L_2} = \frac{0.274}{0.0490 \cdot 314 \cdot 0.0984} = 0.181 \quad (6.15)$$

Номінальне ковзання:

$$s_n = s_k \sqrt{\sigma'} = 0.181 \cdot \sqrt{0.0490} = 0.04 \quad (6.16)$$

Перевантажувальна здатність:

$$\lambda = \frac{1 + \sigma'}{2\sqrt{\sigma'}} = \frac{1 + 0.0490}{2\sqrt{0.0490}} = 2.37 \quad (6.17)$$

Критичний момент:

$$M_k = \lambda M_n = 2.37 \cdot 97.44 = 230.95 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (6.18)$$

Для побудови механічної характеристики АД з використанням динамічної моделі, перепишемо систему математичної моделі АД в наступному вигляді [15]:

$$M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} p_n (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}); \quad (6.19)$$

$$\dot{i}_{1a} = -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a}; \quad (6.20)$$

$$\dot{i}_{1b} = -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b}; \quad (6.21)$$

$$\dot{\psi}_{2a} = -\alpha \psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}; \quad (6.22)$$

$$\dot{\psi}_{2b} = -\alpha \psi_{2b} + p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}. \quad (6.23)$$

Момент двигуна є результатом розв'язання системи рівнянь, де незалежною змінною є кутова швидкість ротора. Напруга живлення статора представлена таким виразом:

$$u_a = U_{na} \cos(\omega_{0n} t); \quad (6.24)$$

$$u_b = U_{na} \sin(\omega_{0n} t). \quad (6.25)$$

За допомогою цих рівнянь створюється програма моделювання. На початку, коли модель включається, на неї подається напруга з мережі живлення. У цей момент часу кутова швидкість двигуна має значення нуль, що означає, що він знаходиться у режимі короткого замикання і генерує пусковий момент. Після припинення перехідних процесів, пов'язаних з підключенням електричної системи до джерела живлення, кутову швидкість ротора поступово збільшують до досягнення стабільного значення. Протягом цього процесу робоча точка двигуна рухається по статичній характеристиці, як це відображено у формулі моменту. Побудувавши залежність швидкості ротора від моменту, отримуємо графік його механічної характеристики.

Варто відзначити, що різниця між критичними моментами у рушійному та генераторному режимах визначається значенням параметра q , який враховується у рівнянні механічної характеристики.

Побудуємо графіки перехідних процесів в залежності від кутової швидкості та моменту двигуна.

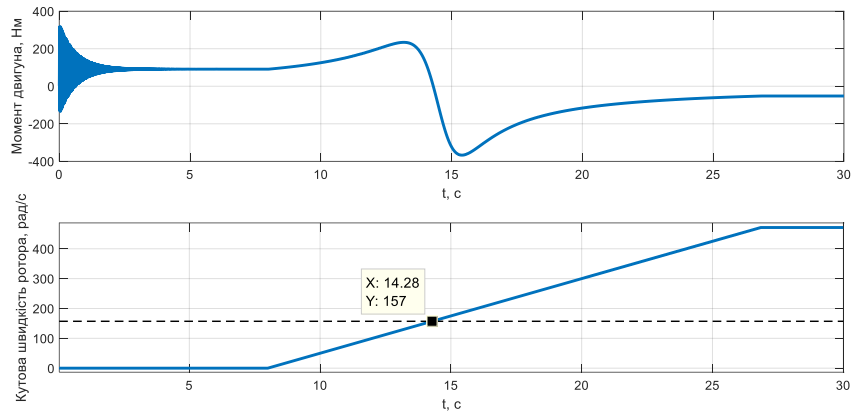


Рисунок 6.1 – Графіки перехідних процесів при побудові механічної характеристики асинхронного двигуна

Побудуємо механічну характеристику асинхронного двигуна 4A180S4Y3 у різних режимах роботи.

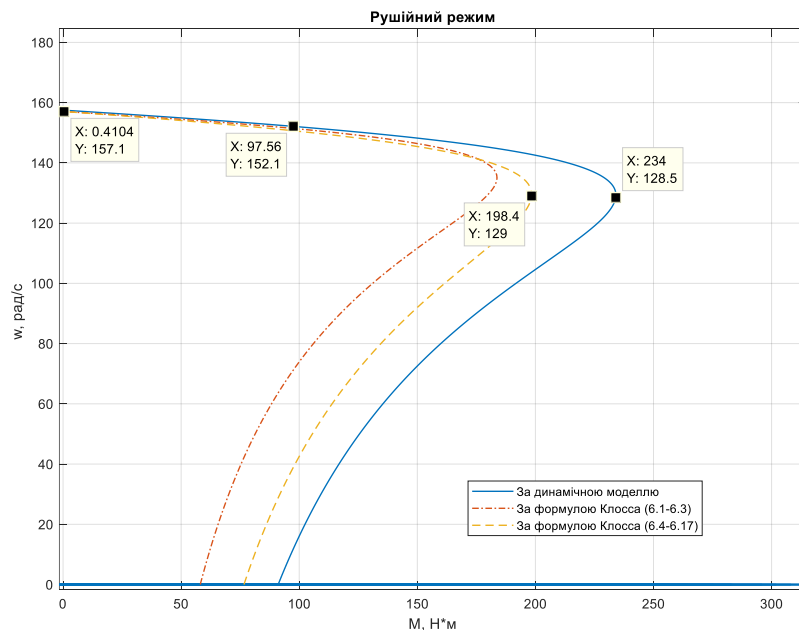


Рисунок 6.2 – Механічні характеристики в рушійному режимі

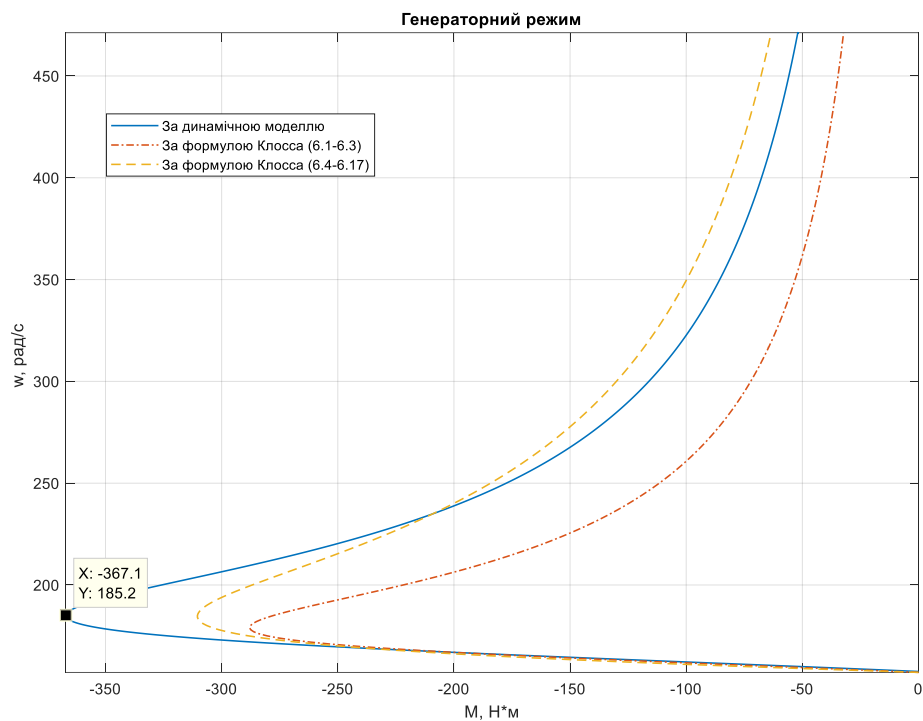


Рисунок 6.3 – Механічні характеристики в генераторному режимі

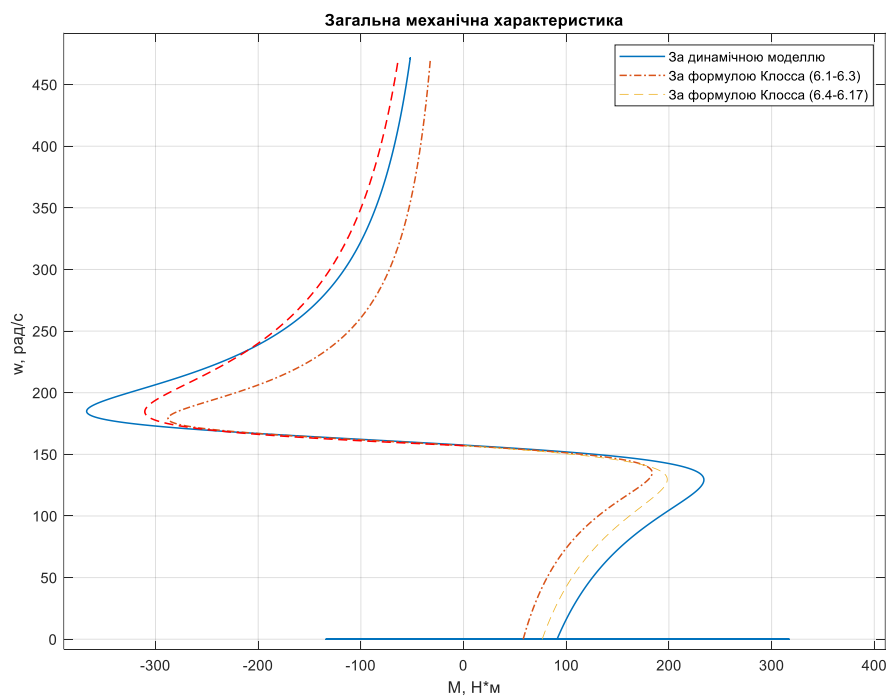


Рисунок 6.4 – Загальна механічна характеристика

Визначимо деякі параметри динамічної моделі, інші в матлаб моделі за допомогою матлаб функцій такі параметри, як I_{na} , $\cos\varphi$, P_m , P_a .

Номінальне ковзання:

$$s_n = \frac{\omega_{xx} - \omega_n}{\omega_{xx}} = \frac{157 - 152.1}{157} = 0.031 \quad (6.26)$$

Критичне ковзання:

$$s_k = \frac{\omega_{xx} - \omega_k}{\omega_{xx}} = \frac{157 - 129}{157} = 0.178 \quad (6.27)$$

Перевантажувальна здатність:

$$\lambda = \frac{M_k}{M_n} = \frac{234}{97.44} = 2.4 \quad (6.28)$$

Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = \frac{P_m}{P_a} = \frac{17920}{19480} = 0.92 \quad (6.29)$$

Перетворення діючого струму в амплітудний:

$$I_n = \frac{I_{na}}{\sqrt{2}} = \frac{41.5}{\sqrt{2}} = 29.35 \text{ A.} \quad (6.3)$$

Порівняльні значення параметрів механічних та енергетичних характеристик зведені в табл. 6.1. В таблиці у дужках вказані похибки визначення показників відносно табличних даних, які прийнято за істинні.

Таблиця 6.1 – Порівняння характеристик

Параметр Метод	s_k , %	s_n , %	λ , в.о.	$\cos\varphi$, в.о.	I_n , А	ККД, %
Табличні значення	0.14	0.02	2.3	0.88	29.35	0.88
Розрахунок за формулами	0.175 (+25%)	0.04 (+100%)	2.37 (+3.04%)	—	—	—

6.1 – 6.3						
Наближений метод 6.4 – 6.18	0.181 (+29.29%)	0.04 (+100%)	2.37 (+3.04%)	0.906 (+2.95%)	–	–
Динамічна модель	0.178 (+27.14%)	0.031 (+55%)	2.4 (+4.35%)	0.92 (+4.55%)	29.35 (0%)	0.92 (+4.55%)

Висновок до розділу:

1. Була розрахована та побудована механічна характеристика двигуна в рушійному та генераторному режимі.
2. Порівняно розрахункові дані з номінальними, найбільшу похибку має номінальне ковзання.

7. СПЕЦЧАСТИНА. КОНТУР СТАБІЛІЗАЦІЇ ПОТУЖНОСТІ

У електроприводах металорізальних верстатів контур стабілізації потужності є важливою частиною системи керування, яка забезпечує підтримку заданої потужності або обмеження її на певному рівні, незважаючи на зміни навантаження, напруги живлення або інших зовнішніх факторів.

Стабілізація потужності потрібна з кількох причин:

- **Захист обладнання:** Надмірні коливання потужності можуть призвести до перевантаження двигуна, інвертора або інших компонентів електроприводу, що може спричинити їх вихід з ладу.
- **Енергоефективність:** Оптимальне використання потужності дозволяє зменшити втрати енергії та підвищити загальну ефективність системи.
- **Стабільність роботи:** У деяких застосуваннях (наприклад, у вітрових турбінах, атомних годинниках, або складних промислових процесах) стабільна вихідна потужність є критично важливою для коректної роботи.
- **Дотримання мережевих вимог:** Для великих електроприводів важливо контролювати споживану або вироблену потужність, щоб відповідати вимогам електромережі і уникнути негативного впливу на неї.

Переваги застосування контурів стабілізації потужності в металообробних центрах:

- **Підвищення точності обробки:** Забезпечення стабільних умов різання запобігає відхиленням у розмірах та формі деталей.
- **Покращення якості поверхні:** Уникнення перевантажень та вібрацій, що виникають при нестабільній потужності, призводить до кращої чистоти обробленої поверхні.
- **Збільшення терміну служби інструменту:** Завдяки стабілізації навантаження на ріжучий інструмент, зменшується його знос, що призводить до рідших замін та економії.

- **Захист обладнання:** Зменшення ризику пошкодження двигунів, шпинделя та інших механічних частин від перевантажень.
- **Підвищення продуктивності:** Забезпечення максимального, але безпечного темпу обробки, особливо при контурній обробці зі змінною шириною та глибиною різання.
- **Зниження енергоспоживання:** Оптимізація робочих режимів сприяє економії електроенергії.
- **Скорочення часу простою:** Зменшення поломок та збоїв призводить до більш стабільної роботи та меншої кількості позапланових зупинок.

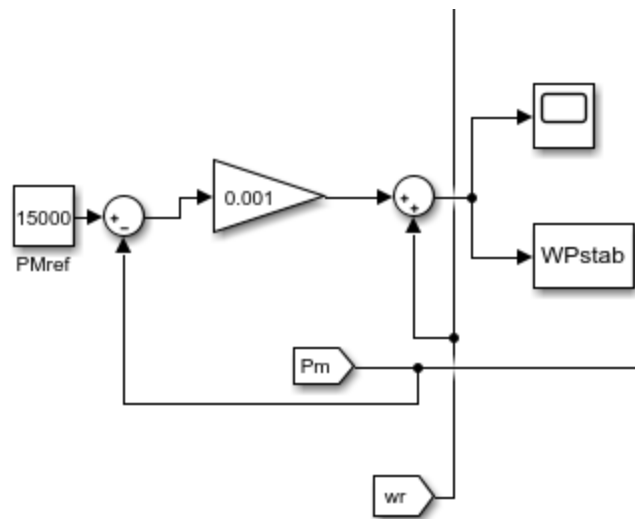


Рисунок 7.1 – Схема зворотнього зв'язку за активною потужністю

У моделі реалізовано зворотний зв'язок за активною потужністю, яка визначається як добуток електромагнітного моменту та кутової швидкості. Це значення порівнюється із заданою опорною потужністю, яка може бути зафіксована як константа. Різниця між реальним і заданим значенням потужності проходить через підсилювач, формуючи сигнал регулювання, що впливає на контур струму керування електроприводом. У результаті, при зміні навантаження, система

автоматично підлаштовує параметри електроприводу так, щоб активна потужність залишалась на потрібному рівні.

Таким чином, реалізований замкнутий контур стабілізації потужності дозволяє зберігати постійний рівень енергоспоживання, що забезпечує рівномірну роботу приводу, зменшує коливання обертів та навантаження, і в цілому підвищує точність та якість обробки.

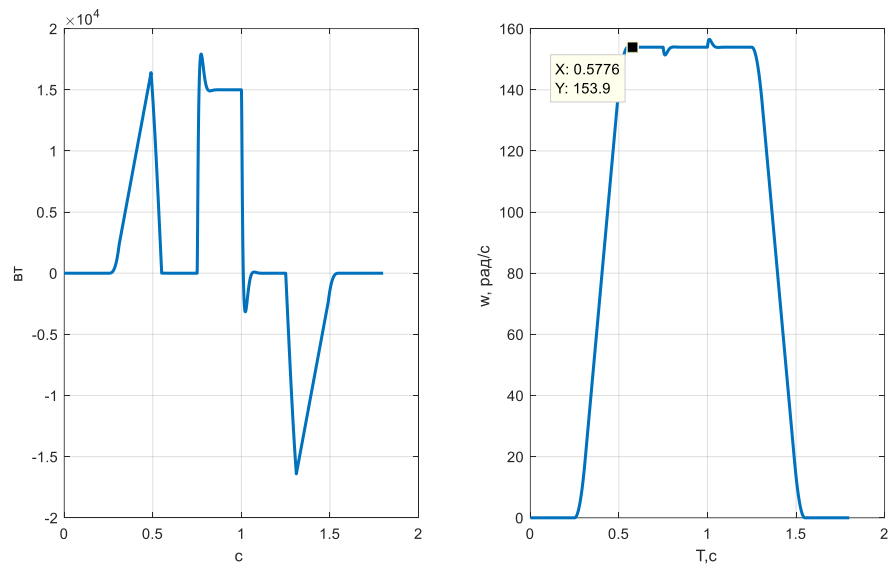


Рисунок 7.2 – Результат моделювання без стабілізації

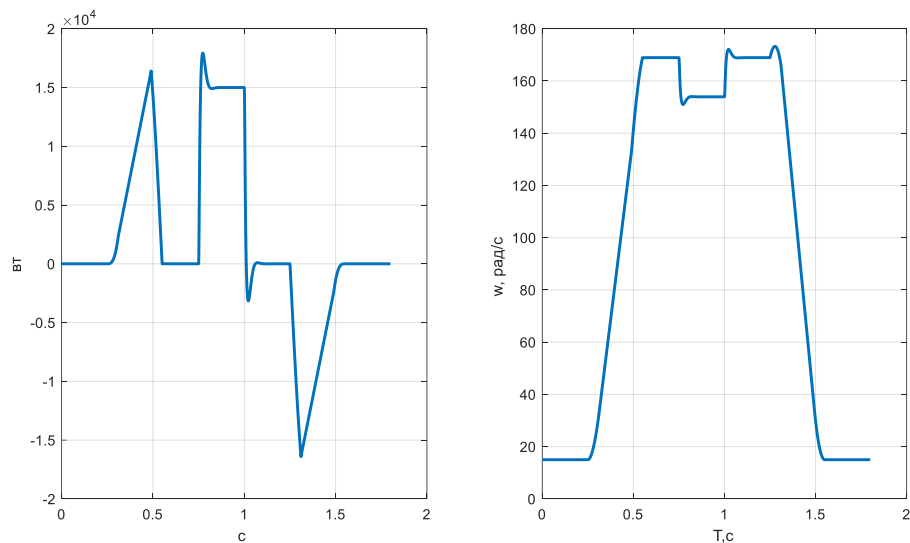


Рисунок 7.3 – Результат моделювання зі стабілізацією потужності

З рисунків 7.2 і 7.3 видно, що було забезпечене збереження стійкості системи при замиканні зворотного зв'язку за активною потужністю. Перевірка стабілізації полягала в спостереженні за реакцією системи на зміну навантаження: при його збільшенні кутова швидкість зменшувалася, при зменшенні - зростала, тоді як активна потужність залишалася сталою. Це підтверджує правильність роботи реалізованого контуру стабілізації потужності.

Висновок до розділу 7:

1. В даному розділі було проведено синтез системи стабілізації активної потужності.
2. Додавання контуру стабілізації потужності дозволяє системі підтримувати активну потужність на сталому рівні, змінюючи кутову швидкість двигуна залежно від навантаження. Це забезпечує енергетичну ефективність та стійку роботу приводу в умовах змінного навантаження, а також підвищує продуктивність верстату.

8. ОПИС СХЕМИ КЕРУВАННЯ ТА СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

Перетворювач частоти є ключовим елементом асинхронного електропривода. Його функція полягає у перетворенні параметрів електричного струму та їх керуванні за допомогою контролера на основі цифрового сигнального процесора.

Функціональна схема асинхронного електроприводу представлена на рис. 8.1 [16].

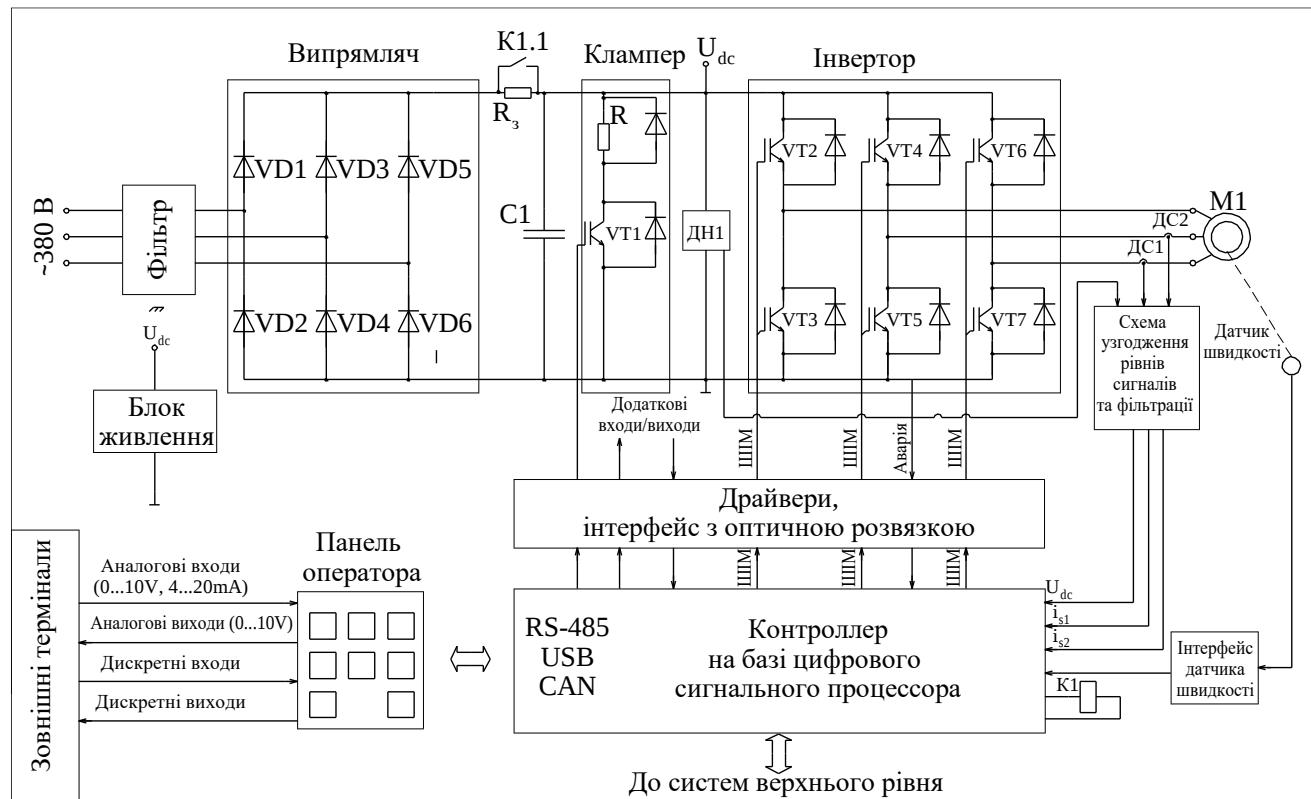


Рисунок 8.1 – Функціональна схема асинхронного електроприводу

На наведеній схемі показано, що перетворювач складається з двох основних частин: силової та керуючої.

Силова частина включає:

- вхідний захисний фільтр;
- випрямляч змінної напруги (діодний міст);
- фільтруючу ланку з конденсатором;
- інвертор — пристрій для формування трифазної напруги із постійної;

- датчики струму, напруги та швидкості;
- драйвери з оптичним гальванічним розв'язуванням;
- клампер (при наявності реверсного режиму);
- блок живлення.

Керуюча частина містить:

- контролер на базі цифрового сигнального процесора;
- схеми узгодження рівнів та фільтрації сигналів від датчиків;
- інтерфейс з енкодером;
- зовнішні цифрові та аналогові входи/виходи;
- панель оператора.

Розглянемо призначення окремих функціональних блоків:

1. **Фільтр** — підключається на вході трифазної мережі для захисту від високочастотних гармонік, що можуть виникати у процесі роботи перетворювача.
2. **Випрямляч** — діодний міст, який перетворює змінну напругу у постійну.
3. **Конденсатор С** — згладжує пульсації після випрямлення.
4. **Резистор R_з і реле К1** — формують ланку заряджання для обмеження пускового струму при включенні живлення. Після зарядки реле замикає контакт і виключає резистор з кола.
5. **Датчик напруги ДН1** — забезпечує зворотний зв'язок, необхідний для формування керуючих імпульсів інвертора.
6. **Інвертор** — складається з силових ключів і формує трифазну змінну напругу заданих параметрів.
7. **Датчики струму ДС1 та ДС2** — контролюють фазні струми у статорі двигуна і передають дані на контролер.
8. **Енкодер** — під'єднаний до вала двигуна і вимірює кутову швидкість, необхідну для побудови алгоритмів керування.
9. **Драйвери** — формують імпульси керування силовими ключами на основі сигналів від контролера.

10. **Оптопари** — забезпечують гальванічну розв'язку між силовою та керуючою частинами.
11. **Контролер** — виконує обчислення алгоритмів керування, збір даних із датчиків та керує роботою інвертора.
12. **Схема узгодження сигналів** — адаптує сигнали з датчиків для коректного сприйняття контролером.
13. **Інтерфейс енкодера** — забезпечує правильну взаємодію між енкодером і контролером.
14. **Блок живлення** — формує необхідні допоміжні напруги (+10 В, +24 В) для живлення датчиків, драйверів та контролера.
15. **Зовнішні термінали** — забезпечують можливість підключення аналогових та цифрових сигналів.
16. **Панель оператора** — інтерфейс для ручного керування приводом з боку користувача.

ВИСНОВКИ

1. У дипломному проєкті було проведено дослідження та модернізацію системи електропривода головного руху металорізального верстата IP-500 шляхом впровадження асинхронного електропривода з векторним керуванням. Такий підхід обумовлений потребою підвищити надійність, енергоефективність та точність обробки, а також замінити морально та фізично застаріле обладнання з двигунами постійного струму на сучасні, технологічно гнучкі системи.

2. В межах проєкту обґрунтовано вибір асинхронного двигуна, здійснено розрахунок його параметрів та побудовано математичну модель системи електропривода. Модель реалізовано у програмному середовищі MATLAB/Simulink, що дало змогу змоделювати як статичні, так і динамічні режими роботи привода. У результаті моделювання були отримані характеристики, що підтверджують працездатність обраної конфігурації електропривода в умовах технологічного навантаження.

3. Одним із ключових нововведень проєкту стало впровадження замкненого контуру стабілізації активної потужності. Даний контур реалізовано шляхом введення додаткового зворотного зв'язку за активною потужністю, яка визначається, як добуток моменту та кутової швидкості. З метою забезпечення стійкої роботи системи, коефіцієнт зворотного зв'язку було підібрано експериментально, починаючи з малих значень (0,001). Результати моделювання показали, що за умов зміни навантаження система автоматично регулює кутову швидкість, забезпечуючи збереження потужності на сталому рівні.

Таким чином, реалізована структура електропривода не лише виконує основні функції керування швидкістю та моментом, а й адаптується до змін технологічного процесу шляхом стабілізації потужності різання. Це дозволяє покращити якість обробки, знизити перевантаження на механічні елементи системи та підвищити загальну ефективність роботи обладнання.

4. Загалом, результати дипломного проєкту підтверджують доцільність і ефективність впровадження асинхронного електропривода з векторним керуванням і контуром стабілізації потужності в структуру металорізального верстата. Запропоноване рішення може бути використане як основа для подальших модернізацій у галузі автоматизованих приводів верстатного обладнання.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Класифікація металорізальних верстатів:
<https://profosvita.online/courses/course-v1:Profosvita+CS-M31+2023/courseware/501a0669984a451980687e866d3c4644/d4f827fc2f9f41da90d26c9007c14d7b/>
2. Спеціалізовані верстати <https://b2b.imperija.com/ua/klassifikatsiya-metallorezhushtih-stankov.html>
3. Токарні автомати <https://techtronic.com.ua/tokarni-avtomati-ta-napivavtomati/>
4. IP-500 <https://studfile.net/preview/9906626/page:14/>
5. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод (Теорія і практика) / М.Г.Попович, В.І. Кострицький та ін. Навч. посібник з грифом МОН України. – К.: КНУТД . 2008. - 408 с.
6. Електромеханічні системи автоматизації в металообробці. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.І. Теряєв. – Електронні текстові дані. - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 337 с.
<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/68901>
7. Каталог електродвигунів:
<https://systemax.ua/ua/elektrodvigateli/trehfaznye-obshepromyshlennye-elektrodvigateli/m2-ie1/m2bax-160mlb-4-ie1-15.html>
8. Каталог перетворювачів:
<https://www.abb.com/global/en/products/3aua0000090437>
9. Каталог автоматичних вимикачів:
<https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/3VL1703-1DD33-0AA0>

10. Асинхронні двигуни серії 4А: Довідник/А 90 А. Е. Кравчик, М. М. Шлаф, В. І. Афонін, О. А. Со-боленська. – М.: Енергоатоміздат, 1982. — 504 с., іл.
11. С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, Є. О. Ніконенко, “Керування електроприводами – навчальний посібник”, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2024. [Електронний ресурс], URL: <http://surl.li/wlmapn>
12. Wikipedia. *Vector Control (Motor)* – [https://en.wikipedia.org/wiki/Vector_control_\(motor\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Vector_control_(motor))
13. Energies Journal, 2024. *Vector Control of an Induction Machine* – <https://www.mdpi.com/journal/energies>
14. ArXiv, 2021. *Energy Efficient Control of Electric Motors* – <https://arxiv.org/abs/2102.12345>
15. Основи Мехатроніки - <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/78d178e5-02eb-4ed2-b0b5-6205dd4b3902/content>
16. Схема перетворювача частоти https://stud.com.ua/84207/tehnika/shema_asinhronnogo_elektroprivodu