

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ННІ/факультет	Навчально-науковий технологічний інститут
Кафедра	Електричної інженерії та автоматизації
Спеціальність	141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Форма навчання	заочна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Свищ Андрій Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему Електромеханічне обладнання металургійного виробництва.

Асинхронний регульований електропривод горизонтально-фрезерного верстата

на основі двигуна змінного струму

(повна назва теми)

за матеріалами

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник

К.Т.Н., доцент

-

Пироженко А.В.

(наук. ступінь, вчене звання)

(підпис)

(прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від _____ 2026__р. № _____

Завідувач кафедри

(підпис)

Є.О. Модло

Наук. ступінь, вчене звання

Ініціали, прізвище

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра Електричної інженерії і автоматизації

Рівень вищої освіти бакалавр

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Електричної інженерії і автоматизації

В.о. зав. каф.

Модло Є.О.

(підпис)

(посада, вчене звання,
прізвище ініціали)

«____»

2026__ року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ(КИ)

Свищ Андрій Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Асинхронний регульований електропривод горизонтально-фрезерного верстата на основі двигуна змінного струму.

керівник кваліфікаційної роботи Пироженко Андрій Володимирович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «06»04.2026 р. № 237-ст

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 01.06.2026

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи бакалавра: статті, патенти, промислові дослідження

Об'єкт розробки і дослідження – асинхронний регульований електропривод горизонтально-фрезерного верстата на основі двигуна змінного струму.

Характер навантаження – повторно-короткочасний (S3), з переважанням динамічних моментів і постійним статичним моментом опору ($M_c = \text{const}$), з частими пусками, гальмуваннями та реверсами.

Тип системи електроприводу: рід струму – змінний, електродвигун постійного струму (ДПС); тиристорний перетворювач частоти – нереверсивний (або реверсивний за потреби), напруга змінного струму 380 В, відхилення напруги мережі +10 %, -15 %, частоти мережі 50 Гц ± 2 %. Діапазон регулювання – 1:100 Електропривод реверсивний. Передбачено захист від перевантажень та коротких замикань. Перерегулювання швидкості трохи більше 10%. Час регулювання швидкості трохи більше 6с

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

4.1 Аналітична частина;

4.2 Основна частина.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1 Кінематична схема

2 Функціональна схема

3 Структурна схема

4 Структурна схема САУ

5 Схеми моделювання

6 Результати моделювання

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 Аналітична частина	к.т.н., доцент Пироженко А.В.		
2 Основна частина	к.т.н., доцент Пироженко А.В.		

7. Дата видачі завдання «__06__» ____04____ 2026р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	30.04.2026	
2.	Основна частина	05.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	11.05.2026	
4.	Виконання графічної частини	26.05.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	01.06.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	17.06.2026	

Студент

(підпис)

Свищ А. І.
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Пироженко А.В.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Свищ А. І. «Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Асинхронний регульований електропривод горизонтально-фрезерного верстата на основі двигуна змінного струму» - Бакалаврська робота. - Кривий Ріг, 2026. 75 с., 34 рис., 6 табл., 15 джерел.

Об'єкт дослідження - асинхронний регульований електропривод горизонтально-фрезерного верстата на основі двигуна змінного струму.

Предмет дослідження - режими роботи, статичні та динамічні характеристики горизонтально-фрезерного верстата на основі двигуна змінного струму.

Мета роботи - розробка та дослідження системи горизонтально-фрезерного верстата на основі двигуна змінного струму, яка забезпечує високу надійність, необхідну динаміку перехідних процесів та узгодженість роботи з головним приводом стана в умовах важких ударних навантажень.

У роботі розроблено систему модернізації електропривода горизонтально-фрезерного верстата шляхом заміни ступінчастої коробки швидкостей на частотно-регульований асинхронний привід із векторним керуванням. Автором обґрунтовано застосування методу математичного розділення струму статора на складові потоку та моменту, що забезпечує сталість крутного моменту на валу шпинделя та «жорстку» механічну характеристику під час врізання інструмента в метал. За допомогою імітаційного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink підтверджено високу динамічну точність системи, її стійкість до накидів навантаження та мінімізацію перехідних процесів. Впровадження цієї системи дозволяє зменшити пускові струми в 4-5 разів, скоротити енергоспоживання на 20-30 % та суттєво подовжити термін експлуатації механічних вузлів верстата.

Ключові слова: горизонтально-фрезерний верстат, електропривод, система автоматичного регулювання, оптимізація, частотно-регульований асинхронний електропривод з векторним управлінням

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Технологічний процес металообробки на горизонтально-фрезерних верстатах	10
1.2 Опис, кинематика та особливості горизонтально-фрезерного верстата 6М82	14
1.3 Вимоги до електроприводу горизонтально-фрезерного верстата 6М82	19
1.4 Обґрунтування вибору типу електроприводу	20
1.4.1 Статичні та динамічні характеристики	20
1.4.2 Енергетичні аспекти та перехідні процеси	21
1.4.3 Надійність електромеханічного перетворення	21
1.5 Функціональна схема	22
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	27
2.1 Вибір та перевірка асинхронного двигуна	27
2.2 Обґрунтування вибору перетворювального пристрою та методу управління	30
2.3 Аналіз узгодженості системи "перетворювач - двигун"	35
2.4 Структурна схема лінеаризованої безперервної САУ РЕП частотно-регульованого асинхронного електроприводу з векторним управлінням	42
2.5 Складання рівнянь динаміки системи автоматизованого електроприводу для математичної моделі автоматичного управління	44
2.5.1 Опис електромагнітних та механічних процесів асинхронної машини	44
2.6 Перевірка правильності роботи асинхронного ЕП із векторним управлінням на базі моделі АД	53
2.6.1. Робота асинхронного ЕП із векторним керуванням на базі моделі АД у системі координат, що обертається, з орієнтацією по вектору потокозчеплень ротора	53

2.6.2 Робота асинхронного ЕП із векторним керуванням на базі моделі АД у стаціонарній системі координат	55
2.6.3. Нелінійна САУ електроприводу	59
2.6.4 Дослідження зміни величини перерегулювання замкнутого контуру при подачі різних U_{zc}	61
2.7 Заходи із охорони праці та безпеки при експлуатації горизонтально-фрезерного верстата	66
2.7.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів при експлуатації горизонтально-фрезерного верстата	66
2.7.2 Засоби зниження дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників	66
2.7.3. Пожежна безпека та санітарія	68
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	74

ВСТУП

Сучасне машинобудування та будівельний сектор неможливо уявити без високоточних технологій обробки металів. Сьогодні попит на якісні послуги у цій сфері постійно зростає, що ставить перед інженерами завдання щодо забезпечення максимальної ефективності та надійності верстатного парку.

Основу силових агрегатів у промисловості становлять асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Однак експлуатація таких машин у нерегульованому режимі часто призводить до надмірного споживання енергії та передчасного зносу механічних вузлів [1]. Використання систем частотного керування на основі сучасних напівпровідникових перетворювачів та мікропроцесорної техніки дозволяє радикально змінити ситуацію. Це не просто питання про економію, а стандарт сучасного виробництва, що забезпечує гнучкість налаштування та довговічність обладнання.

Останні п'ять років умови експлуатації промислового устаткування значно змінилися. Необхідність оновлення електроприводу горизонтально-фрезерного верстата сьогодні диктується кількома критичними факторами: енергетична стійкість та захист від збоїв: в умовах нестабільності енергосистеми, частих блекаутів та раптових відключень живлення, старі системи управління виявляються вразливими [2]. Модернізований привід з сучасними перетворювачами частоти дозволяє реалізувати алгоритми безпечного заново, підхоплення двигуна, що обертається, і захисту обмоток від кидків струму при відновленні електропостачання [3]. Це мінімізує ризик поломки дорогого ріжучого інструменту та нестачі заготовок.

Нові напрями в електромеханіці зміщуються у бік "розумних" верстатів. Впровадження частотного регулювання дозволяє інтегрувати верстат у цифрові системи управління виробництвом, забезпечуючи точну адаптацію моменту, що крутить, під конкретні режими фрезерування в реальному часі.

Досвід останніх років показав, що орієнтація виключно на закордонні сервісні пакети може бути ризикованою. Створення електроприводу на базі

доступних та ефективних компонентів змінного струму вирішує проблему дефіциту специфічних вузлів постійного струму та підвищує загальну ремонтпридатність верстата.

В умовах зростання вартості ресурсів перехід на регульований асинхронний привід – це єдиний спосіб знизити експлуатаційні витрати та зробити виробництво конкурентоспроможним.

Таким чином, метою даної роботи є проектування та обґрунтування впровадження регульованого електроприводу змінного струму для горизонтально-фрезерного верстата, який відповідатиме актуальним вимогам безпеки, енергоефективності та технологічної гнучкості.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Технологічний процес металообробки на горизонтально-фрезерних верстатах

Оброблення здійснюється на фрезерних верстатах. Як і більшість верстатів – це технічні системи із високим ступенем складності, [5], і яскраво вираженою динамічною поведінкою, [6,7] та можуть розглядатись як об'єкти теорії автоматичного керування, [8].

Розглядають фрезерні верстати загального призначення, а також спеціалізовані і спеціальні. До верстатів загального призначення відносять горизонтальні, вертикальні і поздовжньо-фрезерні верстати. Серед спеціалізованих верстатів слід виділити шпоночно-фрезерні, копірувально-фрезерні, різе-фрезерні, а також розглядуваний в роботі фрезерно-центрувальний верстат.

Загалом фрезеруванням обробляють зовнішні і внутрішні, плоскі і фасонні поверхні. Це особливо стосується важелів, планок, корпусних та інших деталей, що не є поверхнями обертання. Цим методом місцеві вирізи і зрізи, прорізають прямі і гвинтові канавки, нарізають зуби коліс і різьби.

Оброблення здійснюють багатолезовим інструментом – фрезами різноманітних профілів і конструкцій. Так, площини фрезерують, як правило, торцевими і циліндричними фрезами. Особливий випадок – фрезерування плоских торців при фрезерно-центрувальних операціях. Фрезерування таких поверхонь можна віднести до фрезерування торцевими фрезами.

Фрезерування є високопродуктивним методом обробки металів різанням, при якому обертальний рух багатолезового інструменту (фрези) поєднується з поступальним рухом подачі заготовки. На відміну від точення процес фрезерування характеризується уривчастістю: кожен зуб фрези знаходиться в

контакті з металом лише частину обороту. Ця особливість диктує специфічні вимоги до електроприводу. У момент врізання зуба в метал відбувається стрибкоподібне збільшення навантаження на валу двигуна. При використанні застарілих нерегульованих приводів це призводить до динамічного падіння швидкості, що негативно впливає на чистоту поверхні та ресурс інструменту. Сучасний асинхронний електропривод, що регулюється, з векторним управлінням здатний компенсувати ці мікропадіння швидкості, підтримуючи стабільний момент різання.

Фрезерна обробка є одним із ключових методів формоутворення у сучасному машинобудуванні. На верстатах цієї групи виконуються такі операції, як розкрій заготовок, обробка площин, пазів, уступів, а також нарізування різьблення та створення складних криволінійних поверхонь.

За характером організації процесу обладнання поділяють на дві основні категорії: Верстати з уривчастим циклом: (універсальні, різьбофрезерні та ін.). Процес передбачає паузу у подачі або зворотний хід для переустановки деталі. Верстати з безперервним циклом: (карусельні, барабанні). Закріплення та зняття деталей відбувається безпосередньо під час обертання робочого органу, що значно скорочує міжопераційний час. Для підвищення ресурсу інструменту та зниження вібрацій у сучасних умовах застосовуються фрези з механічним кріпленням змінних багатогранних пластин. Це забезпечує стабільність геометрії ріжучої кромки та скорочує час на переналагодження. Основним показником тут виступає хвилинна подача, що безпосередньо залежить від можливостей електроприводу. Крім прискорення режимів різання, ефективність досягається за рахунок автоматизації керування та швидкої зміни інструменту. Фрезерування характеризується уривчастим характером контакту інструменту з металом, що спричиняє значні коливання навантаження. Це вимагає від технологічної системи високої жорсткості, а від електроприводу – здатності швидко компенсувати динамічні удари та підтримувати стабільний момент.

При фрезерування для здійснення процесу різання застосовують такі відомі конструкції верстатів (табл. 1.1) [1,9,10].

Таблиця 1.1

Відомі конструкції фрезерних верстатів

ВЕРСТАТИ:	
Універсальний	Горизонтальний
	
Консольно-фрезерний	Вертикально-фрезерний
	

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1,9,10]

Основне призначення цих верстатів – оброблення плоских поверхонь способом фрезерування.

В даний час використовують верстати, в яких фрезерні операції поєднуються із іншими, тобто багатоцільові верстати (оброблювальні центри), які виконують як фрезерні так розточувальні роботи (табл. 1.2)

Таблиця 1.2

Багатоцільові фрезерні верстати

Горизонтальний оброблювальний центр

Вертикальний оброблювальний центр


Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1,9,10]

Таким чином, раз процес фрезерування супроводжується різкими стрибками навантаження (силами різання, що коливаються), значить, асинхронний регульований привід повинен володіти хорошими динамічними характеристиками, щоб «тримати» оберти при врізанні фрези в метал.

Метою роботи є розробка електроприводу горизонтально-фрезерного верстата, загальний вигляд якого представлений на рис.1.1-1.2.

1.2 Опис, кинематика та особливості горизонтально-фрезерного верстата 6М82

Верстати моделі 6м82 (рис.1.1-1.2, табл.1.1) призначені для фрезерування площин невеликих деталей різної конфігурації зі сталі, чавуну та кольорових металів циліндричними, дисковими, торцевими, фасонними та іншими фрезами.

Таблиця 1.1

Технічні характеристики горизонтально-фрезерного верстата 6М82

Опис	Од. виміру	Параметри
Розмір столу	мм	320 × 1320
Переміщення	мм	700 × 255 × 320
Мах навантаження на стіл	кг	500
Конус шпинделя	№	ISO 50
Кількість передач		18
Швидкість обертання шпинделя	об/хв	30–1500
Відстань від шпиндельної осі до столу (min-max)	мм	30–350
Потужність двигуна	кВт	9
Габарити:		
Довжина	мм	2294
Ширина	мм	1770
Висота	мм	1665
Вага	кг	2650

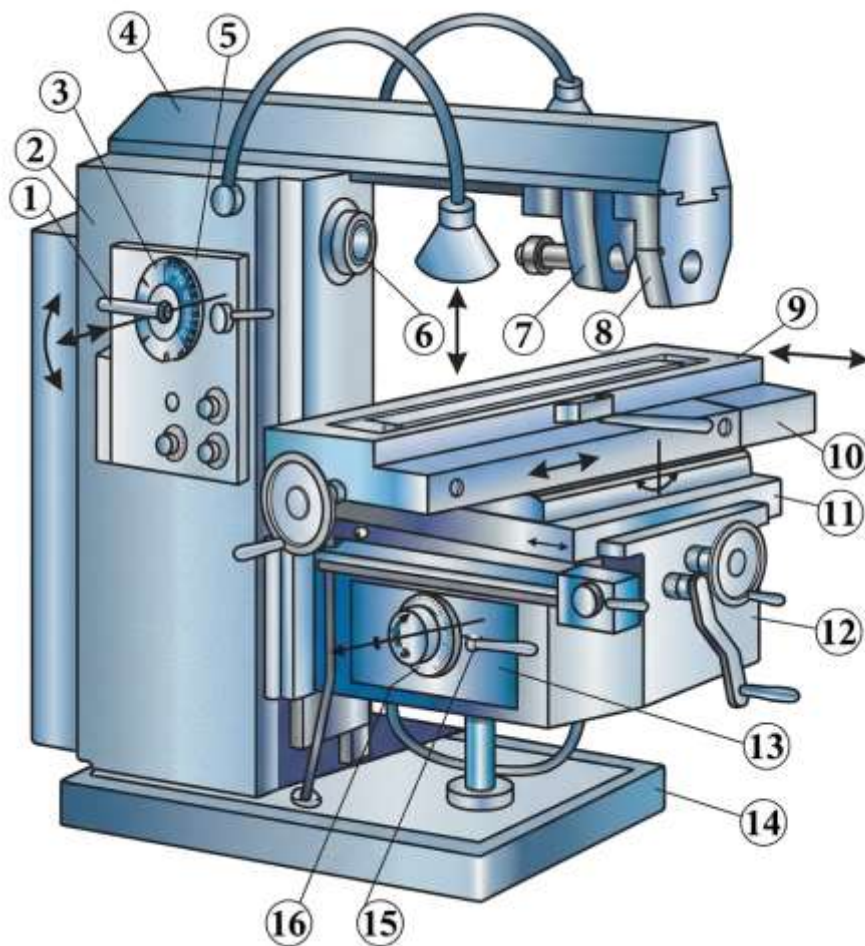
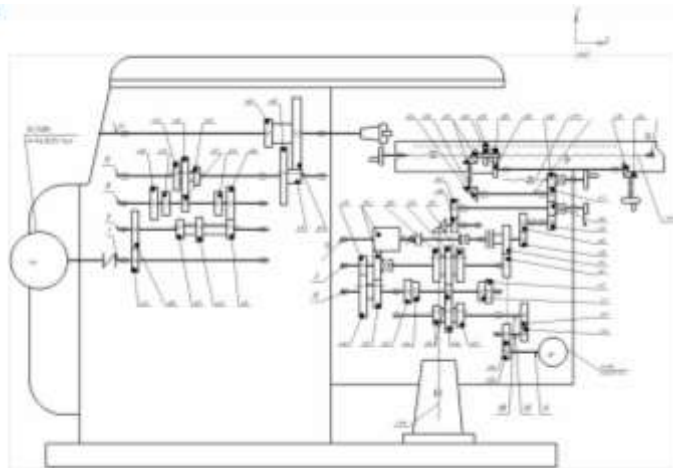
Широка технічна характеристика верстата дозволяє використовувати швидкорізальний інструмент. Застосовується в одиничному, серійному та великосерійному виробництві. Особливості горизонтально-фрезерного верстата 6М82: станина верстата є коробчастою конструкцією з розвиненим ребренням; статичні та динамічні деформації та надає їй необхідної жорсткості системи СНІД; коробка швидкостей із електромагнітною муфтою; окремі приводи попри

всі переміщення; зручне розташування елементів керування верстата, простота налаштування та роботи; автоматична подача та прискорений хід по всіх трьох осях; поворот робочого столу $\pm 45^\circ$.



Рис.1.1. Зовнішній вигляд горизонтально-фрезерного верстата серії 6М82

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]



1, 15 – рукоятка; 2 – станина; 3, 16 – лімб; 4 – хобот; 5 – коробка швидкостей;
6 – шпиндель; 7,8 – підвіски; 9 – стіл; 10 – плита; 11 – санки; 12 – консоль;
13 – коробка подач; 14 – фундаментна плита

Рис.1.2. Зовнішній вигляд горизонтально-фрезерного верстата серії 6М82

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

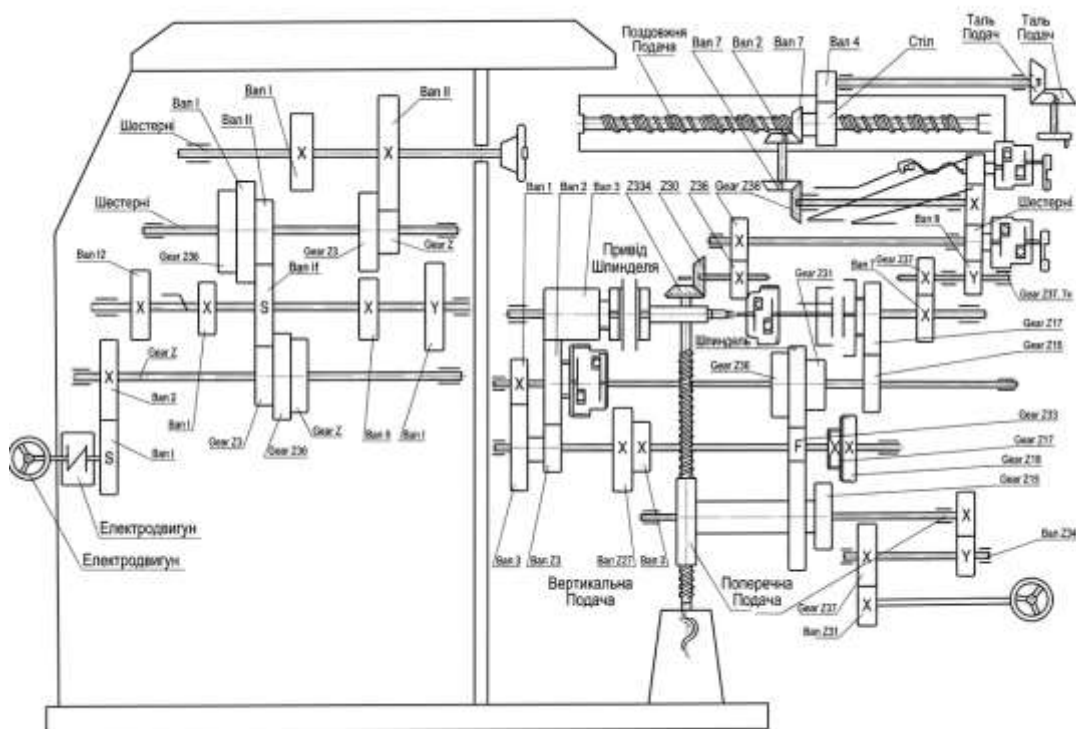
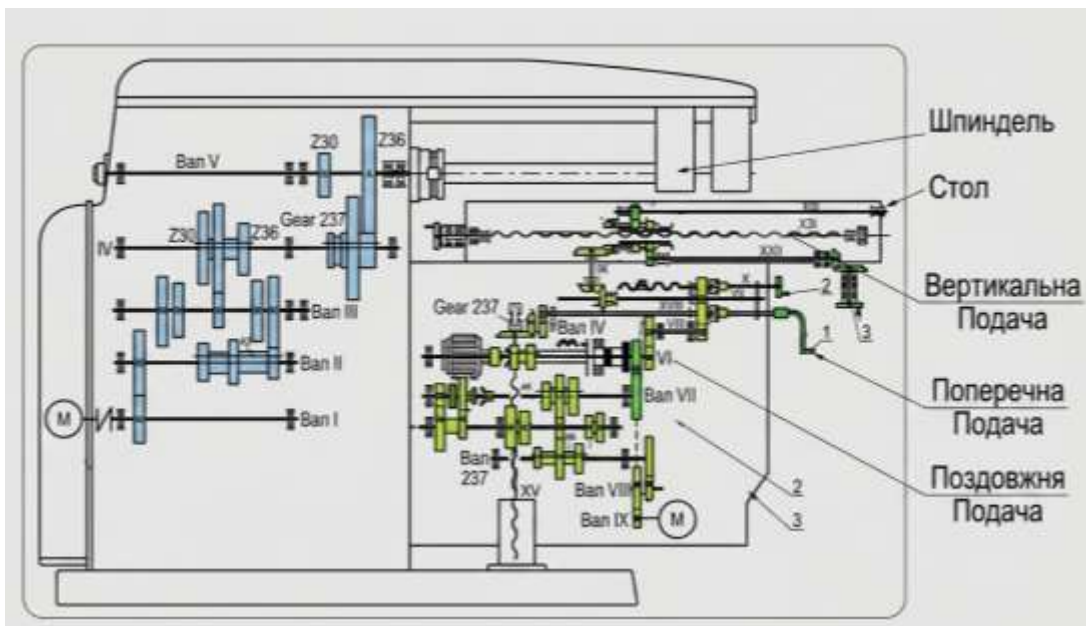


Рис.1.3. Кінематична схема горизонтально-фрезерного верстата серії 6М82

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

Опис кінематичної схеми та принциповий пристрій

Кінематика горизонтально-фрезерного верстата 6М82 є розгалуженою системою механічних передач, що забезпечує координацію між головним рухом

(обертанням інструменту) і рухами подачі (переміщенням заготовки). Кінематична схема складається з наступних елементів:

1. Ланцюг головного руху

Силовий потік починається від асинхронного електродвигуна, розташованого на підставі станини. Через пружну муфту обертання передається на вхідний вал коробки швидкостей.

Коробка швидкостей: є системою ступінчастих валів (Вал I - Вал VI) з пересувними блоками шестерень. У класичній реалізації перемикання блоків забезпечує 18 фіксованих ступенів частоти обертання.

Шпиндельний вузол: Кінцевою ланкою є порожнистий шпиндель, встановлений на прецизійних підшипниках кочення. Висока жорсткість шпинделя дозволяє мінімізувати радіальні биття, що є критичним для якості чистового фрезерування.

2. Ланцюг подач

Привід подач здійснюється від незалежного двигуна, змонтованого консолі верстата. Цей поділ потоків потужності дозволяє налаштовувати швидкість переміщення столу незалежно від обертів шпинделя.

Поздовжнє переміщення: здійснюється через ходовий гвинт (Вал 4), що переміщає робочий стіл.

Поперечне та вертикальне переміщення: реалізуються через систему проміжних валів та гвинтових пар, що передають зусилля на санки та консоль відповідно.

Електроустаткування та система управління

Електрична частина верстата розрахована на підключення до трифазної мережі змінного струму з номінальною напругою 380 і частотою 50 Гц. Залежно від виконання, обладнання може бути адаптоване до інших стандартів (220 або 550 В), а також до частоти мережі 60 Гц.

Конфігурація ланцюгів та захисні функції:

Для забезпечення надійності та безпеки експлуатації електрична схема розділена на рівні: Ланцюги управління: запитані через понижувальний

трансформатор напругою 127 Ст. Ланцюг місцевого освітлення: працює від безпечної напруги 36 В. Система захисту: включає нульовий захист всіх електродвигунів, що запобігає мимовільному запуску при відновленні живлення, а також захист від коротких замикань (плавкі запобіжники) та перевантажень (теплові реле) Органи управління та комутації: Загальне підключення верстата до електромережі здійснюється вступним вимикачем, рукоятка якого виведена на дверцята лівої ніші станини. Привід шпинделя: Кнопкове керування головним двигуном доповнено реверсивним перемикачем, за допомогою якого задається напрямок обертання інструменту (прямий або зворотний). Привід подачі: Управління переміщеннями робочих органів автоматизовано через два командоапарати. Поздовжня подача: включає два кінцеві вимикачі для активації ходу столу вліво або вправо. Поперечна та вертикальна подачі: керуються п'ятипозиційною рукояткою (положення: «вперед», «назад», «вгору», «вниз» та центральне нейтральне).

1.3 Вимоги до електроприводу горизонтально-фрезерного верстата 6М82

Електропривод забезпечує роботу у чотирьох квадрантах. Керуюча постійна напруга змінюється від (-10) до 10 В. Амплітуда пульсацій трохи більше 2 %. Вхідний опір для керуючої напруги 4,74 кОм. Діапазон регулювання частоти обертання електродвигуна від 45 до 4500 хв.⁻¹

Час відновлення номінальної частоти обертання при ступінчастому додатку навантаження від холостого ходу до 11 кВт трохи більше 1 с. У системі автоматичного регулювання частоти обертання тривалий момент та потужність становлять 75 % допустимого значення. Смуга пропускання замкненого за швидкістю електроприводу при частоті обертання 1000 хв.⁻¹ інерції щонайменше 20 Гц. за відсутності додаткового моменту.

При навантаженні, що перевищує максимальний момент $M_{\max}$ подачі або номінальний момент M_H для приводів – для головного приводу, електропривод

відключається за час трохи більше 1,0 с. При відключенні мережі живлення електроприводи гальмуються з максимальним темпом до зупинки двигунів.

Електропривод має систему контролю перегріву електродвигунів. Довжина кабелів зв'язку, що з'єднують частини електроприводу з обладнанням верстата та між собою, повинна бути не більше 30 м.

1.4 Обґрунтування вибору типу електроприводу

Електромеханічне обґрунтування вибору типу електроприводу

Вибір регульованого асинхронного електроприводу (ЕП) для модернізації горизонтально-фрезерного верстата обумовлений необхідністю переходу від жорсткого ступінчастого регулювання до прецизійного керування механічними характеристиками в реальному часі.

1.4.1 Статичні та динамічні характеристики

На відміну від приводів постійного струму (ППТ), де управління базується на незалежному регулюванні потоку збудження та струму якоря, сучасний асинхронний ЕП із частотним керуванням реалізує закон сталості потокозчеплення. Використання алгоритмів векторного управління (Field Oriented Control - FOC) дозволяє математично розділити вектор статора на дві незалежні складові: намагнічуючу і моментоутворюючу. З точки зору електромеханіки це забезпечує:

- високу жорсткість механічної характеристики на наднизьких частотах (аж до нульової швидкості), яка необхідна для режимів важкого силового фрезерування;
- мінімізацію динамічних помилок при ударних навантаженнях.

У момент врізання зуба фрези в метал система керування миттєво форсує момент, компенсуючи падіння кутової швидкості та запобігаючи поломці інструменту.

1.4.2 Енергетичні аспекти та перехідні процеси

З позицій енергоефективності та впливу на мережу, система «перетворювач частоти - асинхронний двигун» (ПЧ-АТ) має наступні переваги:

1. Коефіцієнт потужності ($\cos \phi$): наявність ланки постійного струму в ПЧ дозволяє підтримувати $\cos \phi$ на рівні 0,9 виключає необхідність у додаткових пристроях компенсації реактивної потужності.

2. Оптимізація пускових режимів: частотний пуск дозволяє реалізувати розгін приводу з обмеженням пускового струму на рівні номінального ($I_{\text{пуск}} \approx I_{\text{ном}}$), тоді як прямий пуск супроводжується кидками струму до $7 \cdot I_{\text{ном}}$. Це значно знижує термічний знос ізоляції та ударні навантаження на вали коробки швидкостей.

1.4.3 Надійність електромеханічного перетворення

Основним фактором, що дестабілізує, ППТ в умовах металообробки є щітково-колекторний вузол. Металевий пил, масляний туман та вібрації призводять до інтенсивного зношування щіток та ризику виникнення «кругового вогню» на колекторі. Асинхронний двигун із короткозамкненим ротором конструктивно позбавлений рухомих електричних контактів. Його переваги: Мінімальний момент інерції ротора, що суттєво покращує прийомистість та швидкодію приводу.

Висока перевантажувальна здатність по моменту ($M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} \approx 2.2 \dots 3.0$), що дозволяє короткочасно форсувати режими обробки без ризику виходу машини з ладу.

Впровадження системи ПЧ-АТ дозволяє реалізувати оптимальне двозонне регулювання: Нижче за номінальну частоту: при постійному моменті ($M = \text{const}$), для чорнових операцій. змінного струму є технічно найбільш досконалим рішенням для модернізації верстата 6М82, що забезпечує довговічність обладнання та високу якість продукції.

Асинхронний двигун не має аналогів за простотою та надійністю.

Його перевагами є: масовість, дешевизна та надійність; він може працювати там, де інші двигуни працювати просто не можуть, у запиленому, вибухонебезпечному та агресивному середовищі, у вакуумі та під водою.

Таким чином, для керування приймальним пристроєм було обрано електропривод змінного струму з урахуванням перетворювача частоти.

1.5 Функціональна схема

Відомо, що у векторних системах управління найпростіше реалізується з регуляторами в системі координат, що обертається. Однак така реалізація вимагає запровадження додаткових блоків перетворення координат з системи, що обертається x, y в нерухому a, b (пряме перетворення) і навпаки з нерухомої a, b в x, y (Зворотне перетворення). Функціональна схема векторної системи управління АТ з непрямою орієнтацією по полю з регуляторами, виконаними в системі координат, що обертається, представлена на рис. 1.4.

Перелік позначень функціональної схеми керування

У розробленій функціональній схемі електроприводу прийняті такі літерні та графічні позначення ключових вузлів системи:

М (Asynchronous Motor): Виконавчий трифазний асинхронний двигун із короткозамкненим ротором. Є основним електромеханічним перетворювачем енергії, що забезпечує обертання верстата шпинделя.

АІН (Voltage Source Inverter): Автономний інвертор напруги. Виконує функцію формування вихідної змінної напруги заданої частоти та амплітуди методом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Є силовим вузлом перетворювача частоти.

Ф (Signal Filter): Фільтр придушення перешкод та апаратної фільтрації. Призначений для стабілізації вхідних сигналів, що управляють. Основне завдання вузла - придушення високочастотних перешкод та згладжування

пульсацій аналогових входів шляхом математичного усереднення сигналу відповідно до заданих параметрів фільтрації (згідно з табл. 1.2).

АЦП - аналого-цифровий перетворювач (два 10-ти розрядних перетворювача, час перетворення 10 мкс);

BQ – імпульсний датчик положення;

БРС – блок розрахунку швидкості. Час розрахунку сигналу датчика (0,5-16 мкс) при використанні імпульсного датчика положення на 2500 імпульсів встановлюється відповідно до таблиці 1.3.

БРЗК - розрахунковий блок. Обчислює значення швидкості обертання вектора потокозчеплення ω_K при непрямій орієнтації по полю.

БРП – блок розрахунку потокозчеплення Ψ_{2x} ;

БУП – блок кутового перетворення. Обчислює кутове положення вектор потокозчеплення:

$$\theta = \int_0^t \omega_K \cdot dt,$$

де ω_K - швидкість обертання вектора потокозчеплення;

БК – блок компенсації ЕРС двигуна;

БРЗП – блок розрахунку завдання магнітного потоку. Формує $U_{3\psi}$ в залежно від величини заданої швидкості;

РС – регулятор швидкості (ПІ-регулятор);

Р Ψ – регулятор потокозчеплення;

РТ $_x$ – регулятор струму в контурі намагнічування (ПІ-регулятор);

РТ $_y$ – регулятор струму (ПІ-регулятор)

Таблиця 1.2

Параметри налаштування фільтрації вхідних сигналів

Значення параметра уставки	Функція (кількість значень, за якими проводиться усереднення)	Час коригування
0	Без усереднення	128 ~~мкс~~
1	2	256 ~~мкс~~
2	4	512 ~~мкс~~
3	8	1 мс
4	16	2 мс
5	32	4 мс
6	64	8 мс
7	128	16 мс
8	256	32 мс
9	512	64 мс
10	1024	128 мс

$$\omega_K = \omega \cdot z_p + \beta = \omega \cdot z_p + \frac{I_{1y}}{I_{1x}} \cdot \frac{R_2}{L_2};$$

Таблиця 1.3

Параметри дискретизації та роздільна здатність за швидкістю

Значення параметра	Період дискретизації, мс	Роздільна здатність за швидкістю, об/хв
0	0,5	12
1	1	6
2	2	3
3	4	1,5
4	8	0,75
5	16	0,375

Також у схемі передбачені блоки, які здійснюють координатні перетворення:

- А, В, С-а, b - перетворювач координат. Формує складові струми статора I_{1a} , I_{1b} еквівалентної двофазної машини в нерухомій системі координат а, b:

$$I_{1a} = I_{1A}; I_{1b} = \frac{I_{1B} - I_{1C}}{\sqrt{3}}; \quad (1.1)$$

Дані цієї таблиці відображають фундаментальну залежність у цифрових системах управління: чим більший період дискретизації, тим вища роздільна здатність (точність) за швидкістю, але при цьому збільшується запізнення в системі. Для приводу головного руху фрезерного верстата рекомендується обирати значення **1 або 2**, оскільки це забезпечує оптимальний баланс між швидкістю реакції системи на зміну навантаження та точністю підтримання заданих обертів шпинделя.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Вибір та перевірка асинхронного двигуна

1. У пуско-гальмівних режимах $M_{ЕПМАКС} = 240,8$. Електродвигун обираємо загальнопромислового (загального) призначення серії 4А.

2. Номінальна швидкість електродвигуна обирається виходячи з умови

$$\omega_{ДВНОМ} > \omega_{ЕПмакс}$$

3. Потужність електродвигуна обирається відповідно до залежностей допустимого та короткочасного моменту та допустимого умовами

$$P_{ДВНОМ} \geq P_{ДВНОМ}.$$

Необхідна потужність двигуна у зоні роботи з постійним потоком ($W \leq W_{ДВН}$)

$$P_{ТРЕБ} = \frac{M_{СМАКС} \cdot \omega_{ДВ.Н}}{0,5 + \frac{\omega_{ЭП.МИН}}{\omega_{ДВ.Н}}} \cdot 10^{-3} = \frac{59,6 \cdot 135,7}{0,5 + \frac{6,78}{135,7}} \cdot 10^{-3} = 14,7 \text{ кВт}; \quad (2.1)$$

Таблиця 2.1

Технічні характеристики електропривода фрезерного верстата

Параметр	Одиниця виміру	Значення
Типорозмір двигуна	—	4А160М4У3
Номінальна потужність ($P_{ДВН}$)	Вт	$18,5 \cdot 10^3$
Номінальна швидкість (n_0)	об/хв	1500
Номінальна напруга ($U_{1Н}$)	В	380
Коефіцієнт корисної дії (η_n)	%	89,5
Коефіцієнт потужності ($\cos\phi$)	—	0,88
Критичне ковзання (S_k)	—	0,16
Момент інерції двигуна ($J_{ДВ}$)	кг·м ²	0,13
Кратність пускового моменту (k_n)	—	1,4
Кратність максимального моменту (k_m)	—	2,3
Кратність пускового струму ($k_{идв}$)	—	7,0
Ступінь захисту	—	IP44
Розрахункова потужність різання ($P_{ТРК}$)	кВт	14,7

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157,08, \text{ рад/с} \quad (2.2)$$

$$n_{\text{дв.н}} = (1 - S_H) \cdot n_0 = (1 - 0,022) \cdot 1500 = 1467, \text{ об / мин} \quad (2.3)$$

$$\omega_{\text{дв.н}} = (1 - S_H) \cdot \omega_0 = (1 - 0,022) \cdot 157,08 = 153,6, \text{ рад / с.} \quad (2.4)$$

Розрахуємо номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{дв.н}}} = \frac{18,5 \cdot 10^3}{153,6} = 120,4, \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.5)$$

Розрахунок параметрів статора

Для обчислення номінального фазного струму важливо враховувати обрану конфігурацію підключення обмоток. Відповідно до методичних вказівок, саме тип з'єднання (зірка або трикутник) визначає підсумкове значення струму і величину фазної напруги в системі.

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,393, \text{ В.} \quad (2.6)$$

$$I_{1\text{фн}} = I_{1\text{лн}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{18,5 \cdot 10^3}{3 \cdot 219,393 \cdot 0,88 \cdot 0,895} = 35,688, \text{ А.} \quad (2.7)$$

$$I_{1\text{макс}} = k_{\text{ДВ}} \cdot I_{1\text{лн}} = 7 \cdot 35,688 = 249,816, \text{ А.} \quad (2.8)$$

$$M_{\kappa} = k_M \cdot M_{\text{ДВН}} = 2,3 \cdot 120,4 = 276,92, \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.9)$$

$$M_{\text{ДВПУСК}} = k_{\Pi} \cdot M_{\text{ДВН}} = 1,4 \cdot 120,4 = 168,56, \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.10)$$

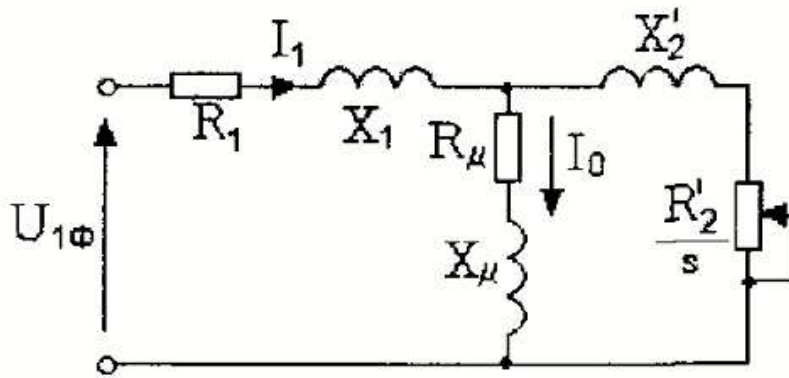


Рис. 2.1. Функціональна схема РЕП

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням

$$R_1 = R_1' \cdot \frac{U_{1\Phi H}}{I_{1\Phi H}} = 0,042 \cdot \frac{219,393}{35,688} = 0,258, \text{ Ом.} \quad (2.11)$$

$$X_{1\delta} = X_1' \cdot \frac{U_{1\Phi H}}{I_{1\Phi H}} = 0,085 \cdot \frac{219,393}{35,688} = 0,523, \text{ Ом.} \quad (2.12)$$

$$L_{1\delta} = \frac{X_{1\delta}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,523}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 1,665 \cdot 10^{-3}, \text{ Гн.} \quad (2.13)$$

$$R_2' = R_2'' \cdot \frac{U_{1\Phi H}}{I_{1\Phi H}} = 0,024 \cdot \frac{219,393}{35,688} = 0,148, \text{ Ом.} \quad (2.14)$$

$$X_{2\delta}' = X_2'' \cdot \frac{U_{1\Phi H}}{I_{1\Phi H}} = 0,13 \cdot \frac{219,393}{35,688} = 0,799, \text{ Ом.} \quad (2.15)$$

$$L_{2\delta}' = \frac{X_{2\delta}'}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,799}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2,543 \cdot 10^{-3}, \text{ Гн.} \quad (2.16)$$

$$X_{KH} = X_{1\delta} + X'_{2\delta} = 0,523 + 0,799 = 1,322, \text{ Ом.} \quad (2.17)$$

$$X_{\mu} = X'_{\mu} \cdot \frac{U_{1\Phi H}}{I_{1\Phi H}} = 4,3 \cdot \frac{219,393}{35,688} = 26,434, \text{ Ом.} \quad (2.18)$$

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{26,434}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,084, \text{ Гн.} \quad (2.19)$$

$$I_0 = \frac{E_1}{X_{\mu}} = \frac{220,532}{26,434} = 8,343, \text{ А.} \quad (2.20)$$

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\Phi H} \cdot \cos \varphi_H - I_{1\Phi H} \cdot R_1)^2 + (U_{1\Phi H} \cdot \sin \varphi_H + I_{1\Phi H} \cdot X_{1\delta})^2} = \quad (2.21)$$

$$= \sqrt{(219,393 \cdot 0,88 - 35,688 \cdot 0,258)^2 + (219,393 \cdot 0,47 + 35,688 \cdot 0,523)^2} = 220,532, \text{ В}$$

2.2 Обґрунтування вибору перетворювального пристрою та методу управління

Для забезпечення роботи електроприводу обрано трифазний перетворювач частоти з проміжною ланкою постійного струму. Вибір обумовлений необхідністю отримання лінійної напруги 380 В при максимальних навантаженнях, що відповідає параметрам мережі і характеристикам двигуна.

Основні технічні рішення:

Тип інвертора: Автономний інвертор напруги (АІН) на базі IGBT-транзисторів, що дозволяє формувати вихідну напругу необхідної амплітуди та частоти. Спосіб регулювання: Застосовується скалярне ($U/f = \text{const}$) або векторне керування (залежно від вимог динаміки сталевоза). Це дозволяє підтримувати сталість магнітного потоку широкому діапазоні зміни частоти.

Частотні характеристики: Система керування інвертором забезпечує плавну зміну частоти від мінімальних значень до необхідного максимуму,

гарантуючи точність позиціонування та плавність пуску/гальмування механізмів.

$$f_{\text{ИМАКС}} = 50 \cdot \frac{\omega_{\text{ЭПМАКС}}}{\omega_0(1 - S_K)} = 50 \cdot \frac{135,7}{157,08(1 - 0,16)} = 51,4, \text{ Гц.} \quad (2.22)$$

$$f_{\text{ИМИН}} = 50 \cdot \frac{\omega_{\text{ЭПМИН}}}{\omega_0} = 50 \cdot \frac{6,78}{157,08} = 2,158, \text{ Гц.} \quad (2.23)$$

$$I_{\text{ИН}} \geq I_{\text{ЛН}} \cdot \frac{M_{\text{СМАКС}}}{M_{\text{ДВН}}} \geq 35,688 \cdot \frac{59,6}{120,4} = 17,666, \text{ А,} \quad (2.24)$$

$$I_{\text{ИМАКС}} \geq I_{\text{ЛН}} \cdot \frac{M_{\text{ЭПМАКС}}}{M_{\text{ДВН}}} \geq 35,688 \cdot \frac{240,8}{120,4} = 71,376, \text{ А;} \quad (2.25)$$

Таблиця 2.2

Способи керування в системі ПЧ-АД

№	Спосіб керування	Діапазон регулювання швидкості	
		розімкнена система	замкнена система з датчиком швидкості
1	Скалярне керування, закон керування $U1 / f1 = \text{const}$	до 10	до 100
2	Скалярне керування, закон керування $U1 / f1 = \text{const}$; компенсація моменту та ковзання	10–15	100–120
3	Векторне керування	до 100 (із внутрішньою моделлю)	до 1000

Для реалізації поставлених завдань затверджено векторне керування без зворотного зв'язку. Вибраний метод повністю покриває заданий діапазон 20 регулювання.

Таблиця 2.3

Параметри перетворювача частоти

Тип	Параметри мережі живлення		Вихідна напруга $U_H, \%$	Вихідна частота $f_c, \text{Гц}$	Вихідний струм		Рекомендована потужність $P_2, \text{Вт}$
	$U_{1\text{лн}}$	$f_c, \text{Гц}$			$I_{VLT}, \text{А}$	$I_{VLT\text{макс}}, \text{А}$	
VLT5042 Danfoss	380	50	(0-100)	(0-132)	61	97,6	$30 \cdot 10^3$

Аналіз структурної схеми перетворювача

Частота комутації силових ключів інвертора встановлено лише на рівні 8 кГц. Як базис для дослідження використовується модель, представлена на рис.2.2. Дана структура характеризується наявністю розгалуженої системи внутрішніх зворотних зв'язків. Особливу увагу слід приділити складним перехресним залежностям, що мають нелінійний характер, які визначають динаміку взаємодії каналів регулювання.

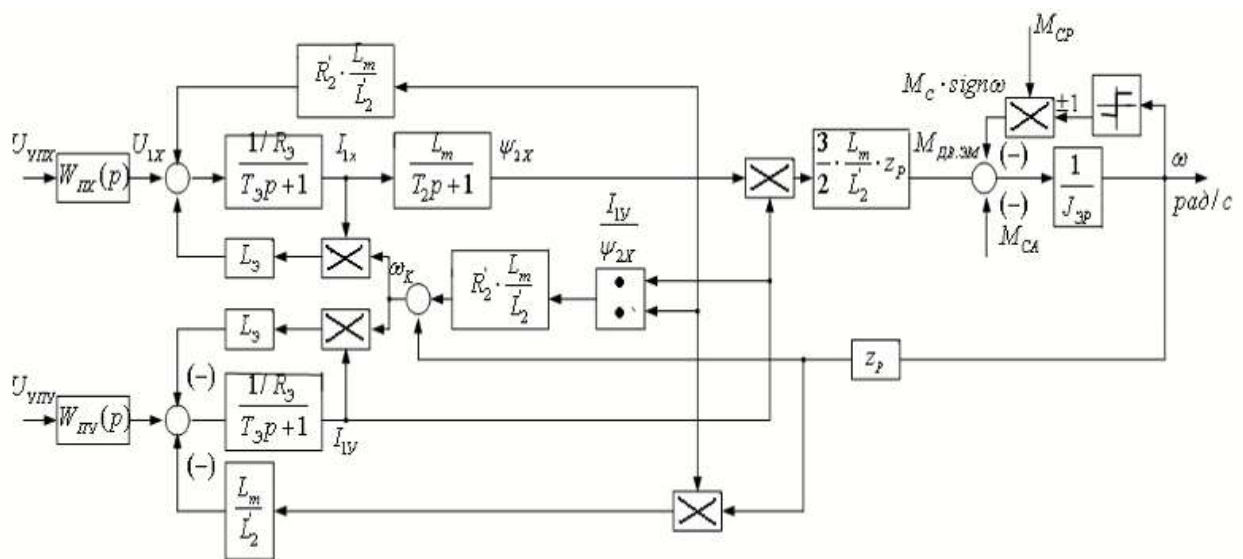


Рис. 2.2. Структурна схема РЕП

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням

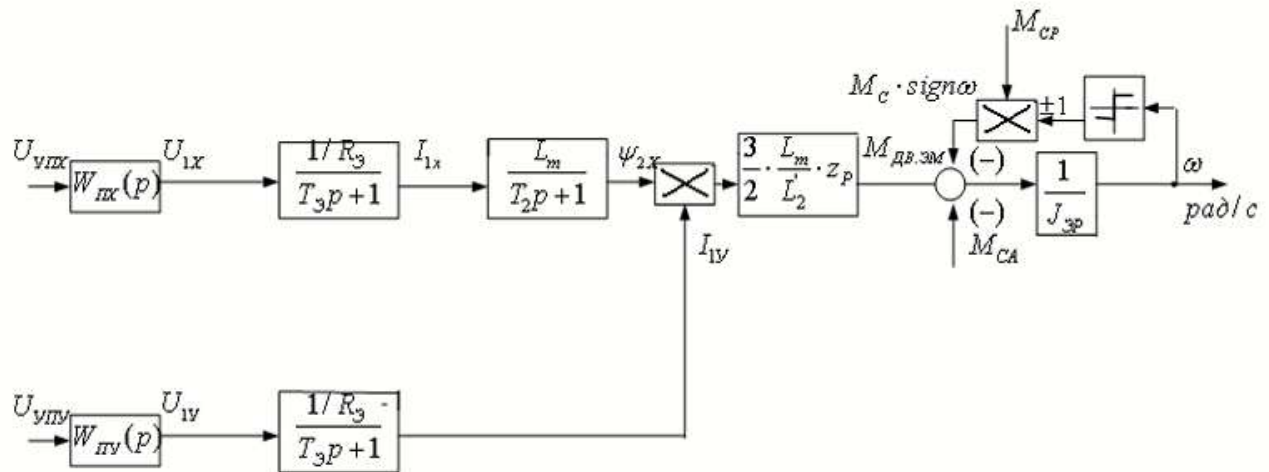


Рис. 2.3. Структурна схема РЕП

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням

Розрахунок параметрів перетворювача

Вибір силової електроніки базується на зіставленні номінальних даних двигуна та функціональних можливостей ПЧ. Для керування електроприводом прийнято перетворювач частоти серії VLT5042 виробництва Danfoss. Вибрана модель повністю сумісна з промисловою мережею 380 В за стандартної частоти 50 Гц.

$$k_H = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1\Phi}}{U_{yпmax}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{10} = 31,113, \quad (2.26)$$

де

$$U_{yпmax} = 10 \text{ В},$$

$$T_H = \frac{0,5}{f_H} = \frac{0,5}{8 \cdot 10^3} = 6,25 \cdot 10^{-5}, \text{ с} \quad (2.27)$$

Розрахунок параметрів АД

Проведемо розрахунок еквівалентної індуктивності обмоток

- статора

$$L_1 = L_{1\delta} + L_\mu = 0,001665 + 0,084 = 0,086, \Gamma H$$

- ротора

$$L_2 = L_{2\delta} + L_\mu = 0,002543 + 0,084 = 0,087, \Gamma H$$

(2.28)

Розрахуємо коефіцієнт розсіювання:

$$\delta = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 + L_2} = 1 - \frac{0,084^2}{0,086 + 0,087} = 0,959 \quad (2.29)$$

Розрахуємо еквівалентний опір:

$$R_\Sigma = R_1 + R_2 \cdot \frac{L_\mu^2}{L_2^2} = 0,258 + 0,148 \cdot \frac{0,084^2}{0,087^2} = 0,396, \Omega \quad (2.30)$$

$$T_\Sigma = \frac{\delta \cdot L_1}{R_\Sigma} = \frac{0,959 \cdot 0,086}{0,396} = 0,208, c, \quad (2.31)$$

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2} = \frac{0,087}{0,148} = 0,588, c. \quad (2.32)$$

Розрахунок параметрів механічної системи

Розрахуємо момент інерції механізму:

$$J_M = 0,24, \text{ кг} \cdot \text{ м}^2.$$

Розрахуємо еквівалентний момент інерції приводу:

$$J_\Sigma = J_{ДВ} + J_M = 0,13 + 0,24 = 0,37, \text{ кг} \cdot \text{ м}^2. \quad (2.33)$$

2.3 Аналіз узгодженості системи "перетворювач - двигун"

Для підтвердження коректності вибору силового обладнання виконується перевірка працездатності системи у встановлених експлуатаційних режимах. Основне завдання даного етапу полягає у підтвердженні того, що комбінація обраного асинхронного двигуна та частотного інвертора перекриває необхідні діапазони моментів та швидкостей.

$$\psi_{2X} = \psi_{2XH} = const, \quad \psi_{2X} = \psi_{2XH} \cdot \frac{\omega}{\omega_H}, \quad M = f(S)$$

Розрахуємо систему перетворювач частоти-асинхронний двигун,

$$f_H = f_{1H} = 50 \text{ Гц}$$

$$M(S) = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot S \cdot \left[(X_{KH})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{S \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} \quad (2.34)$$

Аналіз залежності електромагнітного моменту від ковзання

Для побудови графіка $M=f(s)$ виконується розрахунок ряду значень в інтервалі зміни відносного ковзання s від 0,01 до 1 з певним кроком. Результати цих обчислень дають змогу візуалізувати механічні властивості системи, які відображені на рисунку 2.4. Отримана крива служить базисом з метою оцінки перевантажувальної здатності двигуна за різних режимах роботи. Такий підхід до розрахунку часто використовується при моделюванні електроприводів серед MATLAB для верифікації динамічних і статичних режимів роботи. Побудована характеристика підтверджує можливість реалізації обраного діапазону регулювання 20:1 при використанні векторного керування без зворотного зв'язку.

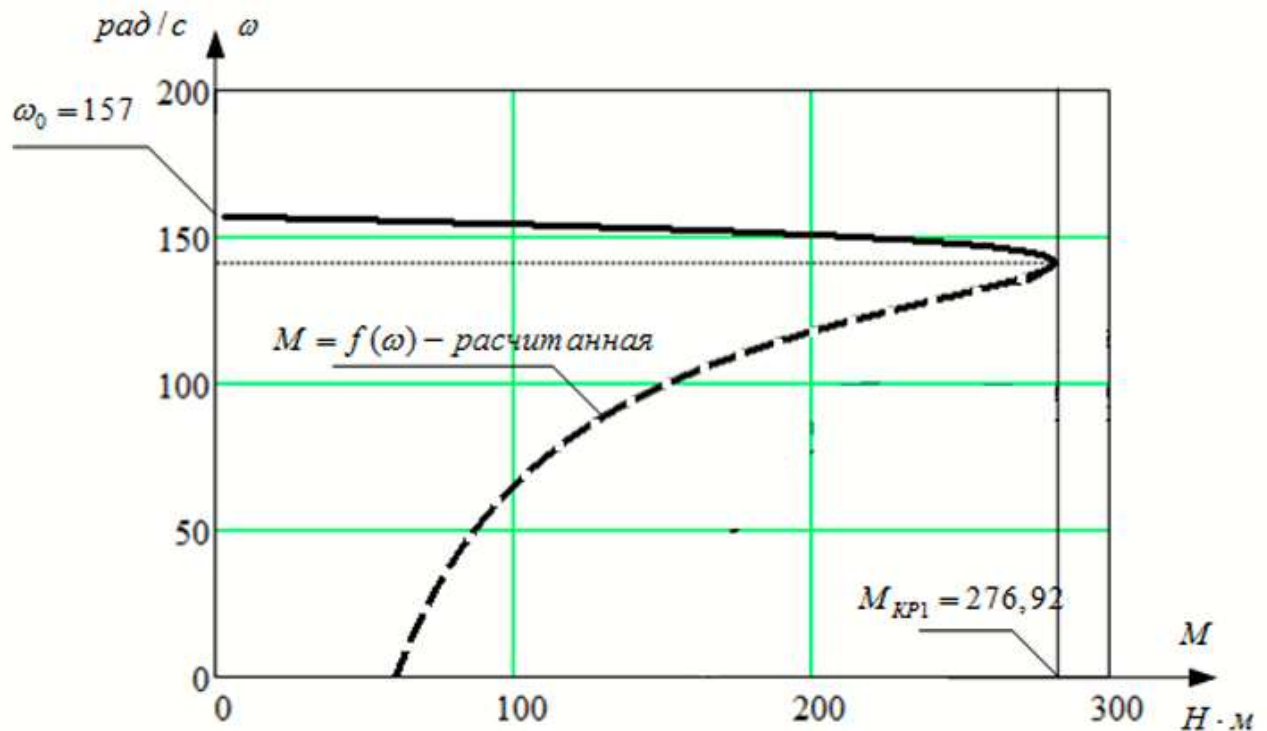


Рис. 2.4. Графік $M=f(s)$ залежності електромагнітного моменту від ковзання

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням

$$w = w_0 \cdot (1 - S)$$

$$I_1(S) = \sqrt{I_0^2 + I_2^2(S) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2(S) \cdot \sin \varphi_2(S)}; \quad (2.35)$$

$$I_2'(S) = \frac{U_{1\Phi H}}{\pm \sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{S})^2 + (X_{KH})^2 + (\frac{R_1 \cdot R_2'}{S \cdot X_\mu})^2}}; \quad (2.36)$$

За результатами розрахунку будується електромеханічна характеристика наведена на рис. 2.5. Цей графік ілюструє роботу асинхронного двигуна при частотному регулюванні. Він наочно показує, як знижується швидкість зі збільшенням навантаження (струму) досі перекидання чи зупинки. На осі абсцис також відмічено струм холостого ходу I_o .

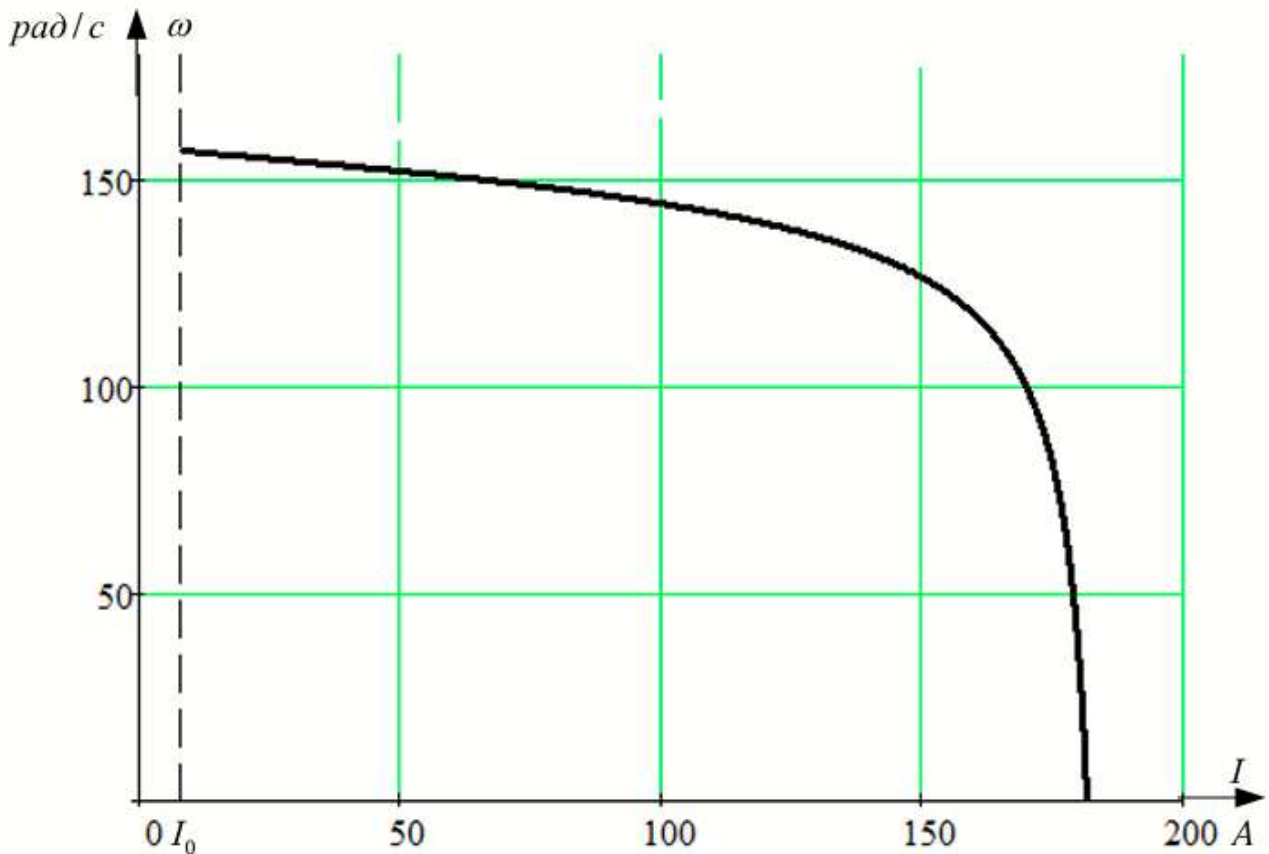


Рис. 2.5. Електромеханічна характеристика двигуна. Графік $\omega=f(I)$ залежності кутової швидкості від струму статора

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням

Визначення заданої сфери роботи

Розраховане сімейство механічних характеристик $M(\omega)$ доповнюється граничними значеннями для тривалого та імпульсного режимів експлуатації:

$$M_{\text{смин}}(\omega) = -5,73;$$

$$M_{\text{смакс}}(\omega) = -59,6;$$

$$M_{\text{эпмакс}}(\omega) = -240,8.$$

2. За електромеханічними характеристиками будуємо графік (рис.2.6)

$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$:

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = I_{\text{двн}} \cdot \left(0,5 + \frac{\omega}{\omega_{\text{двн}}}\right) = 35,688 \cdot \left(0,5 + \frac{76,8}{153,6}\right) \quad \text{при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{двн}}; \quad \omega = 76,8; \quad (2.37)$$

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = I_{\text{двн}} = 35,688 \quad \text{при } \omega < 0,5 \cdot \omega_{\text{двн}}; \quad \omega = 76,8$$

3. Розраховується та будується залежність допустимого тривалого моменту електродвигуна $M_{\text{ДВ.длит.доп}}(\omega)$

В зоні роботи з номінальним потоком:

$$f_H > f_{1H}, \quad (W > W_0 \cdot (1 - S_K))$$

$$M_{\text{ДВМАКС}}(W) = M_K \Big|_{f_H = f_{1H}} = 287,973,$$

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{\text{фн}}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left\{ R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{KH}^2) \cdot \left[1 + \left(\frac{R_2}{X_\mu} \right)^2 \right]} \right\}} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157,08 \cdot \left\{ 0,258 + \sqrt{(0,258^2 + 1,322^2) \cdot \left[1 + \left(\frac{0,148}{26,434} \right)^2 \right]} \right\}} = 287,973 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.38)$$

в зоні роботи з ослабленим потоком при

$$f_H > f_{1H}, \quad (W > W_0 \cdot (1 - S_K))$$

$$M_{\text{ДВМАКС}}(\omega) = M_K \cdot \frac{\omega_0 \cdot (1 - S_K)}{\omega}$$

4. Розраховується та будується залежність допустимого тривалого струму електродвигуна $I_{\text{ДВ.длит.доп}}(\omega)$

В зоні роботи з номінальним потоком:

$$f_H > f_{1H},$$

$$I_{\text{ДВ.длит.доп}}(\omega) = M_{\text{ДВН}} \cdot \left(0,5 + \frac{\omega}{\omega_{\text{ДВН}}} \right) \quad \text{при} \quad \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{ДВН}};$$

$$I_{\text{ДВ.длит.доп}}(\omega) = I_{\text{ДВН}} \quad \text{при} \quad 0,5 \cdot \omega_{\text{ДВН}} < \omega \leq \omega_{\text{ДВН}}. \quad (2.39)$$

в зоні роботи з ослабленим потоком при

$$f_H > f_{1H},$$

з урахуванням того, що двигун обраний із запасом за потужністю приймаємо:

$$I_{\text{ДВ.длит.доп}}(\omega) = I_{\text{ДВН}}, \quad \text{при} \quad \omega > \omega_{\text{ДВН}}.$$

5. Розраховується та будується залежність $I_{CMAKC}(\omega)$, що відповідає тривалому максимальному навантаженню $M_{CMAKC}(\omega) = const$. Для цього необхідно визначити відповідне M_{CMAKC} значення ковзання S_{T5} , вирішивши щодо

S рівняння, та розрахуємо значення струму: $I_{CMAKC} \Big|_{f_H = f_{1H}}$

$$\frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot S \cdot \left[(X_{KH})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{S \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} = M_{CMAKC} \quad (2.40)$$

та швидкості: $(\omega_{T5} = \omega_0 \cdot (1 - S_{T.5}))$

Залежність $I_{CMAKC}(\omega)$ розраховується за виразами:

$$I_{CMAKC}(\omega) = I_{CMAKC} \Big|_{f_H = f_{1H}} \quad \text{при } \omega \leq \omega_{T5}$$

$$I_{CMAKC}(\omega) = I_{CMAKC} \Big|_{f_H = f_{1H}} \cdot \frac{\omega}{\omega_{T5}} \quad \text{при } \omega > \omega_{T5}.$$

6. Розраховується та будується залежність $I_{EPCMAKC}(\omega)$, що відповідає тривалому максимальному навантаженню $M_{EPCMAKC}(\omega) = const$. Для цього необхідно визначити відповідне $M_{EPCMAKC}$ значення ковзання S_{T14} , вирішивши

щодо S рівняння, та розрахуємо значення струму: $I_{CMAKC} \Big|_{f_H = f_{1H}}$

$$\frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot S \cdot \left[(X_{KH})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{S \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} = M_{CMAKC} \quad (2.40)$$

$$I_{EPCMAKC}(\omega) = I_{EPCMAKC} \Big|_{f_H = f_{1H}} \quad \text{при } \omega \leq \omega_{T14}$$

$$I_{EPCMAKC}(\omega) = I_{EPCMAKC} \Big|_{f_H = f_{1H}} \cdot \frac{\omega}{\omega_{T14}} \quad \text{при } \omega > \omega_{T14}. \quad (2.41)$$

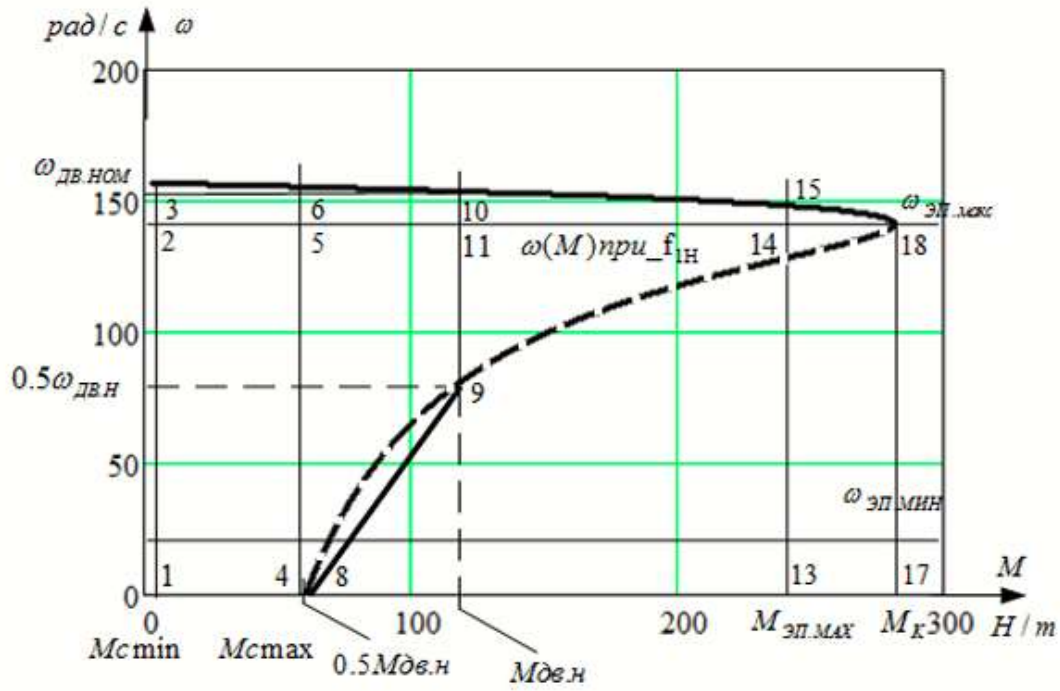


Рис. 2.6.а Механічна характеристика електроприводу та навантаження при векторне управління

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням

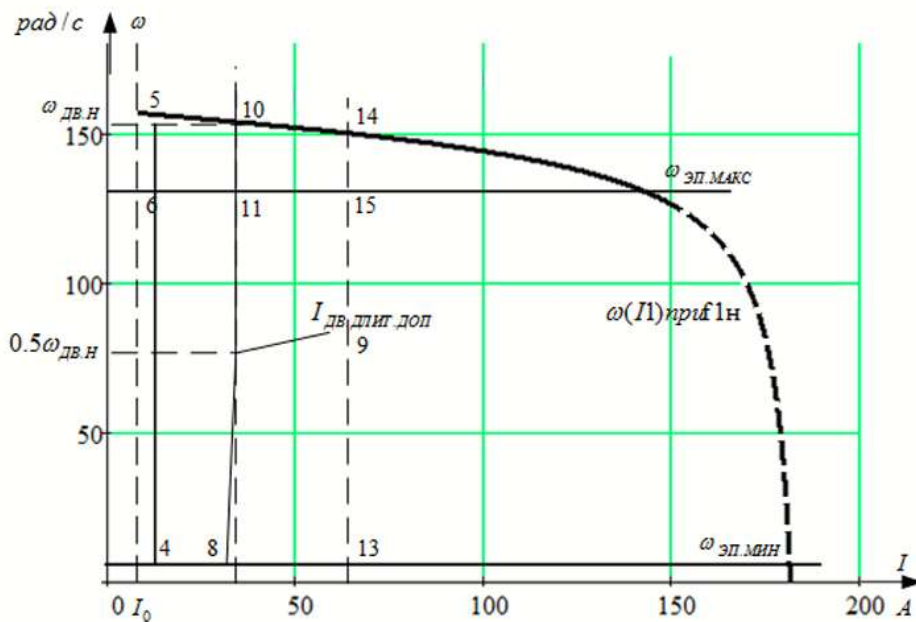


Рис. 2.6.б Електромеханічна характеристика електроприводу та навантаження при векторному управлінні

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням

Перевірка правильності вибору двигуна

За результатами побудови механічних характеристик електроприводу (рис.2.6

а) перевіряється правильність вибору двигуна по моменту

$$M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) \geq M_{\text{смакс}}$$

$$M_{\text{двмакс}}(\omega) \geq M_{\text{эпмакс}}$$

$$120,4 \geq 59,6$$

$$287,973 \geq 240,8$$

$$I_{\text{дв.длит.доп.}}(\omega) \geq I_{\text{смакс}} \text{ имеем } 35,688 \geq 12,065$$

Отже, двигун по струму обраний правильно.

$$I_{\text{смакс}}(\omega) \leq I_{\text{ин}} \quad \text{имеем} \quad 12,065 \leq 17,666$$

$$I_{\text{эпмакс}}(\omega) \leq I_{\text{имакс}} \quad \text{имеем} \quad 63,207 \leq 71,376$$

$$\left| \begin{array}{l} M_{T.11} > M_{T.6} \\ M_{T.19} > M_{T.15} \\ I_{T.11} > I_{T.6} \end{array} \right\rangle \quad \text{усі умови виконуються} \quad \left| \begin{array}{l} 120,4 > 59,6 \\ 287,973 > 240,8 \\ 35,688 > 12,065 \end{array} \right\rangle \quad (2.42)$$

В нижній частині діапазону регулювання швидкості:

$$\left| \begin{array}{l} M_{T.8} \geq M_{T.6} \\ M_{T.17} \geq M_{T.13} \\ I_{T.8} \geq I_{T.4} \end{array} \right\rangle \quad \text{умови виконуються} \quad \left| \begin{array}{l} 60,2 \geq 59,6 \\ 287,973 \geq 240,8 \\ 31,6 \geq 12,065 \end{array} \right\rangle \quad (2.43)$$

2. Умови перевірки перетворювача за струмом:

$$I_{\text{ин}} \geq I_{T.6}; \quad I_{\text{имакс}} \geq I_{T.15};$$

Аналіз графіків на рис. 10а,б підтверджує працездатність системи ПЧ-АД: а саме забезпечується стабільна тривала експлуатація при моменті навантаження від 5,73 до 59,6 Н·м і короточасних впливах до 240,8 Н·м. Діапазон

регулювання кутової швидкості становить $\omega \div [6,78; 135,7]$ рад / с. Технічно обґрунтовано застосування однозонного регулювання швидкості для даного приводу. Для подальших етапів проектування прийнята величина струму $I_{епмакс} = 63,207$ А.

2.4 Структурна схема лінеаризованої безперервної САУ РЕП частотно-регульованого асинхронного електроприводу з векторним управлінням

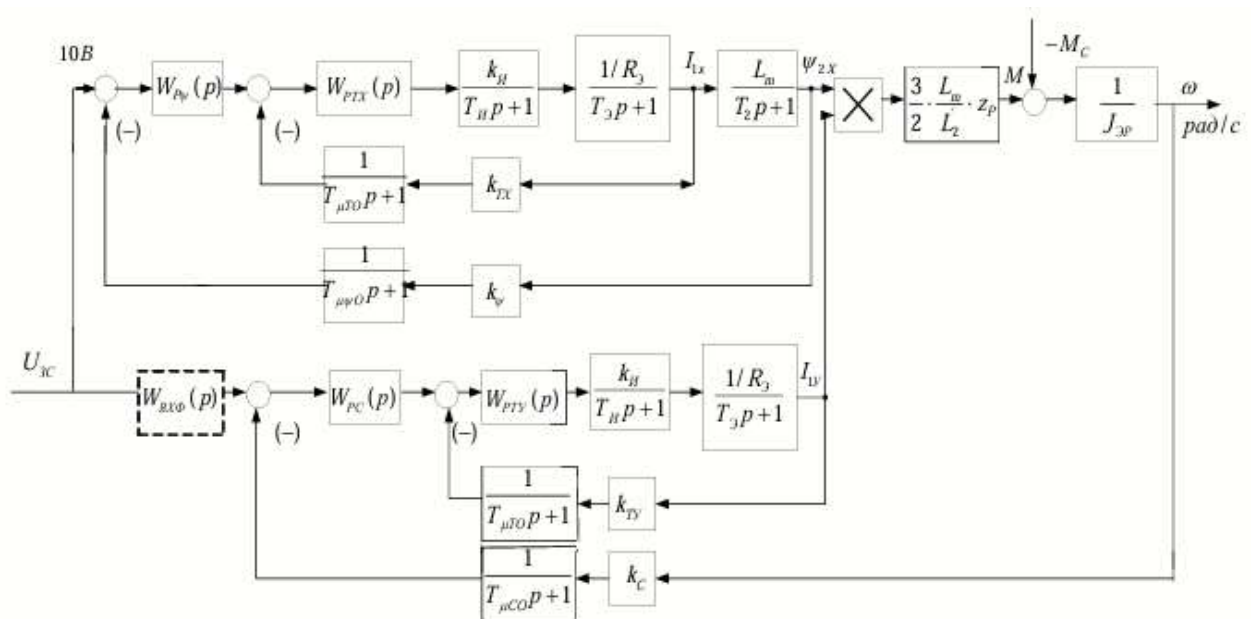


Рис. 2.5. Структурна схема лінеаризованої безперервної САУ РЕП частотно-регульованого асинхронного електроприводу з векторним управлінням

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

Аналіз схеми:

Передавальні функції регуляторів струму, потокозчеплення та швидкості;

$$W(p)_{PT}, W(p)_{P\psi}, W(p)_{PC}$$

Розрахуємо коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом:

$$k_{TX} = k_{TY} = \frac{U_{3TMAKC}}{I_{3TMAKC}} = \frac{10}{63,207} = 0,158B / A \quad (2.44)$$

$$U_{3T\text{МАКС}} = 10B;$$

- Розрахуємо коефіцієнт зворотного зв'язку по потокозчеплення ротора;

$$k_{\psi} = \frac{U_{3\psi\text{МАКС}}}{\psi_{2X}} = \frac{10}{0,824} = 12,136B / Bб. \quad (2.45)$$

$$U_{3\psi\text{МАКС}} = 10B;$$

$$\psi_{2X} = \psi_H = \frac{M_{ЭИИ}}{\frac{3}{2} \cdot Z_P \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1H}^2 \cdot I_0^2}} = \frac{120,4}{\frac{3}{2} \cdot 2 \cdot \frac{0,084}{0,087} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{35,688^2 \cdot 0,163^2}} = 0,824; Bб. \quad (2.46)$$

Розрахуємо коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю:

$$k_c = \frac{U_{3C\text{МАКС}}}{\omega_{ЭПМАКС}} = \frac{10}{135,7} = 0,074B \cdot c / рад; \quad (2.47)$$

$$U_{3C\text{МАКС}} = 10B; f_H = 8кГц;$$

Далі проведемо розрахунок періоду згладжування результатів вимірювання струму:

$$T_{\mu T0} = \frac{1}{f_H} \cdot \frac{n_T}{3} = \frac{1}{8 \cdot 10^3} \cdot \frac{8}{3} = 0,00033c; \quad (2.48)$$

$$n_T = 8.$$

Період розрахунку потокозчеплення

$$n_{\varphi} > 8.$$

$$T_{\mu\psi 0} = \left(16 \cdot \frac{1}{f_H} \right) \cdot \frac{n_{\psi}}{3} = \left(16 \cdot \frac{1}{8 \cdot 10^3} \right) \cdot \frac{4}{3} = 0,0027 \text{ c}; \quad (2.49)$$

Період розрахунку швидкості

$$n_c \geq 3.$$

$$T_{\mu C0} = \left(16 \cdot \frac{1}{f_H}\right) \cdot \frac{n_C}{3} = \left(16 \cdot \frac{1}{8 \cdot 10^3}\right) \cdot \frac{3}{3} = 0,002 \text{ с}; \quad (2.50)$$

2.5 Складання рівнянь динаміки системи автоматизованого електроприводу для математичної моделі автоматичного управління

2.5.1 Опис електромагнітних та механічних процесів асинхронної машини

Для статора:

$$\begin{cases} U_{SA} = R_{SA} I_{SA} + \frac{d\Psi_{SA}}{dt} \\ U_{SB} = R_{SB} I_{SB} + \frac{d\Psi_{SB}}{dt} \\ U_{SC} = R_{SC} I_{SC} + \frac{d\Psi_{SC}}{dt} \end{cases} \quad (2.51)$$

Для ротора:

$$\begin{cases} U_{RA} = R_{RA} I_{RA} + \frac{d\Psi_{RA}}{dt} \\ U_{RB} = R_{RB} I_{RB} + \frac{d\Psi_{RB}}{dt} \\ U_{RC} = R_{RC} I_{RC} + \frac{d\Psi_{RC}}{dt} \end{cases} \quad (2.52)$$

Для статора:

$$\begin{cases} \Psi_{SA} = L_{SA} I_{SA} + L_{SASB} I_{SB} + L_{SASC} I_{SC} + L_{SARA} I_{RA} + L_{SARB} I_{RB} + L_{SARC} I_{RC} \\ \Psi_{SB} = L_{SBSA} I_{SA} + L_{SB} I_{SB} + L_{SBSC} I_{SC} + L_{SBR A} I_{RA} + L_{SBRB} I_{RB} + L_{SBRC} I_{RC} \\ \Psi_{SC} = L_{SCSA} I_{SA} + L_{SCSB} I_{SB} + L_{SC} I_{SC} + L_{SCRA} I_{RA} + L_{SCRB} I_{RB} + L_{SCRC} I_{RC} \end{cases} \quad (2.53)$$

Для ротора:

$$\begin{cases} \Psi_{RA} = L_{RASA} I_{SA} + L_{RASB} I_{SB} + L_{RASC} I_{SC} + L_{RA} I_{RA} + L_{RARB} I_{RB} + L_{RARC} I_{RC} \\ \Psi_{RB} = L_{RBSA} I_{SA} + L_{RBSB} I_{SB} + L_{RBSC} I_{SC} + L_{RBRA} I_{RA} + L_{RB} I_{RB} + L_{RBRC} I_{RC} \\ \Psi_{RC} = L_{RCSA} I_{SA} + L_{RCSB} I_{SB} + L_{RCSC} I_{SC} + L_{RCRA} I_{RA} + L_{RCRB} I_{RB} + L_{RC} I_{RC} \end{cases} \quad (2.54)$$

$$M = \frac{Z_p}{\sqrt{3}} \left[I_{RA} (\Psi_{RB} - \Psi_{RC}) + I_{RB} (\Psi_{RC} - \Psi_{RA}) + I_{RC} (\Psi_{RA} - \Psi_{RB}) \right]$$

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_{назр} \quad (2.55)$$

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_k \Psi_s \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r z_p) \Psi_r \\ \Psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \Psi_r = L_r I_r + L_m I_s \\ M = \frac{3}{2} Z_p (\Psi_{sx} I_{sy} - \Psi_{sy} I_{sx}) \\ J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_{назр} \end{cases} \quad (2.56)$$

$$\begin{cases} U_s = \left(R_s + R_r \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \right) I_s + j\omega_k \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) I_s + \frac{L_m}{L_r} \left(j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \Psi_r + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{dI_s}{dt} \\ 0 = \frac{d\Psi_r}{dt} + \left(j(\omega_k - \omega_r z_p) + \frac{R_r}{L_r} \right) \Psi_r - R_r \frac{L_m}{L_r} I_{sr} \\ M = \frac{3}{2} Z_p K_r (\Psi_{rx} I_{sy} - \Psi_{ry} I_{sx}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_{назр}) \end{cases} \quad (2.57)$$

Графічне зображення структури асинхронної машини з короткозамкненим ротором у стаціонарних осях координат наведено рисунку 2.6.

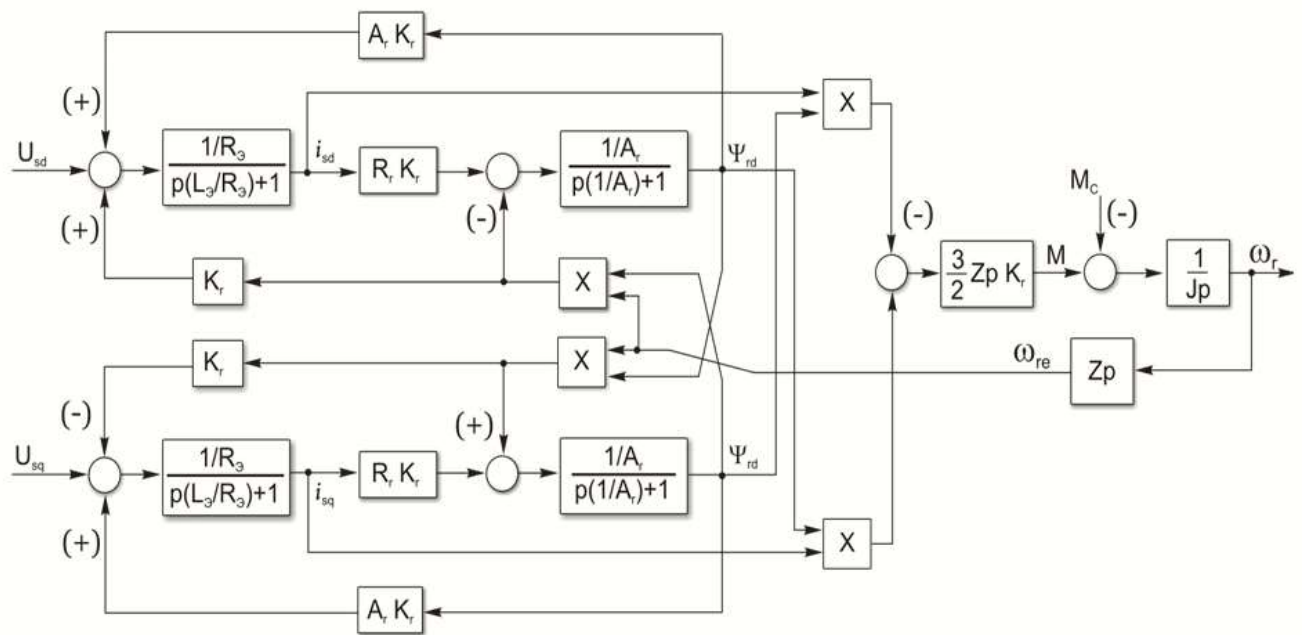


**Рис. 2.6. Структурна схема асинхронного короткозамкнутого двигуна
нерухомій системі координат**

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

За структурною схемою (рис. 2.6) складаємо імітаційну модель (рис.2.7-2.8).

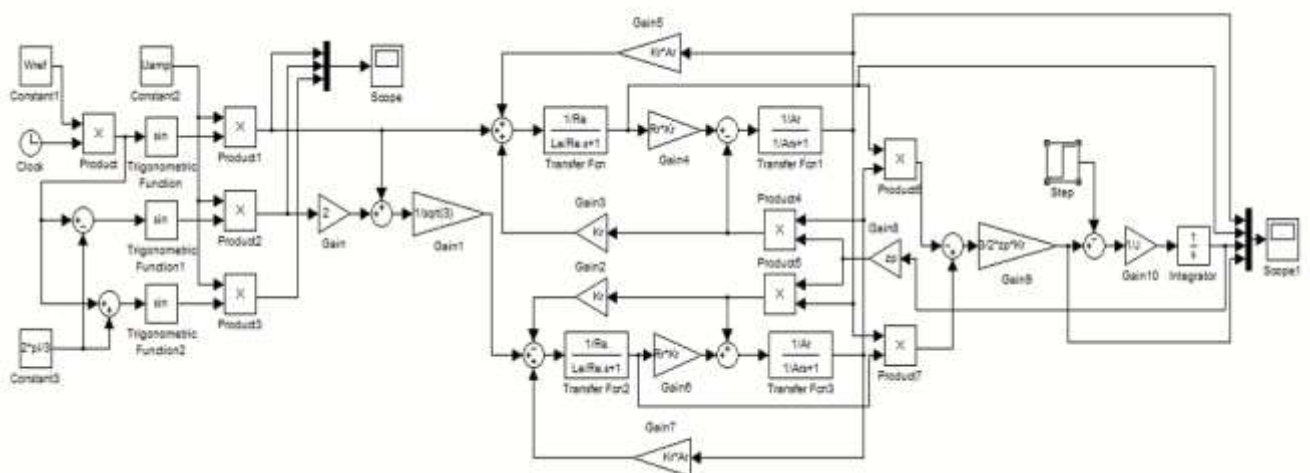


Рис. 2.7. Імітаційна модель

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

```

2      % 1)Load Start-Script file.
3      % 2)Load *.mdl file
4      % 3)Run Simulation
5 -   clear all
6 -   close all
7 -   Ts=1/10000;      % Sampling time for simulation (sec)
8 -   Tend=0.5;      % Stop time
9 -   Rs=0.258;
10 -  Rr=0.148;
11 -  Ls_=0.001665;
12 -  Lr_=0.002543;
13 -  Lm=0.084;
14 -  p=4;
15 -  J=0.13;
16 -  Ls=Ls_+Lm;
17 -  Lr=Lr_+Lm;
18 -  zp=p/2;
19 -  Kr=Lm/Lr;
20 -  Re=Rs+Rr*Kr^2;
21 -  Le=Ls-Lm^2/Lr;
22 -  Ar=Rr/Lr;
23 -  Km=1.5*zp*Kr;
24 -  Ktx=0.158;
25 -  Kty=0.158;
26 -  Kpsi=12.136;
27 -  Kc=0.074;
28 -  T2=0.002;
29 -  Tmtp=0.000125;
30 -  Je=0.37;
31 -  U=220;
32 -  Fref=50;
33 -  Uamp=220*sqrt(2);
34 -  Wref=2*pi*Fref;
35 -  Krt=18.413;
36 -  Trt=0.208;

```

Рис. 2.8. Параметри для розрахунку імітаційної моделі

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

Результати моделювання перехідних процесів $M(t)$, $\omega(t)$, $I(t)$ та $\psi(t)$ в стаціонарної системи координат, при пуску АД від мережі та додаванні навантаження, наведено нижче.

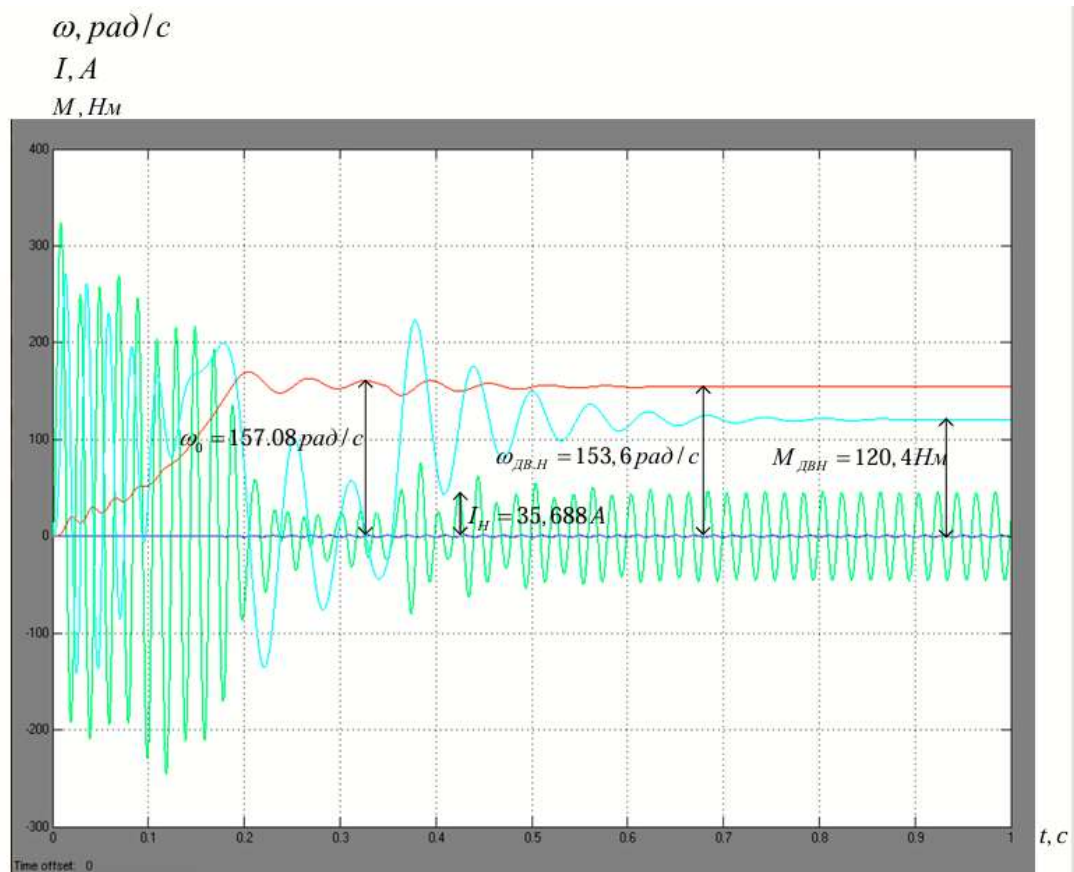


Рис. 2.9. Перехідний процес при пуску короткозамкнутого асинхронного двигуна прямим включенням у мережу при моделюванні в нерухомій системі координат при накиданні навантаження

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

При розробці моделі в системі координат, що обертається, використовуємо перетворення Парка-Горьова

2. Пряме перетворення:

$$\begin{aligned} u_{sx} &= u_{s\alpha} \cos \theta_k + u_{s\beta} \sin \theta_k \\ u_{sy} &= -u_{s\alpha} \sin \theta_k + u_{s\beta} \cos \theta_k \end{aligned} \quad \frac{d\theta_k}{dt} = \omega_k \quad \theta_k = \omega_k \frac{1}{p} \quad (2.58)$$

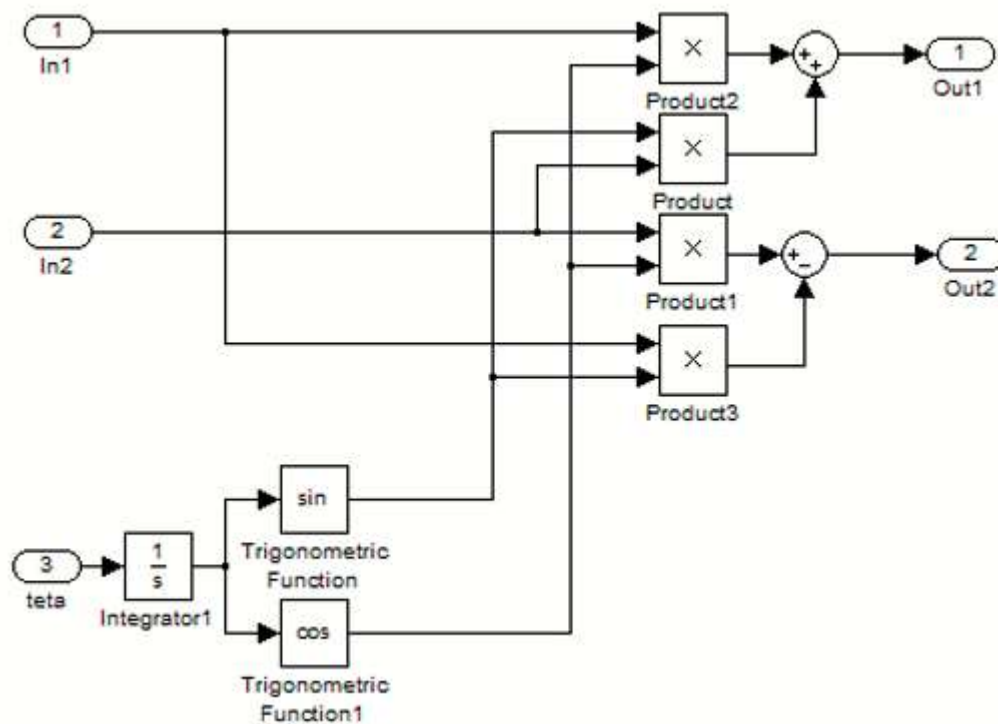


Рис. 2.10. Пряме перетворення Парку-Горьова (Park Transform) в системі MATLAB

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

2. Зворотнє перетворення

$$\begin{aligned}
 i_{s\alpha} &= i_{sx} \cos \theta_k - i_{sy} \sin \theta_k \\
 i_{s\beta} &= i_{sx} \sin \theta_k + i_{sy} \cos \theta_k
 \end{aligned}
 \quad
 \frac{d\theta_k}{dt} = \omega_k \quad \theta_k = \omega_k \frac{1}{p}
 \quad (2.59)$$

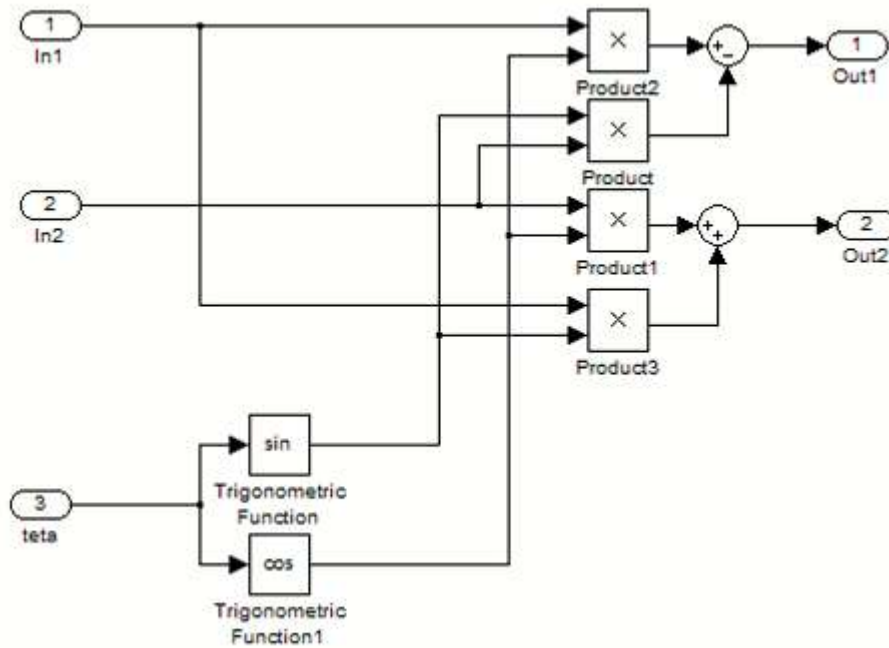


Рис. 2.11. Зворотнє перетворення Парку-Горьова (Park Transform) в системі MATLAB

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

Умова орієнтації системи координат, що обертається по вектору поточкозчеплення ротора

$$\psi_{ry} = 0 \quad \frac{d\psi_{ry}}{dt} = 0 \quad \psi_{rx} = \psi_r \quad (2.60)$$

Математичний опис системи АД

1.

$$\begin{cases} \frac{dI_{sx}}{dt} = \frac{1}{L_e} (U_{sx} - R_e I_{sx} + K_r A_r \Psi_{rx} + K_r \omega_r z_p \Psi_{ry}) + \omega_k I_{sy} \\ \frac{dI_{sy}}{dt} = \frac{1}{L_e} (U_{sy} - R_e I_{sy} + K_r A_r \Psi_{ry} - K_r \omega_r z_p \Psi_{rx}) - \omega_k I_{sx} \\ \frac{d\Psi_{rx}}{dt} = R_r K_r I_{sx} - A_r \Psi_{rx} + \omega_k \Psi_{ry} - \omega_r z_p \Psi_{ry} \\ \frac{d\Psi_{ry}}{dt} = R_r K_r I_{sy} - A_r \Psi_{ry} - \omega_k \Psi_{rx} + \omega_r z_p \Psi_{rx} \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\Psi_{rx} I_{sy} - \Psi_{ry} I_{sx}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_{назр}) \end{cases} \quad (2.61)$$

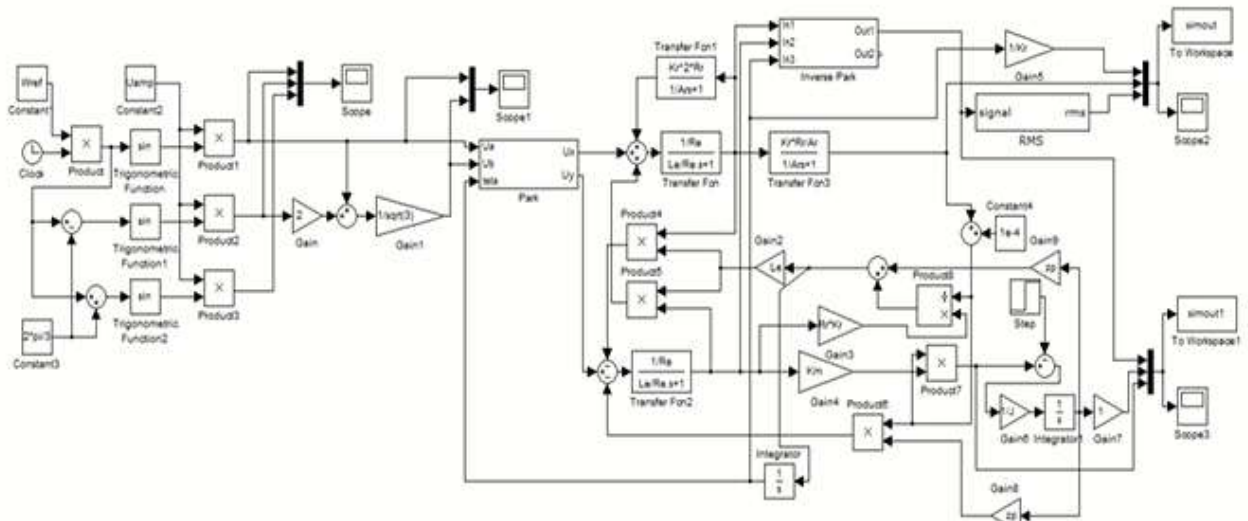


Рис. 2.13. Імітаційна модель

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

Результати моделювання перехідних процесів $M(t)$, $\omega(t)$, $I(t)$ та $\psi(t)$ в системі координат, що обертається, при пуску АД від мережі та додаванні навантаження, приведені далі.

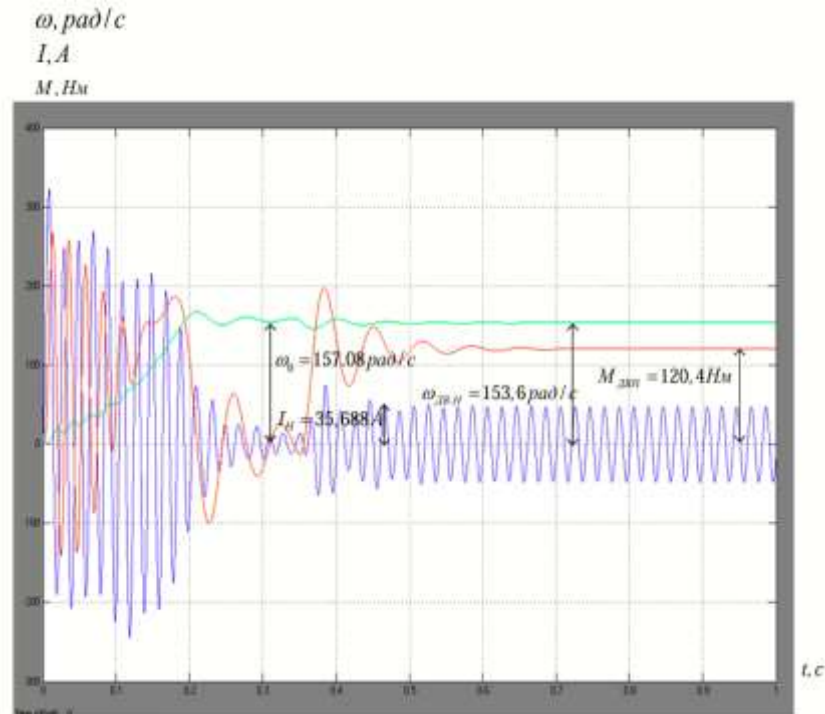


Рис. 2.14. Результати моделювання перехідних процесів $M(t)$, $\omega(t)$, $I(t)$ та $\psi(t)$ в системі координат, що обертається

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

Таким чином, порівнюючи результати імітаційного моделювання короткозамкнутого асинхронного двигуна в нерухомій та обертовій системі координат, можна зробити висновок про їх практично повне збіг. Значення струму швидкості і моменту, що встановилися, дорівнюють заданим, що показує, що схеми працюють правильно.

2.6 Перевірка правильності роботи асинхронного ЕП із векторним управлінням на базі моделі АД

2.6.1. Робота асинхронного ЕП із векторним керуванням на базі моделі АД у системі координат, що обертається, з орієнтацією по вектору потокозчеплень ротора

Проведемо перевірку правильності роботи ЕП шляхом синтезу налаштованих раніше контурів регулювання (струму, швидкості та потокозчеплення) та моделі АД. На рис.2.15 показано структурну схему системи лінеаризованого асинхронного ЕП з векторним керуванням на базі моделі АД в системі координат, що обертається, з орієнтацією по вектору ротора потокозчеплень.

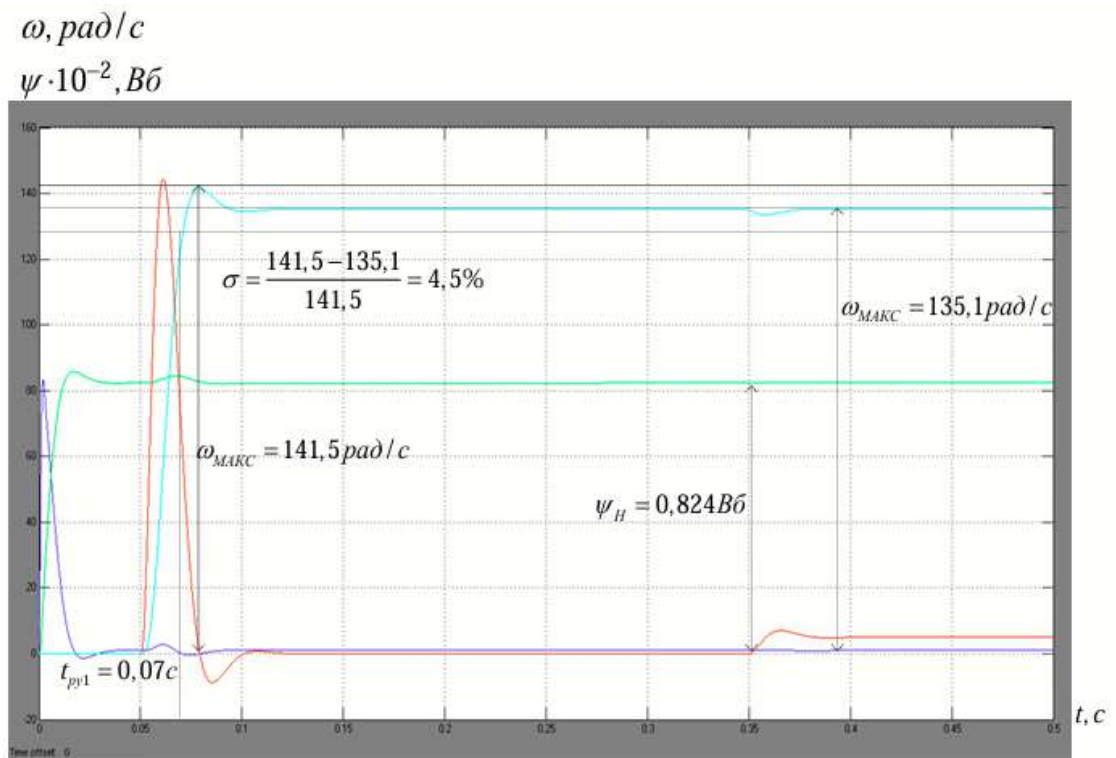


Рис. 2.17. Графік моделювання

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

2.6.2 Робота асинхронного ЕП із векторним керуванням на базі моделі АД у стаціонарній системі координат

Використовуючи структурну схему в системі координат, що обертається, і блоки прямого та зворотного перетворення, зберемо схему в стаціонарній системі координат, показану на рис.2.18.

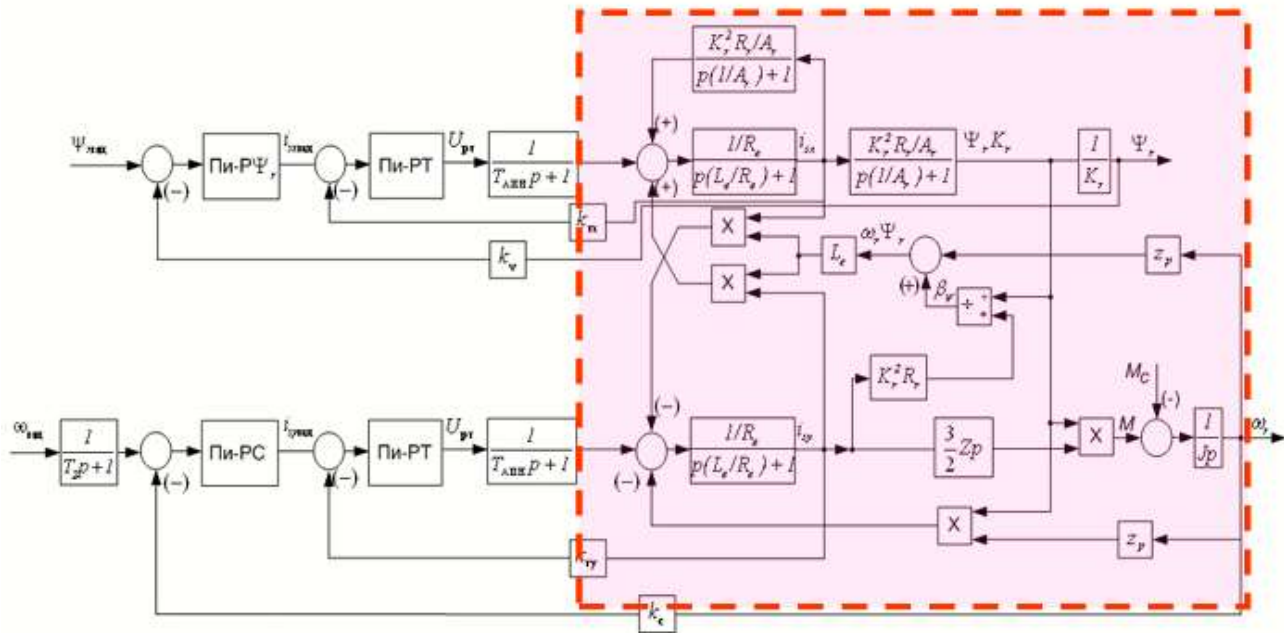


Рис. 2.18. Структурна схема системи лінеаризованого асинхронного ЕП з векторним управлінням на базі моделі АД у системі, що обертається координат з орієнтацією по вектору потокозчеплень ротора
Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

Визначимо математичні вирази для розрахунку модуля та кута повороту вектора потокозчеплення ротора:

$$\begin{aligned}\Psi_r &= \sqrt{\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2} \\ \theta_{\psi r} &= \arctg\left(\frac{\Psi_{r\beta}}{\Psi_{r\alpha}}\right)\end{aligned}\quad (2.64)$$

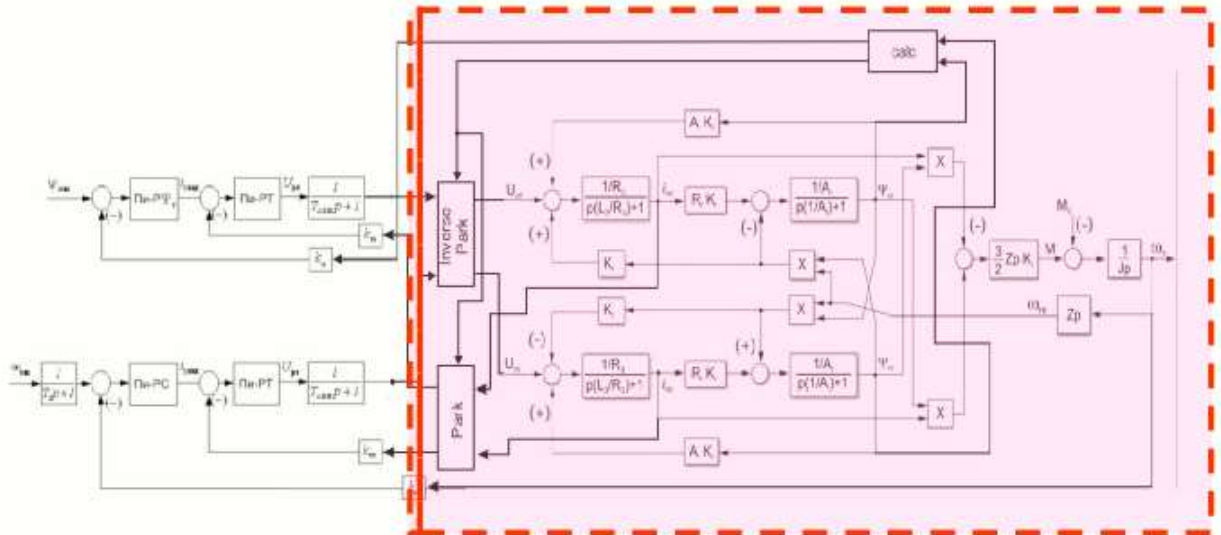


Рис. 2.19. Структурна схема системи лінеаризованого асинхронного ЕП з векторним управлінням на базі моделі АД у системі, в стаціонарній системі координат

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

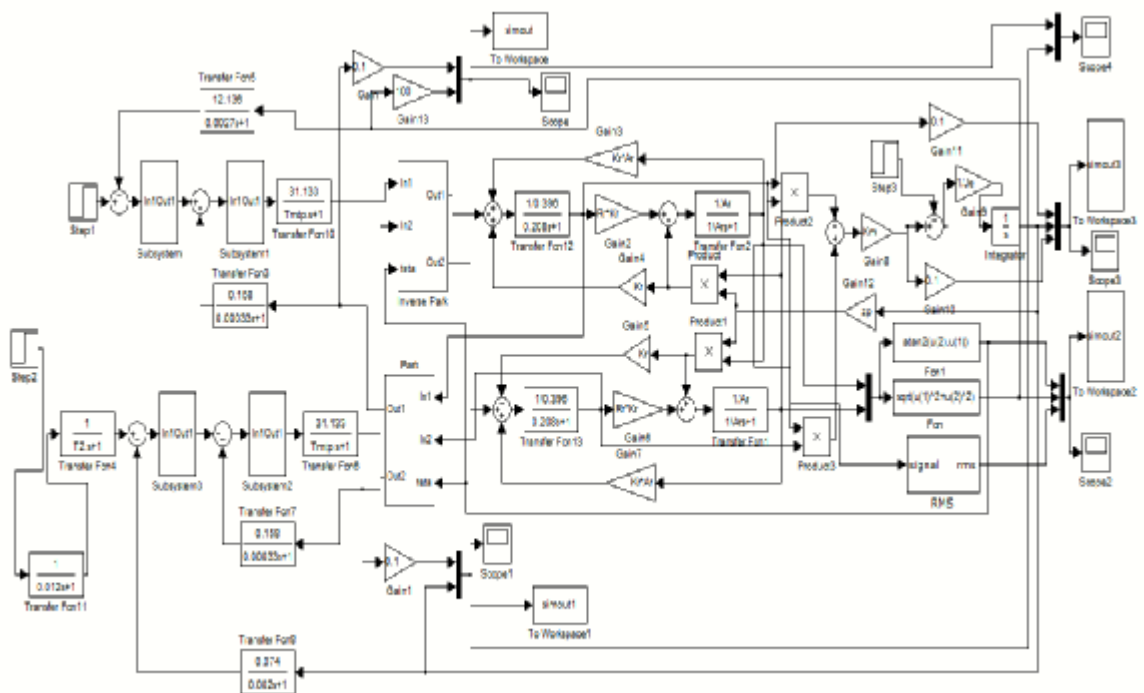


Рис. 2.20. Імітаційна модель лінеаризованого асинхронного ЕП з векторним управлінням на базі моделі АД у стаціонарній системі координат

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

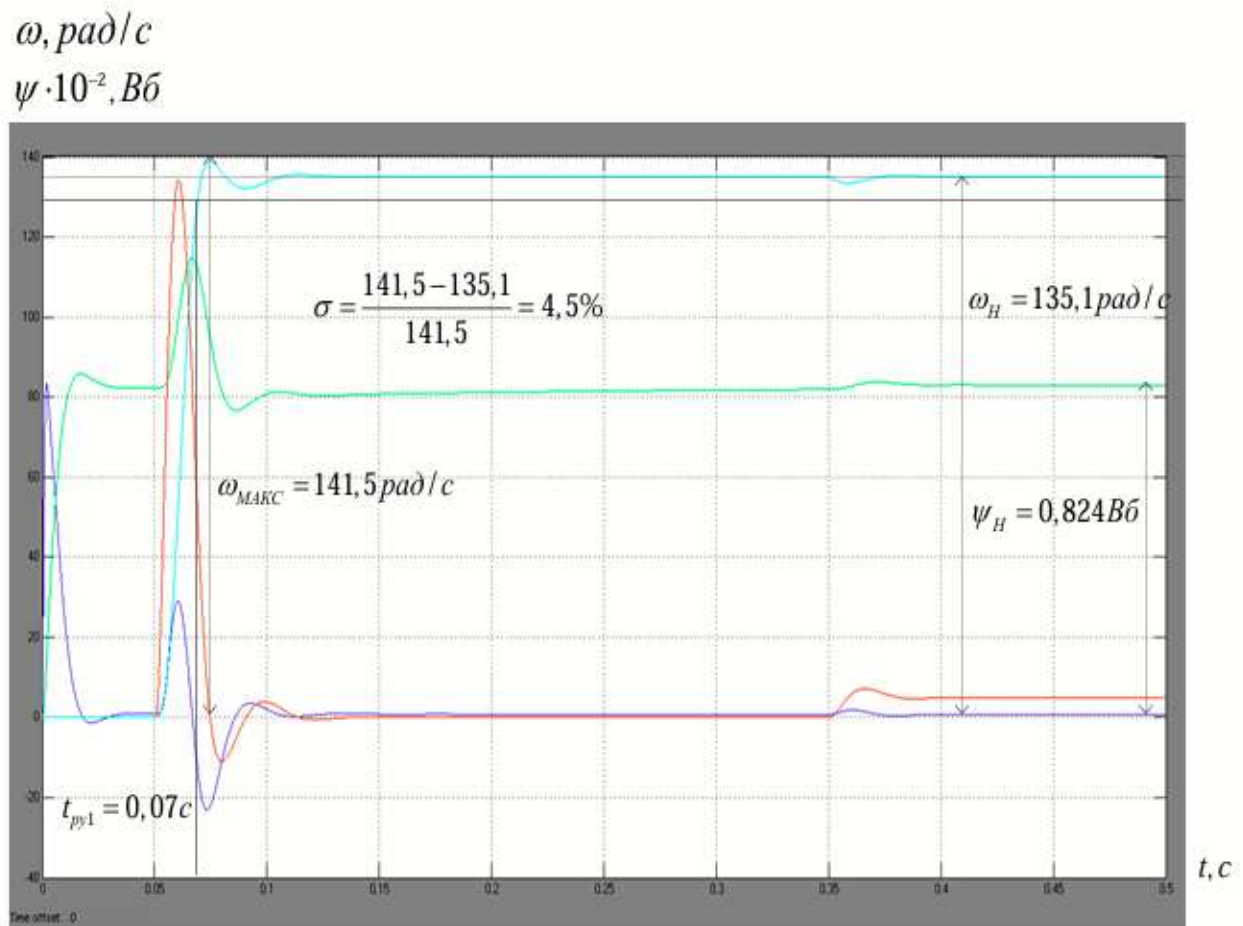


Рис. 2.21. Графіки перехідних процесів моделі лінеаризованого асинхронного ЕП з векторним управлінням на базі моделі АД стаціонарної системи координат

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

На підставі рис 2.17 та 2.21 можна відзначити, що графіки перехідних процесів у стаціонарній та обертовій системах координат виглядають однаково. Стрибок струмової складової I_{SY} у стаціонарній системі координат викликано взаємним впливом двох контурів (потoku та швидкості). Перерегулювання в контурі швидкості в обох системах однаково не перевищує 5 %. Значення швидкості, що встановилися, і потокозчеплення дорівнюють номінальним значенням електроприводу.

2.6.3. Нелінійна САУ електроприводу

Структурна схема нелінійної САУ частотно-регульованого електроприводу з векторним керуванням наведено на рис. 2.23. Структурна схема рис. 2.23 створена за принципом структурної схеми лінеаризованої САУ електроприводу.

Корекція інтегрального насичення

Інтегральне насичення виникає, коли ПІ- або ПІД-регулятор в протязом тривалого часу повинен компенсувати помилку, що лежить за межами діапазону керованої змінної. Оскільки вихід регулятора обмежений, помилку дуже складно звести до нуля. Наслідки: перерегулювання, коливання, затягування часу ПП.

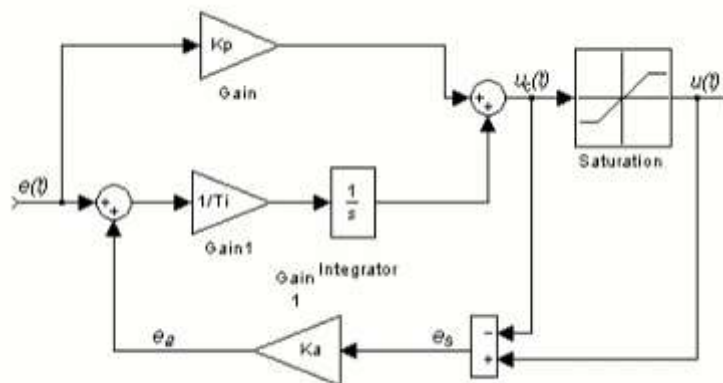


Рис. 2.22. Схема моделювання

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

Задатчики інтенсивності

Застосування задатчиків інтенсивності у вхідних керуючих каналах дозволяє зменшити вплив нелінійностей, що у системі. Крім інтенсивності зміни сигналу, затримка формування завдання у каналі швидкості дозволяє раціональніше використовувати ресурс джерела та зменшити вплив нелінійностей.

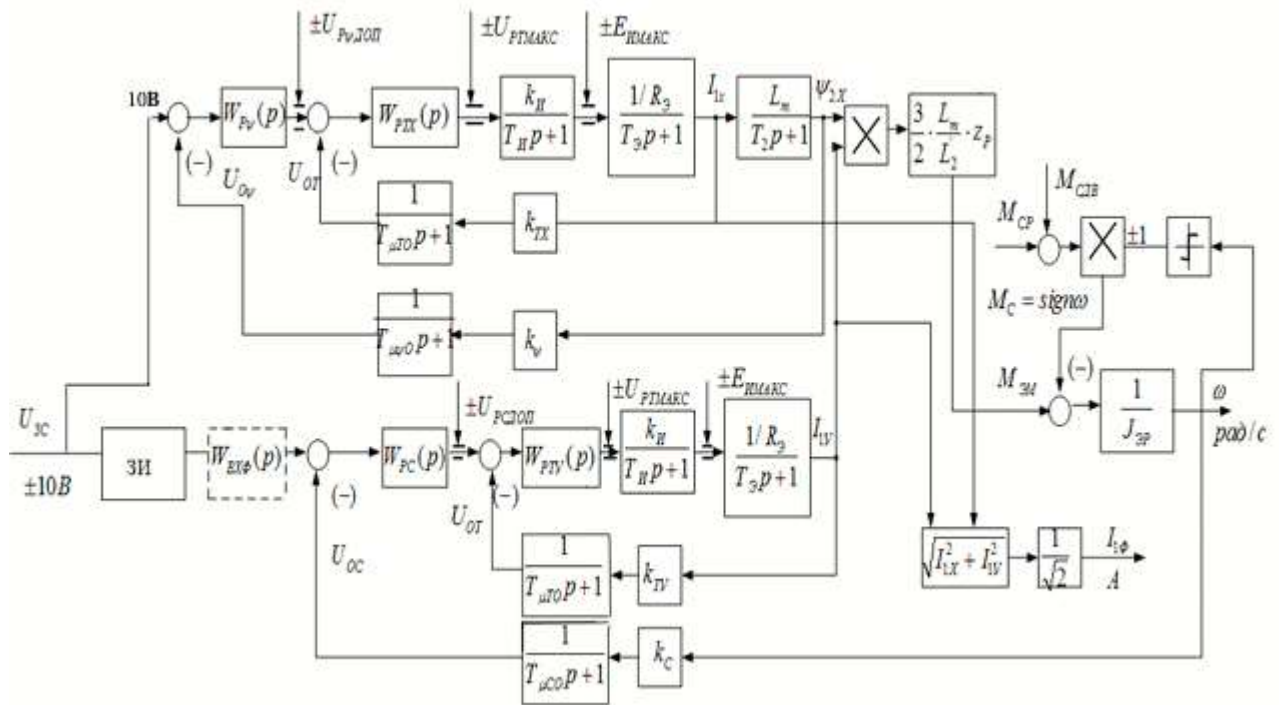


Рис. 2.23. Структурна схема

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

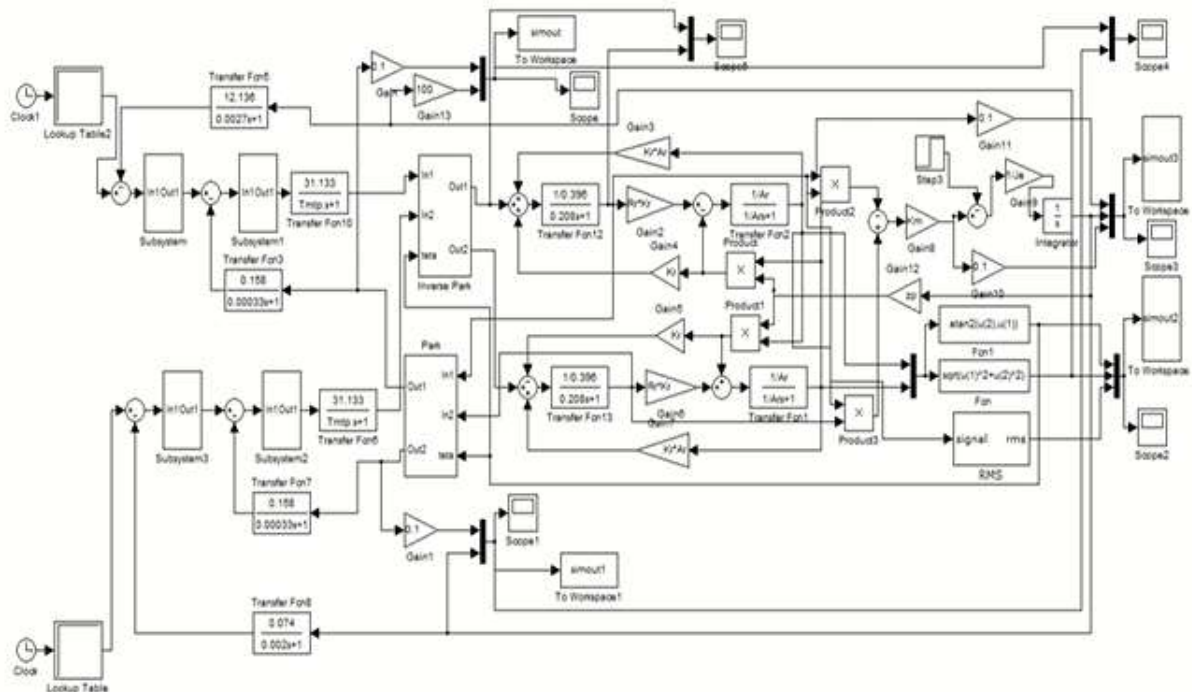


Рис. 2.24. Схема моделювання

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

2.6.4 Дослідження зміни величини перерегулювання замкнутого контуру при подачі різних U_{zc}

При подачі вхідного сигналу $U_{zc} = 10$, відповідного

$$\omega_{\min} = \omega_{уст} = 135, \text{ рад/с}$$

отримані перехідні процеси, наведені на рис.2.25.

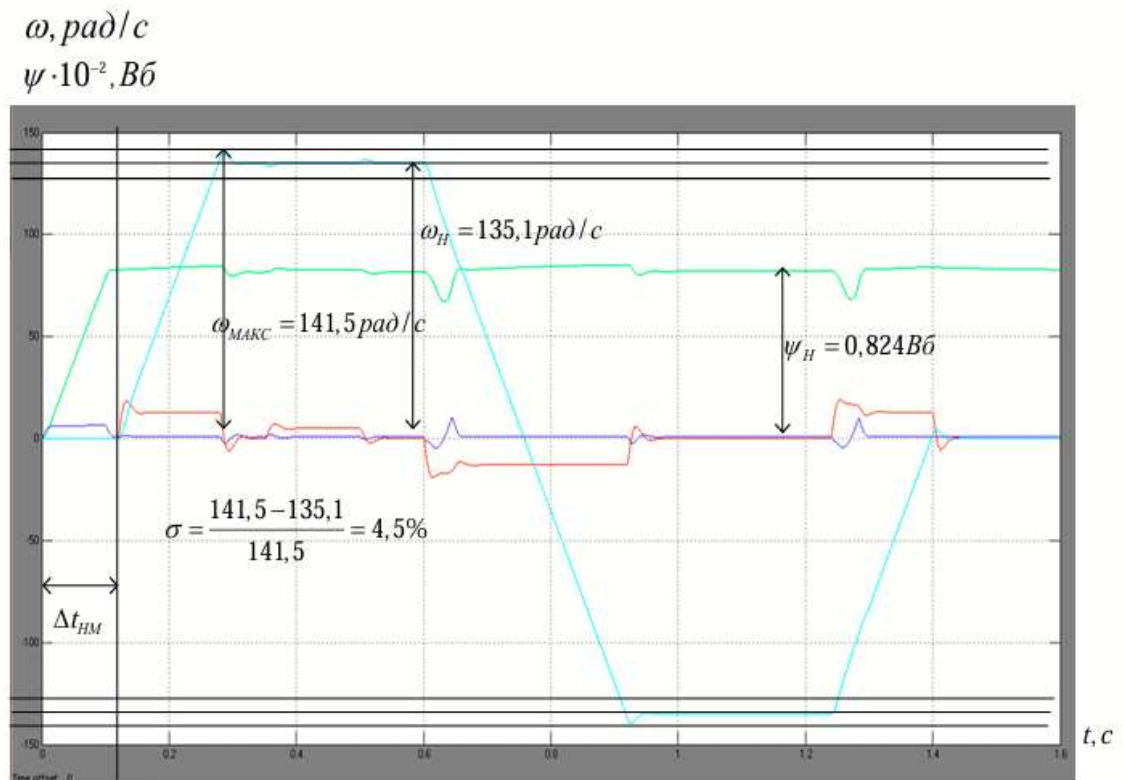


Рис. 2.25. Графіки перехідних процесів у нелінійній САУ РЕП при $U_{zc} = 10\text{В}$ (пуск, збільшення, скидання навантаження, гальмування та реверс)

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

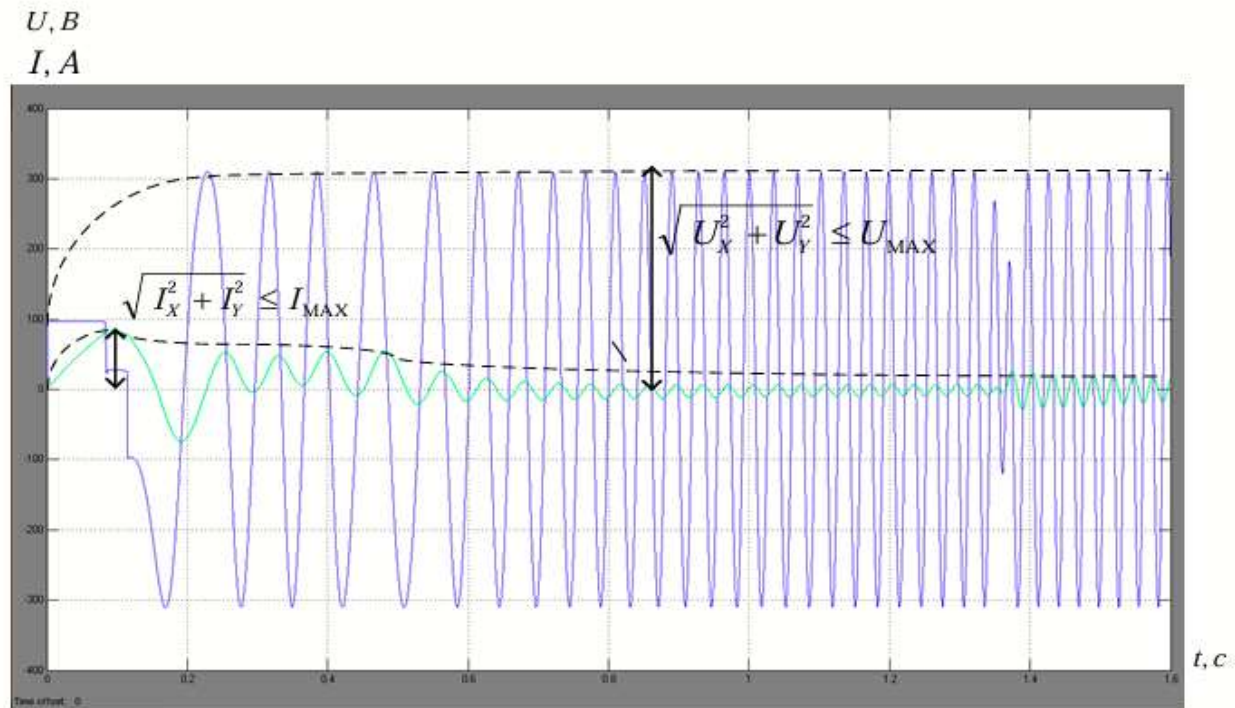


Рис. 2.26. Графіки струму та напруги у нелінійній САУ РЕП при $U_{зс} = 10V$ (пуск, збільшення, скидання навантаження, гальмування та реверс)

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

Графіки струму та напруги в нелінійній САУ РЕП при

$U_{зс} = 10V$ (пуск, начерк, скидання навантаження, гальмування та реверс)

При подачі вхідного сигналу $U_{зс}=2$, відповідного

$$\omega_{\text{мин}} = \omega_{\text{уст}} = 27, \text{ рад/с}$$

Отримані перехідні процеси, наведені на рис.2.27-2.28.

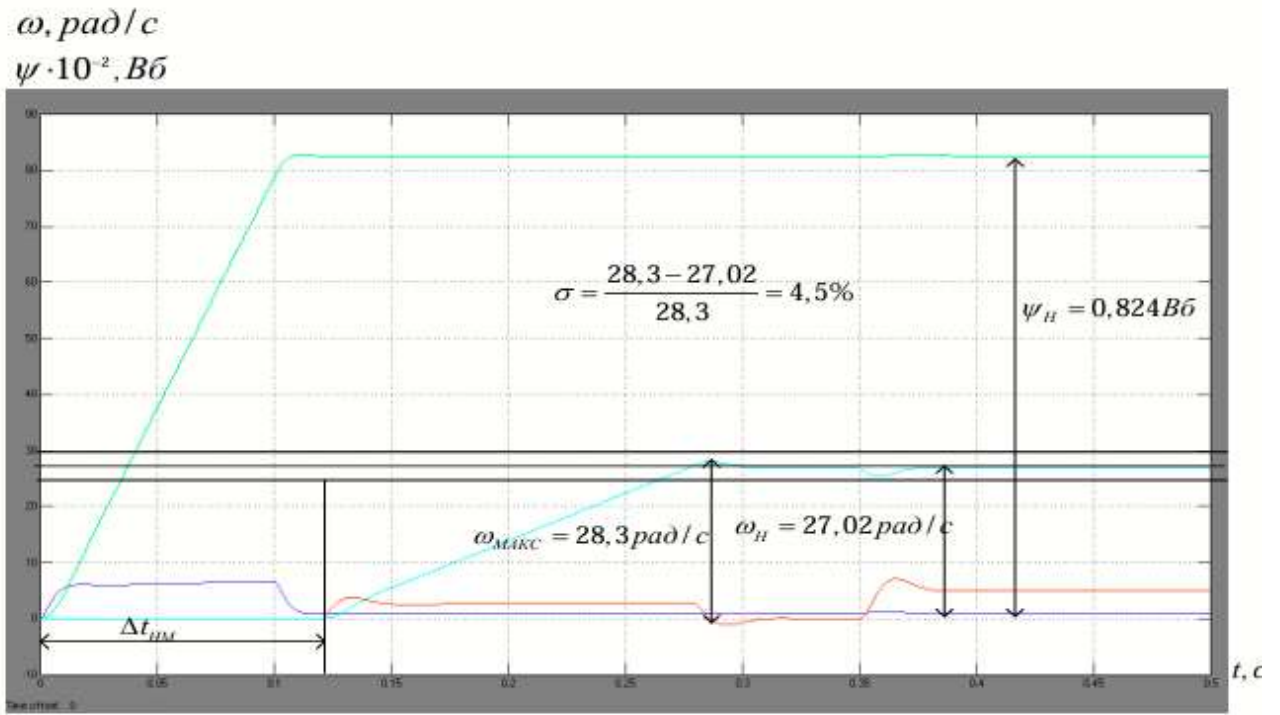


**Рис. 2.27. Графіки перехідних процесів у нелінійній САУ РЕП
при $U_{zc} = 2\text{В}$ (пуск і збільшення навантаження)**

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

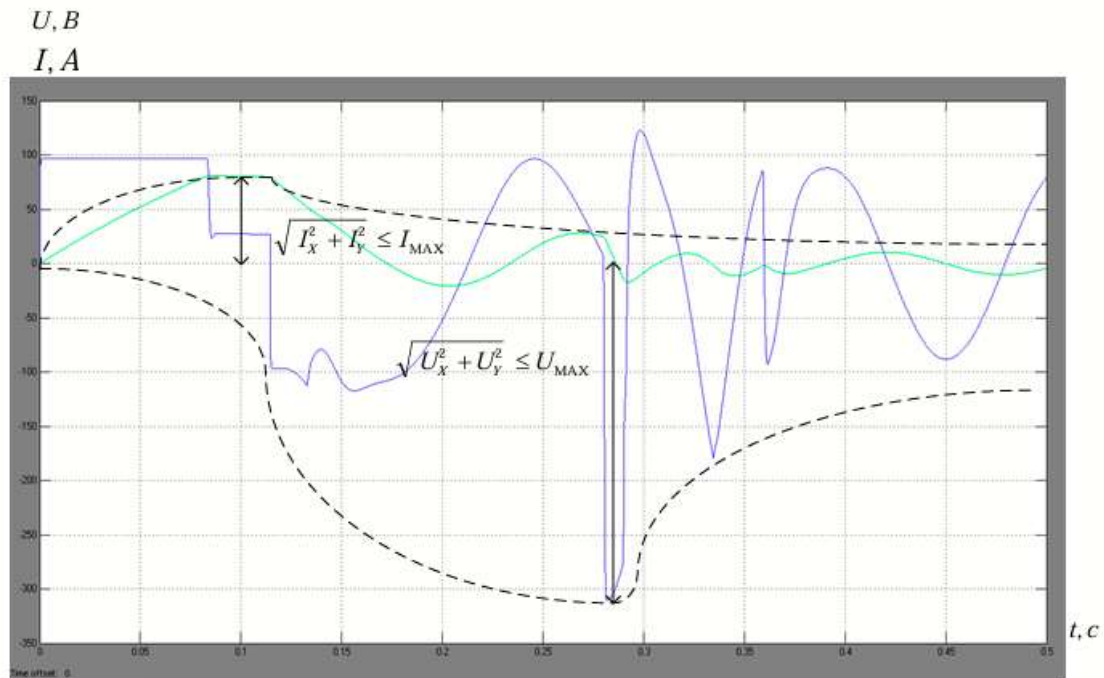


**Рис. 2.28. Графіки струму та напруги в нелінійній САУ РЕП при
 $U_{zc} = 2\text{В}$ (пуск і збільшення навантаження)**

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

При подачі вхідного сигналу $U_{zc}=5$, відповідного

$$\omega_{\min} = \omega_{уст} = 67.5, \text{ рад/с}$$

отримані перехідні процеси, наведені на рис.2.29.

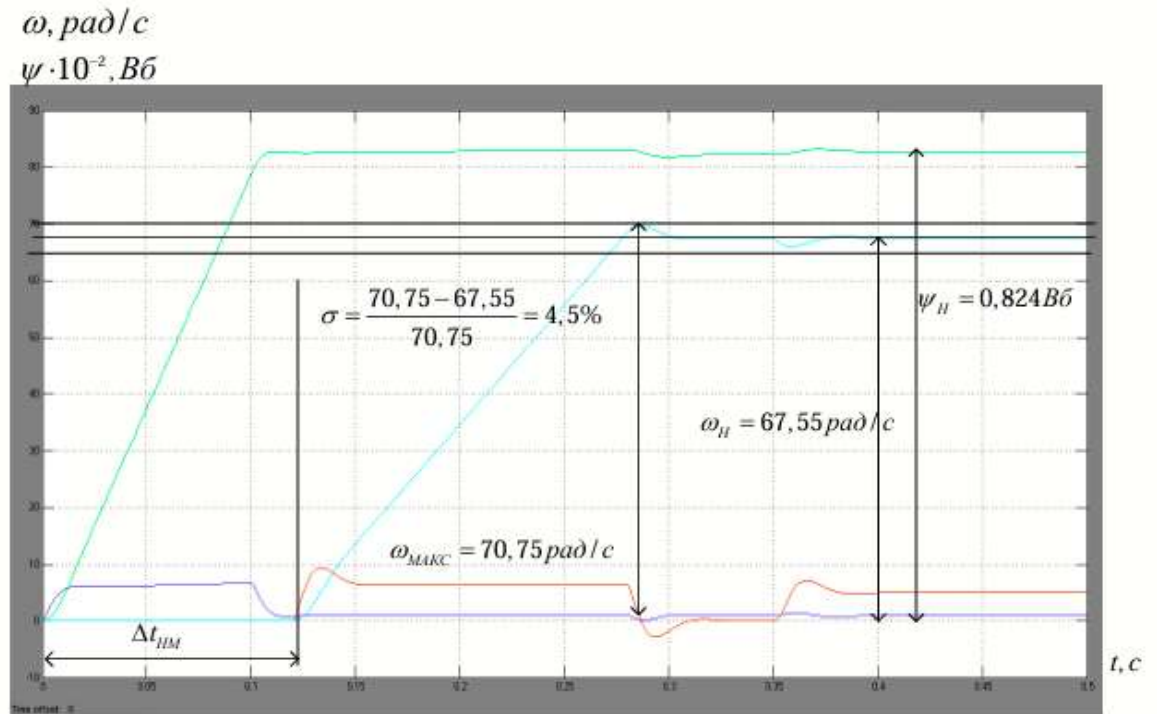


Рис. 2.29. Графіки перехідних процесів у нелінійній САУ РЕП при $U_{zc} = 5\text{В}$ (пуск і збільшення навантаження)

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

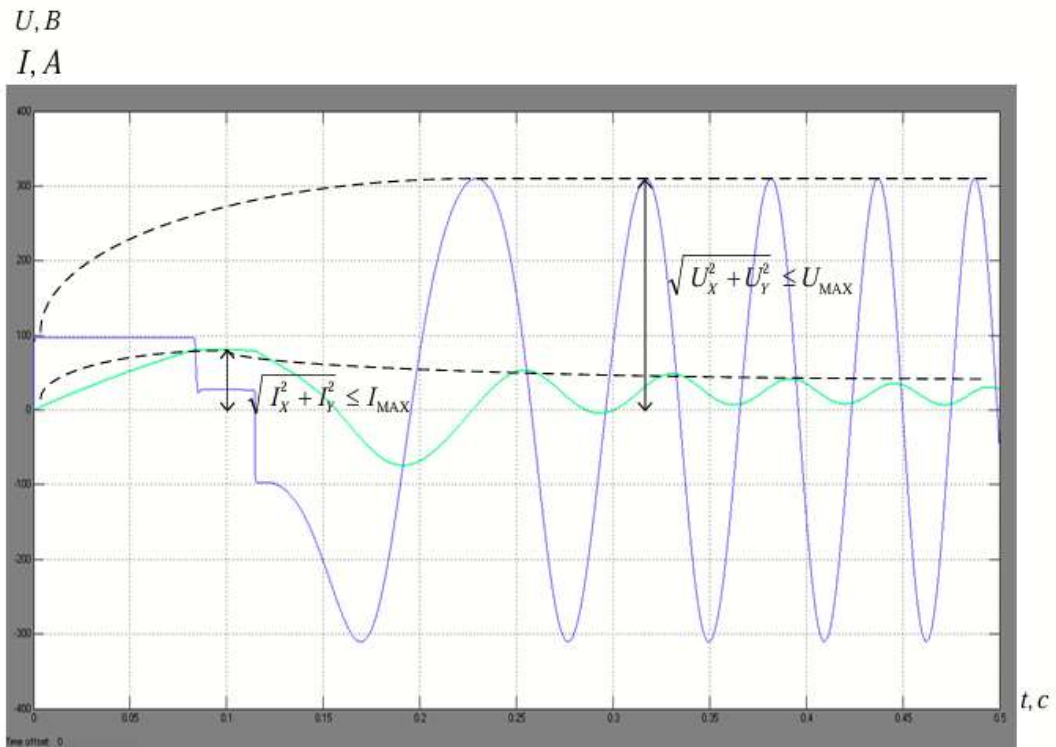


Рис. 2.30. Графіки струму та напруги в нелінійній САУ РЕП при $U_{zc} = 5B$ (пуск і збільшення навантаження)

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

Таким чином, дослідивши нелінійну безперервну САУ частотно-регульованого асинхронного електроприводу при векторному керуванні стаціонарної системи координат при подачі на вхід різних U_{zc} видно:

1. Характер перехідних процесів всім завдань U_{zc} ідентичний.
2. Встановлені величини швидкості і потокозчеплення досягають номінальних значень електроприводу.
3. Перерегулювання в контурі швидкості при різних завданнях U_{zc} не перевищує 5 %.
4. При накиданні та скиданні навантаження перерегулювання в контурі швидкості також не перевищує 5 %.

Графіки струму та напруги показують, що їх максимальні значення не перевищують заданих обмежень

$$(U \leq \sqrt{2} \cdot 220, I \leq 3 \cdot I_{дв.н}).$$

2.7 Заходи із охорони праці та безпеки при експлуатації горизонтально-фрезерного верстата

2.7.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів при експлуатації горизонтально-фрезерного верстата

Місцем експлуатації електроприводу служить сухе приміщення з відсутністю струмопровідного пилу, що класифікується згідно з нормами ПУЕ як приміщення без підвищеної небезпеки. Електробезпека робочого місця фрезерувальника забезпечується застосуванням діелектричного покриття підлоги, опір якого перевищує 0,2 МОм. Несучі елементи цеху виконані зі збірного залізобетону, що відповідає першому ступеню вогнестійкості з межею R 120. Живлення верстата здійснюється від трифазної мережі напругою 380 В і однофазної 220 В. Експлуатація та налагодження електрообладнання потужністю до 1000 В дозволяється персоналу з відповідністю. Основні види небезпек належать до фізичної групи впливів. Дані травми можуть виникнути:

- при попаданні частин одягу і волосся в механізми лінії, що крутяться;
- можливість ураження електричним струмом.

Небезпеки психологічної групи пов'язані з шумом і монотонністю в обслуговування верстата, що призводить до зниження уваги, підвищення травматизму. До шкідливих факторів відносяться:

- вібрація обладнання;
- несприятливий мікроклімат.

2.7.2 Засоби зниження дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників

До роботи в цеху допускаються особи, які виконують правила обслуговування та управління верстатом та інструктаж з дотримання правил техніки безпеки

До робіт з налагодження електроприводу допускаються не менше двох осіб з письмового дозволу керівника.

При налаштуванні схем, заміні запобіжників необхідно використовувати прилади та засоби захисту, призначені для робіт на електроустановки до 1000 В. Засоби захисту, до яких належать резинові калоші, килимки, ізоляція інструменту і т.д., повинні перевірятися перед кожним використанням. При налагодженні приводу необхідно застосування плакатів, що забороняють і попереджають. Випробування електроприводу здійснюється спочатку на холостому ходу потім під навантаженням. Для безпечної роботи механічної частини електроприводу необхідно мати огороження, що мають відповідну міцність. Усі струмопровідні частини електроприводу, проводка повинні бути огорожені та не доступні для випадкового дотику. З цією метою електропривод розміщується у корпусі, захищеному від доступу. Частина проводки в робочій зоні лінії занурена в металорукав або в спеціальні захисні щитки. Усі металеві частини, які можуть опинитися під напругою повинні бути заземлені. Електропривод має бути забезпечений аварійним вимикачем для повного зняття напруги з електродвигуна, проводки та приладів.

Специфіка експлуатації горизонтально-фрезерного верстата потребує комплексного підходу до нейтралізації негативних впливів на оператора. Першочергова увага приділяється зниженню механічного травматизму за допомогою установки захисних екранів та блокувань, які виключають доступ до зони обертання шпинделя під час обробки деталі. Використання сучасних систем керування електроприводом дозволяє реалізувати функцію швидкого динамічного гальмування, що значно скорочує час вибігу інструменту після натискання кнопки зупинки та мінімізує можливість випадкового контакту з рухомими частинами.

Зниження рівня шуму та вібрації досягається за рахунок застосування частотного регулювання асинхронного двигуна. Плавне керування швидкістю обертання дозволяє уникати резонансних частот станини верстата, а відсутність щітково-колекторного вузла в двигуні змінного струму усуває акустичний

високочастотний шум. Точне налаштування перехідних процесів у MATLAB або аналогічних програмних комплексах гарантує відсутність ривків та ударних навантажень у механічних передачах, що продовжує ресурс підшипникових вузлів та знижує загальний рівень структурної вібрації обладнання.

Електробезпека під час експлуатації автоматизованого комплексу підвищується шляхом запровадження сучасних систем заземлення та застосування пристроїв захисного відключення. Розміщення перетворювальної техніки в герметичних шафах зі ступенем захисту не нижче IP54 запобігає попаданню струмопровідної стружки на струмопровідні частини. Впровадження мікропроцесорних систем управління також знижує психологічне навантаження на персонал завдяки автоматизації циклів обробки, що позбавляє оператора виконання одноманітних маніпуляцій і запобігає виникненню професійної втоми.

Оптимізація мікроклімату та чистоти повітряного середовища забезпечується інтеграцією верстата із системами примусової витяжної вентиляції. Використання закритих систем подачі мастильно-охолоджувальної рідини унеможливорює утворення масляного туману в зоні дихання робітника. Таким чином, перехід до регульованого асинхронного електроприводу виступає не лише як технологічне вдосконалення, а й як ефективний інструмент покращення санітарно-гігієнічних умов праці у виробничому цеху.

2.7.3. Пожежна безпека та санітарія

Забезпечення пожежної безпеки під час експлуатації горизонтально-фрезерного верстата з асинхронним електроприводом потребує системного підходу, поділеного на конструктивні, технічні та організаційні заходи.

1. Запобігання загоранням в електротехнічній частині

Основним джерелом пожежної небезпеки в електроприводі є перевантаження і короткі замикання. Для їх виключення застосовуються такі рішення: автоматичний захист: встановлення автоматичних вимикачів та

теплових реле, налаштованих на номінальні струми двигуна змінного струму, що запобігає критичному перегріву обмоток.

Контроль ізоляції: регулярне вимірювання опору ізоляції кабельних ліній та обмоток статора для своєчасного виявлення дефектів, які можуть призвести до іскріння.

Охолодження перетворювача: забезпечення вільної циркуляції повітря навколо частотного перетворювача та очищення його радіаторів від пилу, який може спалахнути при перегріві силових ключів.

2. Пожежна безпека технологічного процесу

Фрезерна обробка супроводжується виділенням тепла та утворенням стружки, що створює додаткові ризики:

Контроль мастильно-охолоджувальної рідини (СОЖ): використання негорючих або важкозаймистих складів для охолодження зони різання. Необхідно стежити за рівнем рідини, щоб унеможливити сухе тертя інструменту про заготовлю.

Видалення відходів: систематичне очищення станини та піддону верстата від металевої стружки, просоченої олією, оскільки така суміш схильна до самозаймання або швидкого поширення полум'я.

Захист від іскор: застосування захисних кожухів, що перешкоджають розльоту розпечених частинок металу у бік легкозаймистих матеріалів або ємностей з ганчіркою.

3. Вимоги до приміщення та оснащення зони робіт

Відповідно до нормативів для виробничих цехів, робоче місце має відповідати встановленим класам пожежної небезпеки:

Вогнестійкість конструкцій: розміщення верстата в приміщенні з межею вогнестійкості не нижче R 120, виконаному з негорючих матеріалів, таких як залізобетон або цегла.

Первинні засоби пожежогасіння: оснащення зони у безпосередній близькості від верстата вуглекислотними вогнегасниками (типу ОУ), які

ефективні при гасінні електроустановок під напругою до 1000 В та не ушкоджують точні механізми верстата.

Шляхи евакуації: збереження вільних проходів навколо обладнання безперешкодного виходу персоналу у разі надзвичайної ситуації.

4. Організаційні заходи

Безпека праці безпосередньо залежить від дотримання регламентів обслуговуючим персоналом:

Заборона використання відкритого вогню: суворе обмеження куріння та проведення зварювальних робіт поблизу фрезерного верстата без спеціального допуску.

Режим прибирання: обов'язкове видалення промасленої ганчірки в спеціальні металеві ящики з кришками, що щільно закриваються, і їх щоденний вивіз з цеху.

Інструктаж: проведення регулярних тренувань з відпрацювання дій під час спрацювання пожежної сигналізації та правил знеструмлення обладнання в аварійному режимі.

У разі виникнення задимлення всередині шафи керування або в самому двигуні першою дією оператора має бути повне відключення верстата від мережі за допомогою грибоподібної кнопки аварійного стопа або головного вступного рубильника.

Для забезпечення пожежної безпеки під час експлуатації горизонтально-фрезерного верстата із сучасним асинхронним приводом необхідно передбачити комплекс технічних засобів. Ці кошти поділяються на стаціонарні системи, первинні пристрої пожежогасіння та автоматику захисту.

1. Автоматичні системи виявлення та сигналізації

У сучасних виробничих цехах встановлення автоматики є обов'язковою вимогою. До них відносяться: Сповіщувачі полум'я та задимлення: у зонах розташування електрощитів та силових перетворювачів встановлюються димові датчики, а над зоною різання – комбіновані сповіщувачі, що реагують на різке підвищення температури. Світлозвукове оповіщення: при спрацюванні будь-

якого датчика активується сирена і світлове табло «Вихід», що вказує шляхи евакуації для персоналу. Інтеграція з електроприводом: система сигналізації повинна мати логічний зв'язок з контролером верстата для автоматичного знеструмлення силових ланцюгів 380 при виявленні ознак горіння.

2. Первинні засоби пожежогасіння

Для локалізації займання на початковій стадії робоче місце фрезерувальника комплектується переносними засобами:

Вуглекислотні вогнегасники (ОУ) є пріоритетними для електромеханіка. Вуглекислота не проводить струму і не забруднює прецизійні вузли верстата (напрямні, шпindel) та електронні плати управління, на відміну від порошкових аналогів.

Пожежний піст: у радіусі доступності повинен бути пожежний щит, укомплектований азбестовим полотном (кошмою) для перекриття доступу кисню до вогнища займання і ящиком з сухим піском.

Внутрішній пожежний водогін: оснащується гнучкими рукавами зі стовбурами, проте використання води категорично заборонено до повного відключення напруги з усіх верстатів.

3. Технічні засоби захисту електроустановок

Пожежу легше запобігти стадії проектування електроприводу, впровадивши такі вузли: Реле контролю фаз та температурні датчики: вбудовані в обмотки асинхронного двигуна терморезистори (РТС-термістори) миттєво розривають ланцюг управління під час перегріву ізоляції. Вогнестійкі кабельні лінії: використання кабелів з індексом «нг-LS» (що не підтримують горіння, з низьким димовиділенням) для прокладання всередині станини верстата.

Герметичні шафи управління: оболонки зі ступенем захисту IP54 і вище запобігають накопиченню всередині горючого пилу та масляного туману, які часто спричиняють «внутрішні» пожежі в електроніці.

4. Засоби колективного та індивідуального захисту

Системи автоматичного пожежогасіння: у великих автоматизованих цехах застосовуються газові установки (наприклад, на основі хладону), які заповнюють

об'єм приміщення складом, що витісняє кисень, не ушкоджуючи дорогого обладнання.

Засоби захисту органів дихання: наявність саморятувальників, що фільтрують, для персоналу, що дозволяють безпечно залишити задимлену зону в разі займання мастильних матеріалів або ізоляції.

Таким чином, при виборі засобів захисту для фрезерного верстата важливим є вуглекислотне пожежогасіння та автоматичне знеструмлення. Це зумовлено специфікою електроприводу, де неприпустиме використання води чи піни досі підтвердженого розриву всіх електричних зв'язків із мережею.

ВИСНОВКИ

Відповідно до технічного завдання в роботі розроблено електропривод горизонтально-фрезерного верстата. Запропоновано в якості регульованого електроприводу використовувати електропривод змінного струму електродвигуна типу **4A160M4УЗ**. Здійснено вибір двигуна та перетворювача частоти. Запропоновано використання перетворювача частоти Danfoss з реалізацією принципів частотно-струмового векторного управління. Виконано синтез та оптимізацію контурів регулювання, розроблено математичну модель системи управління та виконані імітаційні дослідження, результати яких підтвердили відповідність показників якості очікуваним. В цілому, за результатами досліджень зроблено висновок про можливість використання електропривода змінного струму з векторним керуванням для побудови системи автоматичного керування двигуном та дані практичні рекомендації щодо налаштування контурів регулювання. В цілому, результати аналітичних та імітаційних досліджень доводять, що запропонована система автоматизованого ЕП відповідає вимогам технічного завдання. Ця робота виконувалася в програмному середовищі Matlab Simulink. У випускній кваліфікаційній роботі розглянуто питання техніки безпеки, проведено економічний розрахунок та аналіз пуско налагоджувальних робіт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мазуренко Л.І. Керування асинхронними двигунами в системах автоматизованого електропривода. монографія Київ: Наукова думка, 2020. 256 с.
2. Кузнецов, Ю.М. Теорія технічних систем.К. Тернопіль, 1997. 310с.
3. Попов В.И. Динамика станков.К.: Техніка, 1975. 136с.
4. Пересада С.М., Ковбаса С. М. Керування електромеханічними системами на основі асинхронних двигунів: підручник Київ.: НТУУ «КПІ», 2018. 340 с.
5. Руденко В.С., Ромашко В.Я. Напівпровідникові перетворювачі в системах регульованого електропривода: навчальний посібник. Київ: Вища школа, 2015. 280 с.
6. Попович М. Г. Теорія електропривода: підручник. Київ: Вища школа, 2016. 410 с.
7. Кузнецов Б.І., Болюх І. В. Моделювання та синтез систем керування електроприводами верстатів: монографія. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. 190 с.
8. Проць Р.О. Електрообладнання та системи керування металорізальних верстатів: навчальний посібник Львів: Магнолія 2006, 2019. 312 с.
9. Чернов В.О. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні : підручник. Житомир : ЖДТУ, 2018. 445 с.
10. Федоренко Ю.М. Електромеханічне обладнання промислових підприємств. Київ: Видавничий дім «Кондор», 2021. 270 с.
11. Мазуренко Л.І., Шибіко О. В. Системи керування електроприводами: підручник. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 350 с.
12. Попович М.Г., Ковальчук О. В Теорія автоматичного керування: підручник. Київ: Либідь, 2007. 656 с.
13. Терешкевич Л.Б. Основи електропривода: навч. Посібник.Вінниця: ВНТУ, 2012. 154 с.
14. Шанайда В.В. Пакет MathCADв інженерних розрахунках. Тернопіль: вид-во ТДТУ, 2001. 163с.

15. Шавьолкін О. О. Основи автоматизованого електропривода: навч. посібник.
Краматорськ: ДДМА, 2016. 232 с.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

141-103-2026врб

Автор

141-103-2026врб

Науковий керівник / Експерт

Модло Є.

ІД документу

334168307

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

Підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту

6/4/2026

Дата редагування

—

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



5974

Кількість слів



50409

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		14
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		36

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Копію тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Копію тексту

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	--	--

ЗГОДА здобувача освіти Державного університету економіки і технологій про
перевірку кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату
та розміщення в Репозитарії ДУЕТ

Я, Свищ Андрій Іванович, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна бакалаврська робота «Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Асинхронний регульований електропривод горизонтально-фрезерного верстата на основі двигуна змінного струму» виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомлений. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформований, що відповідно до пункту 5.8 «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» згадана робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ) та ознайомлений з умовами такого розміщення.

Дата 01.06.2026

Підпис