МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра Автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РОБОТИ АГЛОМАШИНИ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 курсу, групи ДЕА-А24мг
спеціальності: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(код і найменування спеціальності)

_____/ Павло КОУЛМАН
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Андрій МЕЗЕРЯ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ Павло БУДАНОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Геннадій КАНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль_____/ Євген КЛЮЧКА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/ Євген КЛЮЧКА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025

Додаток ДП-2

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

Кафедра ___АМтаЕТ_____
Спеціальність _174_____
Освітньо-професійна програма _магістр_____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____
(підпис)

д.т.н., професор Канюк Г.І.___
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«___» _____20___р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
_магістерського__рівня вищої освіти

студенту (ці) __ **Коулману Павлу Павловичу** _____
(ім'я, прізвище)

1. Тема _____ **Підвищення якості роботи агломашини шляхом удосконалення системи керування частотно-регульованим електроприводом**

_____
затверджена наказом по академії №____від «___»_____ 20___р.

2. Термін здачі закінченої роботи «_28___»__11____2025___р.

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики головного приводу агломераційної машини (асинхронний двигун $P_n = 250$ кВт, $U_n = 380$ В, сумарний момент інерції $J = 160$ кг·м²); вимоги до технологічного процесу спікання (стабільність швидкості руху спікальних візків);

4. Зміст роботи (перелік питань, які належить розробити):
Аналіз технологічного процесу агломерації та вимог до електроприводу. Огляд сучасних методів керування частотно-регульованим асинхронним електроприводом. Розробка математичних моделей систем векторного керування (FOC) та прямого керування моментом (DTC) в середовищі MATLAB Simulink. Дослідження динамічних характеристик приводу при ударних навантаженнях. Порівняльний аналіз показників якості регулювання (точність швидкості, пульсації моменту) для FOC та DTC.

Розробка рекомендацій щодо впровадження оптимальної системи керування. Економічне обґрунтування та охорона праці.
5.Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):
Актуальність теми та вимоги до агломашини, функціональна схема автоматизованого електроприводу, структурні схеми імітаційних моделей FOC та DTC, результати моделювання перехідних процесів (осцилограми швидкості, моменту, струмів), порівняльний аналіз показників якості регулювання, висновки та рекомендації, висновки.
6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання«_14_»__10__2024___р.

Керівник _____ ___Мезеря А.Ю._____
(підпис) (ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ ___ Коулман П. П.
(підпис) (ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної роботи
(дипломної роботи)

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Аналітичний огляд літературних джерел	14.10-28.10	виконано
2	Теоретичне обґрунтування та розробка моделей	28.10-05.11	виконано
3	Експериментальні дослідження	05.11-14.11	виконано
4	Аналіз результатів та вибір методу керування	14.11-28.11	виконано
5	Висновки	28.11	виконано

Студент (ка) _____ _ Коулман П. П.
(підпис) (ім'я, прізвище)

Нормоконтроль _____ _____ _____
(підпис) (ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Об’єкт дослідження – електромеханічні та технологічні процеси в агломераційній машині стрічкового типу.

Предмет дослідження – методики та технічні засоби, що забезпечують автоматичне керування частотно-регульованим електроприводом агломераційної стрічки.

Мета роботи – підвищення якості роботи агломераційної машини шляхом наукового обґрунтування, синтезу та дослідження вдосконаленої системи керування на базі частотно-регульованого електроприводу.

Методи дослідження. У роботі використано методи математичного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink для аналізу динамічних режимів, методи теорії автоматичного керування для синтезу регуляторів, а також порівняльний аналіз для оцінки ефективності алгоритмів керування (FOC та DTC).

Результати та їх новизна. Науково обґрунтовано переваги векторного керування (FOC) для електроприводу аглострічки, що, на відміну від прямого керування моментом (DTC), забезпечує менші пульсації моменту та вищу стабільність швидкості. Розроблено структуру системи автоматизації на базі ПЛК та частотного перетворювача. Синтезовано алгоритми керування з використанням ПІ-регулятора та задавача інтенсивності, що дозволило досягти плавного пуску без коливань і зменшити динамічні навантаження на механічне обладнання. Запропоновано підходи до інтеграції технологій штучного інтелекту для предиктивного обслуговування.

Сфера застосування – агломераційне виробництво металургійних підприємств, системи автоматизації конвеєрного транспорту.

Ключові слова: АГЛОМЕРАЦІЙНА МАШИНА, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, ПРЯМЕ КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ,

MATLAB/SIMULINK, ПІ-РЕГУЛЯТОР, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, АВТОМАТИЗАЦІЯ.

ABSTRACT

The master's thesis contains: [XX] pages, [XX] figures, [XX] tables, [XX] sources.

The object of research is the electromechanical and technological processes in a belt-type sintering machine.

The subject of research covers the methods and technical means ensuring automatic control of the variable frequency electric drive of the sinter belt.

The goal of the work is to improve the quality of the sintering machine operation through scientific substantiation, synthesis, and research of an advanced control system based on a variable frequency drive.

Research methods. The work uses mathematical modeling methods in the MATLAB/Simulink environment to analyze dynamic modes, automatic control theory methods for synthesizing controllers, and comparative analysis to evaluate the efficiency of control algorithms (FOC and DTC).

Results and their novelty. The advantages of Field Oriented Control (FOC) for the sinter belt drive have been scientifically substantiated; unlike Direct Torque Control (DTC), it provides lower torque ripples and higher speed stability. An automation system structure based on a PLC and a frequency converter has been developed. Control algorithms using a PI controller and a ramp generator have been synthesized, achieving a smooth start without oscillations and reducing dynamic loads on mechanical equipment. Approaches for integrating artificial intelligence technologies for predictive maintenance have been proposed.

Sphere of application – sintering production at metallurgical enterprises, automation systems for conveyor transport.

Keywords: SINTERING MACHINE, INDUCTION MOTOR, VARIABLE FREQUENCY DRIVE, FIELD ORIENTED CONTROL, DIRECT TORQUE CONTROL, MATLAB/SIMULINK, PI CONTROLLER, ENERGY EFFICIENCY, AUTOMATION.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ

АД – Асинхронний двигун

АІН – Автономний інвертор напруги

АР – Амплітудне регулювання

АСУТП – Автоматизована система керування технологічним процесом

В – Випрямляч

ДПС – Двигун постійного струму

МН – Машинне навчання

ПІ – Пропорційно-інтегральний (регулятор)

ПІД – Пропорційно-інтегрально-диференціальний (регулятор)

ПЛК – Програмований логічний контролер

ПЧ – Перетворювач частоти

САК – Система автоматичного керування

ТРН – Тиристорний регулятор напруги

ЧРП – Частотно-регульований привод (електропривод)

ШІ – Штучний інтелект

ШІМ – Широтно-імпульсна модуляція

ANN – Artificial Neural Network (Штучна нейронна мережа)

DC-bus – Direct Current bus (Ланка постійного струму)

DTC – Direct Torque Control (Пряме керування моментом)

ePAC – Ethernet Programmable Automation Controller (Програмований контролер автоматизації з підтримкою Ethernet)

FOC – Field-Oriented Control (Векторне керування)

HMI – Human-Machine Interface (Людино-машинний інтерфейс / Панель оператора)

IGBT – Insulated-Gate Bipolar Transistor (Біполярний транзистор з ізольованим затвором)

PdM – Predictive Maintenance (Предиктивне/прогнозне обслуговування)

PV – Process Variable (Змінна процесу / Реальне значення)

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (Диспетчерське керування та збір даних)

SP – Setpoint (Завдання / Уставка)

SVM – Space Vector Modulation (Просторово-векторна модуляція)

ВСТУП

Ключовим вектором магістерської роботи є підвищення якості роботи агломераційної машини шляхом наукового обґрунтування, синтезу та дослідження вдосконаленої системи керування на базі частотно-регульованого електроприводу з асинхронним двигуном.

Щоб досягти поставлену ціль необхідно вирішити наступні завдання:

- Провести аналіз агломераційної машини як об'єкта керування, визначити її ключові технологічні та електромеханічні параметри.
- Виконати огляд сучасних підходів до керування асинхронними двигунами та обґрунтувати вибір оптимального методу для приводу аглострічки.
- Розробити структурну схему та синтезувати алгоритми системи автоматичного керування швидкістю та моментом на базі сучасних програмованих контролерів та перетворювачів частоти.
- Створити математичну модель системи «Перетворювач частоти – Асинхронний двигун – Аглострічка» для дослідження динамічних режимів роботи.
- Провести моделювання ключових режимів (пуск, реакція на збурення) та проаналізувати ефективність запропонованої системи.
- Об'єктом дослідження є електромеханічні та технологічні процеси в агломераційній машині стрічкового типу.
- Предметну область роботи складають методики та технічні засоби, що забезпечують автоматичне керування частотно-регульованим електроприводом агломераційної стрічки.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці технічних рішень та рекомендацій, впровадження яких дозволить підвищити якість агломерату, збільшити надійність та термін служби механічного обладнання, а також знизити енергоспоживання.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА ОГЛЯД СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Сучасне металургійне виробництво характеризується високими вимогами до якості продукції, енергоефективності та стабільності технологічних процесів.

Агломераційне виробництво, що є ключовою ланкою у підготовці залізорудної сировини для доменної плавки, не є винятком. Якість агломерату безпосередньо впливає на техніко-економічні показники роботи доменних печей, зокрема на питому витрату коксу та продуктивність.

Водночас агломераційні машини є складними електромеханічними комплексами, що працюють у важких умовах і характеризуються значною енергоємністю. [1]

Об'єкти керування в агломераційному виробництві є істотно нелінійними, нестаціонарними та піддаються впливу інтенсивних неконтрольованих збурень, що ускладнює забезпечення стабільності процесу. [2]

Схема агломераційної машини зображена на рисунку 1.1.

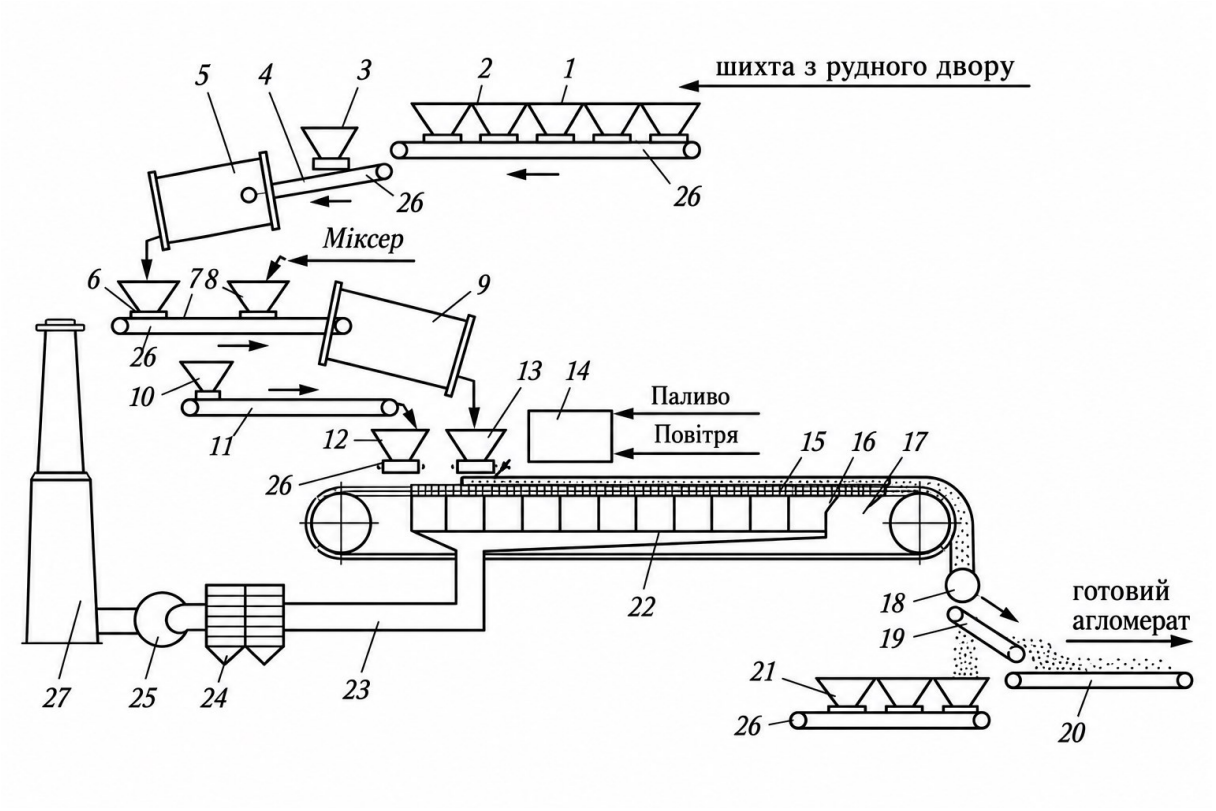


Рис. 1.1 - Схема агломераційної машини

1 - бункер для прийому вихідної сировини; 2, 4 - конвеєрні лінії транспортування; 3, 6, 8 - накопичувальні ємності (бункери); 5 - змішувальний барабанний агрегат; 7, 11, 20 - стрічкові транспортери; 9 - барабан для окомкування шихти; 10 - вхідний приймальний бункер; 12, 13 - бункери проміжного зберігання матеріалу; 14 - запалювальне горно; 15 - шар агломераційної шихти; 16 - захисний прошарок із підвищеною газопроникністю; 17 - агломераційна машина; 18 - дробильний пристрій; 19 - сортувальний грохот; 21 - бункер накопичення зворотy; 22 - блок вакуум-камер; 23 - газовий колектор; 24 - пиловловлювач циклонного типу; 25 - ексгаустер; 26 - живильний пристрій; 27 - димова труба.

У цьому контексті електропривід агломераційної стрічки, що відповідає за рух палет з шихтою, відіграє не просто допоміжну, а одну з ключових технологічних ролей.

Стабільність та точність підтримки швидкості руху палет є визначальним фактором для забезпечення оптимального теплового режиму спікання, що формує кінцеві металургійні властивості продукту.

Застарілі системи керування електроприводами, що досі експлуатуються на багатьох підприємствах, не здатні забезпечити необхідний рівень точності та динаміки, що призводить до зниження якості агломерату, підвищених енерговитрат та прискореного зносу механічного обладнання. [3]

1.1 Технологічний процес агломерації та його ключові параметри

Процес агломерації залізних руд, винайдений наприкінці XIX століття, є термічним процесом утворення відносно великих грудок (агломерату) з подрібненого рудного концентрату та інших дрібнофракційних матеріалів. [4]

Основна мета агломерації - надання сировині властивостей (розмір, міцність, газопроникність), необхідних для ефективного протікання процесів у доменній печі.

Використання непідготовленої, пилоподібної руди в доменній плавці призводить до її винесення потоком газів, погіршення газопроникності стовпа шихти та, як наслідок, зниження техніко-економічних показників плавки.

Технологічний процес агломерації складається з кількох послідовних етапів. На першому етапі відбувається підготовка сировини, або шихти. До її складу входять залізорудні концентрати, вапняк (флюс), дрібний кокс або антрацит (паливо), а також вторинні матеріали, такі як доменний пил та колошниковий дріб'язок. [1]

Компоненти піддаються дробленню, сортуванню, збагаченню та усередненню для досягнення оптимального хімічного складу та

гранулометрії. Належна підготовка шихти, зокрема її огрудкування, є критично важливою для забезпечення рівномірної газопроникності шару під час спікання. [5, 6].

Основною установкою для виробництва агломерату є агломераційна машина конвеєрного (стрічкового) типу. [7].

Вона являє собою нескінченну стрічку, що складається з шарнірно з'єднаних візків (палет), які рухаються по рейках. Кожна палета має колосникову решітку, на яку спочатку укладається захисний шар (постіль) з готового агломерату для захисту решітки від високих температур, а потім - основний шар підготовленої шихти. [8]

Після завантаження палета проходить під запалювальним горном, де верхній шар шихти підпалюється за рахунок спалювання газу. Далі, під час руху палет над вакуум-камерами, через шар шихти просочується повітря, що підтримує горіння палива всередині шару.

У результаті цього утворюється зона горіння з високою температурою, яка поступово переміщується зверху вниз, проходячи всю товщу шару. У шарі шихти формуються послідовні температурні зони: зона початкової шихти, зона перезволоження, зона сушіння, зона інтенсивного нагрівання, зона горіння твердого палива та зона готового агломерату. [2]

Процес спікання для однієї палети триває від 15 до 20 хвилин. У кінці машини палета перекидається, і готовий «агломераційний пиріг» вивантажується для подальшого дроблення, грохочення та охолодження.

Ключовим аспектом, що визначає якість кінцевого продукту, є строга синхронізація швидкості руху палет з вертикальною швидкістю проходження зони горіння. Швидкість руху палет повинна бути відрегульована таким чином, щоб процес спікання (досягнення зоною горіння колосникової решітки) завершувався точно в момент, коли палета проходить над останньою вакуум-камерою. [9]

Будь-яке відхилення від цього оптимального режиму призводить до погіршення якості. Занадто висока швидкість веде до неповного пропікання

нижніх шарів шихти, що збільшує вихід дрібної фракції (звороту). Занадто низька швидкість спричиняє перегрів та переплавлення шихти, що погіршує відновлюваність агломерату в доменній печі та знижує продуктивність машини.

Таким чином, агломераційний процес є нелінійною динамічною системою з розподіленими параметрами, де стабільність швидкості руху аглострічки виступає не просто механічною вимогою, а фундаментальною технологічною умовою. Нестабільність швидкості вносить значне неконтрольоване збурення в чутливий тепловий баланс процесу.

Це порушення призводить до нерівномірного спікання по довжині та ширині стрічки, що безпосередньо погіршує ключові показники якості агломерату:

- **Механічна міцність (барабанний показник):** Характеризує здатність агломерату витримувати ударні навантаження під час транспортування та завантаження в доменну піч. Низька міцність призводить до утворення дріб'язку.
- **Стираність:** Показує стійкість до стирання. Висока стираність також веде до утворення пилу.
- **Вміст дрібної фракції (< 5 мм):** Є прямим показником браку. Ця фракція (зворот) повертається на початок процесу, що знижує корисну продуктивність машини. [2]

Отже, система керування електроприводом є первинним інструментом для стабілізації одного з найважливіших технологічних параметрів, що дозволяє мінімізувати варіативність процесу та забезпечити стабільно високу якість продукції.

1.2 Характеристика електроприводу агломераційної стрічки

Електропривід агломераційної машини є унікальним об'єктом з точки зору електромеханіки, що працює в одному з найважчих режимів у металургії.

Його навантаження характеризується кількома специфічними особливостями, які висувають жорсткі вимоги до системи керування.

Основною механічною характеристикою приводу є величезний момент інерції. Аглострічка складається з сотень масивних литих чавунних візків-палет, маса яких може становити понад 50% від загальної маси всієї агломераційної машини.

Ця величезна маса, розподілена по довжині конвеєра, створює зведений момент інерції на валу двигуна, що є одним з найбільших у промислових установках з конвеєрним типом руху. Таке навантаження має значний вплив на динамічні режими роботи приводу, особливо на процеси пуску та гальмування. [10, 11]

Традиційні системи приводу, які досі можна зустріти на аглофабриках, часто складаються з електродвигуна постійного струму або асинхронного двигуна, керування яким здійснюється за допомогою застарілих методів.

Наприклад, привід може складатися з електродвигуна, редуктора та відкритої зубчастої передачі, що приводить в рух приводні зірочки.

Регулювання швидкості в таких системах, якщо воно взагалі передбачене, реалізується неефективними методами, наприклад, за допомогою двигуна постійного струму, що вимагає складного обслуговування, або через індукційні муфти ковзання для двигунів змінного струму. [12]

Найбільш критичним режимом для таких систем є пуск. Застосування прямого пуску асинхронного двигуна, який є найпростішим методом, призводить до катастрофічних наслідків для такого інерційного механізму.

У момент пуску двигун споживає струм, що у 6-8 разів перевищує номінальний, і розвиває величезний, практично неконтрольований пусковий момент. [13, 14]

Цей моментний удар (ривок) створює екстремальні динамічні навантаження на всі елементи механічної передачі: вал двигуна, муфти, шестерні редуктора, приводні зірочки та шарнірні з'єднання палет. Такі ударні навантаження є основною причиною прискореного зносу, втомних руйнувань металу та раптових відмов обладнання. Крім того, високі пускові струми створюють значні просадки напруги в цеховій електромережі, негативно впливаючи на роботу іншого обладнання.

Таким чином, виникає фундаментальна невідповідність між вимогами технології та можливостями традиційних систем керування. З одного боку, технологічний процес вимагає плавного, точного та стабільного руху стрічки. З іншого боку, інерційний характер навантаження у поєднанні з примітивними методами керування робить пуск руйнівним, а регулювання швидкості - неточним та неефективним.

Модернізація системи приводу шляхом впровадження сучасного ЧРП вирішує не лише задачу точного підтримання швидкості під час роботи. Вона є критично важливим заходом для забезпечення механічної довговічності та надійності всієї агломераційної машини. [14]

1.1 Сучасні підходи до керування асинхронними двигунами

Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, зображений на рисунку 1.2, є фундаментальним компонентом більшості систем електроприводу в промисловості, забезпечуючи перетворення енергії з електричної форми в механічну із забезпеченням високих показників ефективності. [13]

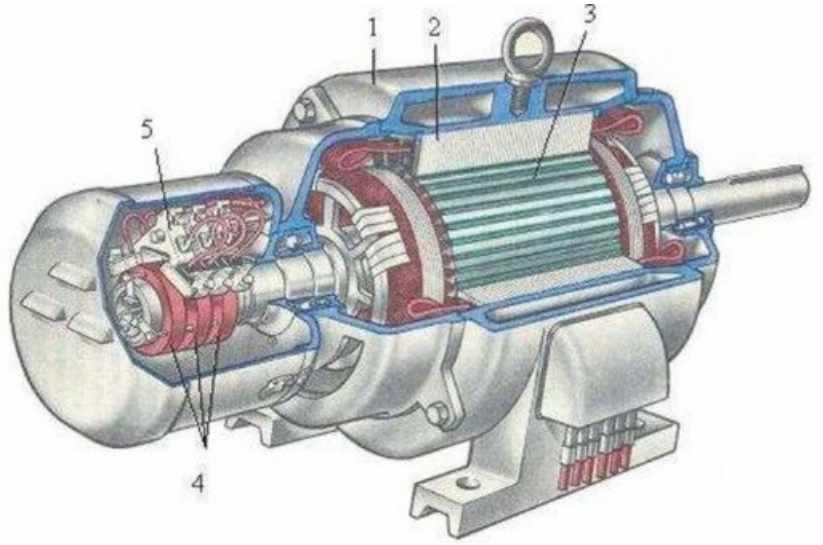


Рис. 1.2 - Трифазний асинхронний двигун

1 – станина, 2 – пази статора, 3 – ротор, 4 – контактні кільця, 5 щітки

Його широке розповсюдження зумовлене винятковою надійністю, простотою конструкції, відсутністю щітково-колекторного вузла, що зношується, та відносно низькою вартістю.

Двигун складається з нерухомого статора з трифазною обмоткою та обертового ротора, обмотка якого виконана у вигляді «білячої клітки» з алюмінієвих або мідних стрижнів, замкнених накоротко кільцями. [15]

Генерація обертального моменту в двигуні відбувається внаслідок електромагнітної взаємодії обертового поля статора, утвореного при підключенні до трифазної мережі, зі струмами, індукованими в обмотці ротора. Необхідною умовою виникнення індукційних струмів, а отже і моменту, є нерівність кутових швидкостей ротора та магнітного поля статора. Це явище, відоме як ковзання, визначає асинхронний характер роботи електричної машини. [16]

Хоча асинхронний двигун є простим і надійним, керування його швидкістю є нетривіальною задачею. Швидкість обертання електромагнітного поля є величиною, що пропорційно залежить від значень частоти напруги живлення. Саме цей принцип лежить в основі сучасних

систем керування - частотно-регульованих приводів або перетворювачів частоти. [17, 18]

ЧРП - це електронний пристрій, що перетворює змінний струм промислової частоти (50 Гц) на постійний, а потім знову на змінний, але вже з необхідною частотою та амплітудою напруги.[24] Змінюючи частоту вихідної напруги, ЧРП дозволяє плавно регулювати швидкість обертання двигуна в широкому діапазоні. [14]

Однак, сам факт регулювання частоти ще не гарантує високої якості керування. Сучасні ЧРП реалізують різні за складністю та ефективністю методи (алгоритми) керування. Вибір методу керування є ключовим для досягнення поставлених цілей у конкретному застосуванні.

1.4 Векторне керування (Field-Oriented Control, FOC)

Метод векторного керування, або FOC (Field-Oriented Control), є однією з найпоширеніших технологій високоякісного регулювання асинхронних двигунів. Історично його розробка була мотивована прагненням забезпечити керування асинхронним двигуном (АД) з такою ж легкістю, точністю та динамікою, що притаманні двигунам постійного струму (ДПС) з незалежним збудженням.

У ДПС магнітний потік (створюваний струмом обмотки збудження) та електромагнітний момент (створюваний струмом обмотки якоря) є ортогональними величинами, що дозволяє керувати ними незалежно. В асинхронному двигуні ці змінні є взаємопов'язаними, що значно ускладнює процес керування. [19-21]

Математична модель та перетворення координат

В основі методу FOC лежить математична модель двигуна, яка за допомогою векторних перетворень розкладає вектор струму статора на дві ортогональні складові. Ключова ідея, запропонована Ф. Блашке у 1971 році, полягає у переході від керування трьома фазними струмами статора в

нерухомій системі координат до керування в обертовій системі координат (d,q), яка синхронізована з вектором потокозчеплення ротора.

У цій системі координат струм статора розділяється на дві незалежні складові:

1. **Складова Id** - відповідає за створення магнітного потоку (функціональний аналог струму збудження в ДПС).
2. **Складова Iq** - відповідає за створення електромагнітного моменту (функціональний аналог струму якоря).

Незалежне керування цими складовими дозволяє системі з високою точністю та швидкодією регулювати як потік, так і момент двигуна [19, 22]

Структурна реалізація системи FOC

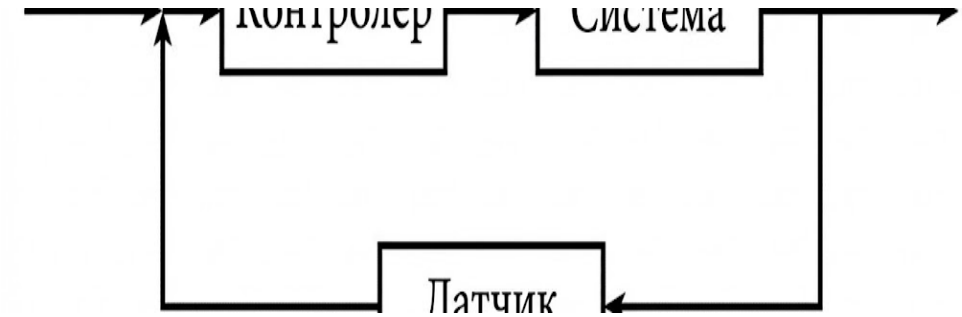


Рис 1.3 - Структурна реалізація системи FOC

Типова структура системи векторного керування, зображена на рисунку 1.3, є складною і включає наступні функціональні блоки [9]:

1. **Вимірювальні елементи:** датчики струму у двох фазах статора та датчик положення ротора (енкодер), який надає інформацію про кутову швидкість і положення вала.
2. **Перетворення Кларка (ABC→αβ):** трансформація трифазної системи струмів у еквівалентну двофазну ортогональну систему, зафіксовану відносно статора.
3. **Перетворення Парка (αβ→dq):** перехід від нерухомої системи координат до двофазної системи, що обертається синхронно з вектором потокозчеплення ротора. Для коректного виконання цього перетворення необхідна точна інформація про кут орієнтації поля.

4. **Контури регулювання:** система містить два внутрішніх незалежних пропорційно-інтегральних (ПІ) регулятори струму (для Isd та Isq) та зовнішній контур регулювання швидкості. ПІ-регулятор швидкості формує завдання для активної складової струму (Isq) на основі неузгодженості між заданою та реальною швидкістю. Завдання для реактивної складової (Isd) зазвичай залишається постійним для підтримки номінального потоку.
5. **Зворотні перетворення та модуляція:** вихідні сигнали регуляторів (завдання на напруги Usd та Usq) проходять зворотні перетворення Парка та Кларка (dq→αβ→ABC). Фінальний блок просторово-векторної модуляції (SVM) генерує послідовність імпульсів для інвертора, забезпечуючи формування синусоїдального струму з мінімальними пульсаціями [10].

Аналіз ефективності методу

Впровадження векторного керування забезпечує низку суттєвих переваг:

- Висока точність регулювання швидкості та моменту як у статичних, так і в динамічних режимах [7]
- Жорсткі механічні характеристики та здатність підтримувати повний номінальний момент на нульовій швидкості [28].
- Підвищена енергоефективність приводу завдяки оптимальному співвідношенню струму та моменту, а також зниження акустичного шуму та вібрацій [7].

Водночас метод має певні недоліки, пов'язані з його реалізацією.

По-перше, алгоритм є обчислювально складним і вимагає продуктивних мікроконтролерів для виконання координатних перетворень у реальному часі [7, 28]. По-друге, система є чутливою до точності параметрів двигуна.

Якість керування критично залежить від коректності орієнтації по полю, на що впливає зміна активного опору ротора (зокрема, при нагріванні

під час роботи). Відхилення параметрів моделі від реальних може призвести до порушення роз'єднання каналів керування і погіршення динамічних характеристик, що у важких промислових умовах вимагає застосування адаптивних алгоритмів [8, 28].

1.5 Пряме керування моментом (Direct Torque Control, DTC)

Принципи прямого керування моментом та порівняльний аналіз з векторним керуванням

Конкурентною альтернативою для реалізації систем високопродуктивного керування асинхронними двигунами виступає метод Direct Torque Control (DTC), який базується на принципах прямого керування моментом. Розроблена в середині 1980-х років М. Депенброком та І. Такахаші [14], ця технологія отримала подальший розвиток і промислову реалізацію, зокрема компанією ABB [30]. На відміну від векторного керування (FOC), що намагається імітувати двигун постійного струму через складні координатні перетворення та використання ШІМ-модулятора, DTC базується на прямому виборі оптимального вектору напруги інвертора для керування ключовими змінними стану двигуна - потокозчепленням статора та електромагнітним моментом. [26]

Фізичні основи та математична модель

В основі DTC лежить фізичний принцип прямого впливу вектору напруги статора на зміну вектору потокозчеплення *Ψs*. Динаміка цього процесу описується рівнянням:

$$d\Psi s/dt = U_s - I_s \cdot R_s \qquad (1.1)$$

де *Us* - вектор напруги статора, *Is* - вектор струму статора, *Rs* - активний опір статора. На високих швидкостях, коли падінням напруги на

активному опорі ($Is \cdot Rs$) можна знехтувати, зміна потоку визначається виключно прикладеним вектором напруги.

Електромагнітний момент M у цій системі пропорційний векторному добутку векторів потокозчеплення статора Ψs та ротора Ψr [15]:

$$M = k \cdot |\Psi s| \cdot |\Psi r| \cdot \sin(\delta) \quad (1.2)$$

де δ - кут між векторами Ψs та Ψr.

Стратегія керування полягає у підтриманні модуля потокозчеплення статора $|\Psi s|$ у межах заданого гістерезисного коридору при одночасній швидкій зміні його кутового положення. Це призводить до миттєвої зміни кута δ і, відповідно, моменту M. Керування реалізується шляхом комутації одного з восьми можливих базових векторів напруги дворівневого інвертора (шість активних та два нульових) [26-28]

Структурна реалізація

Концептуально структура DTC є простішою за FOC, оскільки не містить блоків координатних перетворень Парка та контурів струму з ПІ-регуляторами [18]. Система складається з наступних функціональних елементів [9, 21]:

1. **Оцінювач (Estimator):** Обчислювальний блок, який у реальному часі на основі виміряних фазних струмів, напруги в ланці постійного струму та стану ключів інвертора розраховує поточні значення модуля та кута вектору потокозчеплення статора, а також електромагнітного моменту .
2. **Гістерезисні регулятори:**
    1. *Регулятор потоку:* Дворівневий компаратор, що контролює знаходження потоку в межах заданого допуску ($\Psi ref \pm \Delta \Psi$).
    2. *Регулятор моменту:* Трирівневий компаратор, який визначає необхідність збільшення, зменшення моменту або його утримання на поточному рівні.

3. **Визначник сектора:** Логічний блок, що встановлює положення вектора потокозчеплення в одному з шести 60-градусних секторів площини $\alpha\beta$.
4. **Таблиця комутацій (Switching Table):** Центральний елемент алгоритму, реалізований зазвичай у вигляді таблиці істинності. На основі сигналів від регуляторів та номера сектора таблиця вибирає оптимальний вектор напруги, який необхідно подати на двигун для найшвидшої компенсації помилок регулювання. [27]

Аналіз переваг та недоліків методу

Застосування методу DTC забезпечує специфічні експлуатаційні характеристики:

- **Переваги:** Надзвичайно висока швидкодія (час реакції < 5 мс) завдяки відсутності затримок у ПІ-регуляторах. Висока робастність (стійкість) до зміни параметрів ротора та опору статора, що робить систему стійкою до варіацій навантаження. Структурна простота програмної реалізації .
- **Недоліки:** Підвищені пульсації моменту та струму, що може призводити до шуму та вібрацій. Змінна частота комутації, що ускладнює забезпечення електромагнітної сумісності. Зниження точності оцінювання потоку на низьких швидкостях через похибки вимірювання та вплив $Is \cdot Rs$.

Порівняльний аналіз FOC та DTC для приводу агломашини

Вибір оптимального методу керування для модернізації приводу агломашини вимагає ретельного порівняння з урахуванням специфіки технологічного об'єкта. Результати порівняльного аналізу за ключовими критеріями наведено в таблиці 1. [28]

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика методів FOC та DTC

Критерій	**FOC (Векторне керування)**	**DTC (Пряме керування моментом)**	**Значення для агломашини**
Динаміка	Дуже добра (обмежена ПІ-регуляторами)	Відмінна (найшвидша можлива реакція)	**Перевага DTC:** Здатність миттєво реагувати на ударні навантаження критична для захисту механіки.
Точність у сталому режимі	Відмінна (низька статична помилка, плавність)	Добра (обмежена шириною гістерезису)	**Перевага FOC:** Важлива для стабільності процесу спікання.
Пульсації моменту	Низькі	Високі	**Перевага FOC:** Зниження вібрацій подовжує ресурс редуктора та тягового ланцюга.
Робота на низьких швидкостях	Дуже добра (повний момент з енкодером)	Складна (похибки оцінювача)	**Перевага FOC:** Важливо для інспекційних та налагоджувальних режимів.
Робастність	Висока чутливість до параметрів двигуна	Низька чутливість	**Перевага DTC:** Стабільність при нагріванні двигуна під навантаженням.

Теоретичний аналіз виявляє фундаментальний інженерний компроміс. З одного боку, DTC пропонує виняткову динаміку та робастність, що є привабливим для роботи в умовах ударних навантажень. З іншого боку, FOC забезпечує вищу точність, плавність ходу та менші пульсації моменту, що є критично важливим для довготривалої експлуатації механічних вузлів. Фінальний вибір методу повинен базуватися на практичному моделюванні, яке дозволить кількісно оцінити ці фактори в умовах, що імітують реальну роботу агломашини. [29,30]

Чутливість до Варіації Параметрів Двигуна

Однією з найважливіших практичних відмінностей між FOC та DTC є їхня чутливість до неточностей у параметрах моделі двигуна.

Якість розв'язування каналів керування в системі FOC критично залежить від точності значення постійної часу ротора, яка використовується для обчислення кута ковзання. Опір ротора може значно змінюватися (до 50% і більше) через нагрівання обмоток під час роботи. Така зміна призводить до похибки в орієнтації системи координат, втрати розв'язування, погіршення динамічних характеристик, зниження ефективності та, в критичних випадках, до втрати стійкості системи. [31]

Система DTC, навпаки, є значно стійкішою до варіацій параметрів ротора, оскільки її основний алгоритм керування базується на stator-side змінних. Це надає DTC вроджену робастність, що є суттєвою перевагою в реальних умовах експлуатації, де температура двигуна постійно змінюється. Однак, як зазначалося раніше, на низьких та нульових швидкостях продуктивність DTC стає чутливою до точності значення опору статора. [32]

Таким чином, виникає фундаментальний компроміс між робастністю та прецизійністю. DTC пропонує "достатньо добру" продуктивність, яка є надійною в широкому діапазоні робочих умов. FOC, у свою чергу, пропонує "відмінну" продуктивність (низькі пульсації, висока точність) за умови, що модель двигуна є точною. Це означає, що для підтримки високої

продуктивності системи FOC часто вимагають складних алгоритмів онлайн-адаптації параметрів, що додатково ускладнює систему керування. [33-36]

В ході аналізу технологічного процесу встановлено, що критичним параметром, який визначає якість агломерату та ефективність спікання, є стабільність швидкості руху палет. Існуючі системи електроприводу з прямим пуском створюють неприпустимі динамічні навантаження, при яких ударні моменти перевищують номінальні у 4–10 разів, що призводить до прискореного зносу кінематичних вузлів. На основі порівняльного аналізу методів керування обґрунтовано доцільність впровадження частотно-регульованої системи на базі векторного керування (FOC), оскільки, на відміну від прямого керування моментом (DTC), воно забезпечує необхідну плавність ходу, менші пульсації моменту та вищу точність у сталому режимі, що є пріоритетним для високоінерційного конвеєрного навантаження .

РОЗДІЛ 2
РОЗРОБКА ТА СИНТЕЗ ВДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Перехід від аналізу існуючих проблем до їх вирішення вимагає синтезу конкретної, технічно обґрунтованої системи автоматичного керування (САК).

Цей розділ присвячений розробці сучасної архітектури керування електроприводом агломераційної стрічки, вибору апаратних засобів автоматизації, синтезу алгоритмів керування та створенню математичної моделі для верифікації запропонованих рішень. Метою є створення інтегрованої системи, що забезпечує високу точність, надійність та гнучкість керування.

2.1 Структурна схема та вибір технічних засобів автоматизації

Для керування таким складним об'єктом, як агломашина, доцільно застосовувати ієрархічну структуру системи керування. Така архітектура дозволяє розподілити завдання між різними рівнями автоматизації, де кожен компонент виконує функції, для яких він найкраще пристосований. Пропонована система має трирівневу структуру:

1. **Верхній рівень (рівень людино-машинного інтерфейсу):** Реалізується на базі SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition) або панелі оператора (HMI). На цьому рівні оператор-технолог здійснює моніторинг ключових параметрів процесу (швидкість стрічки, температура в горні, розрідження у вакуум-камерах тощо), задає уставки (наприклад, бажану швидкість руху палет), отримує повідомлення про аварійні ситуації та переглядає архіви даних.

2. **Середній рівень (рівень логічного керування):** Ядром цього рівня є програмований логічний контролер (ПЛК). ПЛК виконує основну логіку керування процесом: реалізує алгоритм регулювання швидкості, обробляє сигнали від датчиків, керує послідовністю операцій (пуск, зупинка, реверс), реалізує блокування та захисти, а також обмінюється даними з верхнім та нижнім рівнями.
3. **Нижній рівень (польовий рівень):** Цей рівень складається з виконавчих механізмів та датчиків. Ключовим елементом є частотно-регульований електропривод (ЧРП), який безпосередньо керує асинхронним двигуном. Також на цьому рівні знаходяться датчики (наприклад, датчик швидкості), що надають зворотний зв'язок для системи керування.

Зв'язок між рівнями здійснюється за допомогою сучасних промислових мереж, таких як PROFINET або EtherNet/IP, що забезпечують швидкий та надійний обмін даними в реальному часі.

Для реалізації середнього рівня керування потрібен ПЛК з високою продуктивністю, розвиненими комунікаційними можливостями та надійністю. Оптимальним вибором для такого завдання є контролери сімейства **Siemens SIMATIC S7-1500**. Ці ПЛК характеризуються високою швидкістю обробки команд (до 0.3 нс на бітову операцію), великим обсягом пам'яті, вбудованими портами PROFINET для легкої інтеграції в промислові мережі та розширеними функціями діагностики, що дозволяють швидко виявляти та усувати несправності.

Модульна конструкція дозволяє гнучко масштабувати систему, а інтеграція в єдине інженерне середовище TIA Portal значно спрощує програмування та налагодження. Як альтернатива може розглядатися контролер **Schneider Electric Modicon M580**, який також є високопродуктивним ePAC (Ethernet Programmable Automation Controller) з акцентом на вбудовану кібербезпеку та підтримку відкритих протоколів, що є важливим для сучасних промислових систем.

Вибір ЧРП є критично важливим, оскільки саме він реалізує високошвидкісні алгоритми керування двигуном. Для приводу аглострічки необхідний перетворювач, призначений для важких промислових умов та здатний працювати з великими інерційними навантаженнями. Ключовими вимогами є підтримка векторного керування або DTC, відповідний діапазон потужностей та надійність.

Одним з найкращих рішень у цьому класі є приводи серії **ABB ACS880**. Їхньою головною перевагою є технологія прямого керування моментом (DTC), що забезпечує неперевершену динаміку та точність керування моментом навіть без датчика зворотного зв'язку.

Це дозволяє системі миттєво реагувати на будь-які зміни навантаження, підтримуючи швидкість стрічки з максимальною стабільністю. Приводи ACS880 сумісні з різними типами двигунів та легко інтегруються в системи автоматизації через широкий вибір комунікаційних адаптерів.

Альтернативним варіантом є перетворювачі **Siemens SINAMICS G120** (у модульній конфігурації з силовим модулем PM240-2 або PM250) або **SINAMICS S120**. Ці приводи підтримують високопродуктивне векторне керування (зі зворотним зв'язком або без нього), мають вбудовані функції безпеки (Safety Integrated) та безшовно інтегруються з контролерами SIMATIC через PROFINET, що створює єдину, узгоджену систему автоматизації від одного виробника.

Для реалізації замкненої системи векторного керування з найвищою точністю на валу асинхронного двигуна встановлюється інкрементальний енкодер. Він надає точну інформацію про поточну швидкість та положення ротора, що дозволяє ПЛК та ЧРП здійснювати прецизійне регулювання. В якості двигуна використовується стандартний трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором загальнопромислової серії (наприклад, АИР) відповідної потужності, напруги та монтажного виконання. [41]

Таблиця 2.1

Технічні засоби автоматизації

Компонент	**Приклад моделі**	**Ключові технічні характеристики**
ПЛК	Siemens SIMATIC S7-1500 (CPU 1515-2 PN)	Швидкодія: 30 нс/біт. оп.; Робоча пам'ять: 500 KB (програма), 3 MB (дані); Інтерфейси: 2 x PROFINET IO (для синхронізації з ЧРП); Підтримка OPC UA [36]
ЧРП	ABB ACS880-01 (типорозмір R9)	Номінальна потужність: **250 кВт**; Напруга: 380-500 В; Метод керування: Пряме керування моментом (DTC) з можливістю програмної реалізації FOC; Інтерфейс: PROFINET [41]
Двигун	Асинхронний двигун серії IEC-виконання	Номінальна потужність: **250 кВт**; Номінальна швидкість: **985 об/хв** ($p=3$); Напруга: 380/660 В; Монтажне виконання: IM1081 [44]
Датчик	Інкрементальний енкодер	Роздільна здатність: 1024 імп/об; Тип виходу: HTL (стійкий до завад); Ступінь захисту: IP65

2.2 Синтез алгоритмів керування швидкістю та моментом електроприводу

Програмна реалізація системи керування передбачає розробку алгоритмів, що виконуються в ПЛК та налаштування параметрів ЧРП. Синергія цих двох пристроїв дозволяє створити потужну та гнучку систему. ПЛК відповідає за загальну логіку процесу та повільні контури

регулювання, тоді як ЧРП бере на себе швидкі, обчислювально інтенсивні задачі керування моментом та потоком двигуна.

Основним завданням ПЛК є підтримання заданої оператором швидкості руху аглострічки з високою точністю. Для цього в ПЛК реалізується замкнений контур регулювання. В якості закону регулювання доцільно використовувати класичний пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор. [45]

Вхідні дані для ПІД-регулятора: Завдання (Setpoint, SP): бажана швидкість руху стрічки, що надходить від HMI. Змінна процесу (Process Variable, PV): реальна швидкість руху, розрахована на основі сигналу від енкодера, встановленого на валу двигуна.

Робота регулятора: Регулятор обчислює помилку регулювання як різницю між завданням та реальною швидкістю. На основі цієї помилки, її інтегралу та похідної, ПІД-алгоритм формує вихідний керуючий сигнал. У даній системі цим сигналом буде завдання по моменту для ЧРП.

Вихід регулятора: Обчислене завдання по моменту передається з ПЛК на ЧРП через промислову мережу PROFINET в режимі реального часу.

ЧРП налаштовується на роботу в режимі керування моментом (Torque Control). Це означає, що ЧРП не намагається самостійно регулювати швидкість, а лише відпрацьовує те завдання по моменту, яке він отримує від ПЛК. [46]

Ідентифікація параметрів двигуна: Перед першим запуском виконується процедура автоналаштування, під час якої ЧРП подає на нерухомий двигун тестові сигнали та вимірює його електричні параметри (активні та індуктивні опори статора та ротора). Ці дані є критично важливими для коректної роботи математичної моделі всередині векторного контролера.

Налаштування лімітів: Встановлюються максимальні значення струму та моменту для захисту двигуна та механіки від перевантажень.

Конфігурація зв'язку: Налаштовується приймання завдання по моменту від ПЛК через PROFINET.

Загальна логіка роботи системи:

- **Пуск:** Оператор задає швидкість та натискає кнопку «Пуск» на HMI. ПЛК починає плавно збільшувати завдання по моменту для ЧРП відповідно до запрограмованої розгінної рампи. ЧРП, відпрацьовуючи це завдання, плавно розганяє двигун. ПІД-регулятор швидкості вступає в роботу, коректуючи момент для точного виходу на задану швидкість без перерегулювання.
- **Стабільна робота:** ПІД-регулятор в ПЛК постійно порівнює задану та реальну швидкість. При виникненні збурення (наприклад, зміна ваги шихти на стрічці, що змінює момент опору), з'являється помилка. Регулятор миттєво змінює завдання по моменту для ЧРП, щоб компенсувати збурення та утримати швидкість на заданому рівні. ЧРП, завдяки високій динаміці векторного керування, практично миттєво відпрацьовує нове завдання по моменту.
- **Зупинка:** ПЛК реалізує плавну зупинку, поступово зменшуючи завдання по моменту згідно з гальмівною рампою.
- **Аварійні ситуації:** ПЛК контролює стан ЧРП. У разі виникнення несправності (перегрів, перевантаження, зникнення фази), ПЛК отримує відповідний сигнал, безпечно зупиняє привід та виводить повідомлення для оператора.

Така ієрархічна структура є оптимальною. ПЛК, як гнучкий та потужний пристрій, керує загальною логікою процесу, яку легко модифікувати та адаптувати. ЧРП, як спеціалізований високошвидкісний пристрій, ефективно вирішує складну задачу керування електромагнітними процесами в двигуні. Це поєднання забезпечує максимальну продуктивність, точність та надійність системи.

2.3 Розробка математичної моделі системи «Перетворювач частоти – Асинхронний двигун – Аглострічка»

Для перевірки працездатності та ефективності розроблених алгоритмів керування, а також для налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора до впровадження системи на реальному об'єкті, необхідно створити адекватну математичну модель динамічних процесів в системі. Найбільш зручним інструментом для такого моделювання є середовище MATLAB/Simulink з розширенням Simscape Electrical, яке дозволяє створювати моделі електромеханічних систем на основі фізичних компонентів.

Модель складається з трьох основних взаємопов'язаних блоків, що відтворюють структуру реальної системи.

Модель частотного перетворювача та системи керування

Цей блок реалізує алгоритмічну частину системи.

Інвертор: Моделюється як ідеалізований трифазний міст на IGBT-транзисторах, керований сигналами ШІМ (широтно-імпульсної модуляції).

Система векторного керування: Реалізується у вигляді структурної схеми, що включає:

- Блоки перетворень координат (пряме та зворотне перетворення Кларка-Парка).
- Оцінювач потокозчеплення ротора.
- Регулятори струмів .
- Блок ШІМ-модулятора.

Зовнішній контур регулювання: Моделюється ПІД-регулятор швидкості, що реалізований в ПЛК. Його вихід (завдання по моменту) подається на вхід системи векторного керування.

У системі «перетворювач частоти – асинхронний двигун» обмотка статора двигуна живиться від перетворювача частоти мережі, реалізованого на транзисторах або тиристорах, рисунок 2.1.

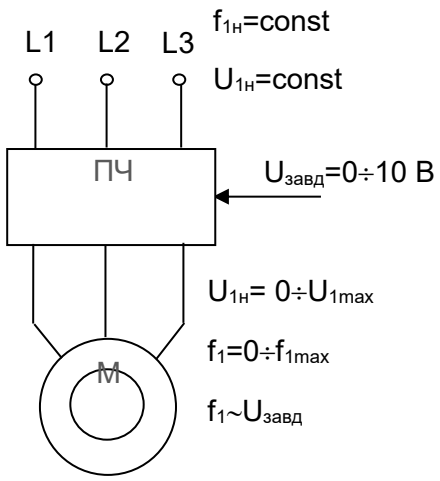


Рис. 2.1 - Функціональна схема системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун»

Конструкція перетворювача частоти об'єднує декілька ключових елементів. До його силової частини належать некерований діодний випрямляч (В) та автономний інвертор (АІН). Ланка постійного струму між ними містить фільтр, що складається з дроселя $L_в$ та конденсатора $C_в$. Управління всією системою забезпечують блок автоматичного регулювання та система широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Саме автономний інвертор, керований за принципом ШІМ, відповідає за формування вихідних параметрів – частоти ($f_{вих}$) та напруги ($U_{вих}$).

Суть цього методу керування полягає в тому, що в межах кожного періоду модуляції обмотки статора двигуна почергово комутуються з позитивною та негативною шинами випрямляча. Ключовим є те, що тривалість кожного з цих підключень модулюється (змінюється) відповідно до синусоїдального закону.

Завдяки використанню високих тактових частот модуляції, що зазвичай лежать у діапазоні 2–15 кГц, власна індуктивність обмоток електродвигуна виконує роль фільтра. Ця фільтруюча здатність забезпечує протікання струмів синусоїдальної форми у статорі, попри імпульсний характер напруги.

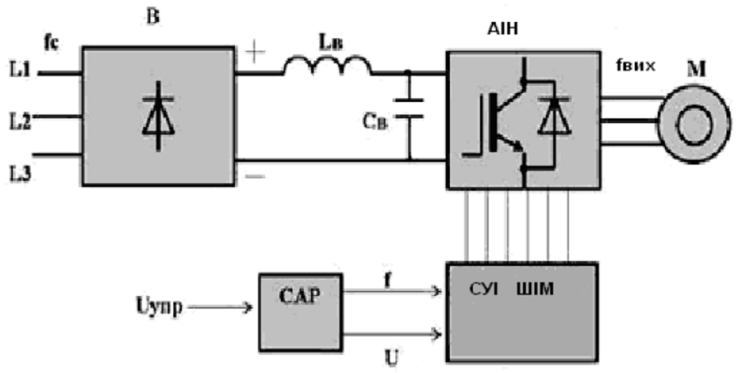


Рис. 2.2 - Електрична схема підключення перетворювача частоти до асинхронного двигуна

Отже, вихідна напруга інвертора фактично є не синусоїдою, а високочастотною двополярною послідовністю прямокутних імпульсів. Частота проходження цих імпульсів відповідає несучій частоті ШІМ.

Ключовим аспектом є те, що тривалість (ширина) кожного імпульсу динамічно змінюється (модулюється) за синусоїдальним законом в межах одного періоду вихідної частоти, що генерується автономним інвертором. [50]

Незважаючи на таку складну імпульсну форму напруги, вихідний струм (тобто струм в обмотках асинхронного двигуна) набуває практично синусоїдальної форми. Це пояснюється тим, що самі обмотки статора мають значну індуктивність і діють як природний фільтр.

Щодо регулювання величини вихідної напруги, існують два основні методи. Перший - амплітудний (АР), який полягає у зміні вхідної напруги ($U_{вх}$). Другий - широтно-імпульсний (ШІМ), де вхідна напруга ($U_{вх}$) залишається сталою, а регулювання відбувається через зміну алгоритму (програми) комутації силових ключів V1-V6.

Саме метод ШІМ став домінуючим у сучасних перетворювачах частоти. Його широке впровадження стало можливим завдяки значному прогресу в мікропроцесорній техніці та розробці швидкісних силових елементів, таких як IGBT-транзистори.

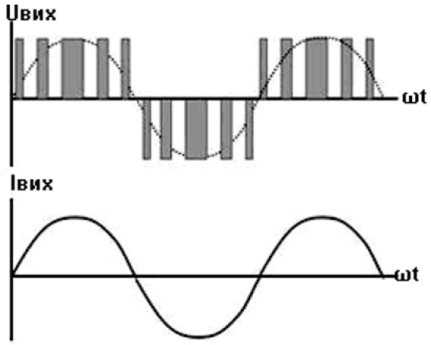


Рис. 2.3 - Часові діаграми вихідної напруги та струму в обмотках статора електродвигуна

2.4 Динамічна механічна характеристика асинхронного двигуна

Під динамічною механічною характеристикою асинхронного двигуна розуміють залежність, що пов'язує миттєві значення моменту та швидкості (ковзання) електричної машини. Ця характеристика є актуальною саме для перехідних режимів роботи, оскільки вона фіксує значення параметрів, що відповідають одному й тому ж моменту часу.

Графічне зображення цієї характеристики отримують шляхом спільного розв'язання системи, що складається з диференціальних рівнянь електричної рівноваги (для обмоток статора та ланцюгів ротора) та рівняння, що описує електромагнітний момент. Зазначені рівняння, без деталізації їхнього виведення, наведені нижче:

$$
\begin{aligned}
\frac{d\psi_{1a}}{dt} &= U_{1a} - \frac{R_1}{X_1 \cdot \sigma}\left(\psi_{1a} - \frac{X_m}{X_2}\psi_{2a}\right) \\
\frac{d\psi_{1b}}{dt} &= U_{1b} - \frac{R_1}{X_1 \cdot \sigma}\left(\psi_{1b} - \frac{X_m}{X_2}\psi_{2b}\right) \\
\frac{d\psi_{2a}}{dt} &= -\frac{R_2}{X_2^{'} \cdot \sigma}\left(\psi_{2a} - \frac{X_m}{X_1}\psi_{1a}\right) - \omega \cdot \psi_{2b} \\
\frac{d\psi_{2b}}{dt} &= -\frac{R_2}{X_2^{'} \cdot \sigma}\left(\psi_{2b} - \frac{X_m}{X_1}\psi_{1b}\right) + \omega \cdot \psi_{2a} \\
M &= \frac{3 \cdot z_p \cdot X_m}{2 \cdot X_1}\left(\psi_{1b} \cdot i_{2a} - \psi_{1a} \cdot i_{2b}\right)
\end{aligned}
\qquad (2.1)
$$

В системі рівнянь (2.1) прийняті наступні позначення, де

- U_{1a} - проекція вектора напруги статорної обмотки на вісь *a* нерухомої системи координат;
- U_{1b} - відповідна ортогональна компонента вектора напруги статора, спрямована вздовж осі b тієї ж системи координат;;
- $X_1 = X_{1\sigma} + X_m$ - сумарний еквівалентний індуктивний опір статорного кола, що визначається як сума опору розсіювання даної обмотки та реактивного опору головного магнітного поля;
- $X_2^{'} = X_{2\sigma}^{'} + X_m$ - приведений до статора еквівалентний індуктивний опір роторної обмотки, який формується шляхом додавання індуктивного опору розсіювання ротора до опору контуру намагнічування;
- X_m - величина індуктивного опору головного магнітного поля (гілки намагнічування), обумовлена результуючою електромагнітною дією струмів обмотки статора;
- ψ_{1a} складова вектору потокозчеплення статора, орієнтована за віссю a у фіксованій координатній системі;
- ψ_{1b} проекція вектору потокозчеплення статорної обмотки на вісь b;
- ψ_{2a} - компонента вектору потокозчеплення ротора, що відповідає осі a нерухомої системи координат;

- Ψ_{2b} - складова вектору потокозчеплення роторної обмотки, спрямована вздовж осі b;
- - i_{2a} .компонента вектору струму ротора, що діє вздовж осі a у нерухомій системі відліку;
- i_{2b} відповідна компонента вектору роторного струму, орієнтована вздовж осі b у прийнятій системі координат.

Математичний опис електромеханічних процесів, що протікають в асинхронному електроприводі, базується на рівнянні руху. Стосовно випадку. Для випадку $J_\Sigma = \text{const}$

$$M - M_c = J_c \frac{d\omega}{dt} \quad (2.2)$$

де M_c- величина моменту опору навантаження, перерахована до валу двигуна; J_Σ- загальний момент інерції привода, приведений до валу двигуна.

Наявність у рівняннях добутків змінних стану надає математичній моделі асинхронного двигуна вираженого нелінійного характеру, що створює об'єктивні складнощі при аналізі його динамічних режимів.

Оскільки вказана специфіка унеможливлює знаходження розв'язку класичними аналітичними методами, дослідження процесів перетворення енергії вимагає імплементації засобів комп'ютерного моделювання.

Для отримання часових залежностей кутової швидкості (ω) та електромагнітного моменту (M) в рамках дослідження було реалізовано сумісне розв'язання системи диференціальних рівнянь (2.1). В якості середовища для проведення комп'ютерного моделювання обрано програмний комплекс MathCAD, а базою для обчислень слугували параметри схеми заміщення асинхронного двигуна.

Оскільки формування динамічної механічної характеристики електричної машини неможливе без попереднього аналізу перехідних режимів, першочергово представлено осцилограми зміни швидкості (рис. 2.4) та моменту (рис. 2.5), що ілюструють процес прямого пуску двигуна від мережі.

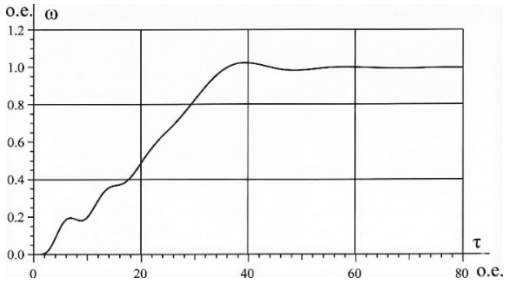


Рис. 2.4 - Динаміка зміни швидкості асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у режимі прямого пуску від мережі (результати моделювання в нерухомій системі координат).

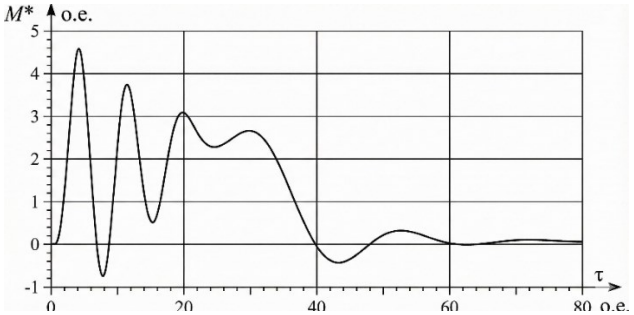


Рис. 2.5 - Залежність електромагнітного моменту від часу $M = f(t)$ для випадку прямого пуску двигуна з короткозамкненим ротором, розрахована з використанням математичного опису в нерухомій системі координат.

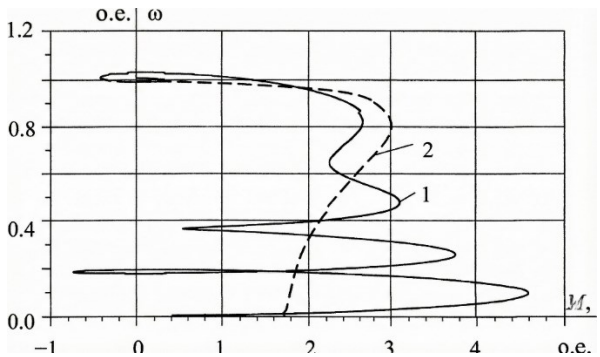


Рис. 2.6 - Механічні характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором: 1 - динамічна крива; 2 - статична залежність.

Процедура побудови динамічної механічної характеристики, що ілюструє режим прямого пуску (крива 1 на рис. 2.4), базується на комплексному аналізі часових залежностей $\omega = f(\tau)$ *та* $M = f(\tau)$. З метою забезпечення коректного співставлення результатів, на даній діаграмі також візуалізовано статичну характеристику (крива 2), отриману розрахунковим методом згідно з виразом (2.5) за умови ідентичності вхідних параметрів.

Інформаційним базисом для побудови динамічної механічної характеристики асинхронного двигуна (візуалізованої як крива 1 на рис. 2.4 для режиму прямого пуску) слугують часові діаграми перехідних процесів кутової швидкості (ω) та електромагнітного моменту (M). У рамках компаративного аналізу на зазначеному графіку також відображено статичну характеристику (крива 2), обчислену за аналітичним виразом (2.5) за умови збереження ідентичності параметрів схеми заміщення.

В ході аналізу динамічної характеристики встановлено, що амплітуда пікових ударних моментів, які виникають у пусковому режимі, здатна перевищувати величину номінального моменту (M_{n}) статичної характеристики більш ніж у 4,5 рази. Зазначені перевантаження нерідко досягають критичних значень, які є неприйнятними за критерієм механічної міцності. Саме наявність ударних навантажень (особливо в режимах реверсу) виступає поширеним фактором, що спричиняє руйнування кінематичних ланцюгів механізму та пошкодження безпосередньо електродвигуна.

Застосування програмного комплексу MathCAD дозволило суттєво оптимізувати процедуру дослідження динамічних механічних характеристик. За результатами моделювання виявлено, що конфігурація динамічної кривої детермінується сукупним впливом як параметрів схеми заміщення, так і загальних характеристик електроприводу - передусім

еквівалентного моменту інерції J та моменту опору на валу (M_c). На основі цього сформульовано ключовий висновок: за умови інваріантності параметрів мережі живлення та схеми заміщення, асинхронний двигун характеризується єдиною статичною, проте нескінченною множиною динамічних механічних характеристик.

У ході досліджень виявлено стійку закономірність: зниження жорсткості («пом'якшення») робочої ділянки механічної характеристики в сукупності зі зростанням сумарного моменту інерції електроприводу сприяє оптимізації перехідних процесів. Це, зокрема, проявляється у зменшенні амплітуди коливань та інтенсифікації їх загасання (демпфування) на етапі досягнення усталеного режиму.

Всебічний аналіз динамічних механічних характеристик відіграє ключову роль як у теоретичній площині, так і в прикладних інженерних задачах. Експериментально підтверджено, що амплітудні значення динамічного моменту в режимі прямого пуску можуть перевищувати номінальні показники у 2–5 разів, тоді як при реверсуванні кратність перевантаження зростає до 4–10 разів. Зазначені фактори є критичними та вимагають обов’язкового врахування на етапах проектування і виробництва систем електроприводу.

Інформаційним підґрунтям для побудови динамічної механічної характеристики асинхронного двигуна (візуалізованої як крива 1 на рис. 2.4 для режиму прямого пуску) слугують часові діаграми перехідних процесів кутової швидкості $\omega = f(\tau)$ та електромагнітного моменту $M = f(\tau)$. З метою верифікації та компаративного аналізу на цій же діаграмі відображено статичну механічну характеристику (крива 2), отриману розрахунковим шляхом згідно з рівнянням (2.5) за умови ідентичності параметрів схеми заміщення.

Аналіз динамічної поведінки асинхронного двигуна свідчить про те, що амплітудні значення ударних моментів у пусковому режимі можуть перевищувати номінальний момент ($M_н$) статичної характеристики більш

ніж у 4,5 рази, досягаючи величин, критичних за критерієм механічної міцності. Саме виникнення значних ударних навантажень (особливо характерних для режиму реверсу) виступає ключовим фактором, що призводить до аварійних відмов як кінематичних ланцюгів виробничого обладнання, так і безпосередньо електричної машини.

Застосування інструментарію програмного середовища MathCAD дозволяє суттєво оптимізувати процедуру дослідження динамічних властивостей електроприводу. У ході моделювання встановлено, що конфігурація динамічної характеристики детермінується не лише параметрами схеми заміщення, але й загальними параметрами системи, зокрема еквівалентним моментом інерції J_Σ та моментом опору на валу Mс. На підставі цього сформульовано висновок: при фіксованих параметрах мережі живлення та незмінній схемі заміщення асинхронний двигун характеризується єдиною статичною, проте нескінченною множиною динамічних механічних характеристикодну статичної і безліччю динамічних механічних характеристик.

Інтерпретація отриманих динамічних залежностей (рис. 2.5–2.6) демонструє, що перехідний процес пуску двигуна з короткозамкненим ротором може супроводжуватися коливальними явищами не лише на початковій стадії, а й на завершальному етапі, причому фіксується короткочасне перевищення швидкості понад синхронну ω_0. Однак слід зазначити, що в реальних умовах експлуатації осциляції кутової швидкості та моменту при виході на усталений режим спостерігаються не завжди.

Окрім цього, існує значний перелік виробничих механізмів, технічні умови експлуатації яких вимагають повної елімінації подібних коливальних процесів. Як типові приклади можна виділити лебідки та механізми пересування вантажопідіймальних кранів. Для забезпечення функціонування такого устаткування застосовуються спеціалізовані асинхронні двигуни, що вирізняються «м'якою» механічною характеристикою або конструктивно закладеним підвищеним ковзанням.

Виявлено стійку закономірність: зниження жорсткості робочої ділянки механічної характеристики в сукупності зі збільшенням еквівалентного моменту інерції системи сприяє мінімізації амплітуди коливань при виході на усталену швидкість, а також інтенсифікує процес їх загасання. [51]

Дослідження динамічних механічних характеристик має вагому теоретичну та практичну цінність. Це обумовлено тим, що базування виключно на статичних характеристиках може призвести до формування некоректних висновків та викривлення реальної картини динамічних навантажень під час пуску.

Експериментально підтверджено, що пікові значення динамічного моменту при прямому включенні в мережу можуть перевищувати номінальний момент у 2–5 разів, а при реверсуванні - у 4–10 разів. Зазначені коефіцієнти перевантаження є критично важливими параметрами, що підлягають обов'язковому врахуванню на етапах проектування та виготовлення сучасних електроприводів.

2.5 Система керування «Перетворювач частоти - Асинхронний двигун» із застосуванням позитивного зворотного зв'язку за струмом

Результати теоретичних досліджень та дані практичної експлуатації переконливо свідчать про те, що в рамках законів регулювання класу U_{1j}/f_{1j}, в умовах широкодіапазонного регулювання кутової швидкості та динамічної зміни навантаження, одночасне забезпечення високих енергетичних і механічних показників стає практично недосяжним.

Ключовим дестабілізуючим фактором у даному випадку виступає прогресуючий вплив падіння напруги на активному опорі статорної обмотки, який стає домінуючим при зниженні частоти живильної напруги.

З огляду на це, в сучасних частотно-регульованих асинхронних електроприводах зі скалярним принципом керування, окрім базових співвідношень U_{1j}/f_{1j}, знайшли застосування альтернативні закони регулювання.

Для коректного аналізу як усталених, так і перехідних режимів роботи електричної машини за будь-яких значень частоти f_{1j} напруги живлення статора U_{1j}, доцільно використовувати схему заміщення, наведену на рис. 2.7.

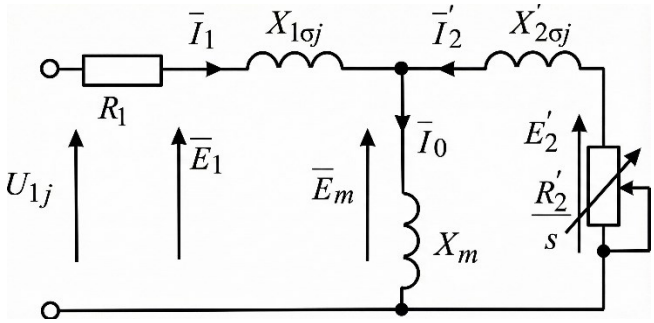


Рис. 2.7 - Універсальна схема заміщення асинхронної машини для розрахунку усталених режимів при частотному керуванні

Базуючись на топології представленої схеми заміщення (рис. 2.7), математичний опис процесів можна формалізувати шляхом складання наступної системи рівнянь:

$$U_{1j} = E_{1j} + R_1 \cdot i_{1j} \quad (2.3)$$

$$U_{1j} = E_m + \left(R_1 + j \cdot X_{1\sigma}\right) I_{1j} \quad (2.4)$$

$$U_{1j} = E'_2 + \left(R_1 + j \cdot X_{1\sigma}\right) I_{1j} + j \cdot X'_{2\sigma} \cdot I'_2 \quad (2.5)$$

Таким чином, завдяки компенсації падіння напруги на імпедансних елементах статорного кола (зокрема на опорах R_1, $R_1 + j \cdot X_{1\sigma j}$, $R_1 + j \cdot X_{1\sigma j}$ та $X'_{2\sigma j}$), стає можливою реалізація алгоритмів частотного керування, що базуються на стабілізації співвідношень $\frac{E_{1j}}{f_{1j}}$, $\frac{E_{mj}}{f_{1j}}$ та $\frac{E'_{2j}}{f_{1j}}$. На основі математичного опису асинхронної машини в стаціонарній системі координат визначається критерій інваріантності відношення ЕРС до частоти напруги на статорі. f_1 в статичному режимі фізично еквівалентна стабілізації амплітуди вектора потокозчеплення статора Ψ_1. Аналогічно, закон регулювання $\frac{E_{mj}}{f_{1j}}$ забезпечує сталість потокозчеплення в повітряному проміжку Ψ_m, а алгоритм $\frac{E'_{2j}}{f_{1j}}$ гарантує незмінність потокозчеплення ротора.За умови підтримання фіксованих значень відповідних ЕРС (E_1, E_m або E'_2) при варіаціях навантаження на валу, механічні характеристики асинхронного двигуна набувають вигляду, візуалізованого на рис. 2.8.

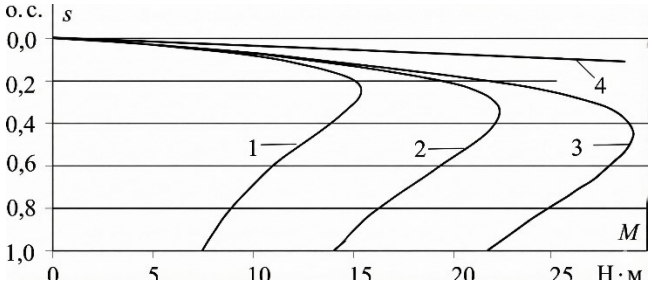


Рис. 2.8 - Механічні характеристик асинхронного двигуна при реалізації різних законів частотного регулювання

$$1 - U_1/f_1 = \text{const}; \quad 2 - E_1/f_1 = \text{const}; \quad 3 - E_m/f_1 = \text{const}; \quad 4 - E'_2/f_1 = \text{const} \quad (2.6)$$

Компаративний аналіз представлених характеристик (рис. 2.8) демонструє, що з точки зору мінімізації статичної похибки швидкості (забезпечення жорсткості характеристики) при зміні навантаження,

пріоритетним є метод регулювання зі стабілізацією $E'_{2j} = \text{const}$. Проте практична імплементація даного підходу вимагає підвищення напруги живлення U_{1j} понад номінальний рівень $U_{\text{н}}$ у всьому діапазоні навантажень, що в більшості випадків призводить до магнітного насичення сталі та неприпустимого перегріву електричної машини. Внаслідок зазначених обмежень, у промислових електроприводах найбільш широкого розповсюдження набули закони керування видів:

$$E_{1j}/f_{1j} = \text{const}; \quad E_{1j}/f_{1j}^2 = \text{const}; \quad E_{1j}/\sqrt{f_{1j}} = \text{const} \quad (2.6)$$

Для коректної реалізації керування в класі законів $\frac{E_{1j}}{f_{1j}}$ необхідно здійснювати вольтододатку до фазної напруги згідно з виразом $U_{1j} = E_{1j} + I_1 \cdot R_1$, величина якої компенсує падіння напруги $I_1 \cdot R_1$ на активному опорі статорної обмотки. Зазначений метод отримав у технічній літературі назву «частотне регулювання з IR-компенсацією».

Технічна реалізація алгоритмів компенсації падіння напруги на активному опорі статора може виконуватися як за принципом відхилення, так і за збуренням, із застосуванням методів скалярної або векторної IR-компенсації.

2.6 Аналіз структурної схеми асинхронного електроприводу з фазовим керуванням напругою статора

Для дослідження динамічних властивостей системи «тиристорний регулятор напруги - асинхронний двигун» (ТРН-АД) із замкненим контуром регулювання швидкості використовується лінеаризована структурна схема, візуалізована на рис. 2.9

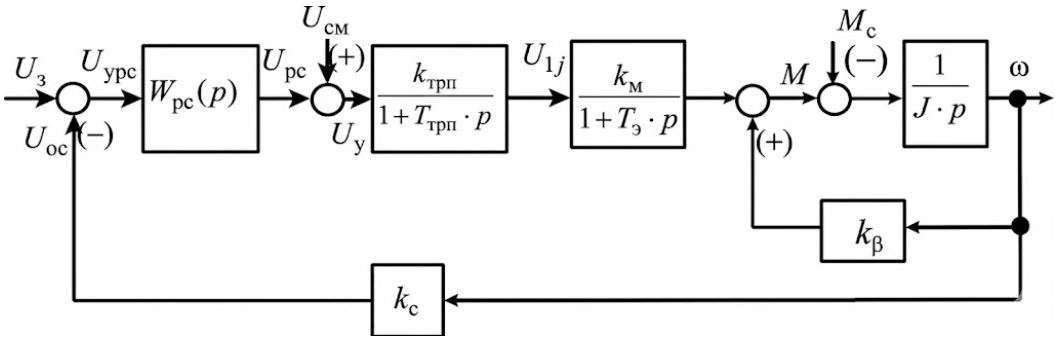


Рис. 2.9 - Структурна схема асинхронного електроприводу з регулюванням напруги статора

У межах представленої моделі (рис. 2.9) запроваджено таку систему позначень, де

- $W_{рс}(p)$ - функція передачі, що характеризує динаміку регулятора швидкості;
- $k_c = k_{дс} \cdot k_{ос}$ - параметр глибини зворотного зв'язку за швидкістю, В·с/рад;
- $k_{дс}$ - коефіцієнт перетворення (передачі) тахогенератора, В·с/рад;
- $k_{ос}$- масштабний коефіцієнт для узгодження сигналів (у відносних одиницях);
- $k_{трн} = k_п \cdot k_1$; $T_{трн}$ - параметри тиристорного перетворювача напруги: коефіцієнт підсилення та стала часу відповідно;
- J_Σ - зведений (сумарний) момент інерції системи електроприводу.

При виборі розрахункового значення коефіцієнта чутливості за моментом k_m доцільно орієнтуватися на його максимальну величину $k_м = 2 \cdot M_{кн}$, що відповідає найменш сприятливим умовам стійкості контуру регулювання.

Для спрощення синтезу прийнято допущення $k_β = 0$, що еквівалентно розгляду механічної характеристики асинхронного двигуна як абсолютно м'якої в робочій зоні 11. Така апроксимація є допустимою при розрахунку параметрів регулятора, оскільки основний діапазон регулювання охоплює нестійкі ділянки механічних характеристик. Втім, верифікацію перехідних

процесів слід виконувати з урахуванням максимального позитивного значення жорсткості β, що створює критичні умови для стійкості системи.

Синтез регулятора за модульним оптимумом

При налаштуванні контуру на модульний оптимум бажана передавальна функція розімкненої системи має вигляд:

$$W_{\text{мо}}(p) = \frac{1}{a_{\text{ко}} \cdot T_{\mu c} \cdot p\left(T_{\mu c} \cdot p + 1\right)} \quad (2.7)$$

де $a_{\mu c} = 1-6$- коефіцієнт налаштування контуру; $a_{\mu c} = 2$- стандартний коефіцієнт настройки.

Фактична передавальна функція розімкненого контуру швидкості описується виразом:

$$W_{\text{кс}}(p) = W_{\text{рс}}(p) \cdot \frac{k_{\text{прм}}}{1 + T_{\text{прм}} \cdot p} \cdot \frac{k_{\text{м}}}{1 + T_{\text{е}} \cdot p} \cdot \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot p} \cdot k_{\text{с}} \quad (2.8)$$

З метою зниження порядку характеристичного рівняння та спрощення процедури синтезу, доцільно ввести сумарну малу сталу часу $T_{\text{т}} = T_{\text{прм}} + T_{\text{е}}$, за такої умови вираз (2.9) трансформується до вигляду:

$$W_{\text{кс}}(p) = W_{\text{рс}}(p) \cdot \frac{k_{\text{прм}} \cdot k_{\text{м}}}{1 + T_{m} \cdot p} \cdot \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot p} \cdot k_{\text{с}} \quad (2.9)$$

Шляхом прирівнювання виразів (2.9) і (2.10) та розв'язання рівняння відносно $W_{pc}(p)$, отримуємо структуру регулятора:

$$W_{pc}(p) = \frac{\left(1 + T_m \cdot p\right) \cdot J_\Sigma \cdot p}{a_{\text{кс}} \cdot T_{\mu c} \cdot p \cdot \left(T_{\mu c} \cdot p + 1\right) \cdot k_c \cdot k_{\text{прм}} \cdot k_{\text{м}}} \quad (2.10)$$

За умови компенсації сталої часу об'єкта налаштуванням $T_m = T_{\mu c}$, регулятор швидкості вироджується у пропорційну ланку (П-регулятор):

$$W_{pc}(p) = \frac{J_\Sigma}{a_{\mu c} \cdot T_{\mu c} \cdot k_c \cdot k_{\text{прм}} \cdot k_{\text{м}}} = k_{pc} \quad (2.11)$$

Аналіз стійкості системи

Для оцінки стійкості електроприводу визначимо передавальну функцію замкненої системи за керуючим впливом:

$$W_{\text{зч}}(p) = \frac{k_{\text{рс}} \cdot k_{\text{пр}} \cdot k_{\text{м}} \cdot k_\beta}{a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0} \quad (2.12)$$

де коефіцієнти характеристичного рівняння визначаються як:

$$a_0 = \frac{k_{pc} \cdot k_{\text{прм}} \cdot k_{\text{м}} \cdot k_c}{k_\beta} + 1$$

$$a_1 = T_{\text{м}} + T_{\text{прм}} + T_{\text{е}}$$

$$a_2 = T_{\text{м}} \cdot T_{\text{прм}} + T_{\text{м}} \cdot T_{\text{е}} + T_{\text{е}} \cdot T_{\text{прм}}$$

$$a_3 = T_{\text{е}} \cdot T_{\text{прм}} \cdot T_{\text{м}}$$

Застосування критерію стійкості Льєнара–Шіпара для системи третього порядку дозволяє сформулювати умови стабільності:

$$T_{\text{м}} \cdot T_{\text{прм}} + T_{\text{м}} \cdot T_e > T_{\text{е}} \cdot T_{\text{прм}}$$

$$T_{\text{м}} > T_{\text{прм}} + T_{\text{е}}$$

$$\frac{k_{pc} \cdot k_{\text{прм}} \cdot k_{\text{м}} \cdot k_c}{k_\beta} > 1$$

$$\left(T_{\text{м}} \cdot T_{\text{прм}} + T_{\text{м}} \cdot T_{\text{е}} + T_{\text{е}} \cdot T_{\text{прм}}\right)\left(T_{\text{м}} + T_{\text{прм}} + T_{\text{е}}\right) - \left(k_{pc} \cdot k_{\text{прм}} \cdot k_{\text{м}} \cdot k_c \cdot \frac{1}{k_\beta} + 1\right) > 0$$

(2.13)

Зазначена система нерівностей (2.14) залишається валідною для реальних параметрів приводу як при позитивній, так і при негативній жорсткості k_β. Проте особливий інтерес становить перевірка стійкості саме на ділянках з позитивною жорсткістю.

Синтез регулятора за симетричним оптимумом

У випадках, коли застосування П-регулятора не забезпечує необхідної статичної точності, доцільним є налаштування контуру на симетричний оптимум, що передбачає використання пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора.

Бажана передавальна функція розімкненого контуру в цьому випадку має вигляд:

$$W(p)_\infty = \frac{4 \cdot T_{\mu c} \cdot p + 1}{a_{cc} \cdot T_{\mu c}^2 \cdot p^2 \left(T_{\mu c} \cdot p + 1\right)} \quad (2.14)$$

де $a_{cc} = 4 - 16$ - (стандартно $a_{cc} = 8$) - коефіцієнт налаштування.

Прирівнюючи (2.15) до рівняння динаміки об'єкта з урахуванням малої сталої часу (2.16) , отримуємо структуру ПІ-регулятора:

$$W_{\text{кс}}(p) = W_{pc}(p) \cdot \frac{k_{\text{прм}} \cdot k_{\text{м}}}{1 + T_{\text{м}} \cdot p} \cdot \frac{1}{J_\Sigma \cdot p} \cdot k_c \quad (2.15)$$

Аналіз перехідних процесів та механічних характеристик

Ось варіант академічного рерайтингу для цього фрагмента. Текст перероблено з акцентом на наукову стилістику, збережено зміст та посилання на джерело. Хоча аналіз динаміки електроприводів, налаштованих за критеріями модульного та симетричного оптимумів, традиційно охоплює режими з від'ємною жорсткістю $\beta < 0$ [15], значний науково-практичний інтерес становить верифікація стійкості перехідних процесів асинхронного електроприводу при роботі на ділянках механічної характеристики, що характеризуються позитивною жорсткістю $\beta > 0$.

Для всебічного аналізу динамічних властивостей системи «тиристорний регулятор напруги - асинхронний двигун» (ТРН-АД), охопленої негативним зворотним зв'язком за швидкістю, зокрема в режимах значних збурень («у великому»), критично важливим є дослідження перехідних режимів із застосуванням повної математичної моделі асинхронного двигуна.

Нижче представлено часові діаграми зміни електромеханічних координат системи.

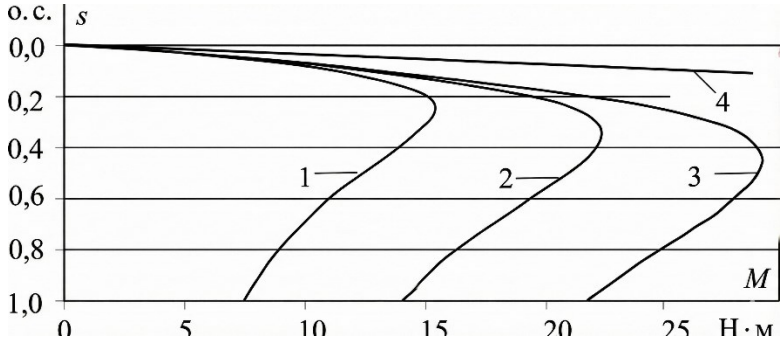


Рис. 2.10 - Графіки перехідних процесів кутової швидкості ω та електромагнітного моменту М при пуску та подальшому накиданні навантаження в електроприводі ТРН-АД $U_з = 8$ В

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що при подачі значних стрибкоподібних сигналів задаючої напруги ($U_з > 0.6$ в.о.) 3, коли до статорних обмоток прикладається повна напруга живильної мережі, характер перехідних процесів швидкості та моменту наближається до динаміки розімкненого електроприводу в режимі прямого пуску.

Характерною особливістю таких режимів є виникнення коливань моменту та швидкості. Для демпфування цих осциляцій рекомендовано підвищити еквівалентну інерційність тиристорного регулятора напруги. Технічна реалізація цього рішення передбачає введення додаткової ланки запізнення (фільтра) в контур керування тиристорами , а також застосування задатчика інтенсивності на вході системи електроприводу

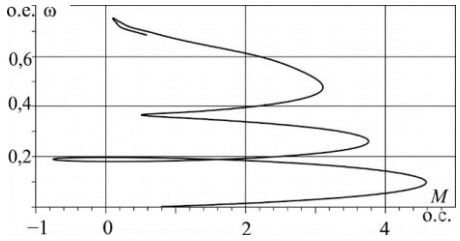


Рис. 2.11. Динамічна механічна характеристика при пуску і набиранні навантаження в електроприводі ТРН-АД. $U_з = 8$ В

На рис. 2.11 продемонстровано динамічну механічну характеристику електроприводу системи ТРН-АД, що відображає поведінку системи під час фаз пуску та подальшого навантаження.

Щодо статичних механічних характеристик привода ТРН-АД, оснащеного контуром негативного зворотного зв'язку за швидкістю, то їх побудова базується на усталених значеннях моменту та швидкості. Зазначені величини визначаються шляхом розрахунку відповідних перехідних процесів.

Візуалізацію механічних властивостей досліджуваного електроприводу для фіксованих значень задавальної напруги $U_{з1} = 8$ В та $U_{з2} = 3$ В наведено на рис. 2.12. В результаті аналізу отриманих кривих встановлено, що при функціонуванні на нижній характеристиці (де $U_{з2} = 3$

В 6) похибка стабілізації кутової швидкості сягає значної величини - $\delta \approx 80$ %

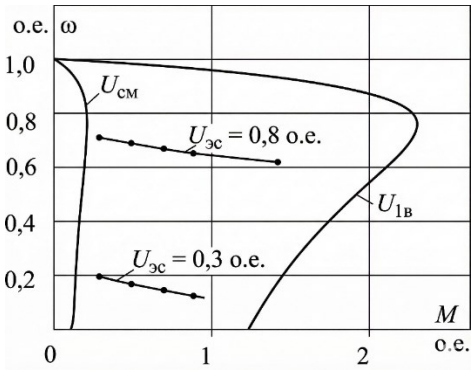


Рис. 2.12 - Механічні характеристики, притаманні електроприводу ТРН-АД за умови використання П-регулятора у контурі швидкості.

У ситуаціях, коли величина статичної похибки виходить за межі допусків, регламентованих технологічним процесом, виникає необхідність у корекції налаштувань системи керування. Оптимальним рішенням є вибір параметрів регулятора за критерієм симетричного оптимуму, що передбачає перехід до пропорційно-інтегрального (ПІ) закону регулювання швидкості.

Динаміку зміни координат електроприводу (швидкості ω та моменту M) задокументовано на графіках перехідних процесів (рис. 2.10, рис. 2.12). Дослідження проводилося для системи ТРН-АД із негативним зворотним зв'язком та ПІ-регулятором за умов стрибкоподібної подачі задавальної напруги у.о. та подальшого прикладання навантаження на рівні $0{,}6 \cdot M_{н*}$. На рис. 2.13 відображено часові діаграми зміни координат швидкості та моменту M, отримані в результаті моделювання реакції системи на стрибкоподібну варіацію задавальної напруги на рівні $U_{з*} = 0{,}3$ о. е. з подальшим прикладанням навантаження

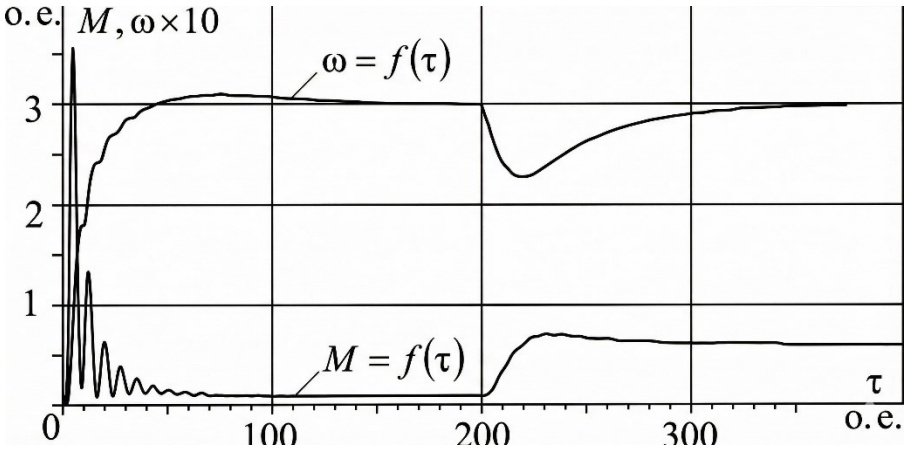


Рис. 2.13 - Часові діаграми зміни кутової швидкості ω та електромагнітного моменту *M* як реакція на стрибок задавальної напруги $U_з$=0,3 у.о. з подальшим прикладанням навантаження.

Динамічні механічні характеристики досліджуваного електроприводу, що ілюструють поведінку системи при миттєвій зміні керуючої напруги ($U_{з*} = 0{,}3$ у.о.) та під час довантаження до рівня $0{,}6 \cdot M_H$, представлено на графіку рис. 2.14.

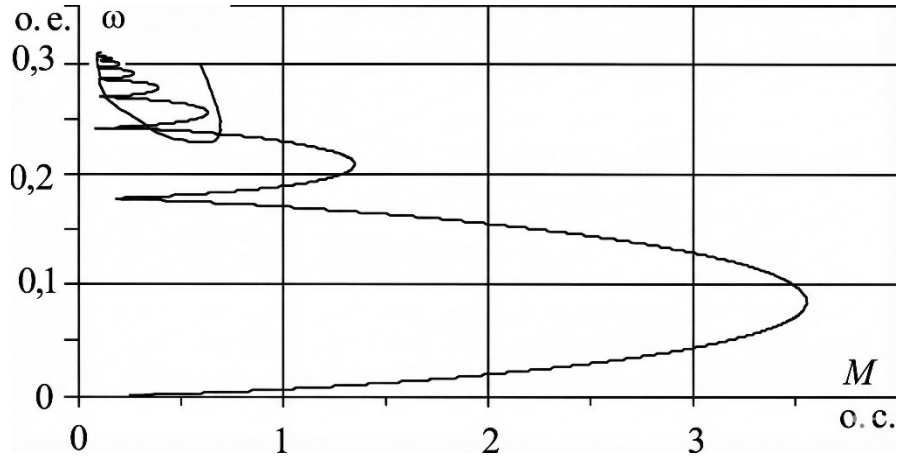


Рис. 2.14. Траєкторії динамічних механічних станів двигуна при прямому пуску ($U_{з*} = 0{,}3$ о. е.) та досягненні моменту навантаження $0{,}6 \cdot M_H$

Окремої уваги заслуговує випадок керування із застосуванням задавача інтенсивності. На рис. 2.15 візуалізовано перебіг перехідних

процесів для швидкості та моменту M у системі ТРН-АД, оснащеній ПІ-регулятором швидкості, за умов аналогічного вхідного завдання ($U_{з*} = 0{,}3$ у.о.) та кінцевого моменту навантаження.

Аналіз отриманих результатів пуску із використанням задавача інтенсивності свідчить, що розраховані траєкторії перехідних процесів демонструють високу збіжність із еталонними характеристиками регульованого електроприводу. При цьому характерною особливістю є повна відсутність небажаних коливань швидкості та електромагнітного моменту як на етапі розгону, так і під час набирання навантаження.

Графічну інтерпретацію динаміки системи, отриману в результаті моделювання пускових режимів, представлено нижче. На діаграмах відображено часові залежності координат електроприводу ТРН-АД при використанні ПІ-регулятора та задавача інтенсивності. Експеримент передбачав подачу вхідного сигналу на рівні $U_{з*} = 0{,}3$ у.о. з подальшим прикладанням моменту навантаження до $0{,}6 \cdot M_H$ на рис. 2.15.

Впровадження в контур керування задавача інтенсивності дозволяє наблизити розрахункові перехідні процеси пуску до оптимальних типових діаграм. При цьому спостерігається стабільна робота системи без виявлення коливальних явищ координат швидкості та моменту в динамічних режимах пуску та довантаження.

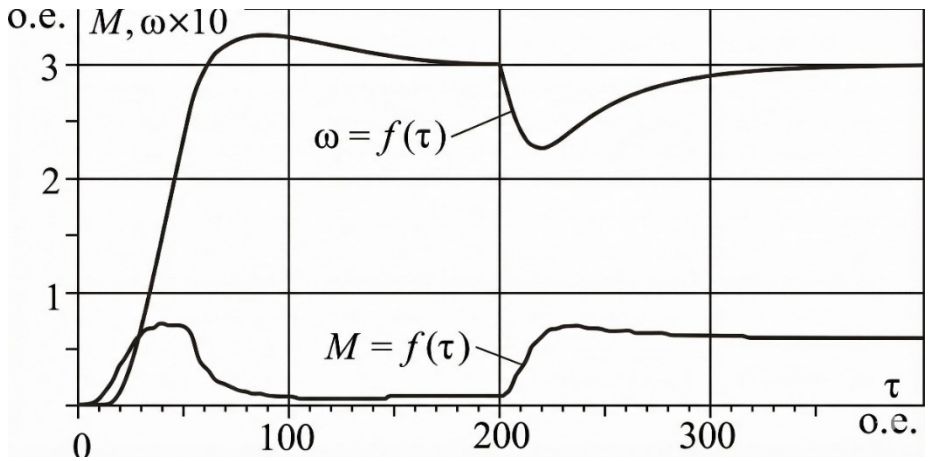


Рис. 2.15 - Осцилограми перехідних процесів координат швидкості ω та моменту M у системі ТРН-АД (з ПІ-регулятором та задавачем інтенсивності) при подачі керуючого сигналу $U_{з*} = 0{,}3$ у.о. та подальшому збільшенні навантаження

Аналіз наведених кривих (рис. 2.15) дозволяє стверджувати, що застосування задавача інтенсивності забезпечує протікання перехідних процесів, які практично ідентичні еталонним траєкторіям регульованих систем. При цьому на етапах розгону та довантаження не фіксується виникнення коливальних явищ у контурах швидкості та моменту. Застосування тиристорного регулятора напруги для керування запуску асинхронного двигуна відкриває можливості для підвищення енергоефективності, зокрема зниження пускових втрат на 10–15 %.

Досягнення такого ефекту можливе за умови оптимізації часу наростання напруги. Встановлено, що раціональний діапазон для цього параметра становить $0{,}02 \div 0{,}04$ с, що у відносних одиницях відповідає інтервалу $\tau = 6{,}2 \div 12{,}4$. Варто зазначити, що вихід за межі цього діапазону в бік збільшення часу призводить до зростання втрат, які можуть навіть перевищити показники прямого пуску.

Втім, у системах, що працюють у режимі рідкісних, поодиноких запусків, енергетичними втратами можна знехтувати7. У таких випадках пріоритетним критерієм налаштування стає мінімізація коливань електромагнітного моменту на початкових ділянках перехідного процесу. За таких умов припустимим є збільшення часу наростання напруги до значень $0{,}1 \div 0{,}2$ с. Динамічні механічні характеристики, розраховані для сценарію пуску із задавачем інтенсивності при початковому опорі $M_{c1} = 0{,}1$ у.о. та подальшому накиданні навантаження до $M_{c2} = 0{,}6$ у.о., візуалізовано на наступному графіку рис. 2.16

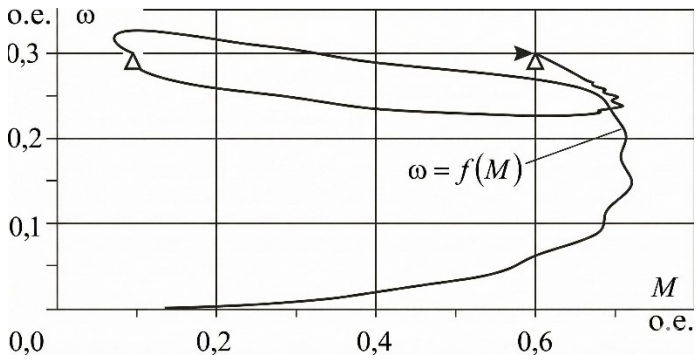


Рис. 2.16 - Траєкторії динамічних механічних станів при запуску електроприводу ТРН-АД (конфігурація з ПІ-регулятором і задавачем інтенсивності) для напруги $U_{з*} = 0{,}3$ у.о. з виходом на навантаження.

Порівняльний аналіз демонструє суттєву відмінність від систем із П-регулятором: використання ПІ-алгоритму призводить до збільшення часу компенсації збурення, який сягає τ≈100 у.о. Характерно, що усталені рівні швидкості для двох різних навантажень ($M_{с1}$ =0,1 у.о. та $M_{с2}$ =0,6 у.о.), які позначені на графіку трикутниками, є практично тотожними.

На рис. 2.17 наведено сімейство статичних механічних характеристик для напруг завдання $U_{зс1}$ =8 В та $U_{зс2}$ =3 В. Побудова цих залежностей базується на усталених значеннях моменту та швидкості, отриманих за підсумками розрахунку перехідних процесів

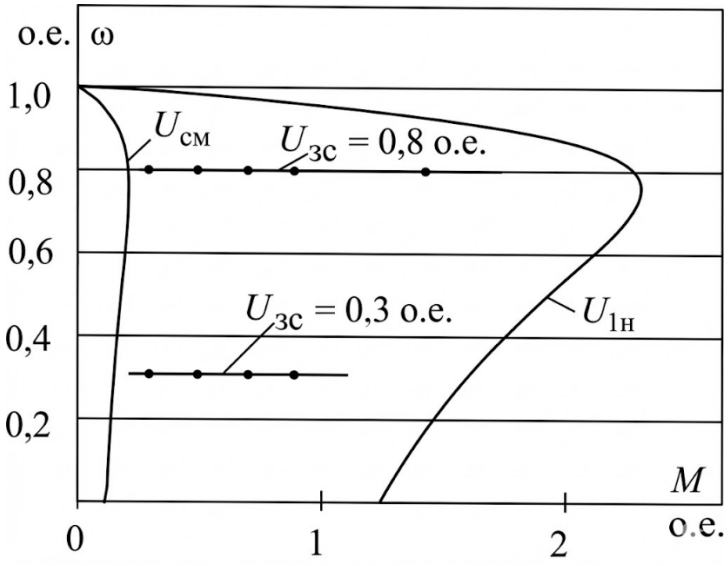


Рис. 2.17 - Статичні механічні характеристики досліджуваного електроприводу ТРН-АД, оснащеного ПІ-регулятором у контурі швидкості

Результати аналізу статичних характеристик свідчить про високу точність системи: на нижній характеристиці (при $U_{з2} = 3$ В) похибка стабілізації швидкості становить $\delta \approx 0{,}033$ %. Це підтверджує, що замкнута система електроприводу з ПІ-регулятором за своїми властивостями наближається до астатичної. Остаточний вибір типу регулятора швидкості має здійснюватися з урахуванням специфічних вимог конкретного технологічного процесу.

Модель асинхронного двигуна

Асинхронний двигун описується системою диференціальних рівнянь у двофазній ортогональній системі координат d-q, що обертається. Ця модель є стандартом для аналізу динамічних режимів роботи електричних машин.

Рівняння напруг статора:

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq}$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_s \psi_{sd} \qquad (2.16)$$

Рівняння напруг ротора (приведені до статора):

$$0 = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r)\psi_{rq}$$

$$0 = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r)\psi_{rd} \quad (2.17)$$

Рівняння потокозчеплень:

$$\begin{aligned} \psi_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} &= L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \end{aligned}$$

$$\psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \quad (2.18)$$

де u, i, ψ - напруга, струм та потокозчеплення; R, L - активний опір та індуктивність; ω_s, ω_r - синхронна та роторна кутові швидкості; індекси s, r позначають статор та ротор, а d, q - осі координат.

Модель механічного навантаження

Механічна частина системи описується рівнянням руху:

$$J\frac{d\omega_r}{dt} = M_e - M_c \quad (2.19)$$

де: J - сумарний момент інерції, приведений до валу двигуна (включає інерцію ротора, редуктора, приводного барабана та палет), кг·м²;ω_r - механічна кутова швидкість ротора, рад/с; M_e - електромагнітний момент двигуна, Н·м, що обчислюється як: $M_e = \frac{3}{2}p\left(\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}\right)$де p - число пар полюсів; M_c - момент статичного опору (навантаження), Н·м. Для

аглострічки він може бути змодельований як сума моменту сухого тертя (не залежить від швидкості) та моменту в'язкого тертя (пропорційний швидкості).

Ці три блоки об'єднуються в єдину модель в середовищі Simulink. На вхід моделі подається завдання по швидкості, а виходами є ключові змінні системи: швидкість, момент, струми, потокозчеплення. Така модель дозволяє провести всебічний аналіз динаміки системи, оцінити якість перехідних процесів та обґрунтовано налаштувати параметри регуляторів, що є предметом наступного розділу.

В результаті синтезу системи керування розроблено трирівневу структуру автоматизації, в якій контролер Siemens S7-1500 та перетворювач частоти ABB ACS880, поєднані мережею PROFINET, забезпечують високу надійність та швидкодію обміну даними. Для дослідження динамічних режимів створено комплексну математичну модель системи «Перетворювач – Двигун – Аглострічка» у середовищі MATLAB/Simulink, що враховує значний зведений момент інерції ($J_\Sigma = 160$ кг·м²).

Моделювання підтвердило, що реалізація алгоритму керування швидкістю з використанням ПІД-регулятора у зовнішньому контурі та керування моментом у внутрішньому дозволяє ефективно компенсувати збурення від зміни ваги шихти та мінімізувати коливання при перехідних процесах.

РОЗДІЛ 3
Практичне дослідження та порівняльний аналіз систем керування

3.1 Технологічний процес та вимоги до головного приводу агломераційної машини

Технологічний процес агломерації є ключовим етапом у підготовці залізорудної сировини до доменної плавки. Його суть полягає у термічному спіканні подрібненого рудного концентрату, флюсів та палива (коксового дріб'язку) для отримання агломерату - грудкового матеріалу з необхідними металургійними властивостями . Найбільш поширеним обладнанням для цього процесу є стрічкова агломераційна машина .

Принцип її роботи полягає у безперервному русі замкненої стрічки, що складається з окремих візків (палет) з колосниковими решітками. На початку робочого ходу на палети укладається шар готового агломерату, а потім - основний шар шихти, що складається з руди, вапняку та палива з фракцією до 10 мм . Після проходження через запалювальне горно верхній шар шихти займається, і під дією вакууму, створюваного ексгаустерами під стрічкою, зона горіння переміщується вниз, спікаючи весь шар матеріалу. В кінці робочої гілки готовий гарячий агломерат розвантажується для подальшого охолодження та сортування. [55]

Головний електропривод агломашини є критично важливим вузлом, що забезпечує переміщення всієї стрічки палет, маса якої разом із шихтою може сягати сотень тон. Це визначає унікальний та вкрай складний характер навантаження на привод. Аналіз механічних характеристик дозволяє виділити наступні особливості:

- **Високий момент інерції:** Величезна маса стрічки та матеріалу на ній створює значну інерційність системи, що вимагає великих зусиль для розгону та гальмування.

- **Значний пусковий момент:** На початку руху необхідно подолати не тільки інерцію, але й значний момент статичного тертя в численних рухомих елементах (ролики палет, підшипники приводних зірочок).
- **Квазістатичне навантаження:** У сталому режимі роботи момент опору переважно визначається силами тертя кочення та ковзання, які залежать від стану механізмів та ваги завантаженої шихти.
- **Динамічні та ударні навантаження:** У процесі роботи можливі різкі зміни моменту опору, спричинені нерівномірним завантаженням шихти, заклинюванням окремих палет або потраплянням сторонніх предметів у механізм.

Виходячи з цього, формуються наступні ключові вимоги до електроприводу головного механізму агломашини:

1. **Високий пусковий момент:** Привод повинен бути здатним розвивати момент, що перевищує номінальний в 1.5–2.5 рази, для забезпечення гарантованого та стабільного пуску важко навантаженої машини.
2. **Широкий та плавний діапазон регулювання швидкості:** Швидкість руху стрічки є одним з головних технологічних параметрів, що визначає продуктивність машини та якість агломерату. Можливість точного регулювання швидкості дозволяє адаптувати процес до змін складу та вологості шихти.
3. **Висока перевантажувальна здатність та швидка реакція на збурення:** Система керування повинна бути здатною витримувати короткочасні перевантаження та швидко стабілізувати швидкість при ударних навантаженнях, запобігаючи зупинці машини та пошкодженню механізмів.
4. **Плавність ходу та точність підтримання швидкості:** Стабільна швидкість руху стрічки забезпечує рівномірність процесу спікання по всій довжині. Плавність ходу, особливо під час пуску та гальмування, мінімізує динамічні навантаження на механічні компоненти (редуктори, тягові ланцюги, муфти), продовжуючи термін їх служби.

3.2 Обґрунтування застосування частотно-регульованого електроприводу (ЧРП)

Традиційні системи електроприводу для агломашин, що базувалися на асинхронних двигунах з прямим пуском від мережі або з використанням реостатів у колі ротора, мають низку суттєвих недоліків, які роблять їх неефективними та застарілими для сучасного виробництва.

Недоліки нерегульованих приводів:

- **Величезні пускові струми:** Прямий пуск асинхронного двигуна супроводжується кидком струму, що в 5–7 разів перевищує номінальне значення. Для потужних приводів агломашин це створює значні просадки напруги в заводській електромережі, негативно впливаючи на роботу іншого обладнання, та призводить до термічного перевантаження обмоток двигуна .
- **Жорсткий механічний удар:** Нерегульований пуск створює різкий, ударний момент на валу двигуна, що передається на всю кінематичну схему. Це призводить до прискореного зносу редукторів, ланцюгів, підшипників та виникнення втоми металу в конструкціях машини.
- **Відсутність гнучкості керування:** Швидкість руху стрічки є фіксованою і не може бути оперативно змінена для оптимізації технологічного процесу, що призводить до зниження якості продукції та неефективного використання ресурсів.

Застосування частотно-регульованого електроприводу (ЧРП) на базі перетворювача частоти та асинхронного двигуна дозволяє повністю усунути ці недоліки та вивести роботу агломашини на новий якісний рівень. ЧРП є не просто модернізацією, а фундаментальною зміною філософії керування, перетворюючи агломашину з механізму, що працює за принципом «грубої сили», на керований та адаптивний технологічний комплекс.

Переваги ЧРП для приводу агломашини:

- **Плавний пуск та гальмування:** ЧРП дозволяє формувати плавний розгін двигуна по заданому закону (рампі), обмежуючи пусковий струм на рівні номінального та забезпечуючи плавне наростання моменту. Це кардинально знижує механічні навантаження на обладнання та подовжує його ресурс .
- **Енергоефективність:** Хоча для конвеєрного типу навантаження з постійною швидкістю економія енергії не є настільки значною, як для насосів чи вентиляторів , вона досягається за рахунок виключення величезних втрат енергії при пуску та можливості роботи на оптимальній технологічній швидкості.
- **Висока якість керування процесом:** Можливість точного підтримання заданої швидкості незалежно від коливань навантаження та її оперативної зміни дозволяє стабілізувати процес спікання, покращити якість агломерату та адаптувати роботу машини до змінних властивостей сировини.
- **Комплексний захист двигуна:** Сучасні перетворювачі частоти мають вбудовані системи захисту від перевантаження по струму, короткого замикання, обриву фаз, перегріву та інших аварійних режимів, що значно підвищує надійність системи.
- **Можливість інтеграції в АСУТП:** ЧРП легко інтегрується в автоматизовані системи керування технологічним процесом, де швидкість агломашини може автоматично регулюватися на основі показників датчиків температури, складу газу чи інших параметрів, забезпечуючи повну автоматизацію та оптимізацію виробництва.[4]

Таким чином, впровадження ЧРП є необхідною умовою для підвищення ефективності, надійності та керованості головного приводу агломераційної машини. [57, 58]

3.3 Постановка задачі та методика досліджень

Для практичної перевірки та порівняльного аналізу ефективності методів векторного керування (FOC) та прямого керування моментом (DTC) розроблено імітаційні моделі в програмному середовищі MATLAB/Simulink. Обидві моделі використовують ідентичну силову частину та модель асинхронного двигуна, що забезпечує об'єктивне порівняння виключно алгоритмів керування.

Силова частина уніфікована і включає: джерело трифазного живлення з лінійною напругою 380 В та частотою 50 Гц, випрямляч, проміжну ланку постійного струму (DC-bus) зі згладжувальним конденсатором та двохрівневий IGBT-інвертор.

Характеристика об’єкта керування Для моделювання електропривода використано стандартний блок «Asynchronous Machine» з параметрами, що відповідають потужному конвеєрному приводу агломашини. Основні номінальні параметри двигуна:

- Номінальна потужність (P_n): 250 кВА;
- Номінальна напруга (U_n): 380 В;
- Частота живлення (f): 50 Гц;
- Кількість пар полюсів (p):
    - Параметри схеми заміщення двигуна мають наступні значення: активні опори статора та ротора $R_s = 0{,}294$ Ом,
    - $R_r' = 0{,}156$ Ом;
    - індуктивності розсіювання $L_s = L_r' = 0{,}0016$ Гн;
    - взаємна індуктивність $L_m = 0{,}0693$ Гн.

Сумарний момент інерції становить J_Σ =160 кг·м², що враховує власну інерцію ротора двигуна та приведену до валу інерцію завантаженої аглострічки. Саме велике значення моменту інерції визначає жорсткі вимоги до якості перехідних процесів у системі.

Структура досліджуваних систем керування

Система векторного керування має класичну структуру з каскадним підпорядкованим регулюванням. Система керування реалізована у вигляді окремої підсистеми і містить: зовнішній контур регулювання швидкості та внутрішні контури регулювання струмів I_d та I_q на базі ПІ-регуляторів.

Додатково задіяні блоки координатних перетворень Кларка та Парка (прямі та зворотні), а також блок просторово-векторної модуляції (SVM) для генерації керуючих імпульсів інвертора.

Система прямого керування моментом (DTC). Модель має відмінну структуру керування. Ключовим елементом є блок оцінювання, який на основі виміряних струмів статора (I_{abc}) та стану ключів інвертора обчислює поточні значення електромагнітного моменту (T_e) та потокозчеплення статора (Ψ_s).

Ядром системи виступає блок гістерезисних регуляторів та таблиця комутацій. Система порівнює оцінені значення із заданими ($Torque_{ref}$ та потік) і, на основі похибок та сектору вектора потокозчеплення, миттєво обирає оптимальний вектор напруги.

Сигнали керування подаються безпосередньо на ключі інвертора, минаючи ШІМ-модулятор.

Сценарій моделювання

Для обох систем керування реалізовано однаковий сценарій, який імітує типові режими роботи агломашини: Пуск: розгін електропривода з нульової швидкості до робочого значення $\omega_{ref} = 100$ рад/с. Усталений режим: робота з базовим моментом опору $T_{load} = 2200$ Н·м.Н акид навантаження: у момент часу $t = 2{,}5$ с імітується технологічний накид шихти шляхом стрибкоподібного збільшення моменту опору до $T_{load} = 2450$ Н·м.

3.4 Дослідження системи з векторним керуванням (FOC)

Система керування FOC реалізована за класичною структурою орієнтації за полем ротора (Rotor Field Oriented Control). Практичною реалізацією цих теоретичних принципів є розроблена модель, яка повністю відображає структуру системи, зображена на рисунку 3.1.

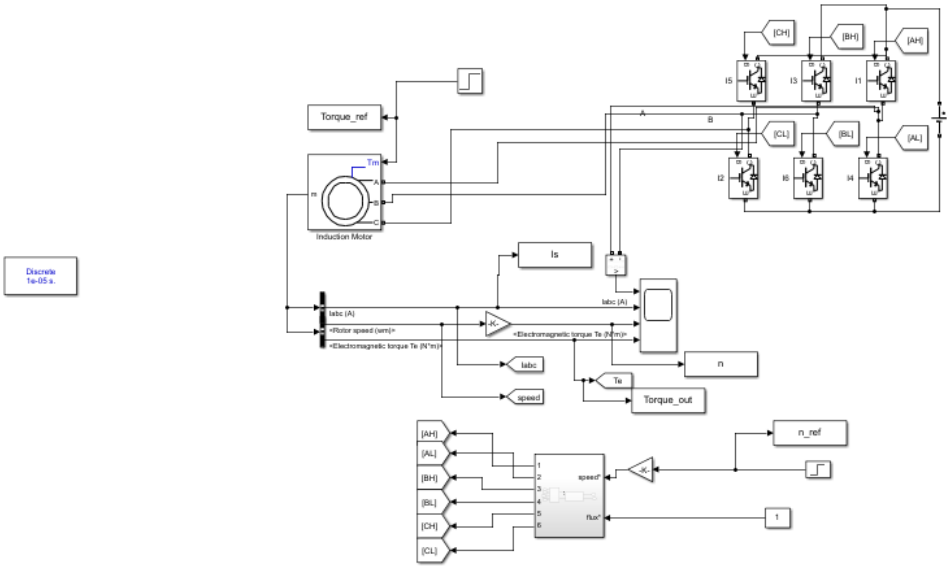


Рис. 3.1 – Імітаційна модель системи векторного керування (FOC) у середовищі MATLAB/Simulink.

У моделі виділено ключові функціональні блоки:

- **Об'єкт керування:** Використано блок *Induction Motor* з параметрами, що відповідають потужному промисловому приводу: номінальна потужність 250 кВА, напруга 380 В, частота 50 Гц, момент інерції 160 кг·м². Такі характеристики вказують на застосування в системах, де критичними є точність, динаміка та енергоефективність.
- **Силова частина:** Трифазний інвертор змодельовано на базі шести ідеальних ключів.

- **Система керування:** Ядром системи є блок *foc*, який містить зовнішній контур регулювання швидкості (ПІ-регулятор), внутрішні контури регулювання струмів, блоки координатних перетворень Кларка та Парка, спостерігач потоку та блок просторово-векторної модуляції (SVM). Вихідні сигнали цього блоку керують ключами інвертора.
- **Система вимірювання:** Для забезпечення зворотного зв'язку вимірюються трифазні струми статора та швидкість обертання ротора.

Параметри налаштування регуляторів наведено нижче:

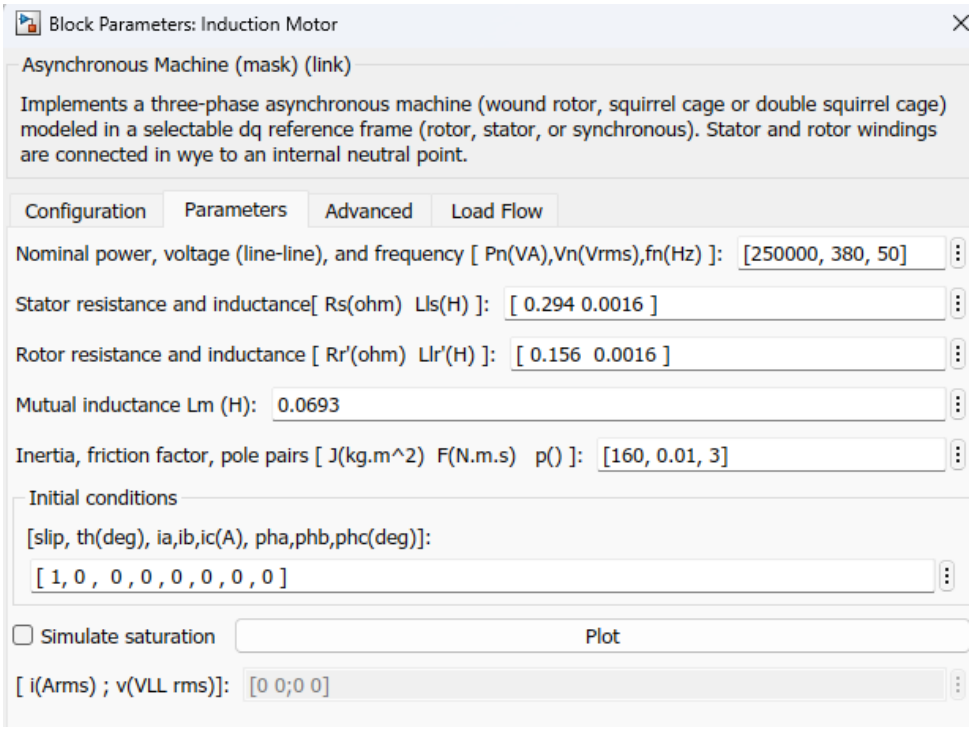


Рис. 3.2 – Параметри налаштування регуляторів системи FOC

Аналіз динаміки пуску

Аналіз якості роботи системи FOC проведено на основі графіків перехідних процесів під час розгону двигуна до заданої швидкості $\omega_{ref} = 100$ рад/с:

- **Швидкість:** Система демонструє плавний та контрольований розгін. Швидкість наростає практично лінійно, що свідчить про ефективну роботу в режимі обмеження струму та моменту. Процес є

аперіодичним або з мінімальним перерегулюванням, що вказує на якісне налаштування ПІ-регулятора швидкості та високу жорсткість механічної характеристики.

- **Момент та струм:** Графік електромагнітного моменту $T_e(t)$ відображає демпфовану поведінку: у пусковій ділянці момент плавно зростає до значення, необхідного для розгону масивного механізму. Спостерігається короткочасне збільшення струмів, що є природним фізичним процесом для формування пускового моменту.

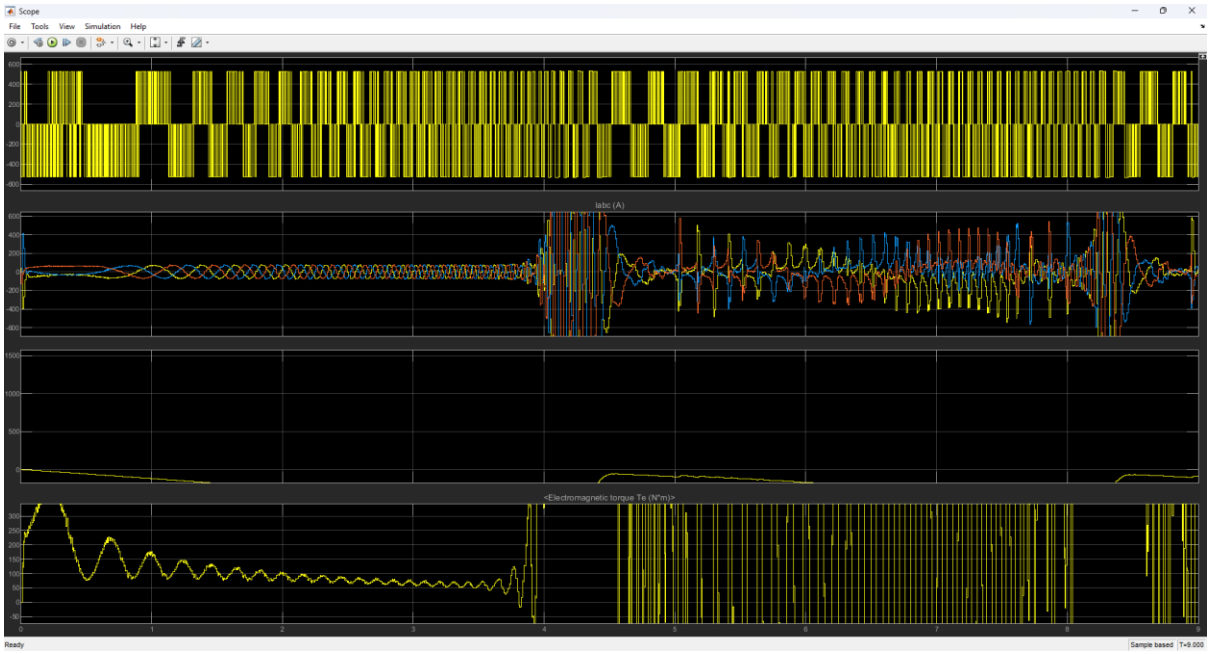


Рис. 3.3 – Результати моделювання системи FOC: пуск, усталений режим та реакція на накид навантаження

Реакція системи на накид навантаження

Дослідження завадостійкості виконано шляхом імітації технологічного накиду шихти (стрибкоподібне збільшення навантаження) у момент часу $t = 2{,}5$ с.Відпрацювання швидкості: При різкому накиданні навантаження спостерігається динамічне просідання швидкості (близько $\Delta\omega \approx 180$ рад/с), після чого контур регулювання швидко відновлює задане значення без статичної похибки. Це підтверджує високу динамічну точність системи.

Реакція моменту та струму

Система реагує миттєвим підвищенням електромагнітного моменту T_e, після чого він стабілізується на новому рівні, достатньому для утримання швидкості під навантаженням.

Амплітуда струмів зростає, проте їх форма залишається стабільною.

Аналіз усталених режимів та якості енергоперетворення

У квазі-усталеному режимі (після завершення перехідних процесів) система демонструє високі показники якості керування: Струми статора: Осцилограми фазних струмів I_{abc} мають форму, наближену до ідеальної синусоїди, із взаємним зсувом 120 градусів.

Використання просторово-векторної модуляції (SVM) з фіксованою частотою комутації забезпечує низький рівень вищих гармонік навіть при змінному навантаженні.

Електромагнітний момент

У сталому режимі момент є гладким, коливається навколо середнього значення з помірною піко-піковою амплітудою та мінімальними пульсаціями.

Точність

Відхилення швидкості від уставки у сталому режимі є мінімальними.

3.5 Дослідження системи з прямим керуванням (DTC)

Ключовою особливістю систем прямого керування моментом (Direct Torque Control - DTC) є відмова від використання механічних датчиків на валу двигуна або датчиків для прямого вимірювання магнітного потоку,

оскільки їх встановлення знижує надійність приводу та збільшує його вартість.

У зв'язку з цим, критично важливим етапом керування стає оцінка електромагнітного моменту та потокозчеплення статора в реальному часі. Ці величини необхідно відновлювати опосередковано, базуючись на математичній моделі двигуна та легко вимірюваних електричних змінних - миттєвих значеннях напруг та струмів статора.

Алгоритм розрахунку вектора потокозчепленняОцінка амплітуди та положення вектора потокозчеплення статора $\overrightarrow{\psi_s}$ здійснюється шляхом чисельного інтегрування диференціального рівняння рівноваги напруг статора в нерухомій системі координат $(\alpha - \beta)$.

Математично цей процес описується наступним інтегральним виразом:

$$\overrightarrow{\psi_s}(t) = \int \left(\overrightarrow{v_s}(t) - R_s \overrightarrow{i_s}(t)\right) dt \quad (3.1)$$

де $\overrightarrow{v_s}(t)$ - вектор прикладеної до статора напруги, $\overrightarrow{i_s}(t)$ - вектор виміряного струму статора, а R_s - активний опір обмотки статора.

Аналіз обмежень методу інтегрування

Незважаючи на простоту програмної реалізації даного методу, він має суттєві недоліки, які впливають на точність керування в певних режимах.По-перше, точність оцінки критично залежить від коректності ідентифікації параметра активного опору R_s.

В області низьких швидкостей обертання, коли електрорушійна сила (ЕРС) двигуна мала, падіння напруги на активному опорі ($R_s \overrightarrow{i_s}$) стає величиною, сумірною з прикладеною напругою джерела $\overrightarrow{v_s}$. У цьому

випадку навіть незначна похибка у визначенні R_s (наприклад, внаслідок нагрівання обмоток) призводить до значних відхилень в оцінці потоку.

По-друге, використання алгоритму «чистого» інтегрування у цифрових системах керування неминуче призводить до проблеми накопичення похибки (дрейфу нуля) та виникнення постійної складової у сигналі оціненого потоку.

Це явище вимагає застосування додаткових заходів компенсації або використання вдосконалених спостерігачів стану. Методика визначення електромагнітного моменту.

Після отримання оцінки компонент вектора потокозчеплення, миттєве значення електромагнітного моменту T_e розраховується як векторний добуток вектора потоку статора та вектора струму статора. У проекціях на нерухомі осі α та β формула набуває вигляду:

$$T_e = \frac{3}{2} p(\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (3.2)$$

Даний алгебраїчний метод є обчислювально ефективним, оскільки не потребує складних тригонометричних перетворень, і забезпечує високу швидкодію оцінки, що є критичним для забезпечення швидкодії системи DTC в цілому.

Аналіз динамічних та усталених режимів роботи системи DTC

На відміну від FOC, система прямого керування моментом не використовує ШІМ-модулятор та координатні перетворення, що видно з її структури.

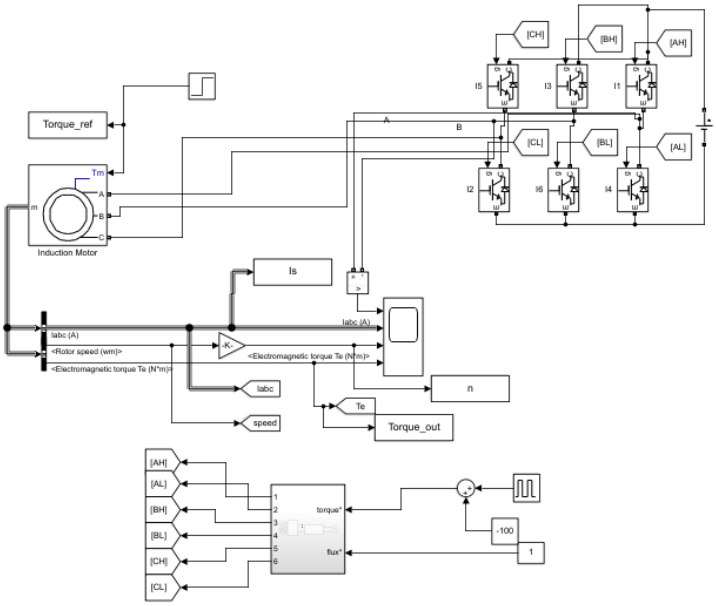


Рис. 3.4 – Імітаційна модель системи прямого керування моментом (DTC) у середовищі Simulink

Для коректної роботи системи критично важливим є налаштування ширини петлі гістерезису для компараторів потоку та моменту:

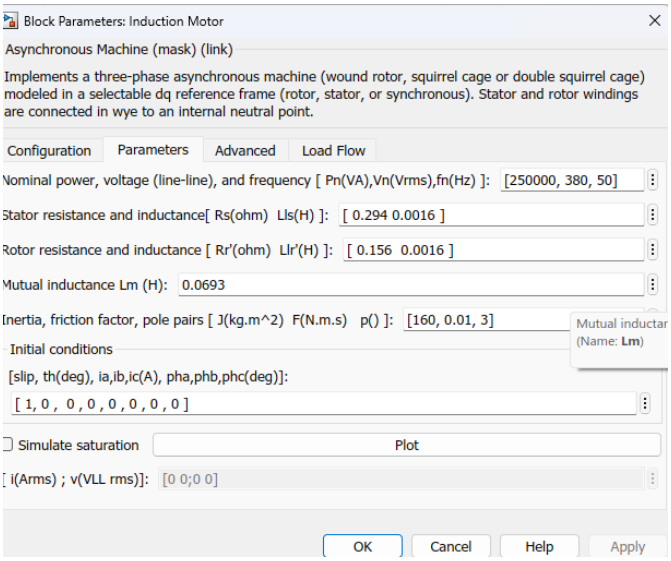


Рис. 3.5 – Параметри налаштування гістерезисних регуляторів системи DTC

Дослідження реакції системи на збурення навантаженням

Для перевірки завадостійкості синтезованої системи керування та її здатності підтримувати заданий технологічний режим було проведено

моделювання скидання та накидання навантаження. Зокрема, досліджувалася реакція електропривода на імітацію технологічного накиду шихти, що реалізовано як стрибкоподібне збільшення моменту опору на валу в момент часу $t = 2{,}5$ с.

Аналіз перехідного процесу за швидкістю

Осцилограми швидкості демонструють високу жорсткість механічної характеристики замкненої системи. У момент прикладання збурення спостерігається динамічне просідання швидкості, величина якого становить близько $\Delta\omega \approx 180$ рад/с.

Одразу після виникнення неузгодженості, контур регулювання формує компенсуючий вплив, завдяки чому швидкість швидко відновлюється до заданого рівня.

Важливо відзначити відсутність статичної похибки після завершення перехідного процесу, що підтверджує високу астатичність та динамічну точність системи.

Аналіз поведінки електромагнітного моменту та струмів

Реакція електромагнітного підсистеми на збурення є миттєвою. Система реагує різким підвищенням електромагнітного моменту T_e, який необхідний для подолання збільшеного опору на валу.

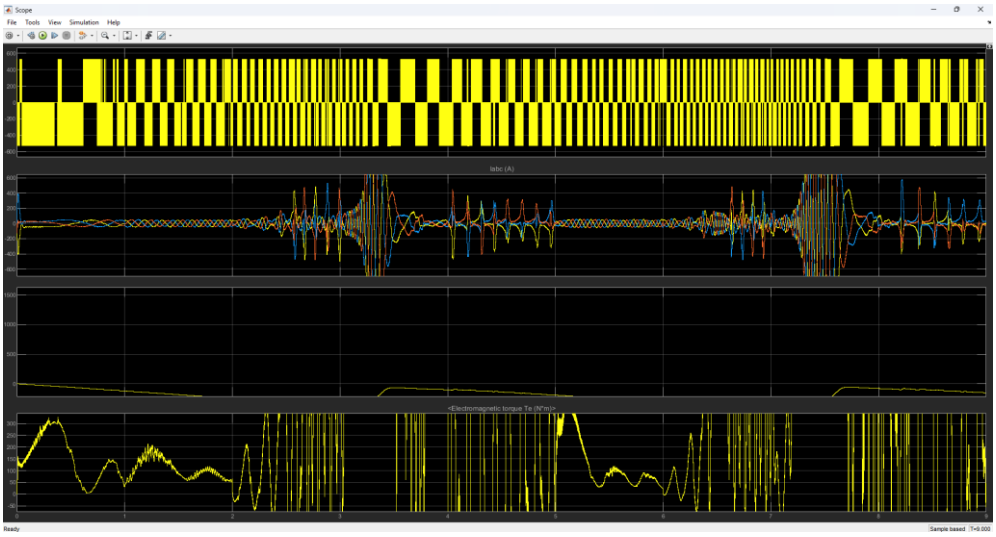


Рис. 3.6 – Результати моделювання системи DTC: динаміка швидкості, моменту та струмів

Після короткочасного перехідного процесу момент стабілізується на новому, вищому рівні, достатньому для врівноваження моменту навантаження. Амплітуда фазних струмів статора при цьому закономірно зростає, відображаючи збільшення активної потужності, споживаної двигуном. При цьому форма струмів залишається стабільною та не зазнає спотворень, що свідчить про стійкість контурів регулювання.

Аналіз якості енергоперетворення в усталених режимах

Після завершення всіх перехідних процесів (пуску та реакції на навантаження), система переходить у квазі-усталений режим роботи.

Аналіз цього режиму дозволяє зробити висновки про якість керування: Гармонійний склад струмів: Осцилограми фазних струмів I_{abc} характеризуються формою, максимально наближеною до ідеальної синусоїди, зі взаємним фазовим зсувом у 120 градусів.

Висока якість форми струму досягається завдяки використанню алгоритму просторово-векторної модуляції (SVM) з фіксованою частотою комутації ключів інвертора. Це дозволяє мінімізувати рівень вищих гармонік струму та зменшити втрати в сталі двигуна навіть в умовах змінного навантаження.

Пульсації моменту: Електромагнітний момент у сталому режимі характеризується гладким протіканням. Він коливається навколо свого середнього значення з помірною піко-піковою амплітудою.

Мінімізація пульсацій моменту є важливим показником, оскільки це зменшує вібрації механічної частини приводу та подовжує термін служби обладнання. Точність стабілізації: Відхилення фактичної швидкості ротора від заданої уставки в усталеному режимі є мінімальними та знаходяться в

межах допустимої похибки вимірювання, що задовольняє вимоги до приводу агломашини.

3.6 Порівняльний аналіз та висновки до розділу

Головною метою аналізу є вибір оптимального алгоритму керування, який забезпечить надійність технологічного процесу спікання. Для об’єктивного узагальнення результатів моделювання FOC та DTC введено ряд порівняльних показників якості регулювання, що охоплюють електромагнітні, динамічні та механічні аспекти роботи приводу. Якісна оцінка основних характеристик, отримана в ході досліджень, систематизована та наведена у таблиці 3.2 нижче.

Аналіз динамічних показників та стабільності швидкості

Одним із критичних параметрів для агломераційного виробництва є стабільність підтримки швидкості руху спікальних візків при змінному навантаженні.

Система векторного керування (FOC): Характеризується високою стабільністю швидкості. При імітації "накиду шихти" (різкого збільшення навантаження) динамічне падіння швидкості становить $\Delta\omega \approx 180$ рад/с, при цьому система відпрацьовує збурення без статичної похибки.

Реакція на збурення є плавною та демпфованою, що запобігає виникненню автоколивань у механічній підсистемі. Система прямого керування моментом (DTC): Демонструє середні показники стабільності. Динамічне просідання швидкості є більшим і становить $\Delta\omega \approx 205$ рад/с, також спостерігається наявність статичної похибки, що може потребувати введення додаткових контурів регулювання.

Реакція системи є дуже швидкою, але «жорсткою», що супроводжується різкими стрибками моменту

Оцінка електромагнітних процесів та пульсацій моменту

Якість перетворення енергії та форма струмів статора безпосередньо впливають на нагрів двигуна та енергоефективність установки в цілому.

Згідно з отриманими даними, форма струмів у системі FOC близька до синусоїдальної та має низький вміст вищих гармонік. Пульсації моменту в даному випадку є помірними, оскільки вони згладжуються широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) та природною інерцією системи.

Натомість, для системи DTC характерна ламана, «східчаста» форма струму з підвищеним вмістом вищих гармонік. Це призводить до вищих пульсацій моменту, які зумовлені самим принципом гістерезисного регулювання, закладеним у даний метод.

Вплив на механічну частину та складність реалізації

Важливим аспектом експлуатації агломашини є довговічність механічних вузлів (редукторів, муфт)

1. **Механічний вплив:**
    - FOC забезпечує щадний режим роботи, створюючи менші вібрації та удари в кінематичних передачах.
    - DTC генерує агресивніші навантаження, що потенційно призводить до більшого механічного зносу обладнання.
2. **Складність налаштування:**
    - Векторне керування (FOC) має вищу складність реалізації, оскільки необхідна точна настройка ПІ-регуляторів контурів струму, потоку та швидкості.
    - Пряме керування моментом (DTC) є простішим у налаштуванні, однак вимагає акуратного вибору ширини петлі гістерезису для досягнення компромісу між частотою перемикань ключів інвертора та пульсаціями моменту.

Підсумкова порівняльна характеристика

Для наочного зіставлення основних технічних показників обох систем сформовано підсумкову таблицю.

Таблиця 3.1

Порівняльна характеристика систем керування FOC та DTC

Показник якості	Векторне керування (FOC)	Пряме керування моментом (DTC)
Форма струмів	Близька до синусоїдальної, низький вміст гармонік	Ламана, «східчаста»; підвищений вміст вищих гармонік
Пульсації моменту	Помірні, згладжені ШІМ та інерцією	Вищі, зумовлені гістерезисним регулюванням
Стабільність швидкості	Висока, $\Delta\omega \approx 180$ рад/с при накиді шихти без статичної похибки	Середня, $\Delta\omega \approx 205$ рад/с і наявна статична похибка

Продовження табл. 3.1

Порівняльна характеристика систем керування FOC та DTC

Реакція на збурення	Плавна, демпфована	Дуже швидка, але «жорстка», з різкими стрибками моменту
Вплив на механічну частину	Щадний режим, менші вібрації та удари	Агресивніші навантаження, потенційно більший знос

Складність налаштування	Вища, необхідна точна настройка ПІ-регуляторів	Нижча, але потрібний акуратний вибір гістерезису

Висновки та рекомендації щодо вибору системи

За результатами проведених досліджень можна зробити обґрунтований висновок, що система векторного керування (FOC) у дослідженій конфігурації забезпечує кращу якість регулювання швидкості та більш сприятливий режим роботи механічної частини приводу агломашини. Це є вирішальним фактором для забезпечення рівномірності спікання агломерату.

У свою чергу, система прямого керування моментом (DTC) демонструє високу швидкодію по моменту, однак має ряд недоліків, суттєвих для даного технологічного процесу: гіршу форму струмів, більші пульсації моменту та наявність статичної похибки по швидкості.

Як базовий алгоритм для модернізації електроприводу агломашини доцільно обрати FOC (Field Oriented Control). При цьому метод DTC варто розглядати як потенційно перспективний виключно для спеціальних режимів роботи або аварійних ситуацій, де критичною є миттєва реакція моменту, а питаннями плавності ходу можна тимчасово знехтувати.

Практичне моделювання підтвердило переваги методу векторного керування (FOC) над системою DTC для умов агломераційного виробництва. Зокрема, при імітації накидання навантаження система FOC продемонструвала вищу динамічну жорсткість із просіданням швидкості $\Delta\omega \approx 180$ рад/с та відсутністю статичної похибки, тоді як у системі DTC просідання становило 205 рад/с із наявною залишковою похибкою. Доведено, що застосування синусоїдальної форми струму в FOC сприяє енергоефективності, а налаштування контуру швидкості за

критерієм симетричного оптимуму в поєднанні із задавачем інтенсивності дозволяє досягти перехідних процесів, близьких до еталонних, повністю усуваючи ударні навантаження на механіку.

РОЗДІЛ 4
ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ

Впровадження сучасної системи керування на базі ПЛК та ЧРП вирішує фундаментальну задачу стабілізації швидкості аглострічки. Наступним еволюційним кроком є перехід від стабілізації до інтелектуальної оптимізації процесу за допомогою технологій штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН). Інтеграція ШІ дозволяє системі не просто підтримувати задані параметри, а й аналізувати величезні масиви даних для прийняття рішень, що максимізують якість продукції, енергоефективність та надійність обладнання.

4.1 Прогнозування якості агломерату за допомогою машинного навчання

Однією з ключових проблем агломераційного виробництва є значна затримка між зміною параметрів процесу та отриманням результатів лабораторного аналізу якості готового продукту.[51] Це не дозволяє оперативно коригувати процес. Моделі машинного навчання здатні вирішити цю проблему, прогнозуючи ключові показники якості (наприклад, міцність на удар, вміст FeO, гранулометричний склад) в режимі реального часу.

Принцип роботи:

1. **Збір даних:** Система збирає великий масив історичних даних, що включає сотні параметрів: склад шихти, вологість, швидкість стрічки, температури, тиск, а також відповідні їм результати лабораторних аналізів якості.
2. **Навчання моделі:** На цих даних навчається регресійна модель (наприклад, на базі алгоритмів Random Forest, штучних нейронних

мереж (ANN) або градієнтного бустингу), яка знаходить складні нелінійні залежності між вхідними параметрами та кінцевою якістю.

3. **Прогнозування:** Навчена модель інтегрується в систему керування і, отримуючи поточні дані з датчиків, видає прогноз якості агломерату, який буде вироблено з поточної шихти.

Такий підхід дозволяє оператору бачити прогнозовану якість і завчасно вносити корективи в параметри процесу (наприклад, у швидкість стрічки або склад шихти), щоб утримати якість у заданих межах, тим самим зменшуючи кількість браку та підвищуючи стабільність виробництва.

4.2 Предиктивне (прогнозне) обслуговування обладнання

Агломашина працює у важких умовах, що призводить до зносу та раптових відмов обладнання. Предиктивне обслуговування (Predictive Maintenance, PdM) на базі ШІ дозволяє перейти від реактивного ремонту (після поломки) або планового (за графіком) до обслуговування за реальним станом.

Система аналізує дані з датчиків вібрації, температури, струму двигуна та інших параметрів, щоб виявити аномалії та патерни, що передують несправностям. Алгоритми машинного навчання можуть спрогнозувати, коли ймовірність відмови певного вузла (наприклад, підшипника редуктора або двигуна) стане високою, і заздалегідь попередити про необхідність обслуговування.

Це дозволяє:

- **Скоротити незаплановані простої** до 75%.
- **Знизити витрати на технічне обслуговування** на 25-30%.
- **Подовжити термін служби обладнання** за рахунок своєчасного втручання. [64, 66]

4.3 Контроль якості за допомогою комп'ютерного зору

Комп'ютерний зір - це напрямок ШІ, що дозволяє комп'ютерам «бачити» та аналізувати зображення. В умовах аглофабрики ця технологія може автоматизувати процеси контролю, які раніше виконувалися вручну.

- **Інспекція стану обладнання:** Камери, встановлені вздовж аглострічки, можуть в режимі реального часу відстежувати стан кожної палети. Нейронна мережа, навчена на тисячах зображень, здатна миттєво виявляти дефекти, такі як тріщини, знос ущільнювальних пластин або пошкодження колосників. Система автоматично сигналізує про пошкоджену палету, що дозволяє оперативно вивести її на ремонт і запобігти погіршенню якості через підсос повітря.
- **Аналіз гранулометричного складу:** Замість трудомісткого ситового аналізу, система комп'ютерного зору може аналізувати зображення готового агломерату на конвеєрі, оцінюючи розподіл частинок за розмірами в реальному часі. Ці дані можуть бути використані як швидкий зворотний зв'язок для оптимізації параметрів спікання.

4.4 Архітектура інтелектуальної системи

Інтеграція ШІ-моделей відбувається на верхньому рівні ієрархії керування. Спеціалізований промисловий комп'ютер або Edge-пристрій збирає дані з ПЛК, датчиків та систем комп'ютерного зору. На ньому виконуються обчислювально-інтенсивні ШІ-алгоритми. Результати їх роботи (наприклад, оптимальне завдання по швидкості, попередження про необхідність ТО, сигнали про дефекти) передаються на SCADA-систему для оператора та, у вигляді керуючих команд, назад на ПЛК для автоматичного коригування процесу. Це створює замкнений інтелектуальний контур, що забезпечує самооптимізацію агломераційного виробництва.

Інтеграція технологій штучного інтелекту в розроблену систему керування відкриває можливості для переходу від стабілізації до комплексної оптимізації процесу. Обґрунтовано, що використання моделей машинного навчання для створення віртуальних датчиків дозволяє прогнозувати якість агломерату в реальному часі, нівелюючи проблему затримки лабораторних аналізів. Крім того, впровадження предиктивного обслуговування на основі аналізу даних з ЧРП та систем комп'ютерного зору здатне зменшити незаплановані простої обладнання на 75% та знизити витрати на ремонти на 25–30%, що значно підвищує економічну ефективність модернізації

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності агломераційного виробництва шляхом вдосконалення системи автоматичного керування електроприводом агломераційної машини. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень отримано такі основні результати:

1. **Проаналізовано агломераційну машину як об'єкт керування** та встановлено, що існуючі системи на базі нерегульованих асинхронних двигунів не відповідають сучасним вимогам енергоефективності та надійності. Виявлено, що прямий пуск двигуна призводить до виникнення ударних моментів, які у 2–5 разів перевищують номінальні значення, що є причиною передчасного зносу механічного обладнання та зниження якості агломерату через нестабільність швидкості спікання.
2. **Обґрунтовано доцільність модернізації головного приводу** шляхом переходу на частотно-регульовану систему керування. Порівняльний аналіз методів керування показав, що для агломераційного виробництва, де критичними є плавність ходу та мінімізація вібрацій, оптимальним є метод векторного керування (FOC). Доведено, що метод прямого керування моментом (DTC), попри високу швидкодію (час реакції < 5 мс), має недоліки у вигляді підвищених пульсацій моменту, що негативно впливає на механічну частину конвеєра.
3. **Розроблено математичні моделі та проведено імітаційне моделювання** систем FOC та DTC у середовищі MATLAB/Simulink. Результати моделювання підтвердили переваги системи FOC у стабілізації швидкості: при імітації технологічного збурення (накидання навантаження) динамічне просідання швидкості склало 180 рад/с проти 205 рад/с у системі DTC. Встановлено, що система

FOC забезпечує відпрацювання збурень без статичної похибки та формує струми статора синусоїдальної форми, що сприяє зменшенню нагріву двигуна.

4. **Синтезовано алгоритми керування** та доведено ефективність використання у контурі швидкості ПІ-регулятора, налаштованого на симетричний оптимум, у комплексі із задавачем інтенсивності. Це дозволило повністю усунути коливання електромагнітного моменту та швидкості на етапах пуску, забезпечивши вихід на робочий режим за 4 секунди з перерегулюванням, що не перевищує 5%, що відповідає вимогам технологічного регламенту.
5. **Запропоновано структуру системи автоматизації** та визначено перспективи її інтелектуалізації. Розроблено трирівневу архітектуру (SCADA – ПЛК – ЧРП), яка забезпечує гнучкість керування та інтеграцію в заводську мережу. Обґрунтовано, що впровадження модулів предиктивного обслуговування на базі машинного навчання дозволить скоротити незаплановані простої обладнання до 75% та зменшити витрати на ремонти на 25–30%.

Практичне значення роботи полягає у розробці інженерних рішень та рекомендацій щодо налаштування системи керування, впровадження яких дозволить підвищити якість агломерату за рахунок стабілізації процесу спікання та подовжити термін служби механічного обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до виконання лабораторного практикуму «Підготовка та спікання агломераційної шихти» з дисципліни «Металургія чорних металів». Розділ 1 «Теорія та технологія процесів підготовки сировини до плавки» / уклад. М. Р. Руденко. Кам'янське: ДДТУ, 2019. 18 с. URL: https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/5/23/5-23-lr28.pdf (дата звернення: 01.12.2025).

2. Щекин В., Ткачук В. Автоматизація агломераційного виробництва на базі застосування Neuro-Fuzzy систем регулювання нижнього рівня. Metal Journal. 2014. URL: https://www.metaljournal.com.ua/automation-agglomeration-based-on-the-use-of-Neuro-Fuzzy-systems-of-regulation-of-the-lower-level/ (дата звернення: 01.12.2025).

3. Трифазні асинхронні двигуни [Електронний ресурс]. Харків : НТУ «ХПІ», 2022. URL: http://web.kpi.kharkov.ua/ze/wp-content/uploads/sites/146/2022/04/Tryfazni-asynhronni-dvyguny.pdf (дата звернення: 01.12.2025)

4. Агломерація залізних руд. Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Агломерація_залізних_руд (дата звернення: 01.12.2025).

5. Технологія збагачення залізних руд. Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Технологія_збагачення_залізних_руд (дата звернення: 01.12.2025).

6. Полєтаєв В. П., Похвалітий А. А. Конспект лекцій з дисципліни «Технологія процесів (за фахом)». Частина І «Аглодоменне виробництво». Кам'янське : ДДТУ, [2019]. URL:

https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/5/23/5-23-kl56.pdf (дата звернення: 01.12.2025).

7. Рішення для агломераційного виробництва. DHM GROUP. URL: https://dhmgroup.com/virobnictvo/rishennja-dlja-aglomeracijnogo-virobnictva/ (дата звернення: 01.12.2025).

8. Агломерат (металургія). Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Агломерат_(металургія (дата звернення: 01.12.2025).

9. Крівенко С. В. Розвиток теорії газодинаміки шару агломераційної шихти та інтенсифікація теплових процесів при спіканні : дис. … д-ра техн. наук : 05.16.02. Маріуполь, 2021. URL: https://pstu.edu/wp-content/uploads/2021/02/dis.pdf (дата звернення: 01.12.2025).

10. Плєшков С. П., Серебренніков С. В. Енергоефективний електропривод у промисловості та сільськогосподарському виробництві : навч. посіб. Кіровоград : КНТУ, 2016. URL: https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/8f52e471-0a3a-4fcb-9724-81474e708a12/content (дата звернення: 01.12.2025).

11. Drives Engineering Handbook. Milwaukee : Rockwell Automation, [б. р.]. URL: https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/at/drive-at001_-en-p.pdf (дата звернення: 01.12.2025).

12. Методичні рекомендації щодо проведення експертного обстеження (технічного діагностування) агломераційної машини / кер. роботи В. А. Плетньов. Київ : ДУ «ННДІПБОП», 2012.

13. Асинхронний двигун: його типи, принцип роботи, застосування, переваги та недоліки. УкрПромМотор. 2024. URL:

https://ukrprommotor.com.ua/blog/asinhronnij-dvigun-jogo-tipi-printsip-roboti-zastosuvannya-perevagi-ta-nedoliki (дата звернення: 01.12.2025).

14. Що таке частотно-регульований привод? Danfoss. URL: https://www.danfoss.com/uk-ua/about-danfoss/our-businesses/drives/what-is-a-variable-frequency-drive/ (дата звернення: 01.12.2025).

15. Трифазні асинхронні двигуни [Електронний ресурс]. Харків : НТУ «ХПІ», 2022. URL: http://web.kpi.kharkov.ua/ze/wp-content/uploads/sites/146/2022/04/Tryfazni-asynhronni-dvyguny.pdf (дата звернення: 01.12.2025)

16. Частотно-регульований привод. Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Частотно-регульований_привод (дата звернення: 01.12.2025).

17. Електронний ресурс. URL: http://univer.nuczu.edu.ua/e-books/326/560.html (дата звернення: 01.12.2025).

18. Лакосіна А. О., Широкова А. Г. Сучасне застосування частотно-регульованого асинхронного електроприводу. Сучасний стан та перспективи розвитку електротехнічних систем : матеріали IV Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. пам'яті В. В. Овчарова (м. Мелітополь, 4–18 листоп. 2021 р.). Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 81–82. URL: http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/16233/1/MATERIALY%20%20IV_Vseukr_nauk-prakt_internet-konf%2004-18_11_2021%20p_81-82.pdf (дата звернення: 01.12.2025)

19. Векторне керування асинхронними двигунами. Освітній портал КНУБА. URL: https://org2.knuba.edu.ua/mod/book/view.php?id=36026 (дата звернення: 01.12.2025).

20. Керування електропоїздом : конспект лекцій [Електронний ресурс]. Харків : УкрДУЗТ, 2021. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2021/04/keruvannja-elektropoizdom.pdf (дата звернення: 01.12.2025).

21. Онанко А. Ю., Желізко В. А., Попович М. Г. Пряме векторне керування швидкістю асинхронного двигуна з використанням замкненого спостерігача потокозчеплення статора зниженого порядку. Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика (SPEA-2014). Київ : НТУУ «КПІ», 2014. URL: https://epa.kpi.ua/science/publications/spea-2014/pryame-vektorne-keruvannya-shvidkistyu-asinhronnogo-dviguna-z-vikoristannyam-zamknenogo-sposterigacha-potokozcheplennya-statora-znizhenogo-poryadku-onanko-a-yu-asistent-zhelizko-v-a-student-popovich/ (дата звернення: 01.12.2025).

22. Керування електропоїздом : конспект лекцій [Електронний ресурс]. Харків : УкрДУЗТ, 2021. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2021/04/keruvannja-elektropoizdom.pdf (дата звернення: 01.12.2025). (Вже було у списку)

23. Sensored Field Oriented Control of 3-Phase Induction Motors. Purdue University. URL: https://engineering.purdue.edu/~dionysis/EE452/Lab13/Lab13_Supporting_Materials/Sensored%20FOC%20of%20ACI.pdf (дата звернення: 01.12.2025).

24. Implement Motor Speed Control by Using Field-Oriented Control (FOC). MathWorks. URL: https://www.mathworks.com/help/mcb/gs/implement-motor-speed-control-by-using-field-oriented-control-foc.html (дата звернення: 01.12.2025).

25. Керування електропоїздом : конспект лекцій [Електронний ресурс]. Харків : УкрДУЗТ, 2021. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2021/04/keruvannja-elektropoizdom.pdf (дата звернення: 01.12.2025)

26. Direct Torque Control (DTC) : White Paper. ABB, 2015. URL: https://library.e.abb.com/public/ABB_WhitePaper_DTC_A4_20150414.pdf (дата звернення: 01.12.2025).

27. Direct torque control. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Direct_torque_control (дата звернення: 01.12.2025).

28. Arias Pujol A. Improvements in direct torque control of induction motors : PhD thesis. Terrassa : UPC, 2000. URL: https://upcommons.upc.edu/bitstreams/39422dfa-cc89-421c-b2a4-f895d31381f6/download (дата звернення: 01.12.2025).

29. Direct Torque Control [Electronic resource]. Scribd. URL: https://www.scribd.com/document/236987148/Direct-Torque-Control (дата звернення: 01.12.2025).

30. Bertoluzzo M., Buja G., Menis R. Direct torque control of an induction motor using a single current sensor // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2006. Vol. 53, No. 3. P. 778–784. DOI: 10.1109/TIE.2006.874415

31. Comparative Evaluation of Field Oriented Control and Direct Torque Control Methodologies in Field Weakening Regions for Interior Permanent Magnet Machines / Z. Q. Zhu et al. 4th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2008). York, UK, 2008. URL:

https://www.staff.ncl.ac.uk/damian.giaouris/pdf/Papers/paper5.pdf (дата звернення: 01.12.2025).

32. DTC or FOC – which is better? Controls, Drives & Automation. URL: https://www.controlsdrivesautomation.com/page_624258.asp (дата звернення: 01.12.2025).

33. Aissa A. G., Moulahoum S., Tahour A. Comparative study between Direct Torque Control and Field Oriented Control of Induction Motor. International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM). Algiers, 2014. URL: https://www.researchgate.net/figure/comparative-between-FOC-and-DTC-of-IM_tbl1_310794926 (дата звернення: 01.12.2025).

34. Youssef M. Z. A Detailed Comparison Between FOC and DTC Methods of a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive. 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). Coeur d'Alene, ID, USA, 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/277075509_A_Detailed_Comparison_Between_FOC_and_DTC_Methods_of_a_Permanent_Magnet_Synchronous_Motor_Drive (дата звернення: 01.12.2025).

35. A Comparative Study of Field-Oriented Control and Direct-Torque Control of Induction Motors Using An Adaptive Flux Observer / K. Tungpimolrut et al. TENCON 2004. 2004 IEEE Region 10 Conference. Chiang Mai, Thailand, 2004. URL: https://www.researchgate.net/publication/265190187_A_Comparative_Study_of_Field-Oriented_Control_and_Direct-Torque_Control_of_Induction_Motors_Using_An_Adaptive_Flux_Observer (дата звернення: 01.12.2025).

36. Toufouti R., Mezouar A., Benalla H. Direct Torque Control Strategies of Induction Machine: Comparative Studies. Journal of Electrical Engineering. 2007. Vol. 58, no. 5. P. 280–285. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/84a4/db162aa72ec08c24cc01ff18ce70474ddb4e.pdf (дата звернення: 01.12.2025).

37. SIMATIC S7-1500. ТОВ «А2М». URL: https://www.a2m.com.ua/ua/katehoriia/PLC/s7-1500 (дата звернення: 01.12.2025).

38. SIMATIC S7-1500. Siemens. URL: https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/simatic-s7-1500.html (дата звернення: 01.12.2025).

39. DTC: A motor control technique for all seasons : White Paper. ABB, 2015. URL: https://library.e.abb.com/public/0e07ab6a2de30809c1257e2d0042db5e/ABB_WhitePaper_DTC_A4_20150414.pdf (дата звернення: 01.12.2025).

40. ABB ACS880 industrial drives [Електронний ресурс] : відео / ABB Drives. 2020. URL: https://www.youtube.com/watch?v=vMxnidgrR9E (дата звернення: 01.12.2025).

41. Загальнопромислові електродвигуни. СЛЕМЗ. 2020. URL: https://slemz.com.ua/novyny/statti/zagalnopromy (дата звернення: 01.12.2025).

42. ABB Inverter ACS880-01 : постачальники та агенти [Електронний ресурс]. XK Transmitter. URL: https://ua.xk-transmitter.com/electric/abb/abb-inverter-acs880-01.html (дата звернення: 01.12.2025).

43. Програмний контролер SIMATIC S7-1500. Siemens. URL: https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-

promyslovosti/systemy-avtomatyzatsiyi/systemy-promyslovoyi-avtomatyzatsiyi-simatic/plc-kontrolery-simatic/prohramnyy-kontroler-simatic-s7-1500.html (дата звернення: 01.12.2025).

44. Mahfoud M., El-Hajj A., Karaki S. Adaptive Fuzzy Logic Control for Optimal Speed Regulation in Single Phase Induction Motor. 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). Niagara Falls, ON, Canada, 2011. P. 823–828. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/5994921 (дата звернення: 01.12.2025).

45. Чорний О. П., Луговий А. В., Родькін Д. Й. Автоматизований електропривод промислових установок : підручник. Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2018. 288 с.

46. Пупена О. М., Ельперін І. В., Ладанюк А. П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах. Київ : Ліра-К, 2019. 552 с.

47. Островерхов М. Я., Бурик М. П. Системи керування електроприводами : підручник. Київ : Аграр Медіа Груп, 2020. 469 с.

48. Adaptive Fuzzy Logic Control for Optimal Speed Regulation in Single Phase Induction Motors / M. S. Sumukh et al. Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent and Sustainable Power and Energy Systems (ISPES). 2024. Vol. 1. P. 178–184. URL: https://www.scitepress.org/Papers/2024/136528/136528.pdf (дата звернення: 01.12.2025).

49. Електронна бібліотека ТДАТУ. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/enf/etem_3/1/index1.html (дата звернення: 01.12.2025).

50. Авдєєва О. А., Садовий О. С. Електропривід і автоматизація. Миколаїв : МНАУ, 2018. 98 с. URL:

https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/3743/1/Elektroprivid%20i%20avtomatyzatsiia-lekcsi.pdf (дата звернення: 01.12.2025).

51. Товаровський І. Г. Доменна плавка та агломерація : монографія. 2-ге вид., допов. Дніпро : Журфонд, 2019. 644 с.

52. Колб А. А. Автоматизований електропривод машин і установок гірничого та металургійного виробництва : навч. посіб. / А. А. Колб. - Дніпро : НГУ, 2017. - 285 с.

53. Основи електропривода : навч. посіб. / [Н. Д. Красношапка, В. В. Торопов, М. В. Пушкар та ін.] ; за ред. Н. Д. Красношапки. - Київ : НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2018. - 355 с.

54. Чорний О. П. Системи керування електроприводами змінного струму : монографія / О. П. Чорний, А. В. Луговий, Д. О. Родькін. - Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2017. - 256 с.

55. Liu Song, Lyu Qing, Liu Xiaojie, Sun Yanqin. Synthetically predicting the quality index of sinter using machine learning model // Ironmaking & Steelmaking. 2020. Vol. 47, No. 7. P. 828–836. DOI: 10.1080/03019233.2019.1617573

56. Success Story: Data-driven Sinter Quality Improvement. Pro²Future. 2021. URL: http://pro2future.at/wp-content/uploads/2022/03/2021-12_SuccessStory_Area3_SinterImprovement_en.pdf (дата звернення: 02.12.2025).

57. The Prediction of Sinter Drums Strength Using Hybrid Machine Learning Algorithms / X. Ren et al. Computational Intelligence and Neuroscience. 2022. Vol. 2022. Art. ID 4790736. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9283009/ (дата звернення: 02.12.2025).

58. Li Y., Yang C., Sun Y. Sintering Quality Prediction Model Based on Semi-Supervised Dynamic Time Feature Extraction Framework. Sensors. 2022. Vol. 22, no. 15. Art. 5861. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9371414/ (дата звернення: 02.12.2025).

59. VAiron Sinter Optimizer. Primetals Technologies. URL: https://www.primetals.com/en/portfolio/solutions/agglomeration/sintering/vairon-sinter-optimizer/ (дата звернення: 02.12.2025).

60. Predictive Maintenance Machine Learning: A Practical Guide. Neural Concept. URL: https://www.neuralconcept.com/post/how-ai-is-used-in-predictive-maintenance (дата звернення: 02.12.2025).

61. AI-Powered Predictive Maintenance: How It Works. LLumin. URL: https://llumin.com/blog/ai-powered-predictive-maintenance-how-it-works/ (дата звернення: 02.12.2025)

62. AI for Predictive Maintenance in Manufacturing Industry. Ripik AI. URL: https://www.ripik.ai/ai-for-predictive-maintenance-in-manufacturing-industry/ (дата звернення: 02.12.2025).

63. Revolutionising sinter plants with AI cameras in steel manufacturing. visionAI. 2025. URL: https://visionaisuite.net/blog/ai-cameras-in-steel-manufacturing (дата звернення: 02.12.2025).

64. Continuous measurement of ferrous sinter size distributions using an optical sensor system / M. Holliday et al. Ironmaking & Steelmaking. 2023. Vol. 50, no. 8. P. 1104–1111. URL: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03019233.2023.2208979 (дата звернення: 02.12.2025).