

**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)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**Дипломний проєкт**

**на здобуття ступеня бакалавра**

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи автоматизації,

електропривод та електромобільність»

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

на тему: «Автоматизований електропривод поздовжньо-стругального верстата»

Виконав: студент IV курсу, групи ЕП-02

(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Гребінник Олег Дмитрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник ас. Сергієнко Олег В'ячеславович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент асистент Вишневський О.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

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

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2024 р.



**Пояснювальна записка  
до дипломного проєкту**

на тему: Автоматизований електропривод поздовжньо-стругального верстата

---

---

**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)

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)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проєкт студенту**

**Гребінник Олег Дмитрович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту Автоматизований електропривод електропривод подольно-строгального верстата

керівник проєкту ас. Сергієнко О.В.

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

затвержені наказом по університету від « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом проєкту: 10.06.2024

3. Вихідні дані до проєкту: параметри асинхронного двигуна 4A315S6У3.

4. Зміст пояснювальної записки: 1 аналітичний огляд; 2 енергосиловий розрахунок електроприводу подольно-строгального верстата; 3 вибір двигуна та силового обладнання; 4 розробка електричних схем; 5 дослідження системи електроприводу шляхом математичного моделювання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, презентацій тощо): Схема електрична принципова – А1; Схема зовнішніх з'єднань – А1; Результати моделювання – А1.

6. Дата видачі завдання 15.04.2024

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Керівник дипломного  
проекту

\_\_\_\_\_ О.В. Сергієнко  
(підпис) (ініціали, прізвище)

15 квітня 2024 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН – ГРАФІК**  
**виконання дипломного проекту**  
**студентом Гребінником Олегом Дмитровичем**  
**на тему**

«Автоматизований електропривод поздовжньо-стругального верстата»

№	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Обсяг , с.	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1.	Аналітичний огляд літератури за темою дипломного проекту	10	30.04.24	
2.	Формування технічних вимог до автоматизованого електроприводу (АЕП) поздовжньо-стругального верстата	10	5.05.24	
3.	Розрахунок потужності електродвигуна та вибір силового обладнання	10	10.05.24	
4.	Побудова функціональної схеми АЕП головного руху поздовжньо-стругального верстату	5	15.05.24	
5.	Математичний опис об'єкта керування, розроблення структурних схем та синтез регуляторів векторно-керованого асинхронного двигуна поздовжньо-стругального	15	10.05.24	
6.	Складання математичної моделі в MatLab/Simulink, дослідження усталених і перехідних процесів в АЕП поздовжньо-стругального верстату	15	25.05.24	
7.	Підготовка графічної частини*	10	30.05.24	
8.	Оформлення пояснювальної записки. Підготовка презентації дипломного проекту	60-80	12.06.24	

Студент.  
Керівник проекту

\_\_\_\_\_  
(підпис)  
\_\_\_\_\_  
(підпис)

Олег ГРЕБІННИК  
Олег СЕРГІЄНКО

## РЕФЕРАТ

Дана робота присвячена розробці автоматизованого електроприводу для подовжньо-стругального верстата, з особливою увагою до питань охорони праці. У роботі розглянуто основні принципи функціонування та проектування автоматизованих електроприводів, що забезпечують ефективну та безпечну роботу верстатного обладнання.

Проведено аналіз вимог до електроприводів подовжньо-стругальних верстатів, включаючи їх технічні характеристики, точність позиціонування, надійність та енергоспоживання. Описано процес проектування електроприводу з використанням сучасних методів моделювання та симуляції, а також підбір відповідних компонентів.

Особливу увагу приділено питанням охорони праці при роботі з подовжньо-стругальними верстатами. Розглянуто основні ризики та небезпеки, пов'язані з експлуатацією даного обладнання, а також запропоновано заходи щодо їх мінімізації. Описано системи захисту та безпеки, які інтегровані в проект автоматизованого електроприводу, включаючи захисні блокування, аварійне відключення та засоби контролю стану оператора.

Результати досліджень та розробки підтверджують ефективність запропонованого автоматизованого електроприводу у забезпеченні високої продуктивності роботи подовжньо-стругального верстата. Отримані висновки можуть бути використані при модернізації існуючих верстатів та розробці нових моделей промислового обладнання.

**ЕЛЕКТРОПРИВОД, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, СТРУГАЛЬНИЙ  
ВЕРСТАТ, ЗУСИЛЛЯ РІЗАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ.**

					<b>141.ЕП02.005.БР</b>			
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>«Автоматизований електропривод подовжньо-стругального верстата» Реферат</i>	<i>Літ.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Розроб.</i>	<i>Гребінник О.Д.</i>						5	
<i>Перевір.</i>	<i>Сергієнко О.В.</i>					<i>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»</i>		
<i>Реценз.</i>						<i>Каф. АЕМС-ЕП</i>		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затв.</i>								

## ABSTRACT

This work is devoted to the development of an automated electric drive for a longitudinal planer, with special attention to occupational health and safety issues. The paper examines the basic principles of operation and design of automated electric drives that ensure efficient and safe operation of machine tools.

An analysis of the requirements for electric drives of longitudinal planing machines, including their technical characteristics, positioning accuracy, reliability and energy consumption, was carried out. The process of designing an electric drive using modern modeling and simulation methods, as well as the selection of appropriate components, is described.

Special attention is paid to issues of labor protection when working with longitudinal planing machines. The main risks and dangers associated with the operation of this equipment are considered, as well as measures to minimize them are proposed. Describes the protection and safety systems that are integrated into the design of an automated electric drive, including safety interlocks, emergency shutdown, and operator status monitoring.

The results of research and development confirm the effectiveness of the proposed automated electric drive in ensuring high productivity of the longitudinal planing machine. The obtained conclusions can be used in the modernization of existing machines and the development of new models of industrial equipment.

ELECTRIC DRIVE, VECTOR CONTROL, PLANER, CUTTING FORCE, AUTOMATION.

					<b>141.ЕП02.005.БР</b>			
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>Лім.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Hrebinnik O.D</i>			<i>«Automated electric drive of hemming and planing machine »</i>  <i>Abstract</i>		6	
<i>Перевір.</i>		<i>Serhienko O.V.</i>				<i>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»</i>		
<i>Реценз.</i>						<i>Каф. АЕМС-ЕП</i>		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затв.</i>								

## ЗМІСТ

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН – ГРАФІК .....	6
РЕФЕРАТ .....	7
ВСТУП.....	10
1 ВИХІДНІ ДАНІ .....	13
2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ І ВИБІР КЕРОВАНИХ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ .....	28
3 ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ .....	34
4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ .....	39
5 РОЗРОБКА МОДЕЛЮЮЧОЇ ПРОГРАМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ .....	50
5 АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ .....	56
ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	63

## ВСТУП

В сучасному виробничому середовищі автоматизація виготовлення є ключовим фактором для досягнення високої продуктивності, якості і конкурентоспроможності підприємств.

Одним із важливих аспектів цього процесу є впровадження автоматизованих систем управління електроприводами для різноманітних верстатів, зокрема поздовжньо-стругальних верстатів. Це дозволяє значно підвищити швидкість обробки деталей, знизити витрати на енергію та матеріали, а також забезпечити більшу точність та стабільність процесу обробки.

Метою цієї роботи є дослідження можливостей впровадження автоматизованого електроприводу для поздовжньо-стругального верстату. Основні завдання включають вивчення принципів роботи електроприводів, аналіз вимог до системи автоматизації з боку виробництва, проектування та розроблення необхідних елементів управління, а також тестування та оцінку ефективності розробленої системи.

Результати цієї роботи будуть сприяти підвищенню ефективності виробництва на підприємствах, що використовують поздовжні стругальні верстати, а також внести вагому конструктивну та технологічну віддачу в розвиток автоматизованих систем управління в машинобудуванні.

Актуальність проблеми. В сучасних умовах промисловості автоматизація виробничих процесів стає необхідністю для підвищення продуктивності, зниження витрат та підвищення якості виробів. Поздовжні верстати використовуються для обробки довгих деталей, таких як дошки чи балки, і вимагають точного керування та стабільності приводу для забезпечення якісної обробки.

Автоматизація електроприводу таких верстатів дозволить знизити втрати часу на налаштування, підвищити точність обробки та забезпечити більш ефективне використання ресурсів.

Мета роботи полягає в розробці та дослідженні системи автоматичного керування, яка забезпечить підвищену точність, ефективність та надійність процесу обробки матеріалів на верстаті.

Завдання дослідження, які необхідно вирішити:

1. Проаналізувати існуючі технології та рішення з автоматизації верстатів в машинобудуванні;
2. Розробити концептуальну схему електроприводу, враховуючи потужність, швидкість і точність необхідні для оптимальної роботи верстату;
3. Обрати оптимальні електродвигуни, датчики та систему керування для забезпечення найвищої ефективності та надійності роботи верстату;
4. Створити програмне забезпечення для керування верстатом з метою автоматизації різних процесів обробки;
5. Провести моделювання та симуляцію роботи електроприводу для верстату для оцінки його ефективності та визначення можливих вдосконалень;
6. Зібрати прототип автоматизованого електроприводу та провести його тестування на реальному верстаті для перевірки відповідності розробленим технічним характеристикам;
7. Зібрати та проаналізувати результати тестування, зробити висновки про ефективність розробленої системи та підготувати кінцевий звіт з результатами роботи.

Предмет дослідження - розробка автоматизованого електроприводу для подовжньо-стругального верстату, що забезпечує точне регулювання швидкості і руху різального інструменту.

Об'єкт дослідження - електропривід подовжньо-стругального верстату, включаючи електромотори, приводні механізми, системи керування та інтеграцію з іншими компонентами верстату.

Методи дослідження:

- Аналіз вимог до робочих параметрів верстату (швидкість руху, точність регулювання);
- Проектування електричних схем і вибір компонентів для приводу;

- Моделювання та симуляція роботи електроприводу для оцінки його ефективності та надійності;
- Виготовлення прототипу електроприводу та проведення експериментальних випробувань.

Практичне застосування результатів полягає у впровадженні розробленого автоматизованого електроприводу в промисловість для підвищення продуктивності і якості обробки виробів. Зменшенні витрат на експлуатацію та обслуговування верстату за рахунок автоматизованого керування. Підвищенні конкурентоспроможності підприємства на ринку завдяки удосконаленому виробничому процесу.

## 1 ВИХІДНІ ДАНІ

### 1.1.Опис технологічного процесу

Сучасні металорізальні верстати - це високорозвинені машини, які містять багато механізмів і керують рухами і циклами механічно, електронно, гідравлічно, пневматично або іншими способами.

З точки зору дизайну і призначення, важко знайти машину, настільки ж різноманітну, як металорізальні верстати. Вони обробляють всі види деталей, від дрібних компонентів у годинниках і приладах до багатометрових деталей, таких як турбіни, прокатні стани і кораблі.

Верстати обробляють не тільки прості циліндричні поверхні, але й поверхні, що описуються складними математичними формулами або задаються графічно, наприклад, криволінійні кулачки, турбінні лопатки, штампи та гвинтові лопаті.

Результатом є висока точність обробки, яка часто вимірюється в мікрометрах. На верстатах обробляють деталі зі сталі, чавуну, кольорових, спеціальних жароміцних, легких сплавів, твердих сплавів, інших сплавів, пластмас, дерева, кварцу, феромагнітних сплавів та інших матеріалів. Обробка деталей з радіоактивних матеріалів виконується в тих випадках, коли необхідно керувати верстатом з дистанційного пульта і спостерігати за процесом на панелі оператора.

Верстати з програмним управлінням, в тому числі багатоцільові, стають все більш популярними, пропонуючи високу мобільність виробництва, точність і ефективність обробки. Автоматизація все частіше використовується не тільки для підвищення продуктивності процесів обробки, але і для досягнення їх високих якісних показників.

Комп'ютеризоване управління групами верстатів, оптимізація процесів обробки та можливість автоматичного встановлення необхідного режиму обробки у відповідь на зміну умов також є характерними рисами сучасних систем автоматизації верстатів.

При створенні нових верстатів використовуються досягнення верстатобудівної промисловості та науки. Наприклад, на конструкцію верстатів впливає розробка нових типів електродвигунів (високомоментних, лінійних), поява нових датчиків положення (перетворювачів), вдосконалення електрогідравліки та оптики, створення нових методів управління за допомогою спеціальних комп'ютерів.

Мікропроцесорні контролери перетворюють машини в машинні модулі, які поєднують в собі гнучкість, універсальність і високий ступінь автоматизації. Використання машинних модулів можливе лише за умови повної автоматизації всіх допоміжних операцій завдяки широкому застосуванню маніпуляторів і промислових роботів. Це стосується операцій, пов'язаних зі зміною заготовки, ріжучого інструменту, технічних пристроїв, вимірюванням заготовки та інструменту, операціями дроблення та видалення стружки.

Удосконалення сучасних верстатів повинно забезпечувати підвищення швидкості виконання робочих і допоміжних операцій і відповідне збільшення потужності головного робочого приводу.

Першорядне значення має підвищення надійності верстатів за рахунок оснащення верстатів контрольно-вимірювальними пристроями і впровадження систем діагностики. Сучасні верстати використовують широкий спектр вимірювальних пристроїв, іноді дуже точних, таких як лазерні інтерферометри, для збору поточної інформації про стан верстата, інструментів і допоміжного обладнання та отримання достовірних даних про правильну роботу.

Сучасні металорізальні верстати є надзвичайно точними з точки зору оброблюваних деталей. Критичні поверхні найважливіших деталей машин і обладнання обробляються з точністю до декількох мікрометрів, в той час як шорсткість поверхні при алмазному шліфуванні ніколи не перевищує декількох сотих часток мікрометра. Постійно зростаючі вимоги до точності ставлять перед інженерами-конструкторами нові виклики.

Стругальні верстати призначені для обробки різцями площин і фасонних лінійчастих поверхонь. Вони поділяються на поперечно-стругальні, поздовжньо-

стругальні та довбальні. Перші застосовують під час виготовлення дрібних і середніх за розмірами деталей, другі - порівняно великих або для одночасного стругання кількох деталей середнього розміру. Довбальні верстати використовують для обробки шпонкових пазів, канавок фасонних поверхонь невеликої довжини. Верстати мають робочий хід, під час якого відбувається різання, і зворотний хід, коли інструмент повертається у вихідне положення.

Розмірною характеристикою поздовжньо-стругальних верстатів є найбільші розміри оброблюваних деталей (ширина, довжина, висота).

У поздовжньо-стругальних верстатів рухомою частиною є стіл із закріпленою на ньому заготівлею. Залежно від влаштування поперечені, розрізняють одностійкові і двостійкові верстати. Перші застосовують для обробки великих деталей, ширина яких виходить за межі відстані між колонами верстатів двостійкового виконання.

На рис. 1.1 показано поздовжньо-стругальний верстат 7212. На ньому можна стругати деталі з найбільшими розмірами 1250×4000×1120 мм. На напрямних 1 станини 2 розміщений стіл 3, на якому закріплюються оброблювані деталі. Він отримує зворотно-поступальний рух.

На двох порталі (стійках) 4 і 5 встановлена траверса, що несе два вертикальних супорта 8. У напрямних правого порталу може мати вертикальні переміщення бічний супорт. У коробці 10 розташований привід головного руху, в коробках 7 і 9 - приводи вертикальних і бічних супортів.

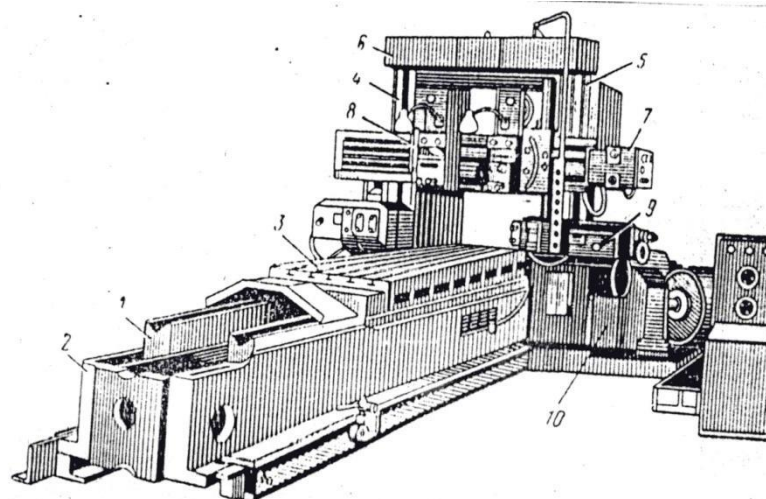


Рис. 1.1. Поздовжньо-стругальний верстат

Головний рух здійснюється від регульованого електродвигуна змінного струму.

Робочий хід передається через двоступеневу коробку швидкостей на передачу черв'яка - рейка за таким циклом: повільне переміщення столу під час врізання різця в заготівлю, розгін столу до робочої швидкості перед виходом різця із заготівлі, повернення столу в початкове положення. Для зміни швидкостей є спеціальний механізм, змонтований на коробці швидкостей. Реверсування здійснюється електродвигуном.

Рух подачі здійснюється реверсивним електродвигуном, від якого обертання передається черв'ячною парою на вал коробки подач.

На цьому валу на шпонці змонтований диск, на якому встановлений фрикціон, пов'язаний пальцем з диском, що несе собачку храпового механізму. Собачка обертає храпове колесо і пов'язане з ним колесо. Від нього обертання передається на роздавальний вал і далі через зубчасті колеса на колеса, пов'язані з напівмуфтами.

Верхній і нижній вали служать для горизонтального переміщення супортів, а середні вали для вертикального переміщення.

Періодична подача супортів здійснюється таким чином. У момент реверсування столу зі зворотного ходу на робочий подається команда електродвигуна. Обертання його відбувається доти, доки розтискна планка фрикціону не упреться в нерухомий упор і не розіжме фрикціон.

При натисканні кулачка наконечник реверсу столу на початку робочого ходу електродвигун відключається. Механізм подачі бічного супорта влаштований аналогічним чином. Установка подачі здійснюється храповим колесом. При його обертанні приводиться в рух рухомий упор. При цьому змінюється кут між рухомим і не рухомим упорами, тим самим величина подачі.

Установчі переміщення запозичують рух від електродвигуна, який обертається в напрямку робочої подачі. Одночасно вмикається електромагніт, який зчіплює черв'ячне колесо з храповим колесом за допомогою кулачкової

муфти. Далі рух слідує за попереднім. Кнопка настановного переміщення розташована на підвісній станції, на якій розташовуються й інші кнопки управління. Крім кнопок управління, на верстаті є засоби ручного управління і налагоджувального переміщення супортів.

Металорізальні верстати є вельми поширеною, численною групою машин і знарядь, призначених для механічного оброблення виробів із металу за допомогою одного або декількох інструментів. Поздовжньо-стругальні верстати застосовуються в основному для обробки різцями плоских горизонтальних і вертикальних поверхонь у великих деталях великої довжини. На верстатах можна робити прорізання поздовжньо-прямокутних канавок різного профілю, Т-подібних пазів і безліч інших операцій.

Головний рух - це переміщення столу, завдяки якому інструмент виконує різання металу і рух подачі, що зумовлює переміщення інструменту для зняття нового шару металу.

Основними величинами, що характеризують розміри і технологічні можливості різних поздовжньо-стругальних верстатів, є: довжина стругання, хід столу (1,5 - 12 м), ширина обробки (0,7 - 4 м), найбільше тягове зусилля (30 - 150 кН).

Процес обробки виробу на поздовжньо-стругальному верстаті складається з циклів, що послідовно повторюються. Кожен із них містить прямий, тобто робочий хід, і зворотний, коли стіл повертається у вихідне положення і здійснюється подача різців під час реверсу столу зі зворотного ходу на прямий. Нормативна швидкість прямого ходу, швидкість різання визначається твердістю оброблюваного матеріалу, властивостями ріжучого інструменту і видом обробки (чорнове, чистове).

Оскільки під час стругання різець зазнає ударного навантаження, то значення максимальних швидкостей стругання не перевищують 75-120 м/хв. При цьому швидкість входження різця в метал, порівняно зі швидкістю різання, обмежується до 40 % і менше, залежно від оброблюваного матеріалу, щоб уникнути крихти.

Зазначені обставини обмежують продуктивність і для її підвищення необхідно скоротити непродуктивний час руху. Зворотний хід здійснюється на підвищеній швидкості, а пуско-гальмівні режими при реверсі приймають допустимо мінімальної тривалості. Привід має бути керованим за швидкістю, оскільки для різних матеріалів використовуються різні оптимальні та максимально допустимі швидкості стругання; крім того, рух характеризується різними швидкостями на різних інтервалах часу робочого циклу, високою частотою реверсування з великим пуско-гальмівним моментом.

Вимоги до електроприводу:

1. забезпечення роботи механізму за таким циклом:

- підхід деталі до різця зі зниженою швидкістю;
- врізання на зниженій швидкості;
- розгін до робочої швидкості прямого ходу;
- різання на швидкості прямого ходу;
- уповільнення до зниженої швидкості перед виходом різця;
- вихід різця з деталі;
- уповільнення до зупинки;
- розгін у зворотному напрямку до робочої швидкості зворотного ходу;
- повернення столу на холостому ходу зі швидкістю зворотного ходу;
- уповільнення до зупинки (стіл повертається у вихідне положення).

Знижену швидкість прийняти 40 % від швидкості прямого ходу.

1.2.Огляд систем електроприводу, що застосовуються у промислових установках даного виду

Огляд систем електроприводу, що застосовуються у промислових установках для електроприводу поздовжньо-стругальних верстатів, включає різноманітні технології і компоненти, спрямовані на забезпечення точності, ефективності і надійності в роботі. Ось ключові аспекти цих систем:

Електроприводи:

- Індукційні двигуни: Найбільш поширений тип електродвигунів у промисловості. Вони надійні та мають добрі характеристики керування швидкістю;

- Синхронні двигуни: Застосовуються там, де необхідне високе покращення керування швидкістю і точності позиціонування.

Керування:

- Частотні преобразувачі (інвертори): Використовуються для регулювання швидкості і частоти обертання двигуна, що дозволяє підтримувати необхідні режими роботи верстату.

- Позиціонери: Використовуються для точного позиціонування верстату на основі зовнішніх сигналів (наприклад, енкодери для замкнення контуру позиціонування).

Механічні трансмісії:

- Шестерні, редуктори: Забезпечують передачу потужності від електродвигуна до робочого інструменту верстату з необхідним співвідношенням обертів і моменту.

Контроль і захист:

- Системи автоматичного керування: Включають ПЛК (програмовані логічні контролери) та САПР (системи автоматизованого проектування) для керування процесами роботи верстату.

- Захисні пристрої: Вбудовані системи захисту для електродвигунів і електроніки від перевантажень, коротких замикань і інших аварійних ситуацій.

Інноваційні технології:

- Енергоефективність: Використання технологій зменшення споживання енергії та підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД).

- Інтернет речей (IoT): Застосування IoT для моніторингу і управління роботою верстату в реальному часі.

Підсумовуючи, системи електроприводу для стругальних верстатів поєднують в собі передові технології з метою покращення продуктивності, якості і енергоефективності в промислових умовах виробництва.

### 1.3. Обґрунтування вибору раціональної системи електроприводу

Підвищення технічного рівня металорізальних верстатів пов'язане з поліпшенням характеристик і збільшенням можливостей електроприводу.

Переваги електропривода нині не викликають жодних сумнівів порівняно з іншими видами приводів. У невеликі відрізки часу змінюються структура, технічна база створення електроприводів. [7]

Функція електроприводів - приведення в рух виконавчих органів робочих машин і механізмів та управління цим рухом.

Електропривод містить у собі сукупність пов'язаних електротехнічних, електромеханічних і механічних елементів. Основний елемент будь-якого електроприводу - електричний двигун. Він виділяє механічну енергію шляхом споживання електричної енергії.

З цього випливає, що електричний двигун є електромеханічним перетворювачем енергії. Існують режими, в яких електродвигун виконує і зворотне перетворення енергії та отримує механічну енергію за рахунок виконавчого елемента машини.

Механічна енергія подається на виконавчий орган, який за рахунок цього здійснює потрібний механічний рух. Функцією передавального пристрою є узгодження параметрів руху виконавчого органу та електричного двигуна [8].

В електропривод електрична енергія надходить від джерела електричної енергії. Щоб отримати електроенергію з необхідними параметрами і управління потоком цієї енергії електродвигуна включається силовий перетворювач.

Блок управління в електричному приводі виконує функції автоматизації та управління. Він виробляє сигнал керування за допомогою вхідного сигналу і декількох додаткових сигналів ЕРС, які дають інформацію про реалізацію технологічного процесу машини, роботу окремих частин електроприводу, про аварійні ситуації, рух виконавчих органів тощо. Перетворювач і блок керування разом утворюють систему електроприводів [9].

За видом електричного силового перетворювача розрізняють різноманітні електроприводи. Якщо як характерну ознаку застосувати спосіб перетворення напруги джерела електричної енергії, то виокремлюють чотири типи силових перетворювачів, керовані та некеровані випрямлячі, що перетворюють напругу змінного струму на напругу постійного струму.

За кількістю використовуваних двигунів електроприводи діляться на:

а)Групові - електроприводи, що характеризуються тим, що один із його двигунів приводить у рух кілька виконавчих органів однієї машини або один виконавчий орган декількох машин.

б)Взаємопов'язані - електропривод, що являє собою два або кілька пов'язаних між собою індивідуальних електроприводів, які працюють разом на один або кілька виконавчих органів.

в)Індивідуальні - такі електроприводи, які забезпечують рух одного виконавчого органу робочої машини.[10].

За характером руху поділяють електроприводи обертального і поступального руху. Швидкість їх може бути як нерегульованою, так і регульованою, а рух - дискретним або безперервним, односпрямованим, вібраційним або двоспрямованим.

Усі електричні приводи поділяють на автоматизовані та неавтоматизовані.

Неавтоматизованими електроприводами керує людина. Вона здійснює запуск приводу і його зупинку, змінює швидкість і реверсування залежно від заданого циклу.

Електропривод забезпечується необхідними властивостями захисту, сигналізації та блокування.

Своєю чергою в автоматизованому електроприводі операції керування здійснюються системою керування. Оператор у цьому разі вмикає і вимикає електропривод, контролює його роботу, за необхідності займається налагодженням.

З цього можна зробити висновок, що автоматизований електропривод є ефективнішим і економічно вигіднішим, сильно полегшує роботу людині, також підвищує продуктивність робочих машин і якість виконаних операцій.

Автоматизовані електроприводи поділяються на замкнуті та розімкнуті. У розімкнутому електроприводі всі зовнішні збурення впливають на вихідну координату, тобто такий електропривод не захищений від зовнішніх збурень і не забезпечує високу якість зміни координат. Розімкнуті електроприводи застосовують для забезпечення пуску, гальмування або реверсу двигунів.

Замкнутий електричний привід реалізується за принципом компенсації зовнішнього збурення, або за принципом відхилення. Основна ознака такого електроприводу - усунення впливу зовнішнього збурення на регульовану координату, тому замкнуті електроприводи забезпечують вищу якість керування рухом виконавчих органів.

У замкнутих електроприводах використовують усі види зворотних зв'язків: лінійні та нелінійні, позитивні та негативні, гнучкі та жорсткі, за видом регульованої координати. У таких приводах можна застосовувати кілька зворотних зв'язків за кількістю регульованих координат.

Під час вибору типу електропривода насамперед враховується умова роботи виробничого механізму. Висока продуктивність і якість продукції, що випускається, можуть бути забезпечені лише за умови правильного врахування статичних і динамічних характеристик приводу і робочої машини.

Кінематика, і навіть конструкція робочої машини значною мірою визначаються типом застосовуваного ЕП, і, навпаки, залежно від конструктивних особливостей виконавчого механізму привід зазнає значних змін.

Під час вибору типу ЕП мають бути враховані: характер статичного моменту, необхідні межі регулювання швидкості, плавність регулювання, необхідні механічні характеристики, умови пуску і гальмування, кількість вмикань на годину, якість навколишнього середовища тощо.

Спочатку вирішується питання про вибір регульованого або нерегульованого типу ЕП.

В останньому випадку завдання значно спрощується. Усе зводиться до вибору двигуна змінного струму (асинхронні двигуни). У випадку з регулюванням за швидкістю вирішується питання про вибір роду струму приводу.

Застосування постійного струму може бути виправдане лише в тих випадках, коли привід має забезпечувати підвищені вимоги до плавності регулювання швидкості.

Приводи постійного струму використовують у механізмах, що працюють у повторно-короткочасному режимі: крани, підймальні механізми, допоміжні механізми металургійної промисловості (шлепери, рольганги, натискні пристрої).

У разі приводів повторно-короткочасного режиму тип двигуна визначається з умов отримання мінімальної діяльності перехідного процесу, мінімальних динамічних моментів. Із цією метою або використовують спеціальні двигуни з мінімальним моментом інерції, або переходять до дводвигунового приводу (сумарний момент інерції двох двигунів тієї самої потужності, що й однодвигуновий привід, менший на 20-40 %).

Для електроприводу поздовжньо-стругального верстата можливе використання таких ЕП:

- "ТПЧ - АД" (тиристорний або транзисторний перетворювач частоти - асинхронний двигун);
- "Г - Д" (генератор - двигун);
- "ТП - Д" (тиристорний перетворювач - двигун).

Система "ТПЧ - АД" у принципі дає змогу отримати характеристики, аналогічні "ТП - Д", але вартість частотного перетворювача набагато вища за керований випрямляч.

До недоліків системи "Г - Д" відносять:

- необхідність у дворазовому перетворенні енергії, що призводить до значного зниження ККД;
- наявність двох машин у перетворювальному агрегаті;

- значні габарити установки;
- високі експлуатаційні витрати.

Для електроприводу головного руху поздовжньо-стругального верстата приймаємо систему "ПЧ - АД".

#### 1.4.Формулювання вимог до електроприводу та системи керування технологічним об'єктом

Стругальна операція ефективно застосовується для зняття припуску і надання металевим заготовкам необхідної форми, заданої гладкості і точності поверхонь. Суть процесу полягає в знятті стружки різної товщини з поверхні металевої заготовки спеціальними різцями. Обробці підлягають площини різного розташування (вертикальні, горизонтальні, паралельні, перпендикулярні, похилі), а також криволінійні поверхні складних геометричних форм, фасонні поверхні.

Стругальна операція виконується на верстатах стругальної групи, які класифікуються відповідно до технологічних особливостей, характеру роботи і компонування.

Площини великогабаритних заготовок обробляються на поздовжньо-стругальних верстатах. Технологічні особливості верстатів дають змогу виконувати поздовжньо-стругальну операцію на заготовках вагою до 200 т, найбільша ширина поверхонь - до 5 м, довжина поверхні заготовки може досягати 12-15 м.

Заготівля закріплюється нерухомо на столі, а гідравлічна або механічна передача приводить стіл у зворотно-поступальний рух. Різець, що обробляє площину зняттям стружки, залишається нерухомим під час робочого ходу, а під час зворотного ходу різець відводиться. Після повернення столу відбувається подача різця (вертикальна, горизонтальна тощо). Для збільшення продуктивності застосовують різці з двома ріжучими крайками.

За якістю і точністю одержуваної поверхні, а також економічністю процесу поздовжньо-стругальна обробка випереджає фрезерування. Причому поздовжньо-стругальна операція застосовна для деяких завдань, які фрезеруванням виконати неможливо або не вигідно. Особливо економічним виявляється виконання одиничних або невеликих партій виробів, оскільки переналагодження верстата і встановлення заготовки не вимагає багато часу і сил.

Поздовжньо-стругальні верстати застосовуються на заводах середнього і важкого машинобудування в умовах індивідуального і дрібносерійного виробництва, а також у ремонтних цехах.

Заготовку, що підлягає обробці, закріплюють на столі верстата, що здійснює зворотно-поступальний рух. Стружка знімається нерухомим різцем (або різцями) тільки під час робочого ходу столу - хід уперед. Подача різця відбувається на кожен подвійний хід столу. На поздовжньо-стругальних верстатах можна обробляти великогабаритні деталі, найбільша довжина стругання становить 2-12,5 м, найбільша ширина - 0,6-5 мм; висота підйому поперечини (траверси) - 0,7-4,5 м.

Основними вузлами поздовжньо-стругального верстата є: станина, стіл, траверса (поперечина), вертикальні супорти, портал, коробка подач вертикальних і бічного супортів, бічна стійка.

Залежно від пристрою траверси розрізняють двостійкові верстати, у яких траверса підтримується двома стійками, і одностійкові.

Одностійкові поздовжньо-стругальні верстати застосовують для обробки заготовок великих деталей.

Станина двостійкового поздовжньо-стругального верстата являє собою чавунне виливок коробчастого перерізу з двома, а у важких верстатів - з трьома поздовжніми напрямними плоского і V-подібного профілю. Верстати з великою довжиною стругання мають станину, складену із секцій, що скріплюються під час монтажу болтами.

Портал верстата складається з двох стійок, прикріплених внизу до площин станини, а зверху пов'язаних балкою. По напрямних стійок можуть переміщатися поперечина і каретка бічного супорта. У стійці знаходиться вантаж, що врівноважує бічний супорт. Механізм підйому поперечки змонтований у стійках і сполучній балці.

Поперечина являє собою чавунну балку коробчатого перерізу, посилену посередині виступом і ребрами. На поперечині розташовані два вертикальні супорти, коробка подач супортів, коробка дубльованого управління і механізм затиску.

Вітчизняні верстатобудівні заводи нині випускають багато сучасних одностійкових і двостійкових поздовжньо-стругальних верстатів, що дають змогу обробляти з різних матеріалів деталі завширшки до 5000 мм, заввишки до 3900 мм і завдовжки до 15 000 мм.

Сучасні поздовжньо-стругальні верстати оснащуються не тільки стругальними супортами, а й шліфувальними та фрезерними головками.

Поздовжньо-стругальні верстати зі шліфувальними головками дають змогу виконувати стругання і шліфування заготовок деталей з однієї установки і, отже, отримувати на верстаті остаточно оброблені поверхні високої чистоти і точності.

Поздовжньо-стругальні верстати з фрезерними і з фрезерно-розточувальними головками призначаються для стругання, фрезерування і розточування великогабаритних заготовок. Фрезерні головки можуть бути змонтовані як на поперечині, так і на стійці верстата.

Ямні поздовжньо-стругальні верстати застосовують для стругання верхніх горизонтальних і похилих площин заготовок високих деталей (наприклад, станин прокатних станів).

Верстати звичайної збірки призначені для експлуатації в умовах помірного клімату в закритих приміщеннях, в умовах механічних цехів машинобудівних підприємств за температури навколишнього повітря від 10 °С до 35 °С і відносної вологості до 80% за температури 25 °С, що відповідає виду кліматичного виконання УХЛ4, категорія розміщення 4 за ГОСТ 15150-69.

Підвищення ефективності виробничих процесів у сучасній промисловості неможливе без застосування автоматизованих технологічних систем, які забезпечують точність, швидкість та надійність обробки матеріалів. Одним з ключових елементів таких систем є електропривід і система керування стругальним верстатом.

Електропривід повинен забезпечувати достатню потужність для виконання стругальних операцій з необхідною швидкістю та точністю. Динамічні характеристики мають забезпечувати швидку реакцію на зміни в режимі роботи верстату.

Електропривід повинен бути стійким до інтенсивного використання та забезпечувати довгий термін служби без значних витрат на обслуговування та ремонт. Вимоги до електроприводу також включають енергоефективність, що дозволяє зменшити споживання електроенергії і витрати на експлуатацію.

Система керування повинна забезпечувати точне позиціонування верстату під час роботи, що необхідно для досягнення високої якості обробки деталей.

Система керування має підтримувати можливість автоматизації робочих процесів та інтеграції з іншими системами виробництва. Вимоги до системи керування також включають надійність роботи та забезпечення безпеки оператора під час експлуатації верстату.

Результати дослідження і розробки автоматизованого електроприводу та системи керування стругального верстату будуть знайти широке застосування в промисловості, зокрема в металообробці та виробництві машинобудівних виробів.

Впровадження цих технологій дозволить підвищити продуктивність та якість виробництва, знизити витрати на енергію і обслуговування, а також забезпечити високу точність і стабільність процесу обробки.

## 2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ І ВИБІР КЕРОВАНИХ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Для забезпечення високої продуктивності під час роботи з різцями з твердих сплавів зворотно-поступальний рух столу здійснюється за таким автоматичним циклом:

- повільне врізання різця в оброблюваний виріб;
- розгін різця в металі до встановленої швидкості різання;
- різання зі встановленою швидкістю робочого ходу;
- уповільнення швидкості руху столу перед виходом різця з металу;
- швидке повернення столу зі встановленою швидкістю зворотного ходу;
- подача супорта з різцем.

Керування циклом руху столу здійснюється спеціальним механізмом (пультом керування). Цей механізм забезпечує ввімкнення уповільнення залежно від величини встановленої швидкості руху столу, зберігаючи тим самим сталість і мінімальну величину вибігів столу під час реверсів на всьому діапазоні швидкостей.

Оскільки стіл здійснює зворотно-поступальний рух, то керуючою координатою для регулювання є швидкість руху столу.

### 2.1 Аналіз кінематичної схеми, визначення параметрів і проектування розрахункової схеми механічної частини електроприводу

Для передачі поступального руху столу від електродвигуна на поздовжньо-стругальному верстаті використовується редуктор, ведуча шестерня і рейка, закріплена на столі. Причому як двигун використовується асинхронний двигун із короткозамкненим ротором без механічного регулювання частоти обертання.

Для визначення параметрів кінематичної схеми та вибору потужності електродвигуна механічну частину представимо в узагальненому вигляді, що представлений на рис. 2.1.

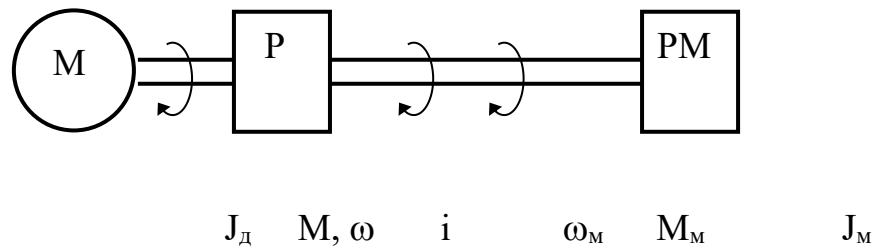


Рис.2.1 Кінематична схема електроприводу.

М - асинхронний двигун із моментом інерції  $J_d$  , електромагнітним моментом  $M$  і кутовою швидкістю обертання вала  $\omega$ ;

Р - редуктор із передавальним числом  $i$ ;

РМ - робочий механізм із моментом інерції  $J_m$  , статичним моментом навантаження  $M_m$  і кутовою швидкістю обертання  $\omega_m$

Лінійна швидкість столу може змінюватися в межах від 6 до 85 м/хв, для врізання і виходу з металу швидкість становить 0,4  $V_{пр}$  , таким чином діапазон зміни лінійної швидкості переміщення столу становить 2,4-85 м/хв.

Визначимо діапазон зміни швидкості за формулою:

$$D_v = \frac{v_{\max}}{v_{\min}}; \quad (2.1)$$

$$D_v = \frac{85}{2,4} \approx 35.$$

Для попереднього вибору двигуна побудуємо навантажувальну діаграму механізму (графік статичних навантажень механізму) Розрахунок часу ділянок циклу на етапі попереднього вибору двигуна виконуємо приблизно, тому що поки що не можна визначити час розгонів і уповільнень.

Знижена швидкість входу різця в метал (приймається):

$$V_{\text{пони}} = 0,4 \cdot V_{\text{пр}}, \quad (2.2)$$

де  $V_{пр}$  - швидкість робочого ходу (за максимального навантаження  $V_{пр\max} = 0,35$  м/с, або 21 м/хв).

За максимального зусилля різання і відповідної їй швидкості різання знижена швидкість дорівнюватиме:

$$V_{vii} = 0,4 \cdot 0,35 = 0,14 \text{ (і / і є і)}$$

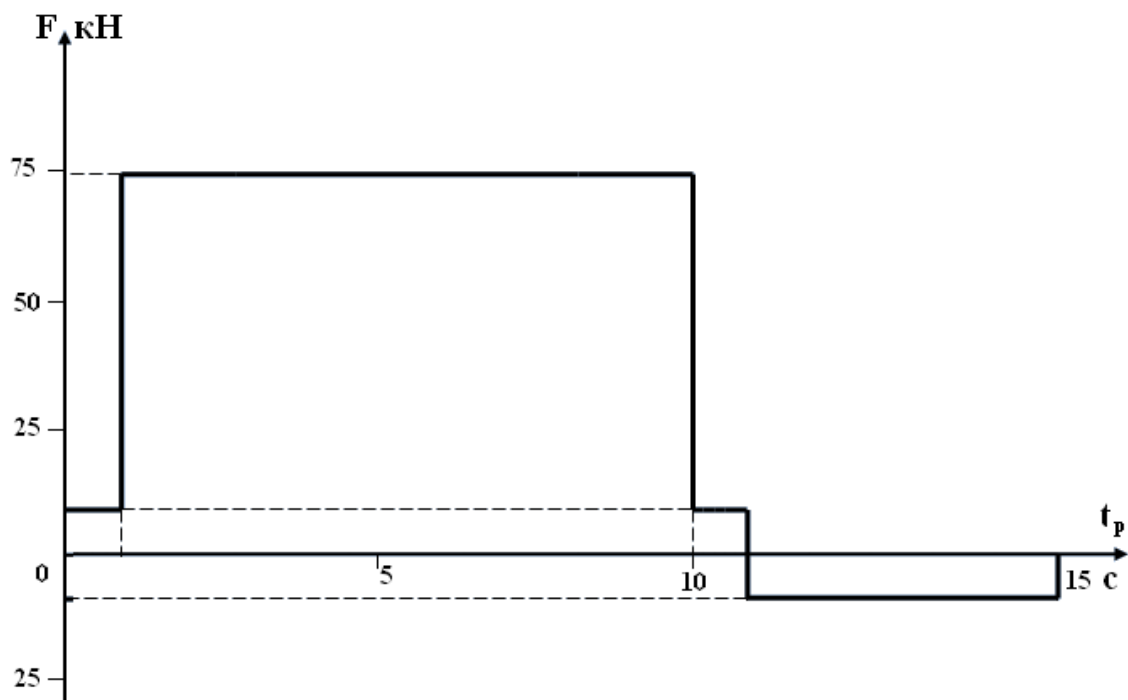


Рис 2.2 Навантажувальна діаграма механізму

Визначимо передавальне число редуктора за формулою:

$$i_p = \frac{\omega_i \cdot r_\phi}{V_{i\dot{a}d}} ; \quad (2.3)$$

де  $r_{ш}$  - радіус шестерні ( $r_{ш}=0,203$  мм);

$\omega_n$  - номінальна частота обертання двигуна (прийmemo, що частота обертання двигуна 1000 об/хв);

$V_{зв}$  - швидкість зворотного ходу столу.

$$\omega_i = n_i \cdot \frac{\pi}{30}; \quad (2.11)$$

$$\omega_i = 1000 \cdot \frac{\pi}{30} = 104,7 \text{ рад/с.}$$

$$i_p = \frac{104,7}{1,42} \cdot 0,203 = 15.$$

Розрахунок моменту інерції:

$$J_{\delta i} = (m_c + m_a) \cdot \rho^2; \quad (1.12)$$

Радіус знаходимо за формулою:

$$\rho = \frac{r_\phi}{i_\delta}; \quad (1.13)$$

$$\rho = \frac{0,203}{15} = 0,0135 \text{ м/рад.}$$

$$J_{\delta i} = (3260 + 4500) \cdot 0,0135^2 = 1,42 \text{ кг*м}^2.$$

#### 1.4 Розрахунок і побудова механічної характеристики механізму.

Механічною характеристикою механізму називається залежність кутової швидкості від моменту

Механічна характеристика розкриває властивості механізму, тобто показує, який виникає момент у механізмі, якщо його приводити в рух із тією чи іншою швидкістю.

Для початку побудуємо навантажувальну характеристику механізму ( $F_z = f(V)$ ). Цю характеристику надано в паспорті на поздовжньо-стругальний верстат.

При поступальному головному русі корисний момент на валу двигуна визначається зусиллям різання і радіусом приведення зусилля до валу двигуна:

$$\dot{I}_{i\ddot{e}} = F_z \cdot \rho; \quad (2.14)$$

де  $\rho$  - радіус приведення.

Момент статичного опору на валу двигуна визначається корисним моментом з урахуванням втрат на тертя в передачах:

$$\dot{I}_{\bar{n}} = \frac{\dot{I}_{i\bar{i}\bar{e}}}{\eta}; \quad (2.15)$$

Отримаємо:

$$\dot{I}_{\bar{n}} = \frac{F_z \cdot \rho}{\eta}; \quad (2.16)$$

Отримаємо:

$$\dot{I}_{\bar{n}1} = \frac{70000 \cdot 0.0135}{0,92} = 1027 \text{ Í} \cdot \dot{i};$$

$$\dot{I}_{\bar{n}2} = \frac{63900 \cdot 0.0135}{0,92} = 937,7 \text{ Í} \cdot \dot{i};$$

$$\dot{I}_{\bar{n}3} = \frac{49500 \cdot 0.0135}{0,92} = 726,4 \text{ Í} \cdot \dot{i};$$

$$\dot{I}_{\bar{n}9} = \frac{19000 \cdot 0.0135}{0,92} = 278,8 \text{ Í} \cdot \dot{i};$$

$$\dot{I}_{\bar{n}10} = \frac{17000 \cdot 0.0135}{0,92} = 249,5 \text{ Í} \cdot \dot{i};$$

$$\dot{I}_{\bar{n}11} = \frac{4567,5 \cdot 0.0135}{0,92} = 67 \text{ Í} \cdot \dot{i};$$

Розрахуємо необхідну статичну потужність двигуна за мінімальної та максимальної частоти обертання  $\omega$ .

За максимальної частоти обертання ( $\omega=104,7$  рад/с)  $P_c$  дорівнюватиме:

$$P_c = M_{c10} \cdot \omega_{\max} = 249,5 \cdot 104,7 = 26 \text{ êÁð}.$$

За мінімальної частоти обертання ( $\omega=25,9$  рад/с)  $P_c$  дорівнюватиме:

$$P_c = M_{c1} \cdot \omega_{\min} = 1027 \cdot 25,9 = 26,6 \text{ êÁð}.$$

При частотному регулюванні с  $U=\text{const}$  має виконуватися умова:

$$M_{\ddot{a}\ddot{i}} = \frac{\dot{I}_{\ddot{i}\ddot{i}}}{\alpha^2}; \quad (2.17)$$

де  $\alpha$  рівняється:

$$\alpha \approx \frac{\omega_{\text{max}}}{\omega_{\ddot{i}\ddot{i}}}; \quad (2.18)$$

$$\alpha = \frac{104,7}{25,9} = 4$$

Звідси випливає, що для підтримання необхідного моменту за частоти обертання  $\omega=25,9$  рад/с потрібно завищити потужність двигуна в  $\alpha$  разів:

$$P_{\ddot{a}\ddot{i}} = \alpha \cdot P_{\ddot{i}\ddot{i}}; \quad (2.19)$$

$$P_{\ddot{a}\ddot{i}} = 4 \cdot 26,6 = 106,4 \text{ кВт};$$

Виберемо двигун 4А315S6У3 потужністю 110 кВт і частотою обертання 1000 об/хв.

Розрахуємо номінальний момент двигуна:

$$\dot{I}_{\ddot{i}\ddot{i}} = \frac{P_{\ddot{i}\ddot{i}}}{\omega_{\ddot{i}\ddot{i}}} = \frac{110000}{104,7} = 1050 \text{ А} \cdot \text{с}.$$

Допустимий момент:

$$M_{\ddot{a}\ddot{i}} = \frac{1050}{16} = 65,5 \text{ А} \cdot \text{с}.$$

Цей двигун не буде перегріватися, оскільки максимальний момент навантаження  $M_{c1} < M_{ном}$ , а мінімальний момент навантаження більший за допустимий момент. Отже, двигун обрано правильно.

## 3 ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

### 3.1 Літературний огляд

Широкого поширення набули системи електроприводів із короткозамкненими асинхронними двигунами.

Перевага таких електроприводів: простота і відносно низька вартість, недоліки - підвищений пусковий момент і, отже, можливість появи великих натягу і пробуксовки стрічки, неможливість регулювання швидкості двигуна.

Асинхронні електроприводи з муфтами ковзання забезпечують плавний пуск, регулювання швидкості в необхідному діапазоні. Недоліками такої системи є невисокий ККД системи, встановлена потужність електропривода збільшується приблизно вдвічі, великі габарити установки.

Застосування асинхронних двигунів із фазним ротором і реостатним керуванням забезпечує плавний пуск обладнання, регулювання швидкості. Недоліками такої системи електроприводу є: невисокий ККД, дискретність регулювання швидкості, м'які механічні характеристики.

Система керований випрямляч - двигун постійного струму дає змогу плавно регулювати швидкість у широкому діапазоні, забезпечує плавний пуск, високі динамічні показники, зручність керування. Недоліки: дуже висока вартість двигуна, високі витрати на обслуговування через наявність щіткового контакту, гірші масогабаритні показники порівняно з асинхронними двигунами.

Система перетворювач частоти - асинхронні двигун дає змогу плавно регулювати швидкість у великому діапазоні, забезпечує плавний пуск двигуна, високі динамічні показники, високий ККД, зручність керування, високу надійність. Перевагою цієї системи є невисока вартість перетворювача частоти з двигуном порівняно із системою керований випрямляч - двигун постійного струму. Недолік - складність системи керування та силової схеми.

### 3.2 Формування вимог до автоматизованого електроприводу

До автоматизованого електропривода поздовжньо-стругального верстата висуваються такі вимоги:

- 1) діапазон регулювання швидкості  $D=35$  (досягаємо за рахунок застосування векторної системи керування);
- 2) пуск і гальмування з постійним прискоренням (використання задатчика інтенсивності);
- 3) підтримання постійної потужності на всьому шляху різання;
- 4) збільшувати ресурс роботи електродвигуна і механічної передачі (завдяки обмеженню пускових струмів під час "м'якого" пуску двигуна);
- 5) енергозбереження (у разі векторного керування інвертор передає в двигун рівно стільки потужності, скільки необхідно для обертання навантаження із заданою швидкістю);
- 6) висока надійність (застосування асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором);
- 7) пило- і брудозахищеність;
- 8) вимоги техніки безпеки та охорони праці;
- 9) захист від радіоперешкод і придушення власних радіоперешкод (використання екранованих проводів, застосування реакторів і фільтрів);
- 10) зручність управління, діагностики та налагодження;
- 11) забезпечення основних видів захисту;
- 12) мінімальні габарити, маса і вартість.

### 3.3.Проектування автоматизованої схеми

Для керування асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором використовується інвертор, який може бути як із безпосереднім зв'язком, так і автономний (із ланкою постійного струму). Оскільки діапазон регулювання швидкості  $D=35$ , то необхідно використовувати перетворювач частоти з ланкою постійного струму.

Таким чином, до складу перетворювача входять:

1) інвертор - здійснює перетворення постійної напруги в змінну з регульованою частотою і величиною напруги, регулювання частоти на виході інвертора здійснюється шляхом зміни частоти перемикання ключів інвертора, а регулювання величини напруги на виході інвертора здійснюється за рахунок широтно-імпульсної модуляції;

2) випрямляч - як елементи випрямляча можна використовувати діоди, оскільки регулювання напруги здійснюється в інверторі і немає необхідності в реверсі двигуна;

3) блок гальмування - використовується для динамічного гальмування і скидання енергії, оскільки випрямляч некерований;

4) LC-фільтр - для фільтрації напруги;

5) анодні реактори - використовуються для фільтрації комутаційних перешкод і обмеження швидкості наростання струму короткого замикання.

Крім перетворювача частоти до функціональної схеми електроприводу верстата входять: асинхронний двигун, передавальний пристрій (редуктор), робочий механізм, датчик швидкості, а також джерело трифазної змінної напруги та пристрій його ввімкнення (рубильник, автоматичний вимикач).

З урахуванням сказаного функціональна схема автоматизованого електроприводу з векторним керуванням має вигляд, представлений на малюнку 3.1.

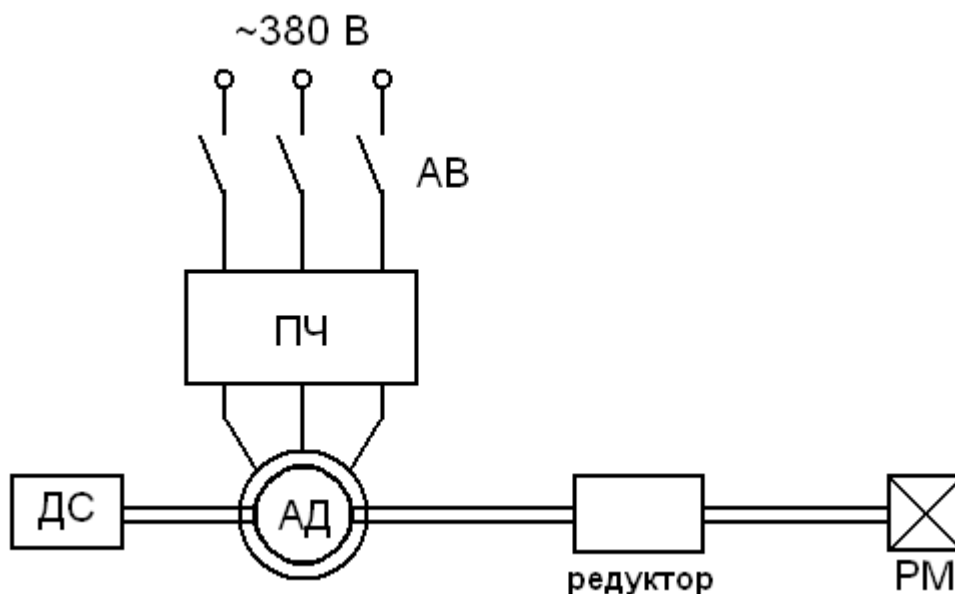


Рисунок 3.1 – Функціональна схема автоматизованого електроприводу

2.4. Вибір комплектного перетворювача і датчиків координат електропривода.

Регулювання швидкості в асинхронному електродвигуні здійснюється за допомогою частоти. Для цих цілей застосовується частотний перетворювач. Його вибирають за номінальним і максимальним струмом і номінальною потужністю двигуна. Оскільки потужність обраного двигуна  $P_H = 110$  кВт, то потужність перетворювача повинна або дорівнювати цій потужності, або бути вищою. Другим важливим критерієм у виборі перетворювача є номінальний вихідний струм і максимальний струм двигуна.

Номінальний фазний струм статора електродвигуна:

$$I_{i\dot{i}} = \frac{D_{i\dot{i}}}{3 \cdot U_{\dot{o}.i\dot{i}} \eta_{i\dot{i}} \cos \varphi_{i\dot{i}}} = \frac{110000}{3 \cdot 220 \cdot 0,93 \cdot 0,9} = 199 \text{ A} \quad (2.1)$$

$$I_{\ddot{a}.max} = I_{i\dot{i}} \frac{\dot{I}_{i\dot{a}\ddot{n}}}{\dot{I}_{i\dot{i}}} \leq I_{max.i\dot{\delta}} \quad (2.2)$$

$$I_{\ddot{a}.max} = 199 \cdot 1,9 = 378,1 \text{ A};$$

Знаючи необхідну потужність і силу струму, виберемо перетворювач частоти з векторним керуванням фірми MITSUBISHI ELECTRIC серії FR F-740 модель 03250 з такими характеристиками:

$$P = 160 \text{ кВт};$$

$$I = 325 \text{ А};$$

$$I_{max} = 390 \text{ А};$$

$$f = 50 \text{ або } 60 \text{ Гц};$$

$$\text{Маса} = 72 \text{ кг}.$$

У проектуваному електроприводі необхідне застосування датчиків струму для контролю навантаження двигуна, датчиків швидкості, які потрібні для контролю швидкості переміщення столу, а також датчиків положення для контролю точного зупинення столу в потрібному місці. Комплектний

перетворювач FR F-740 має вбудований датчик струму, і додаткову карту імпульсного датчика зворотного зв'язку за швидкістю.

Як датчики положення використовуємо індуктивні датчики фірми "СЕНСОР" моделі ДПІ-02-5Н.

## 4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

### 4.1. Розрахунок параметрів схеми заміщення

Схему заміщення асинхронного двигуна наведено на рис.3.1

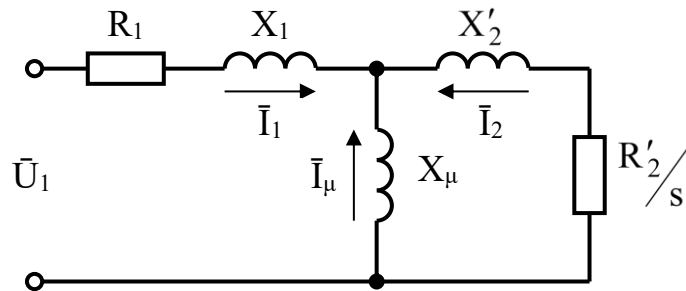


Рис.3.1 Схема заміщення асинхронного двигуна

Для визначення параметрів схеми заміщення скористаємося довідником і формулою переведення відносних одиниць:

$$a = A^* \cdot \frac{U_{\delta}}{I_{\text{нн}}};$$

Де  $A^*$  - величина у відносних одиницях;

$U_{\delta}$  - фазна напруга;

$I_{\text{нн}}$  - номінальний струм.

Для двигуна 4А315S6У3 знаходимо за таблицею параметри схеми заміщення у відносних одиницях.

Тип двигуна	Параметри схеми заміщення				
	$X_{\mu}^*$	$R_1^*$	$X_1^*$	$R_2'^*$	$X_2'^*$
4А315S6У3	3,9	0,026	0,10	0,018	0,12

Підставляючи дані у формулу отримаємо:

$$R_1 = R_1^* \cdot \frac{U_{\delta}}{I_{i1}} = 0,026 \cdot \frac{220}{199} = 0,0286 \hat{I} \hat{i} ;$$

$$X_1 = X_1^* \cdot \frac{220}{199} = 0,1 \cdot 1,1 = 0,11 \hat{I} \hat{i} ;$$

$$R_2 = R_2^* \cdot 1,9 = 0,018 \cdot 1,1 = 0,0198 \hat{I} \hat{i} ;$$

$$X_2 = X_2^* \cdot 1,9 = 0,12 \cdot 1,1 = 0,132 \hat{I} \hat{i} .$$

$$X_{\mu} = X_{\mu}^* \cdot 1,1 = 3,9 \cdot 1,1 = 4,29 \hat{I} \hat{i} ;$$

Індуктивність статора визначається за такою формулою:

$$L_1 = \frac{X_1 + X_{\mu}}{2\pi f} = \frac{0,11 + 4,29}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,01401 \text{ Гн.} \quad (4.1)$$

Індуктивність ротора визначається за формулою

$$L_2 = \frac{\tilde{O}'_2 + \tilde{O}_{\mu}}{2\pi f} = \frac{0,132 + 4,29}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,01408 \text{ Гн.} \quad (4.2)$$

Взаємна індуктивність обчислюється згідно з формулою

$$L_{12} = \frac{X_{\mu}}{2\pi f} = \frac{7,41}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,01366 \text{ Гн.} \quad (4.3)$$

Еквівалентний опір ланцюга статора

$$R_y = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_{12}^2}{L_2^2} = 0,0286 + 0,0198 \cdot \frac{0,01366^2}{0,01408^2} = 0,047 \text{ Ом.} \quad (4.4)$$

Еквівалентна індуктивність ланцюга статора

$$L_y = L_1 - \frac{L_{12}^2}{L_2} = 0,01401 - \frac{0,01366^2}{0,01408} = 0,00076 \text{ Гн.} \quad (4.5)$$

#### 4.2. Математичний опис

Функціональній схемі, представленій на рис. 3.2 відповідає наступний опис асинхронного двигуна та порядок синтезу системи керування.

Для синтезу системи векторного управління фазні величини трифазного асинхронного двигуна перетворюються на відповідні величини еквівалентної двофазної машини [5, с.224]. У ортогональних нерухомих координатних осях  $\alpha$ ,  $\beta$  замість трьох фазних величин  $u_a$   $u_b$   $u_c$  отримують дві проєкції вектора  $u$  на координатні осі

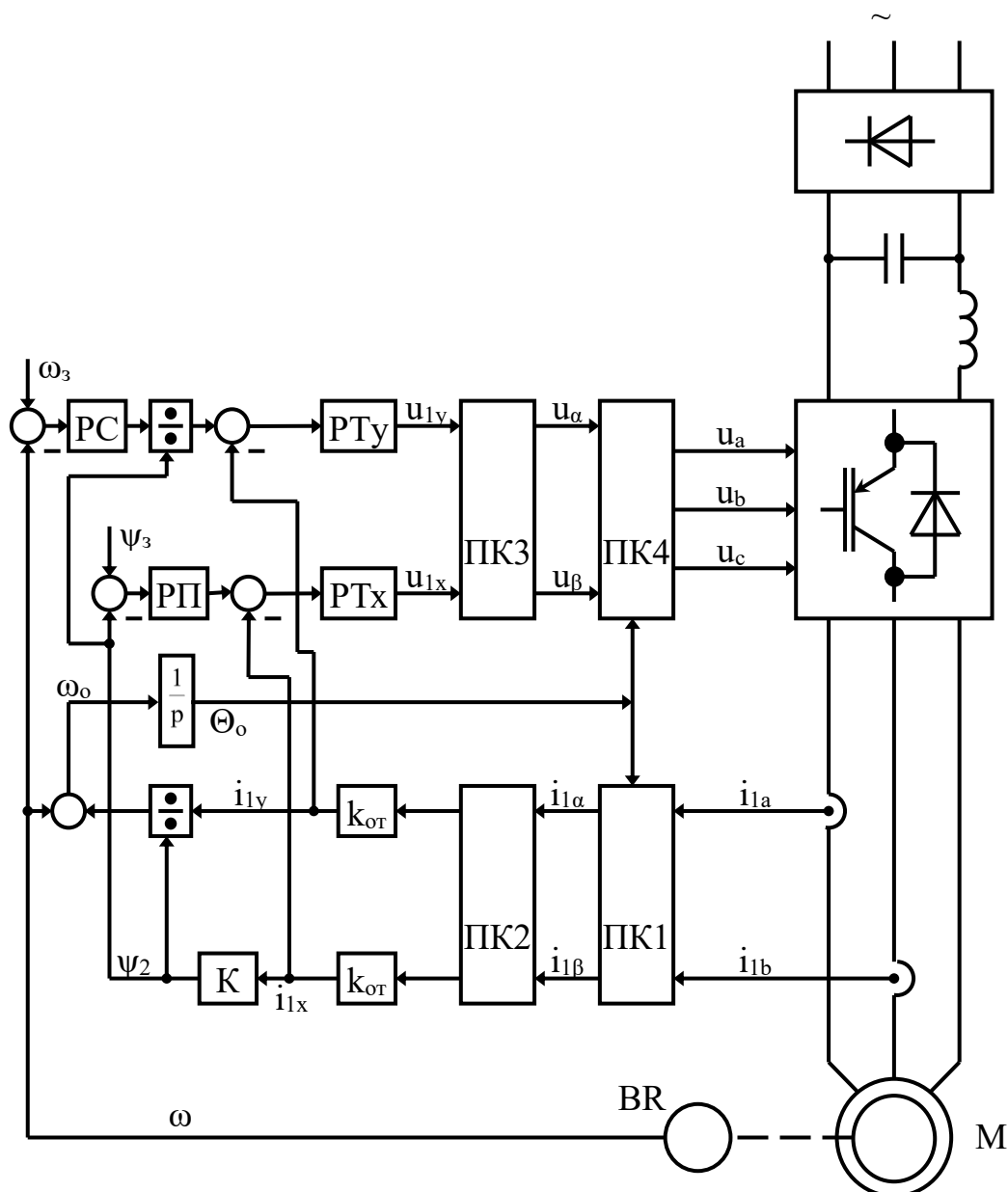
$$u_{\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}} u_a, \quad (3.6)$$

$$u_{\beta} = \frac{u_b - u_c}{\sqrt{2}} = \frac{u_a + 2u_b}{\sqrt{2}}. \quad (3.7)$$

Аналогічні перетворення виконуються також струмів і потокозчеплень.

Для синтезу системи змінні перетворюються до координатної системи ( $x$ ,  $y$ ), що обертається зі швидкістю потокозчеплення ротора

$$u_x = u_{\alpha} \cos \omega_o t + u_{\beta} \sin \omega_o t, \quad (3.8)$$



*PC* – регулятор швидкості;

*PP* – регулятор потоку;

*PT<sub>у</sub>* – регулятор проекції вектора струму на вісь *y*;

*PT<sub>x</sub>* – регулятор проекції вектора струму на вісь *x*;

*ПК1, ..., ПК4* – функціональні перетворювачі координат;

*BR* – датчик швидкості.

Рис.4.2 Функціональна схема прямого векторного управління

$$u_y = -u_\alpha \sin \omega_o t + u_\beta \cos \omega_o t \quad (3.9)$$

У цих координатах електромагнітні процеси асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором описуються диференціальними рівняннями

$$\left. \begin{aligned} u_{1x} &= i_{1x} R_1 + \psi_{1x} - \omega_o \psi_{1y}, \\ u_{1y} &= i_{1y} R_1 + \psi_{1y} - \omega_o \psi_{1x}, \\ 0 &= i_{2x} R_2 + \psi_{2x}, \\ 0 &= i_{2y} R_2 + (\omega_o - \omega_2) \psi_{2x}. \end{aligned} \right\} \quad (3. 10)$$

Перші два рівняння записані для статорного, а другі два – для роторного кола. Тут  $\psi_{1x}$ ,  $\psi_{1y}$  – складові потокозчеплення статора відповідно до осей  $x$  та  $y$ ;  $\psi_{2x} = \psi_2$  – потокозчеплення ротора;  $\omega_o$  – частота напруги статора;  $\omega_2 = \omega_{rp}$ ,  $\omega$  – кутова швидкість ротора;  $rp$  – кількість пар полюсів. Вирази потокозчеплень мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} \psi_{1x} &= L_1 i_{1x} + L_{12} i_{2x}, \\ \psi_{2x} &= L_{12} i_{1x} + L_2 i_{2x}, \\ \psi_{1y} &= L_1 i_{1y} + L_{12} i_{2y}, \\ \psi_{2y} &= L_{12} i_{1y} + L_2 i_{2y}. \end{aligned} \right\} \quad (3. 11)$$

Звідси можна виразити складові струму ротора та потокозчеплення статора

$$\left. \begin{aligned} i_{2x} &= \frac{\psi_2 - L_{12} i_{1x}}{L_2}, \\ i_{2y} &= -\frac{i_{1y} L_{12}}{L_2}, \\ \psi_{1x} &= i_{1x} L_\vartheta + \frac{\psi_2 L_{12}}{L_2}, \\ \psi_{1y} &= i_{1y} L_\vartheta. \end{aligned} \right\} \quad (3. 12)$$

В результаті перетворень третє рівняння системи (3. 13) набуває вигляду

$$\frac{d\psi_2}{dt} = -\frac{R_2 \psi_2}{L_2} + \frac{R_2 i_{1x} L_{12}}{L_2}, \quad (3. 14)$$

а для ланцюга статора виходять рівняння

$$\left. \begin{aligned} u_{1x} &= i_{1x} R_{\text{э}} + \frac{L_{\text{э}} di_{1x}}{dt} - \frac{\psi_2 R_2 L_{12}}{L_2^2} - \omega_o i_{1y} L_{\text{э}}, \\ u_{1y} &= i_{1y} R_{\text{э}} + \frac{L_{\text{э}} di_{1y}}{dt} + \omega_o i_{1x} L_{\text{э}} + \frac{\omega \psi_2 L_{12}}{L_2}. \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

Синхронна частота  $\omega_o$  задовольняє виразу

$$\omega_o = \omega_2 + \frac{i_{1y} L_{12} R_{12}}{L_2 \psi_2}, \quad (3.16)$$

швидкість обертання координатної системи, що використовується для координатних перетворень,  $\omega_k = \omega_o / p_p$ .

Електромагнітний момент визначається виразом

$$M = \frac{3}{2} p_p \frac{L_{12}}{L_2} i_{1y} \psi_2 = k_m i_{1y} \psi_2, \quad (3.17)$$

де

$$k_m = \frac{3 p_p L_{12}}{2 L_2}. \quad (3.18)$$

Швидкість ротора задовольняє диференціальному рівнянню

$$\frac{J d\omega}{dt} = M - M_c. \quad (3.19)$$

тут  $M_c$  – момент сил опору,  $J$  – момент інерції.

Максимальний сумарний момент інерції дорівнює

$$J = J_{\text{дв}} + J_{\text{рм}} = 4,7 + 1,42 = 6,12 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (3.20)$$

Структурна схема векторного управління асинхронним двигуном, побудована відповідно до виразів (3.14)–(3.19) та згідно з функціональною схемою на рис.3.2, показана на рис.3.3

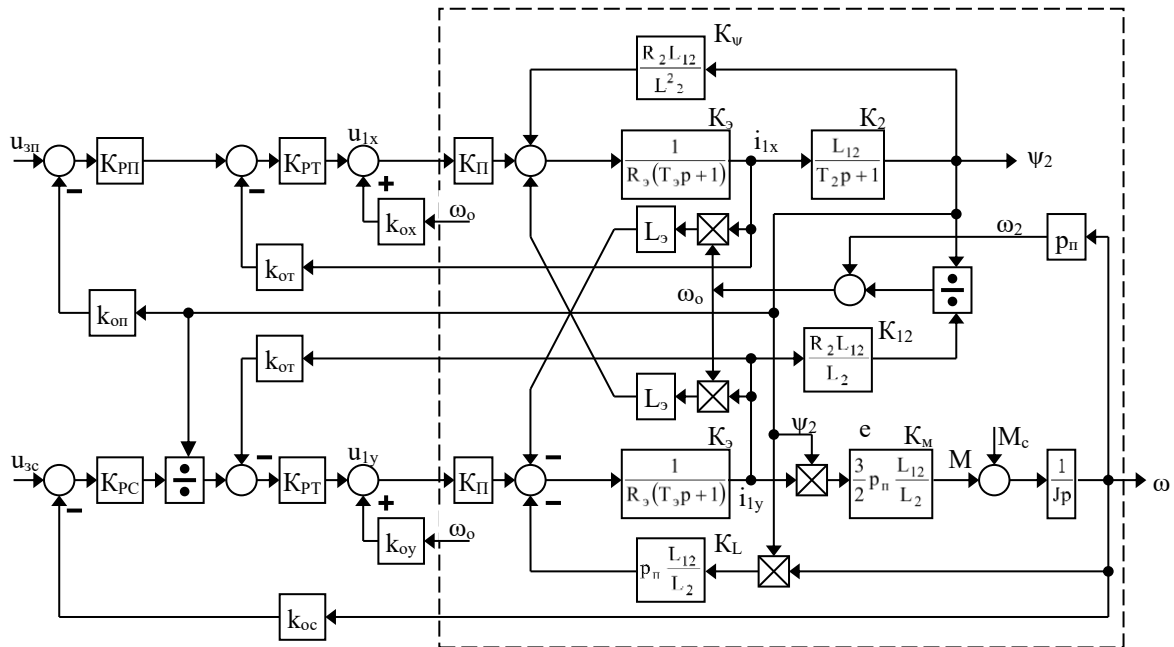


Рис.3.3 Структура векторного керування асинхронним двигуном

Дана структурна схема містить два канали: канал x, на вході якого діє управління  $u_x$  і канал y з вхідним сигналом  $u_y$ . Вихідними величинами є потокозчеплення  $\psi_2$  для каналу x і швидкість ротора для каналу y. На схемі об'єкта управління прийнято позначення

$$\dot{\sigma}_y = \frac{L_y}{R_y} = \frac{0,00076}{0,047} = 0,016 \text{ с}, \quad (3.21)$$

$$\dot{\sigma}_2 = \frac{L_2}{R_2} = \frac{0,01408}{0,0198} = 0,7 \text{ с}. \quad (3.22)$$

Основою цієї структури об'єкта є керований від перетворювача асинхронний двигун. Структура містить у каналах x і y динамічні ланки  $K_e$ , що враховують електромагнітні процеси ланцюга статора.

Ланка К2 враховує процес намагнічування машини. У каналі формується електромагнітний момент, пропорційний добутку поточосцеплення на струм  $i_l$ , ланка Км перетворює динамічний момент в швидкість. На виході ланки КL виходить величина ЕРС, пропорційна добутку поточосцеплення на швидкість.

Структура передбачає наявність координатних перетворювачів з обертається в нерухому систему координат  $(\alpha, \beta)$  і потім сигнали управління трьома фазними напругами інвертора:  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$ , а також наявність координатних перетворювачів сигналів зворотних зв'язків з трифазної системи в систему координат  $(x, y)$ .

Сказане відображено на функціональній схемі автоматизованого електроприводу з векторним керуванням на рис.3.2.

В даний час найбільшого поширення набули автономні інвертори напруги на базі транзисторних силових ключів.

Управління частотою, амплітудою та фазою напруги на двигуні виконується за допомогою широтно-імпульсної модуляції синусоїдальних напруг фаз. У структурі системи управління перетворювач може бути приблизно представлений інерційною ланкою

$$K_n(p) = \frac{\beta_n}{T_\mu p + 1}, \quad (3.23)$$

де  $T_\mu = 0,001-0,002$  с - мала постійна часу.

У разі високої частоти широтно-імпульсної модуляції перетворювач можна вважати безінерційною ланкою.

Коефіцієнт посилення перетворювача  $\beta_n$  визначається як відношення найбільших значень амплітуди напруги перетворювача та амплітуди сигналу керування.

Синтез системи полягає у визначенні структури та параметрів регуляторів кожного каналу, що дозволяє сформулювати сигнали керування  $u_x$ ,  $u_y$ . Для забезпечення автономності каналів потрібна компенсація перехресних зв'язків об'єкта перехресними зв'язками регулятора

$$k_{ox} = k_{oy} = \frac{L_{\varepsilon}}{\beta_{\Pi}} . \quad (3.24)$$

Канал  $x$  містить регулятор струму  $K_{PTx}(p)$  та регулятор потозчеплення  $K_{PP}(p)$ . Передавальні функції регуляторів можуть бути визначені методом послідовної оптимізації контурів на підставі умов модульного оптимуму. Внутрішнім зворотним зв'язком по потоку зчеплення при цьому зазвичай нехтують.

Прирівнюючи передатну функцію розімкнутого контуру управління струмом осі  $x$  до оптимальної, отримуємо вираз

$$K_{PTx}(p) \cdot K_{\Pi}(p) \frac{1}{R_{\varepsilon}(T_{\varepsilon}p + 1)} k_{отх} = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} . \quad (3.25)$$

У правій частині записано оптимальну передатну функцію, а в лівій міститься шукана передатна функція регулятора струму.

$$K_{PTx}(p) = \frac{R_{\varepsilon}(T_{\varepsilon}p + 1)}{2T_{\mu}k_{отх}\beta_{\Pi}p} . \quad (3.26)$$

В результаті замкнутий контур струму матиме оптимальну передатну функцію.

$$W_{TX}(p) = \frac{1}{k_{отх} (2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} + 1)} . \quad (3.27)$$

Тепер можна визначити передатну функцію регулятора потокозчеплення, прирівнюючи передатну функцію розімкнутого контуру до оптимальної

$$K_{\text{РП}}(p) \cdot W_{\text{ТХ}}(p) \frac{L_{12}}{T_2 p + 1} k_{\text{оп}} = \frac{1}{4T_{\mu} p (2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1)}. \quad (3.28)$$

Отримаємо:

$$K_{\text{РП}}(p) = \frac{(T_2 p + 1) k_{\text{отх}}}{4T_{\mu} L_{12} p k_{\text{оп}}}. \quad (3.29)$$

Отриманий ПІ-регулятор забезпечує астатизм контуру поточозчеплення, що сприяє статичній точності.

Аналогічним чином визначаються передавальні функції регуляторів струму та швидкості каналу  $u$ , нехтуючи зворотним зв'язком по ЕРС двигуна. В результаті при  $k_{\text{отх}} = k_{\text{оту}}$  отримаємо

$$K_{\text{РТу}} = K_{\text{РТх}}(p) = \frac{R_{\text{э}}(T_{\text{э}} p + 1)}{2T_{\mu} k_{\text{отх}} \beta_{\text{п}} p}. \quad (3.30)$$

Для визначення П-регулятора швидкості запишемо вираз за умовою модульного оптимуму

$$K_{\text{РСІ}}(p) \cdot W_{\text{ТУ}}(p) \frac{\psi_2 k_{\text{М}} k_{\text{ос}}}{J p} = \frac{1}{4T_{\mu} p (2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1)}. \quad (3.31)$$

Отож:

$$K_{\text{РСІ}}(p) = \frac{J}{\psi_2 k_{\text{М}} 4T_{\mu}} \cdot \frac{k_{\text{оту}}}{k_{\text{ос}}}. \quad (3.32)$$

Тут  $\psi_2$  – змінна величина, тому на виході регулятора швидкості з функцією передавання

$$K_{\text{РС}}(p) = \frac{J k_{\text{оту}}}{4T_{\mu} k_{\text{М}} k_{\text{ос}}}. \quad (3.33)$$

встановити блок поділу на  $\psi_2$ , як показано на рис.3.3.

Для забезпечення астатизму контуру швидкості визначимо передатну функцію регулятора швидкості з умови симетричного оптимуму з огляду на наявність блоку поділу

$$K_{PC}(p) \frac{1}{\psi_2} W_{TY}(p) \frac{\psi_2 k_M k_{oc}}{Jp} = \frac{1 + 8T_\mu p}{8T_\mu p} \cdot \frac{1}{4T_\mu p (2T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1)}. \quad (3.34)$$

Для отримання необхідних динамічних показників необхідно спочатку подати ступінчастий вплив изп на вхід контуру потокозчеплення. Потім, після закінчення часу регулювання потоку, на вхід контуру швидкості має бути подано лінійно зростаюче до необхідної величини завдання швидкості изс, що забезпечує обмеження прискорення при розгоні.

## 5 РОЗРОБКА МОДЕЛЮЮЧОЇ ПРОГРАМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Для асинхронного двигуна моделі 4A315S6Y3 буде виконано моделювання з використанням стандартної схеми непрямого векторного управління, описаної у попередньому розділі. Схема моделювання у MATLAB Simulink представлена на ілюстраціях 4.1-4.6.

Програма для моделювання містить три підсистеми: для генерації завдань по швидкості, потокозчепленню та моменту навантаження ( $w$  reference,  $PSI$  reference,  $M_c$ ), блок управління Control block, модель самого асинхронного двигуна Model IM (a-b), систему для визначення кутового положення вектора потокозчеплення (Flux calculator), а також підсистеми для перетворення координат ( $(d-q) \Rightarrow (a-b)$ ,  $(a-b) \Rightarrow (d-q)$ ).

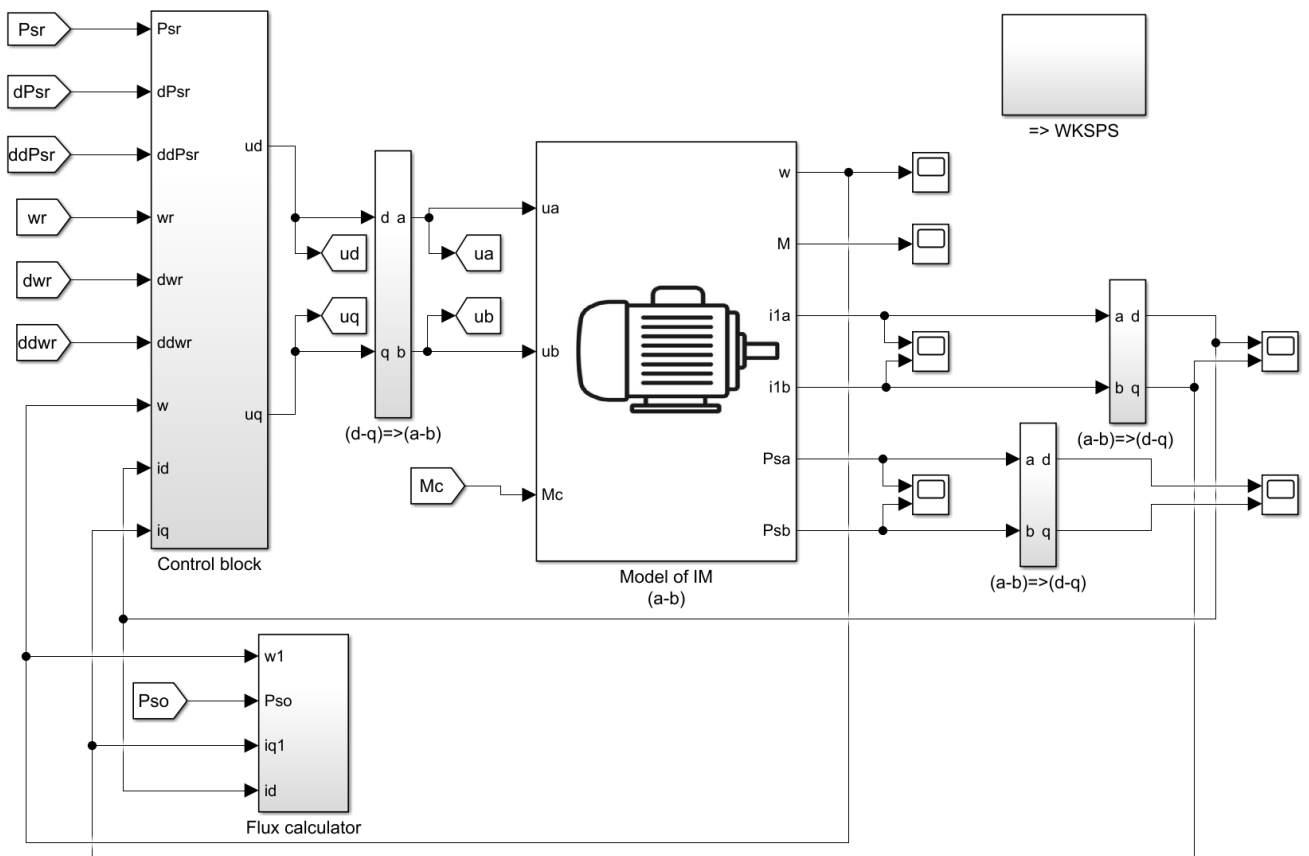


Рисунок 4.1 – Загальна моделююча програма

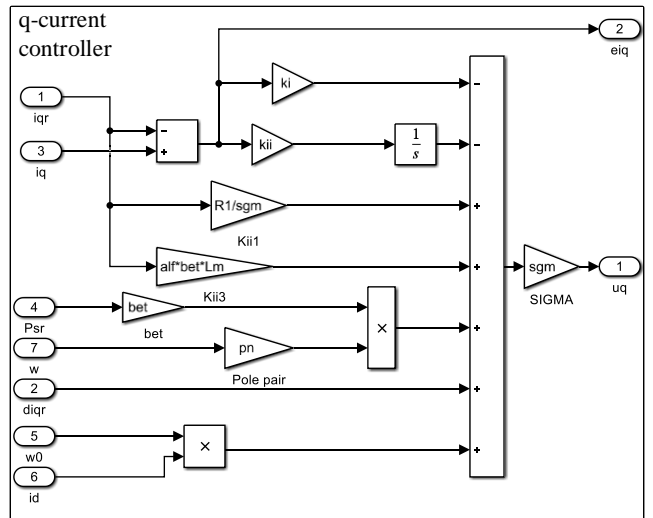
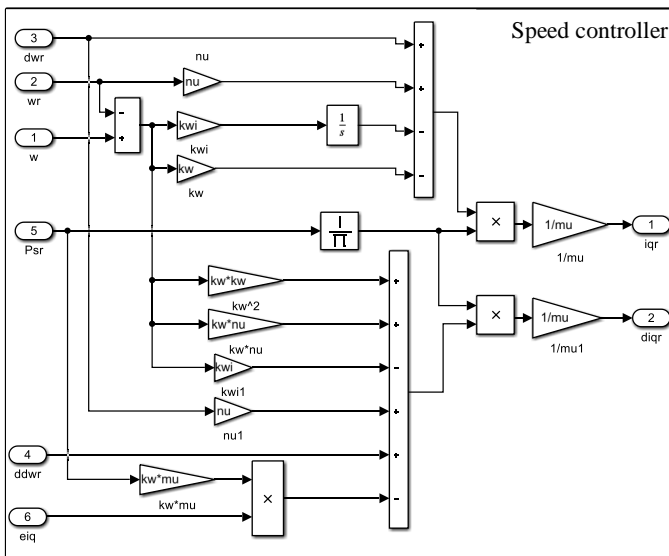
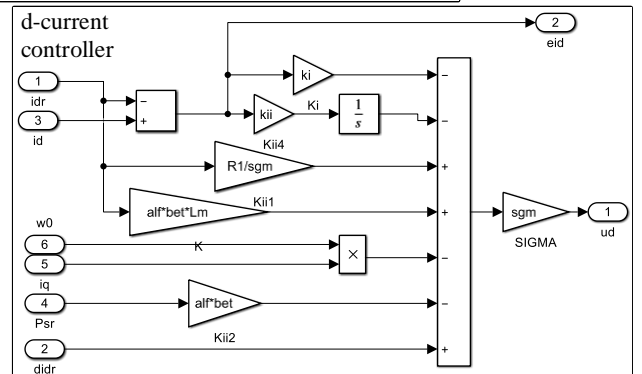
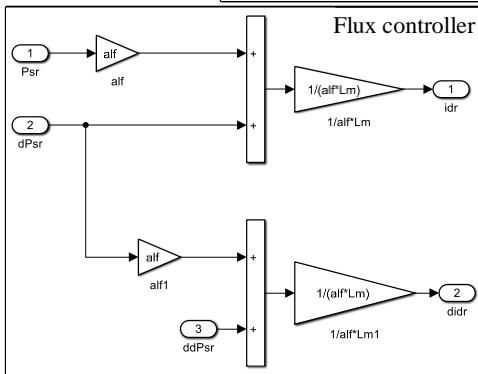
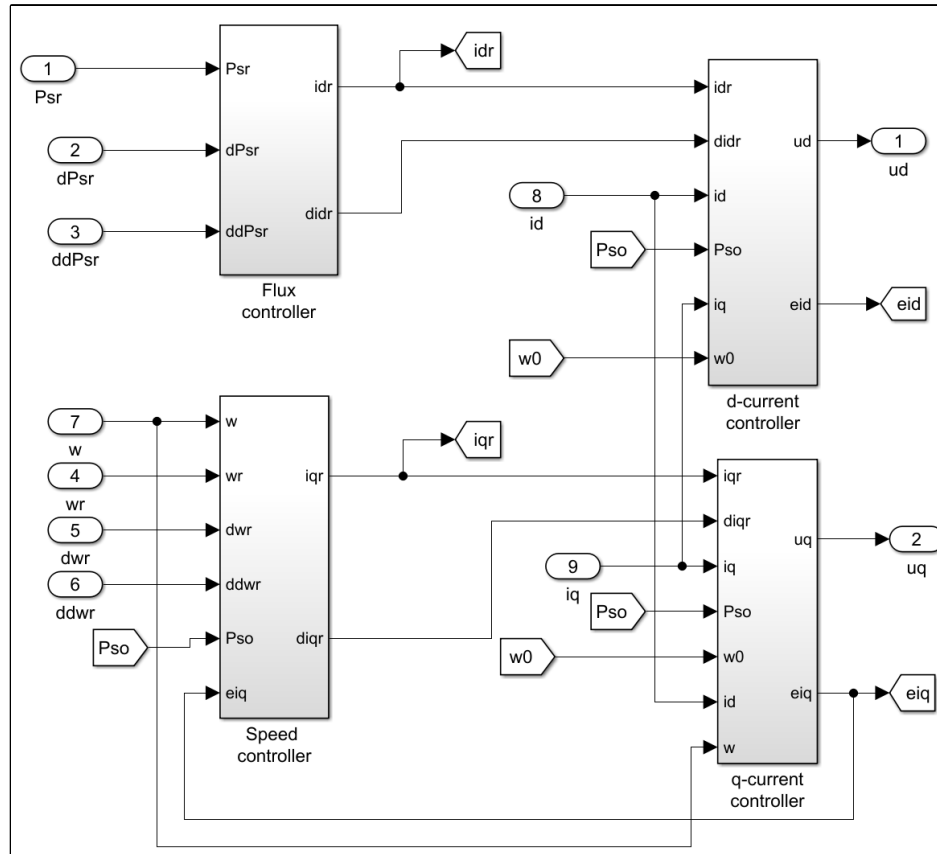


Рисунок 4.2 – Підсистема алгоритму керування

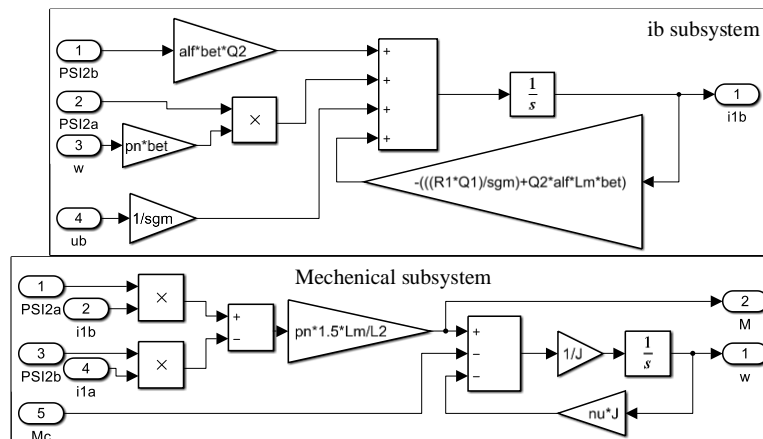
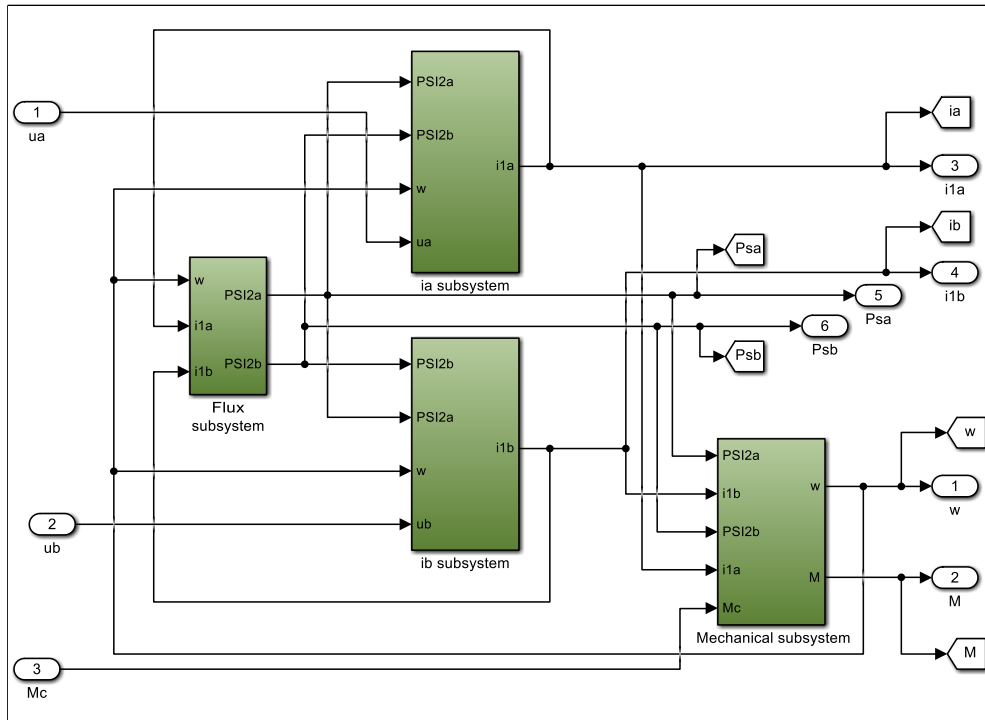
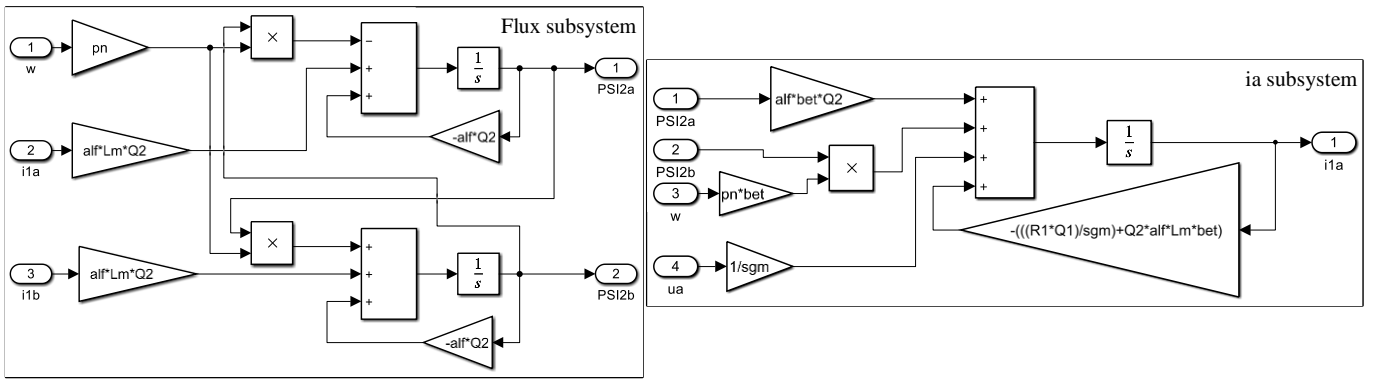


Рисунок 4.3 – Структурна модель АД

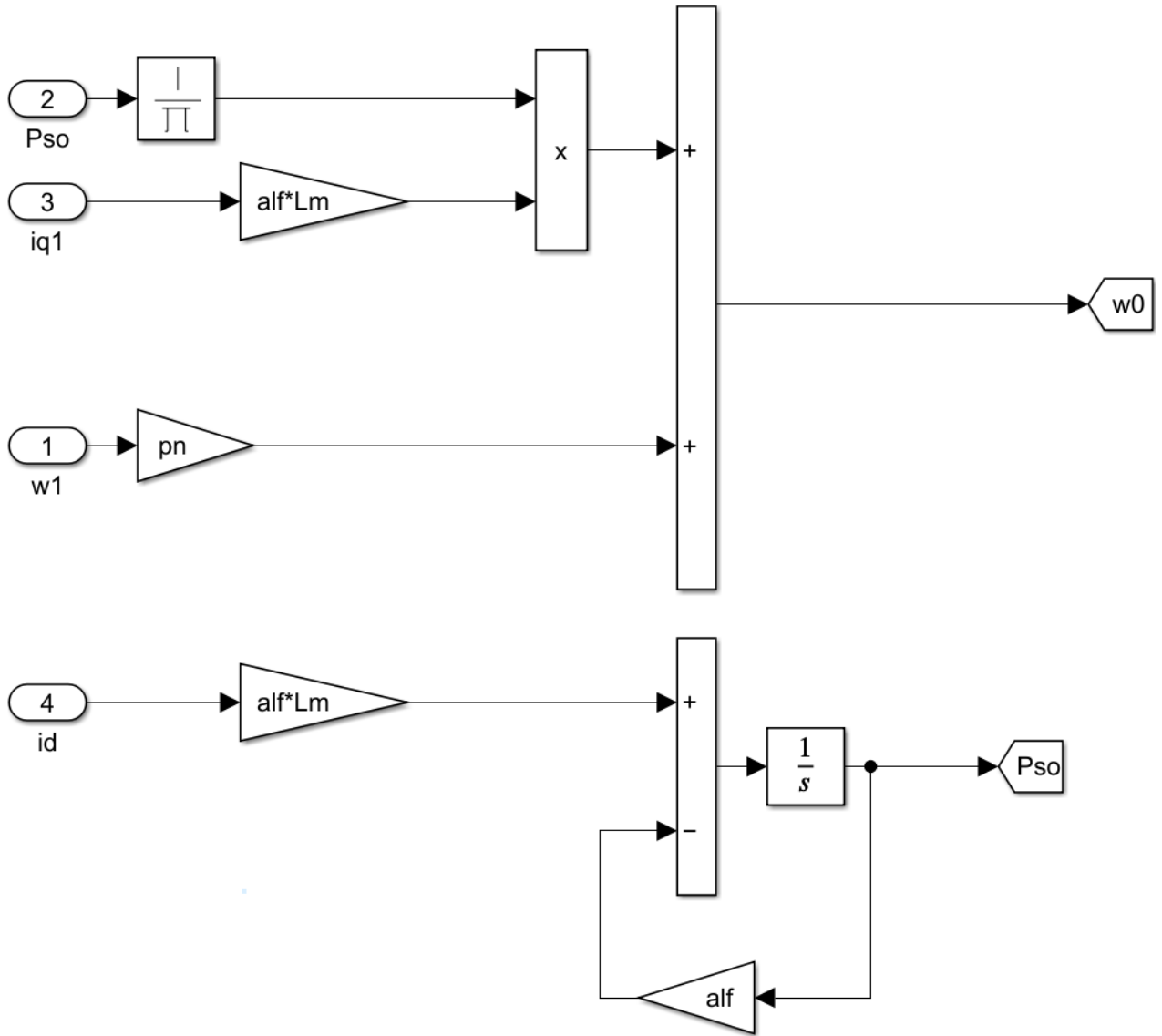


Рисунок 4.4 – Підсистема оцінки поточозчеплення

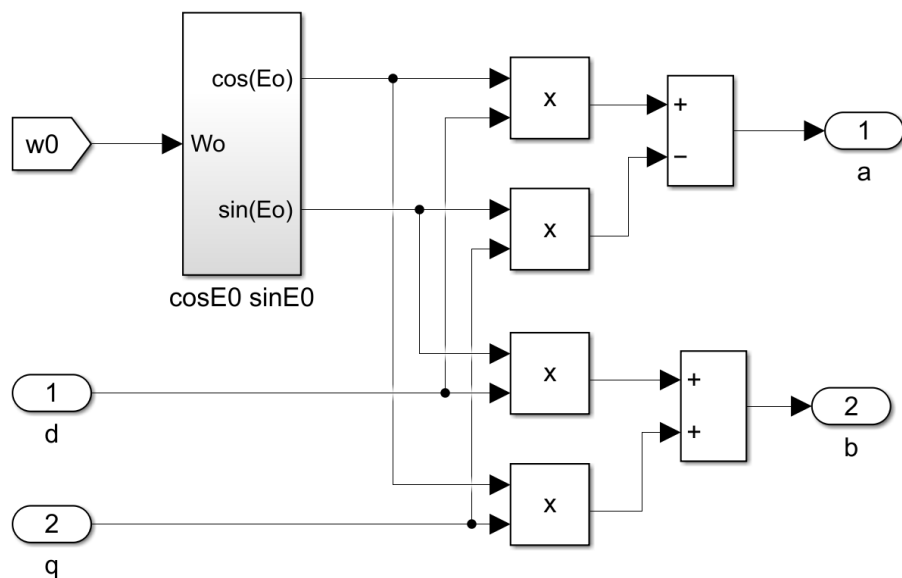


Рисунок 4.5 – Підсистема перетворення системи координат

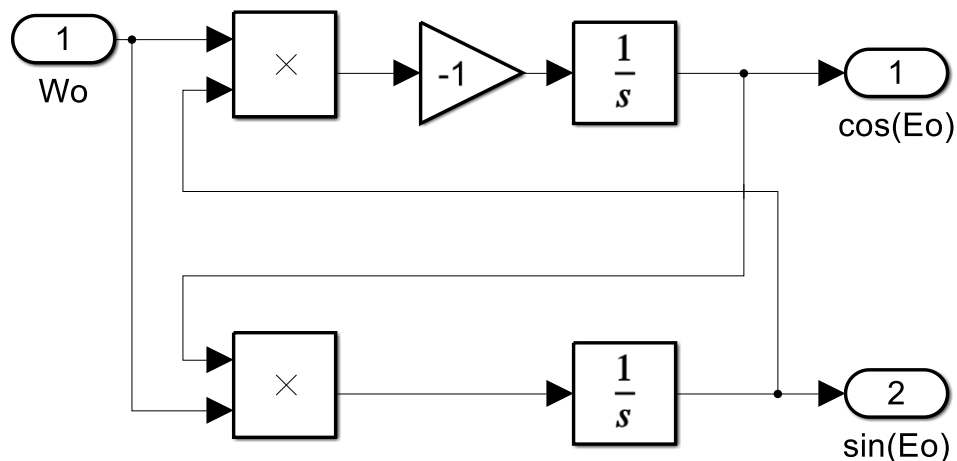


Рисунок 4.6 – Структура підсистеми  $\cos E_0 \sin E_0$  (з рис. 4.5)

Для алгоритмів частотного та векторного керування необхідно сформулювати оптимальне завдання потокозчеплення  $\psi^*$ . Для визначення заданого оптимального потокозчеплення скористаємось виразом

$$\psi^* = \frac{L_m}{L_2} \psi_{1XX} = 0,9757 \cdot 0,99 = 0,9659 \text{ Вб}.$$

Запуск збудження мотора відбудеться за 0,4 секунди з обмеженням на другу похідну. Початок прискорення двигуна заплановано на 0,5 секунди за кривою другого порядку, яке триватиме 0,75 секунди і буде відповідати приблизно подвійному динамічному моменту. Двигун прискорюватиметься до досягнення номінальної швидкості. При цій швидкості він працюватиме протягом 3 секунд. У момент 2 секунди буде раптово застосовано статичний момент навантаження, який зніметься через 3,5 секунди. Тепер розглянемо налаштування коефіцієнтів для ПІ-регуляторів. Система непрямого векторного управління є системою з каскадним управлінням, що включає зовнішнє регулювання швидкості та внутрішнє регулювання струму (див. рис. 4.7). Згідно з основами теорії автоматичного управління, зовнішнє регулювання повинно бути повільніше внутрішнього щонайменше у 2-3 рази. Враховуючи реальні фізичні обмеження, які накладаються швидкодією мікропроцесора частотного перетворювача, ми встановимо коефіцієнт пропорційності для регулятора струму на рівень  $k_i = 700$ .

Потім враховавши обмеження, зумовлені неточностями механічних передач вибираємо пропорційний коефіцієнт регулятора швидкості рівним  $k_{\omega} = 150$ .

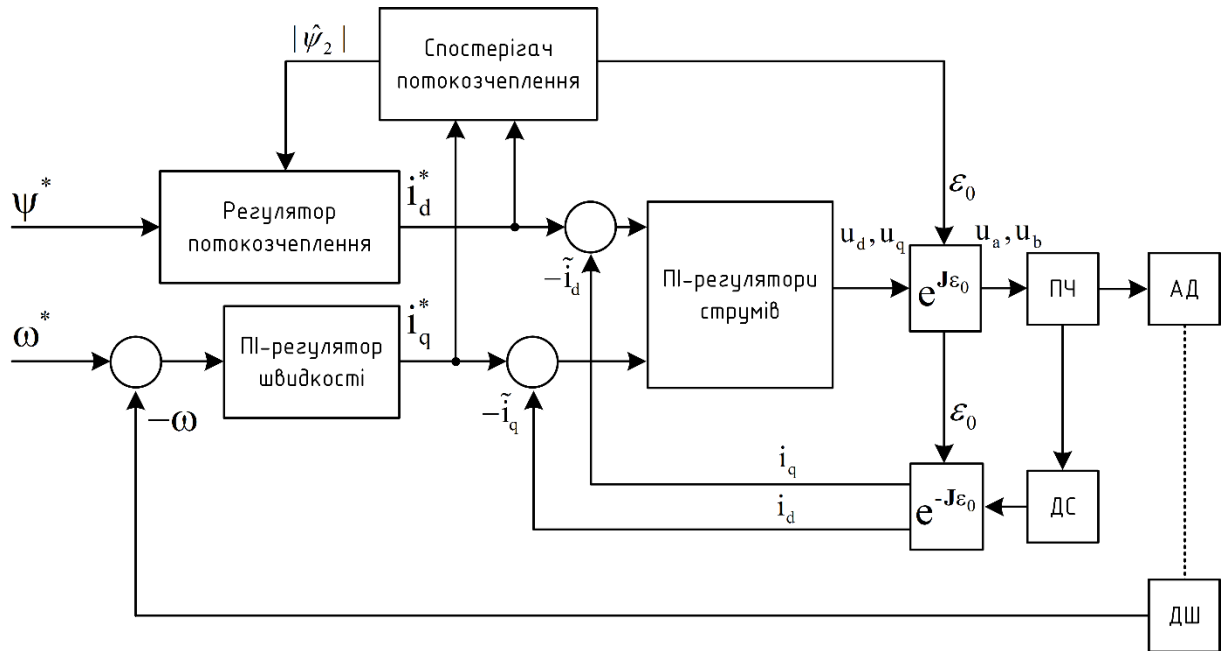


Рисунок 4.7 – Структурна системи керування електроприводу

Використаємо наступні стандартні залежності для пропорційного та інтегрального коефіцієнтів ПІ-регулятора.

- при  $k_i = \frac{k_p^2}{2}$  маємо  $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$  – перехідний процес з невеликим перерегулюванням та більшою швидкістю;

- при  $k_i = \frac{k_p^2}{4}$  маємо  $\xi = 1$  – аперіодичний перехідний процес;

При моделюванні роботи електропривода використано наступні значення коефіцієнтів ПІ-регуляторів:

для регулятора швидкості –  $k_{\omega} = 150$ ;  $k_{i\omega} = \frac{k_{\omega}^2}{2}$ ;

для регуляторів струму –  $k_i = 700$ ;  $k_{ii} = \frac{k_i^2}{2}$ .

Відповідно до виконаних розрахунків, буде проведено дослідження динамічних процесів в електроприводі.

## 5 АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Для автоматизованого електроприводу подовжньо-стругального верстату важливо обрати принцип керування електроприводом, який забезпечить ефективність роботи верстату, точність обробки матеріалу і зручність у використанні.

Електронні системи керування, такі як ПЛК (програмовані логічні контролери) або CNC (числове програмоване керування), здатні забезпечити високу точність позиціонування. Це критично для стругального верстату, де навіть дрібні зсуви можуть вплинути на якість обробки.

Електронні системи керування дозволяють програмувати різні режими роботи верстату, змінювати швидкість руху, глибину обробки та інші параметри залежно від потреби. Це дозволяє легко адаптувати верстат до різних завдань обробки.

Сучасні системи керування забезпечують можливість моніторингу стану верстату і діагностики несправностей. Це спрощує процес обслуговування і планування технічного обслуговування, що підвищує його надійність і тривалість служби.

Деякі системи керування електроприводами мають можливості енергозбереження, які дозволяють оптимізувати споживання електроенергії верстатом, знижуючи експлуатаційні витрати.

Сучасні системи керування забезпечують високий рівень безпеки в робочому середовищі шляхом імплементації заходів безпеки і аварійних захисних функцій.

Обираючи принцип керування електроприводом для автоматизованого подовжньо-стругального верстату, важливо враховувати специфіку завдань, які потрібно виконувати, і вибирати ту систему, яка найкращим чином відповідає вимогам щодо точності, надійності і ефективності роботи верстату.

### 5.2. Структурно-параметричний синтез системи керування

Автоматизація виробничих процесів займає центральне місце в індустріальному виробництві, сприяючи підвищенню ефективності, точності і безпеки виробничих процесів.

Особливо важливим є впровадження автоматизованих електроприводів для управління і керування різноманітними верстатами, зокрема поздовжніми стругальними верстатами. Ця робота присвячена структурно-параметричному синтезу системи керування автоматизованим електроприводом такого стругального верстату.

Такий верстат є важливим обладнанням для обробки деревини, яке забезпечує точне оброблення поверхні за допомогою різання стругальним ножом. Основними компонентами такого верстату є рама, стіл і стругальна головка з електроприводом.

Електропривід виконує ключову роль у забезпеченні рухомих і функціональних можливостей стругального верстату. Він забезпечує переміщення стругальної головки по рамі, регулювання швидкості подачі і інші параметри, які впливають на якість обробленої поверхні.

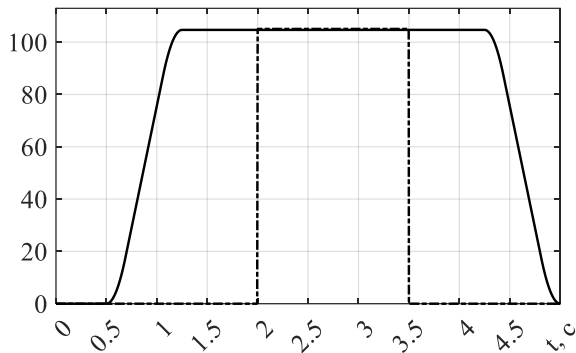
Структурно-параметричний синтез включає в себе процес розробки системи керування з урахуванням структурних особливостей електроприводу та параметрів, які впливають на його ефективність і надійність. Основні етапи синтезу включають:

Аналіз вимог до системи керування - визначення потреб користувача та основних функцій електроприводу;

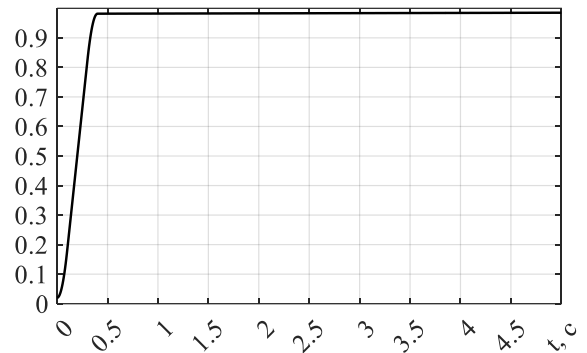
Вибір структури електроприводу - вибір типу приводу (наприклад, прямий привід, редукторний привід тощо) залежно від вимог до швидкості, точності і потужності;

На рис. 5.1 та 5.2 приведені графіки перехідних процесів досліджуваного двигуна в номінальному режимі роботи.

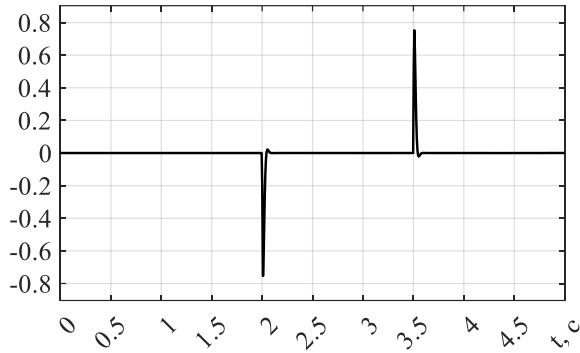
Задана траєкторія швидкості  $\omega^*$ , рад/с,  
та профіль моменту навантаження, 0.1·Нм



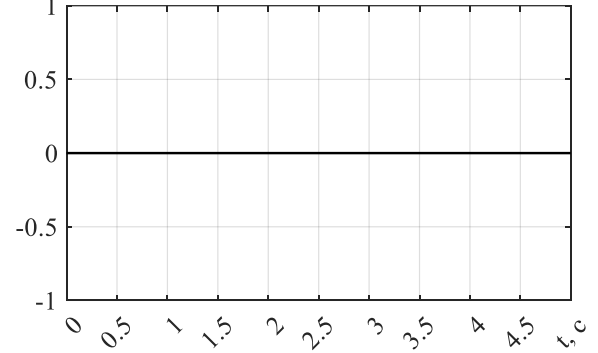
Задана траєкторія потокозчеплення  $\psi^*$ , Вб



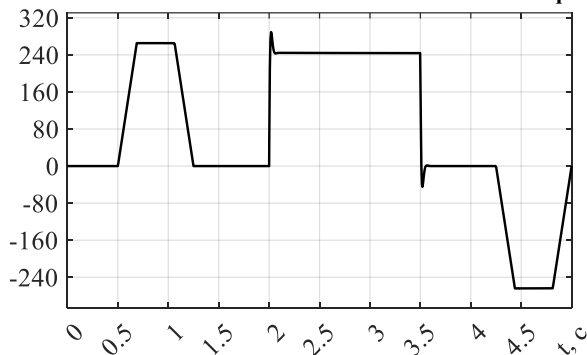
Похибка регулювання швидкості  $\omega$ , рад/с



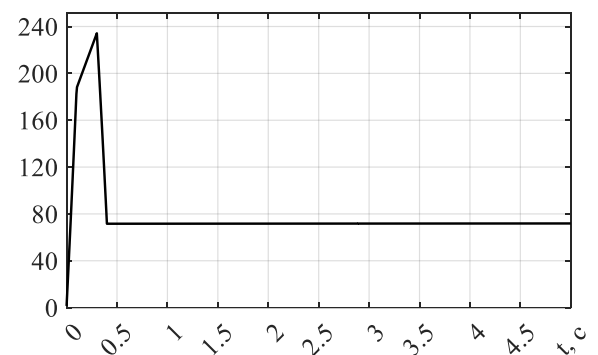
Похибка регулювання потоку  $\psi$ , Вб



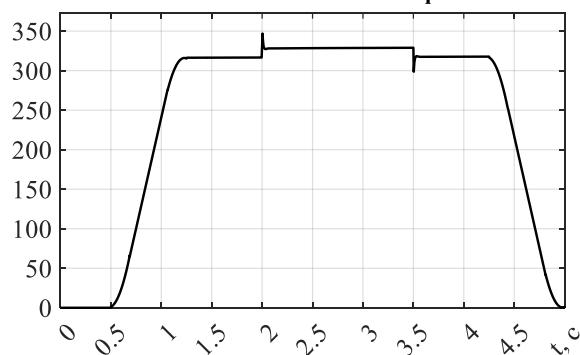
Заданий моментоутворюючий струм  $i_q^*$ , А



Заданий потокоутворюючий струм  $i_d^*$ , А



Керуюча напруга  $u_q$ , В



Керуюча напруга  $u_d$ , В

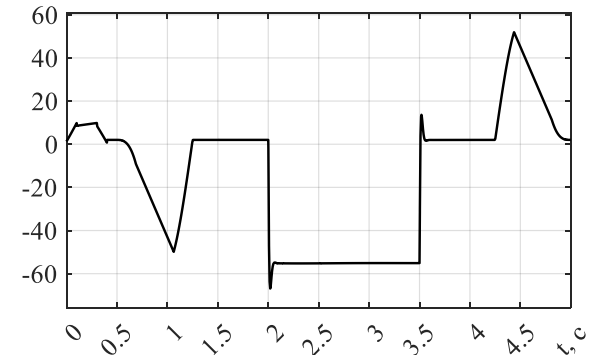


Рисунок 4.8 – Графіки перехідних процесів двигуна для номінальної швидкості з номінальним навантаженням

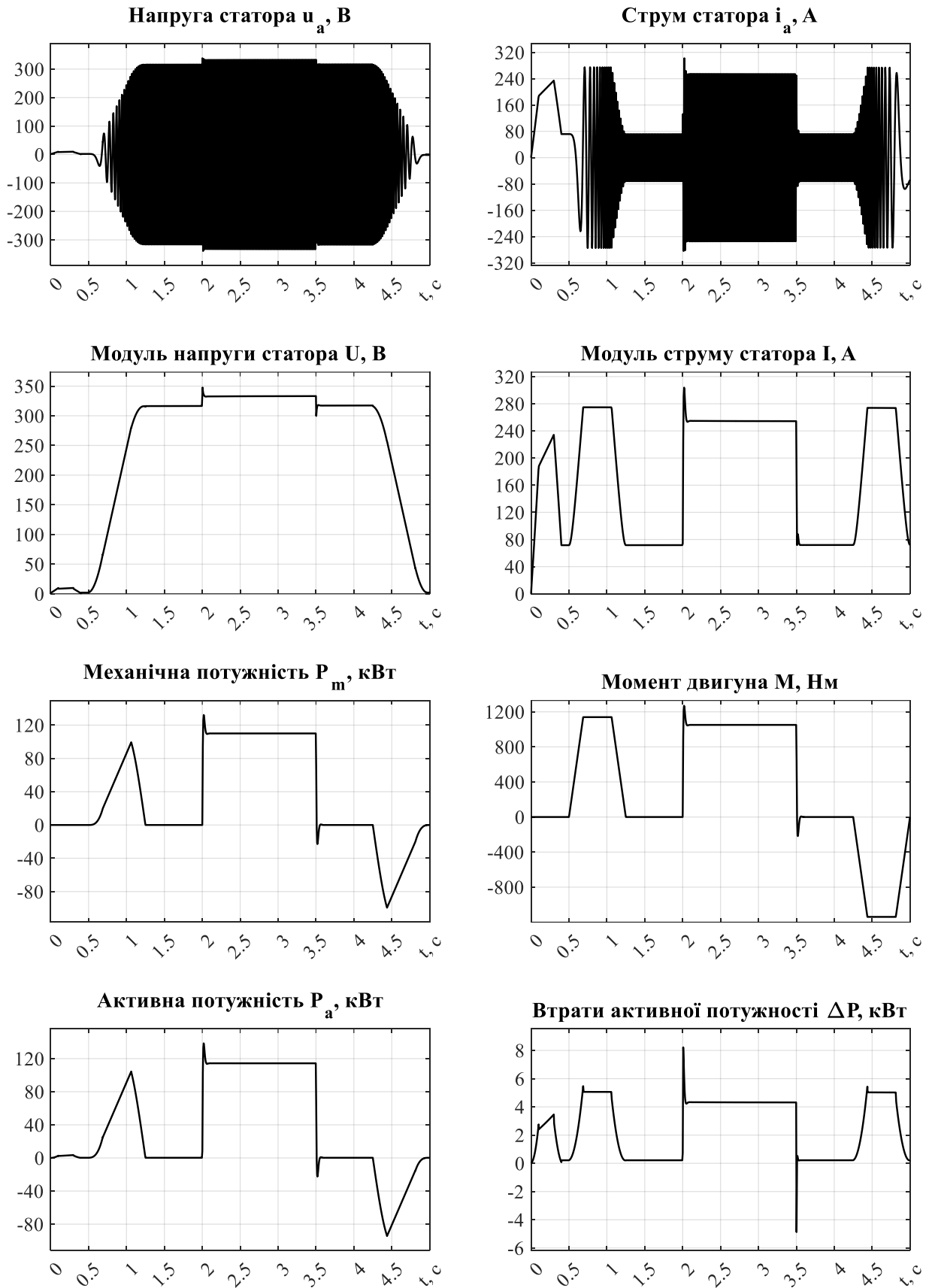


Рисунок 4.9 – Графіки перехідних процесів двигуна для номінальної швидкості з номінальним навантаженням

Аналізуючи діаграму перехідної характеристики регулювання швидкості, ми спостерігаємо відсутність похибок під час прискорення та уповільнення, що досягається завдяки компенсаційним діям першого та другого порядку в заданні швидкості. При застосуванні та знятті статичного моменту навантаження з'являються динамічні похибки через невимірювання моменту навантаження. Наявність ПІ-регулятора гарантує відсутність статичних похибок.

На діаграмі регулювання потягоцеплення помилка виконання потягоцеплення дорівнює нулю, що є результатом роботи регулятора модуля потягоцеплення ротора та виключення збурень у підсистемі регулювання потоку, завдяки ізоляції процесів керування в електромагнітних та електромеханічних підсистемах.

Моментотворюючий струм ідеально корелює з кривою моменту двигуна. З діаграм струму та моменту видно вплив формування динамічного моменту та відповідної моментної складової струму на етапах прискорення та уповільнення.

На етапах холостого ходу в моделі двигуна не спостерігається ні момент, ні струм через виключення з моделювання в'язкого опору.

Керуючи напругами, досягається необхідна форма струму по осям (d) і (q).

На діаграмах напруги та струму по осі а представлено напругу і струм, які визначають реальні фазові значення напруги і струму у фазі А.

З даних графіка механічної потужності можна оцінити вихідну потужність двигуна. Граф активної потужності показує потужність, яку двигун отримує від інвертора. При номінальному навантаженні за допомогою графіків механічної та активної потужностей можливо оцінити номінальний ККД двигуна.

З графіка активних втрат потужності видно, що активні втрати пропорційні до моменту двигуна.

## ВИСНОВКИ

Впровадження автоматизованого електроприводу значно покращує продуктивність та точність стругального процесу. Зменшення втрат часу на перенастроювання і підготовку верстату під конкретні завдання сприяє збільшенню загального виробничого ефекту.

Електропривід забезпечує високу точність у керуванні подачею і швидкістю руху інструменту. Це дозволяє досягати однакових результатів у виробництві та підвищує якість виготовлених деталей.

Автоматизація веде до зменшення витрат на операційні та технічні перерви, підтримку обладнання та витрат на електроенергію, що призводить до зниження загальних виробничих витрат.

Модернізація системи керування сприяє підвищенню рівня безпеки для операторів, оскільки автоматизований електропривід забезпечує автоматичне виявлення та реагування на потенційно небезпечні ситуації.

Розвиток технологій у сфері автоматизації дозволяє передбачити інтеграцію додаткових функцій, таких як системи моніторингу та прогнозування, що підвищують надійність і доступність обладнання.

У сучасному промисловому виробництві автоматизація та безпека праці є важливими аспектами, сприяючи підвищенню ефективності виробництва та зниженню ризиків для працівників.

Однією з ключових складових є автоматизовані електроприводи, які забезпечують точність, швидкість та надійність роботи промислових верстатів. У цьому контексті особливе значення має автоматизований електропривід подовжньо-стругального верстату.

Автоматизований електропривід подовжньо-стругального верстату виконує ключові функції контролю швидкості, тиску та позиціонування різального інструменту. Це дозволяє досягти високої точності обробки матеріалів, що важливо для виробництва деталей з високими технічними вимогами.

Однак, разом з перевагами автоматизації приходить і питання безпеки праці. З урахуванням потужності та швидкості рухомих частин верстату, необхідно вживати відповідні заходи для запобігання травматизму працівників. Це включає в себе встановлення захисних кожухів, систем аварійного вимкнення та обов'язкове проходження навчання з питань безпеки для персоналу.

Таким чином, автоматизовані електроприводи для подовжньо-стругальних верстатів не лише сприяють підвищенню продуктивності виробництва, але й вимагають виваженого підходу до організації безпечних умов праці. Інтеграція сучасних технологій та строго дотримання стандартів безпеки дозволяє досягти оптимального балансу між ефективністю виробництва та захистом працівників від можливих ризиків.

Автоматизовані електроприводи для подовжньо-стругальних верстатів є ключовим елементом в сучасній промисловості, що дозволяє підвищити якість та точність виробництва. З урахуванням їхніх переваг необхідно також надавати пріоритет безпеці праці, щоб забезпечити безпечні умови для персоналу.

Ці висновки підкріплені результатами досліджень та практичними випробуваннями, що підтверджують переваги впровадження автоматизованого електроприводу в контексті стругального верстату.

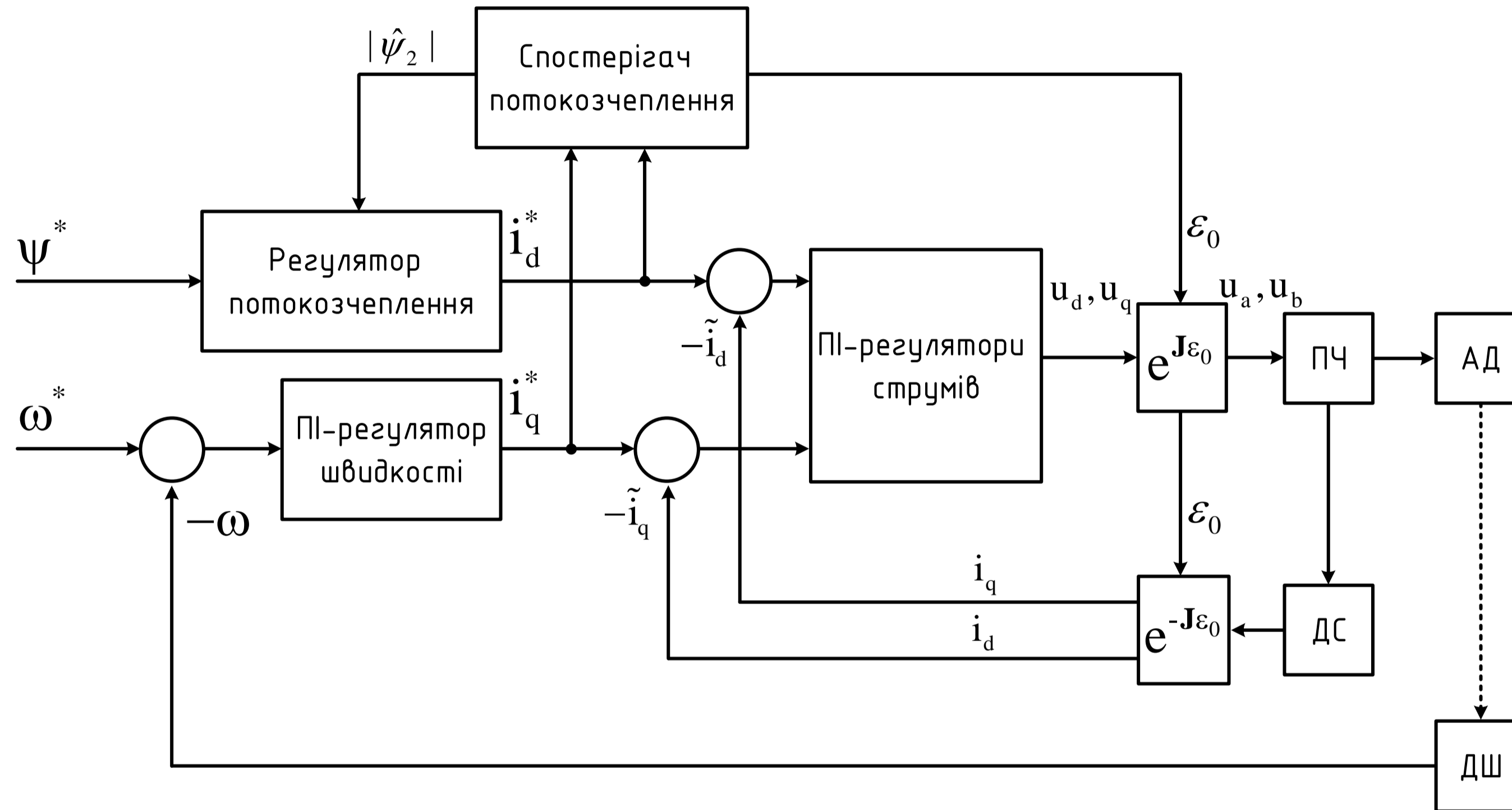
## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Верстати стругально протяжної групи.  
URL:<https://studfile.net/preview/5083095/page:2/>
2. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи/  
За редакцією М.Г.Поповича, О.Ю.Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
3. Красношарпа Н.Д., Піжов В.М., Пушкар М. В. Теорія електроприводу.  
Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт – Київ КПІ ім. Ігоря  
Сікорського 2017. – 49с.
4. Металообробні верстати: види, призначення, характеристики. URL:  
<https://storgom.ua/ua/novosti/chto-takoe-metalloobrabatyvayushie-stanki.html>
5. Онущко В.В., Галай В.М. Передавальна функція асинхронного двигуна  
при частотному керуванні. Вісник КДПУ “Проблематика вищої школи.  
Електромеханічні системи та автоматизація. Енергетика та енергозбереження.  
Діагностика в електромеханічних та енергетичних системах. Моделювання та  
методи оптимізації”. Кременчук: 2003 (19), вип. 2, с. 131 – 135.
6. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів  
різанням: Навчальний посібник. – Київ: УкрНДІАТ, 2003. -383 с.
7. Теорія мехатронних систем – 1: Методичні вказівки до виконання  
розрахунково-графічної роботи для студентів заочної форми навчання напряму  
підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні  
системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса.  
–К.: НТУУ “КПІ”, 2011 р.
8. Principles of Shearing, Blanking, and Piercing, Metalworking: Sheet  
Forming, Vol 14B, ASM Handbook, Edited By S.L. Semiatin, ASM International,  
2006, p 28–38, <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v14b.a0005116>
9. The Slitting Line and Steel Slitting Process Explained. Стаття компанії  
National Material Company. URL: <https://www.nationalmaterial.com/the-slitting-line-and-steel-slitting-process-explained>

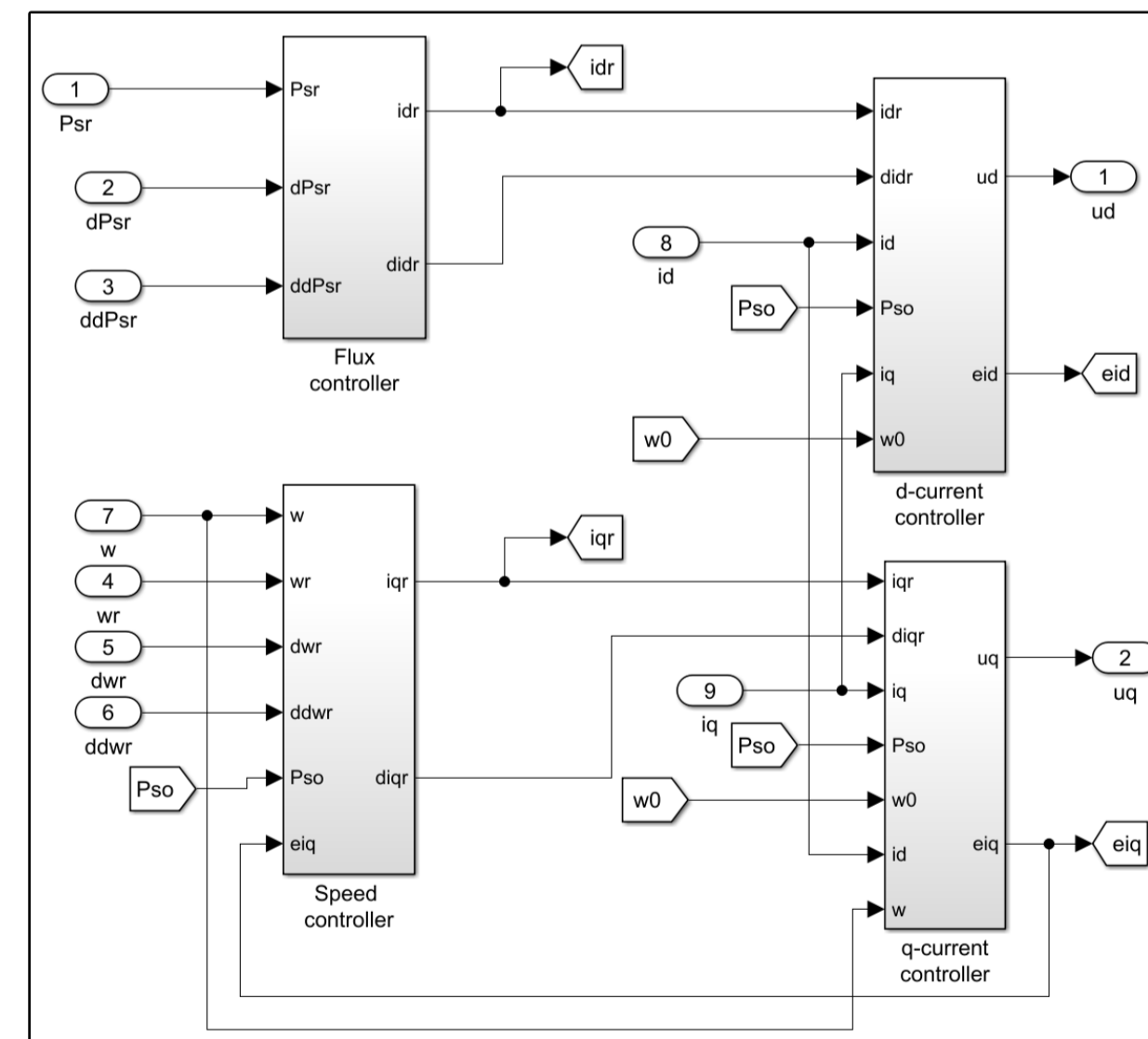
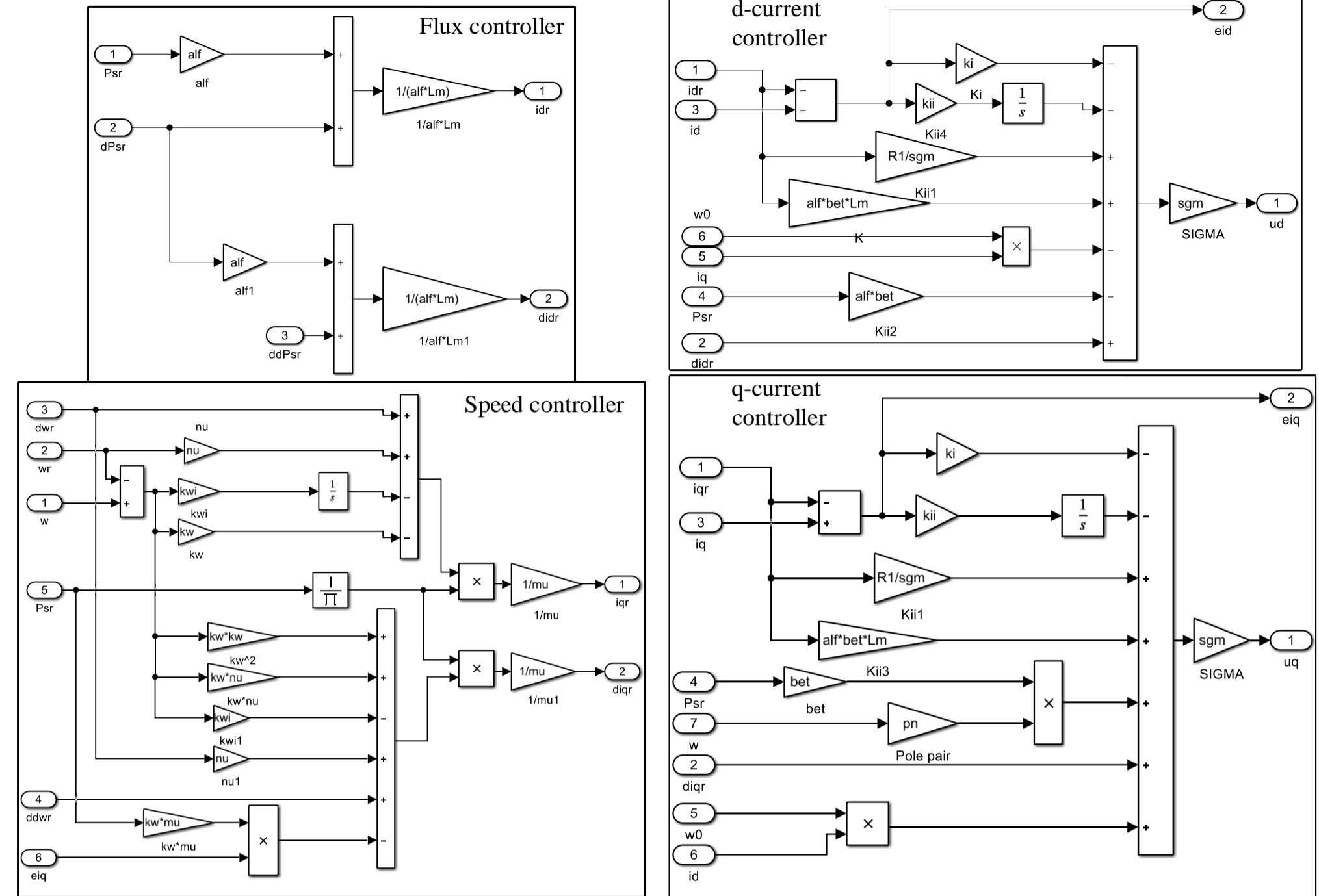
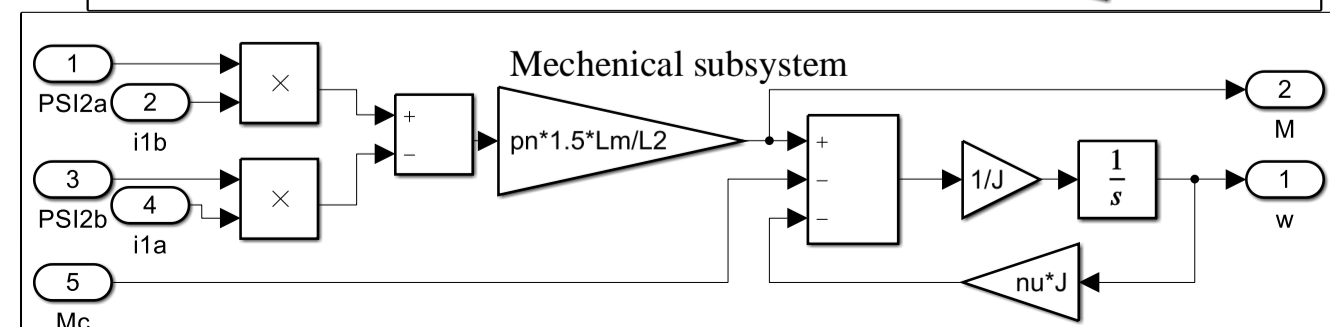
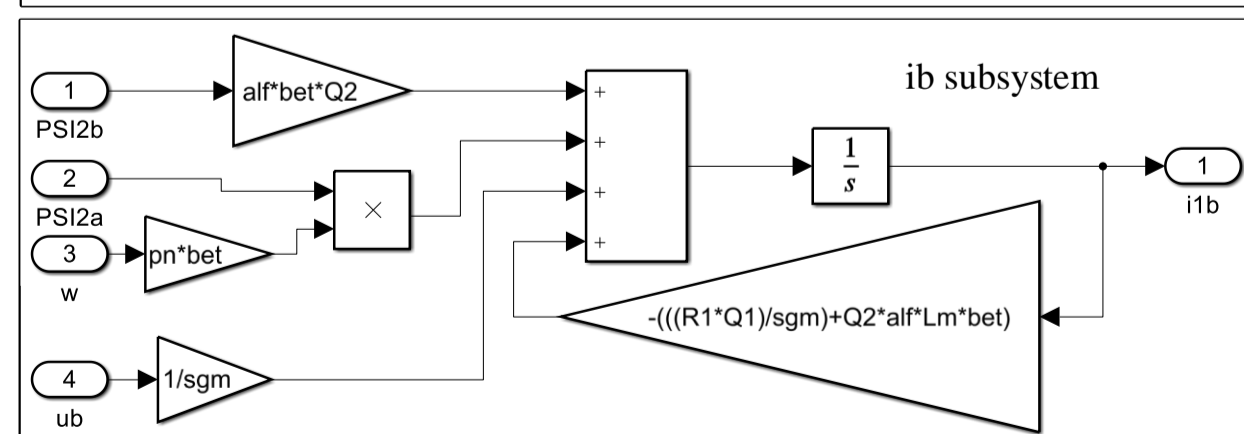
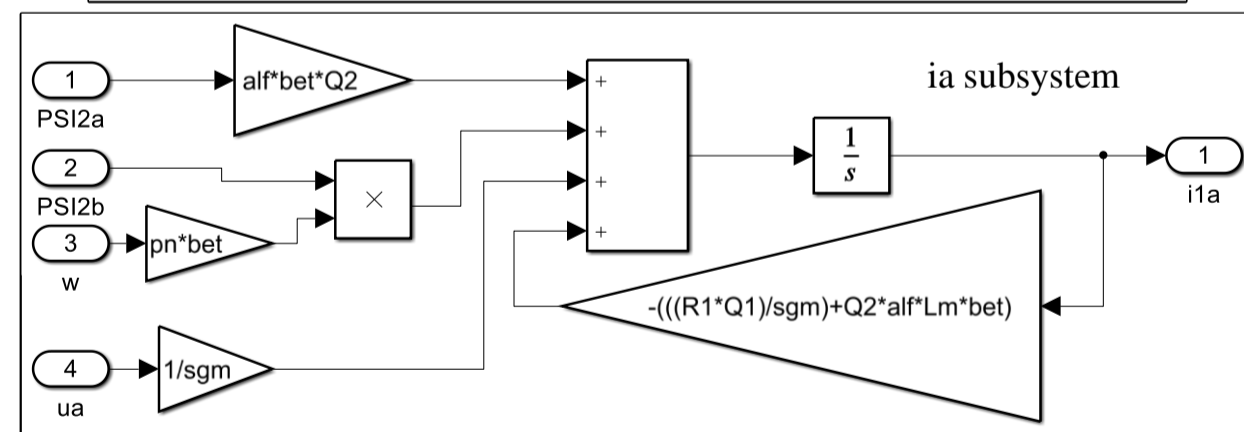
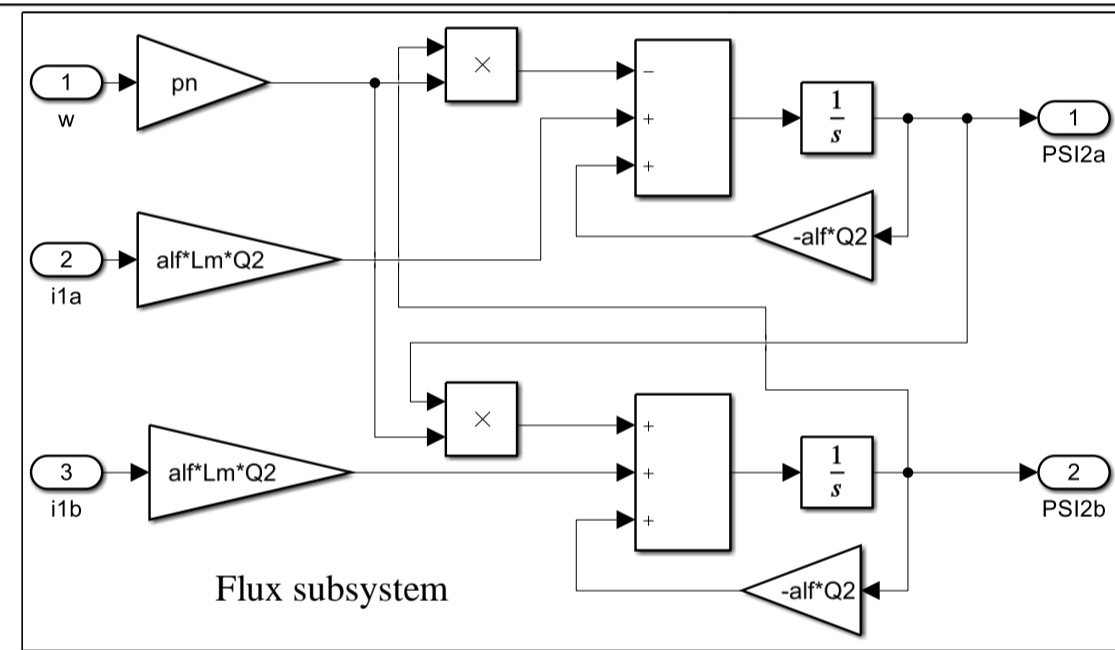
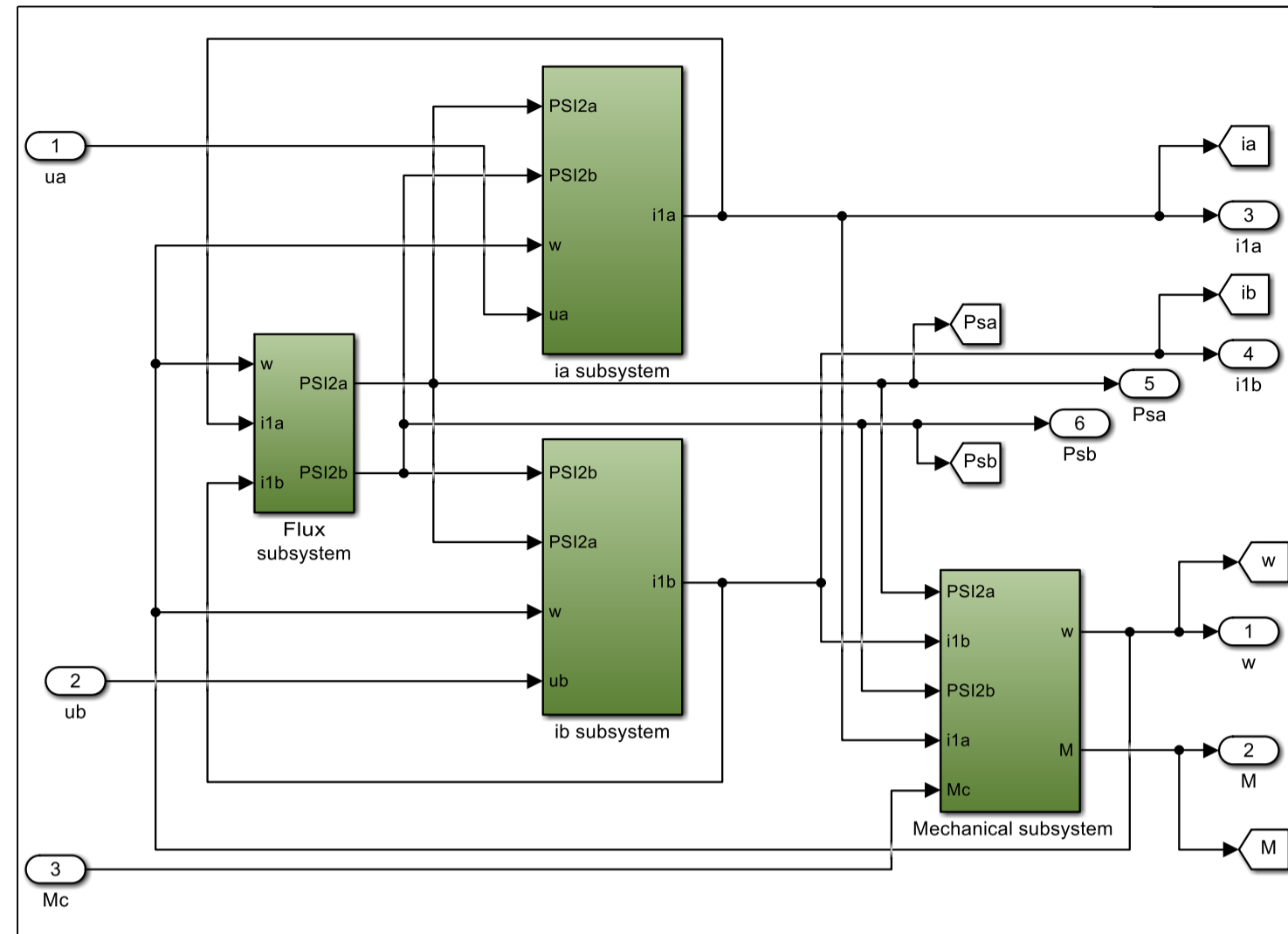
10. Slitting Process Explained. Стаття компанії Fisco. URL: <https://www.fisco.net/blog/slitting-process-explained>

11. Sheet metal processing equipment catalogue. Каталог компанії ATM Engineering. URL: <https://www.ersengine.com/wp-content/uploads/2019/05/Sheet-metal-processing-equipment-ERS-AMT.pdf>

12. The Complete Manual on Cutting Machines in the Steel Industry. Стаття компанії Steel Technology. URL: <https://www.steel-technology.com/articles/the-complete-manual-on-cutting-machines-in-the-steel-industry>



						<b>141.ЕП02.005.01</b>		
						Структурна системи керування електроприводом		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		Літ.	Маса	Масштаб
Розробив		Гребінник О.Д.						
Перевірив		Сергієнко О.В.						
						Аркуш	1	Аркушів
						3		
Н. контр.		Сергієнко О.В.				НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕА, каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП-02		
Затверд.								

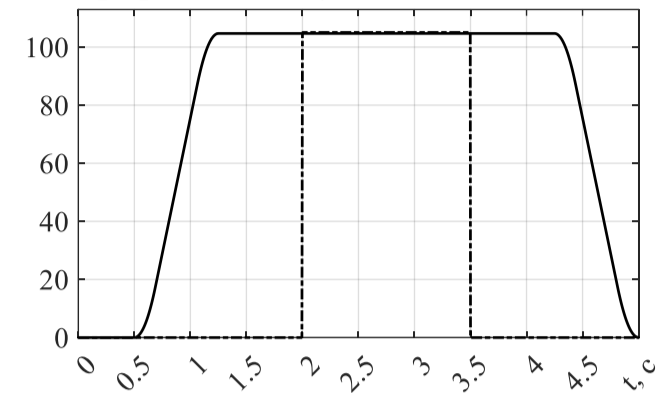


Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розробив	Гребінник О.Д.			
Перевірив	Сергієнко О.В.			
Н. контр.	Сергієнко О.В.			
Затверд.				

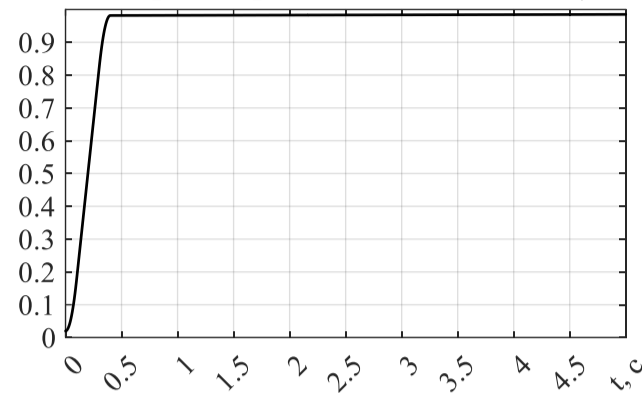
141.ЕП02.005.02		
Структурні моделі АД та алгоритму керування		
Літ.	Маса	Масштаб
Аркуш 2	Аркушів 3	
НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕА, каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП-02		

Графіки перехідних процесів двигуна для номінальної швидкості з номінальним навантаженням

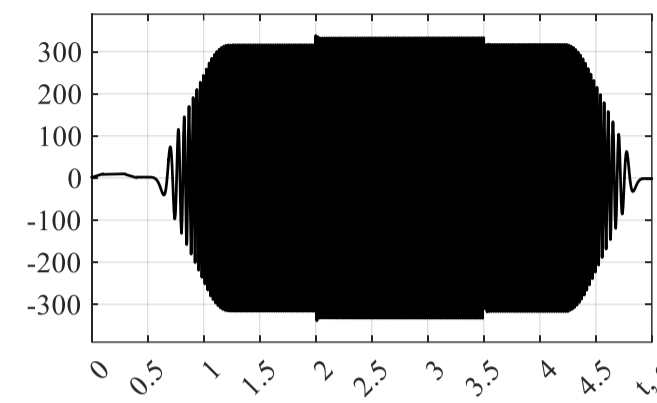
Задана траєкторія швидкості  $\omega^*$ , рад/с, та профіль моменту навантаження, 0.1·Нм



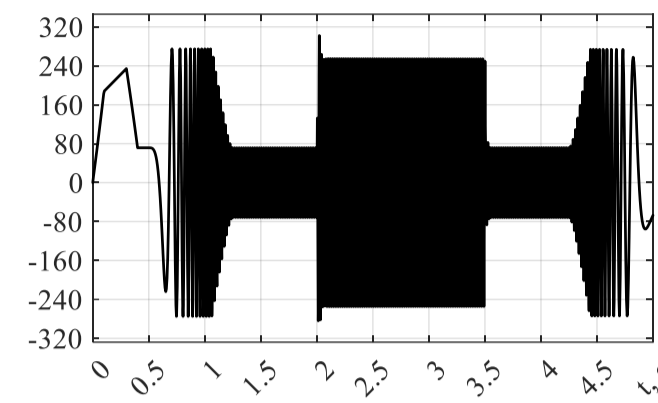
Задана траєкторія потокозчеплення  $\psi^*$ , Вб



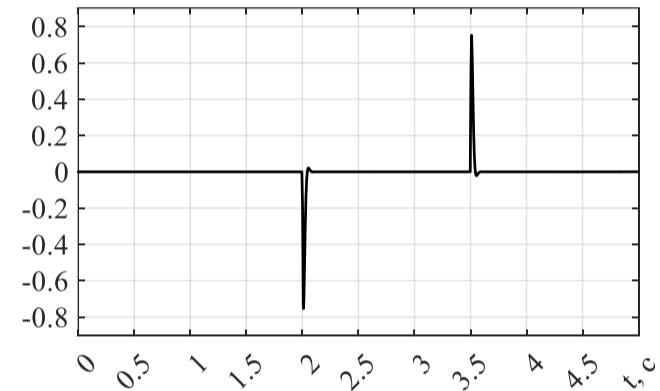
Напруга статора  $u_a$ , В



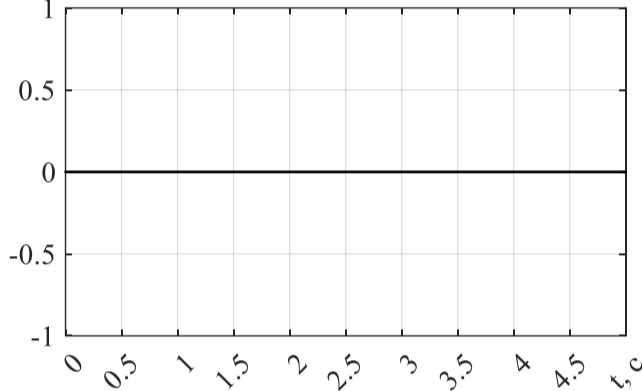
Струм статора  $i_a$ , А



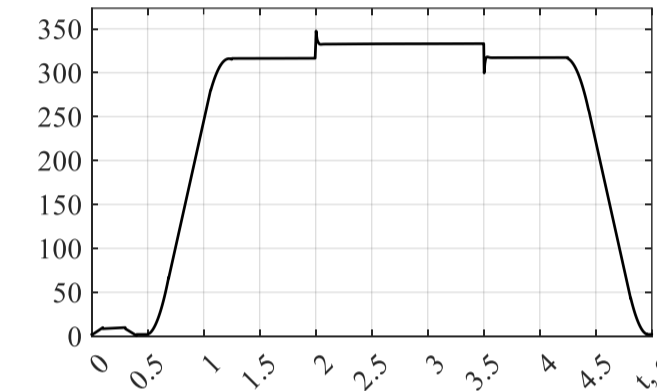
Похибка регулювання швидкості  $\omega$ , рад/с



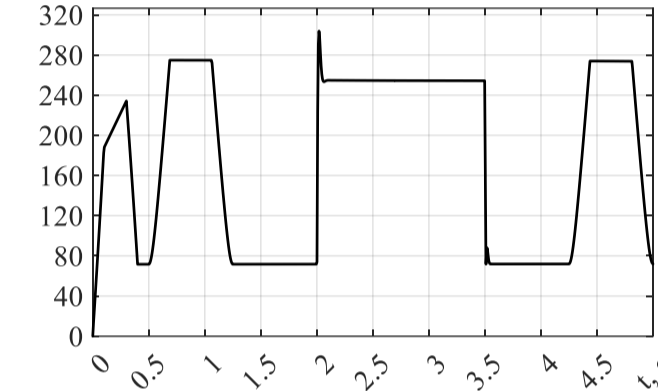
Похибка регулювання потоку  $\psi$ , Вб



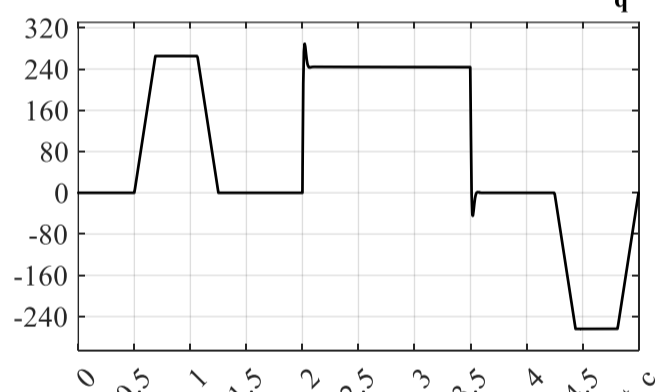
Модуль напруги статора  $U$ , В



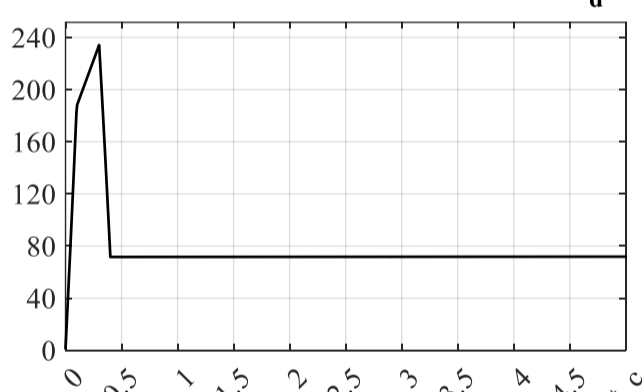
Модуль струму статора  $I$ , А



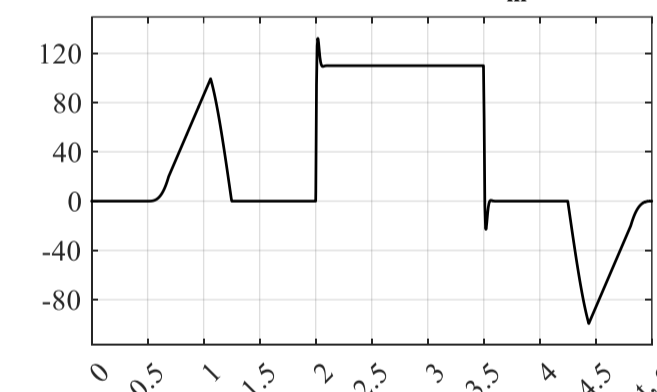
Заданий моментоутворюючий струм  $i_q^*$ , А



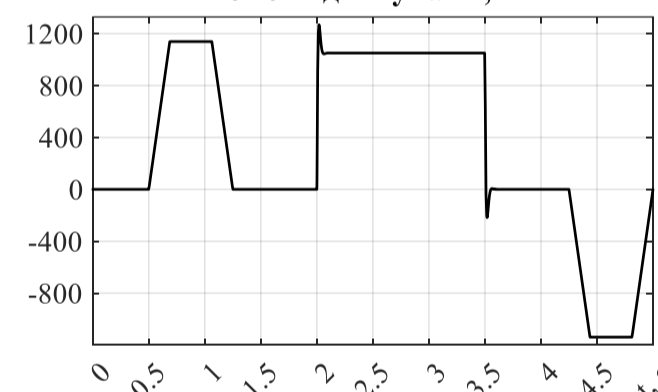
Заданий потокоутворюючий струм  $i_d^*$ , А



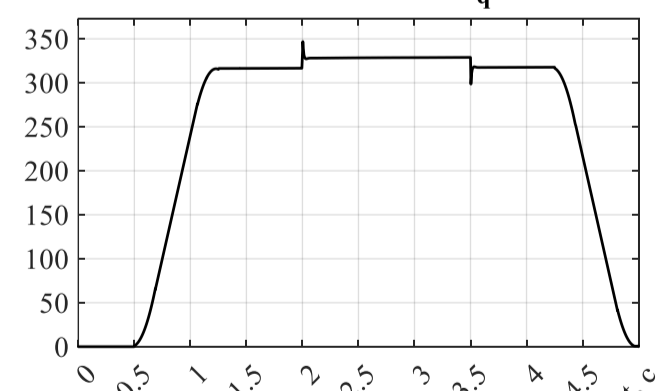
Механічна потужність  $P_m$ , кВт



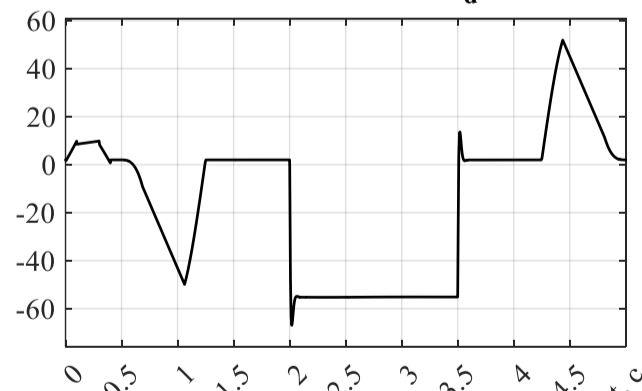
Момент двигуна  $M$ , Нм



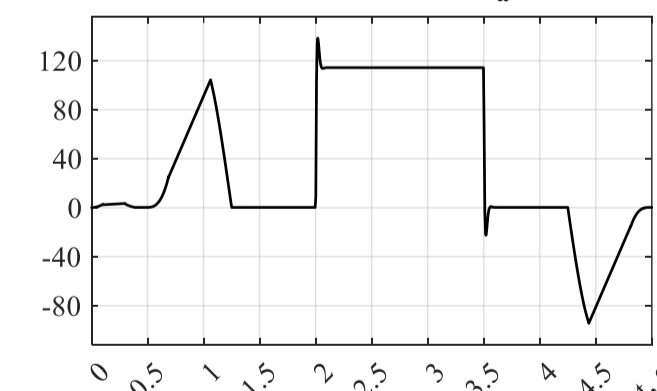
Керуюча напруга  $u_q$ , В



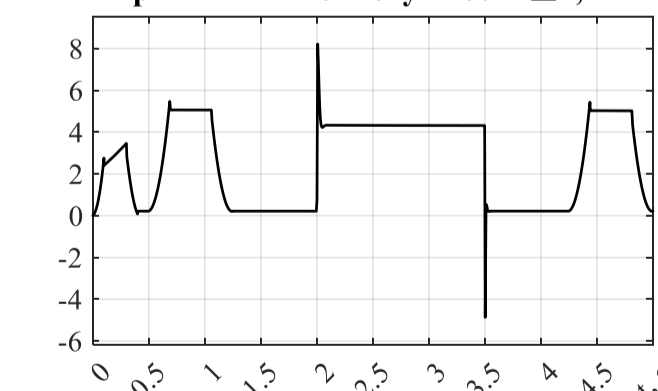
Керуюча напруга  $u_d$ , В



Активна потужність  $P_a$ , кВт



Втрати активної потужності  $\Delta P$ , кВт



						14.1.ЕП02.005.03		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Результати моделювання			
Розробив	Гребінник О.Д.							
Перевірив	Сергієнко О.В.				Літ.	Маса	Масштаб	
					Аркуш	З	Аркушів	
Н. контр.	Сергієнко О.В.				НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕА, каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП-02			
Затверд.								