

Форма навчання заочна

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

(повна назва теми)

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник К.т.н., доцент - Чорний О.П.
(наук. ступінь, вчене звання) (підпис) (прізвище, ініціали)

Від 2026 р. №

(підпис)

Наук. ступень, вчене звання

Ініціали, прізвище

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ**

Кафедра Електричної інженерії і автоматизації

Рівень вищої освіти бакалавр

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Електричної інженерії і автоматизації

В.о. зав. каф.

Модло Є.О.

(підпис)

(посада, вчене звання,
прізвище ініціали)

«_____»

2026 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ(КИ)

Кульбіда Валерій Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Асинхронний електропривод охолоджувача агломерату.

керівник кваліфікаційної роботи _____, к.т.н., доцент Чорний О.П.

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

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

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 01.06.2026

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

Об'єкт розробки і дослідження – асинхронний електропривод охолоджувача агломерату.

Характер навантаження – робота в тривалому режимі, близьким до безперервного режиму S1, відносно стабільний, без різких ударних змін. Тип навантаження: змінний, нелінійний, аеродинамічний (пов'язаний із рухом повітря через шар агломерату)

Тип системи електроприводу: режим роботи електропривода - тривалий S1, рід струму – змінний, електропривод – асинхронний з короткозамкненим ротором, перетворювач частоти – нереверсивний (або реверсивний за потреби), напруга змінного струму 380 В, відхилення напруги мережі +10 %, -15 %, частоти мережі 50 Гц ±2 %.

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

4.1 Аналітична частина;

4.2 Основна частина.

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

1 Принципова схема

2 Загальний вигляд

3 Функціональна схема

4 Структурна схема

5 Результати моделювання

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 Аналітична частина	к.т.н., доц. Чорний О.П.		
2 Основна частина	к.т.н., доц. Чорний О.П.		

7. Дата видачі завдання «__06__» ____04_____ 2026р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	30.04.2026	
2.	Основна частина	05.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	11.05.2026	
4.	Виконання графічної частини	26.05.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	01.06.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	18.06.2026	

Студент

(підпис)

Кульбіда В.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Чорний О.П.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кульбіда В.В. «Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Асинхронний електропривод охолоджувача агломерату» – Бакалаврська робота. – Кривий Ріг, 2026. 64 с., 29 рис., 4 табл., 19 джерел.

Об'єкт досліджень – дводвигуновий частотно-регульований асинхронний електропривод охолоджувача агломерату.

Предмет дослідження – алгоритми управління та динамічні характеристики процесу узгодження навантажень.

Мета роботи: модернізація електроприводу охолоджувача агломерату за допомогою заміни електроприводу постійного струму на сучасний асинхронний електропривод із частотним керуванням. Мета роботи полягає в проектуванні та дослідженні системи автоматизованого асинхронного електроприводу охолоджувача агломерату, що забезпечує вирівнювання та узгодження навантажень між двома агрегатами для підвищення надійності та енергоефективності процесу.

Робота присвячена розробці дворухового електроприводу на основі асинхронних двигунів, де особлива увага приділена задачі вирівнювання зусиль навантаження. У роботі наведено розрахунки щодо підбору силового електрообладнання та визначення параметрів ланцюга. Обґрунтовано метод управління системою, для якого отримано механічні та електромеханічні характеристики. За допомогою програмних комплексів імітаційного моделювання проведено дослідження динаміки роботи приводу у перехідних режимах.

Ключові слова: охолоджувач агломерату, асинхронний двигун, електропривод, перетворювач частоти, тиристорний перетворювач, імітаційне моделювання, ротор, двофазний двигун, статичні динамічні характеристики

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Аналіз технологічного процесу виробництва агломерату	9
1.2 Обладнання для охолодження агломерату	13
1.3 Принцип дії та конструкція охолоджувача агломерату	15
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	23
2.1 Вибір електрообладнання та розрахунок параметрів силового ланцюга електроприводу	23
2.2 Розрахункові параметри двигуна	25
2.3 Визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна за каталожними даними	26
2.4 Функціональна схема асинхронного електроприводу з скалярним керуванням	31
2.5 Специфіка підбору частотно-регульованого електроприводу для охолоджувача агломерату	33
2.6 Розрахунок параметрів елементів структурної схеми силового каналу електроприводу	36
2.7 Розрахунок електромеханічних та механічних характеристик при частотному управлінні	37
2.8 Аналіз та розрахунок механічних характеристик у системі частотного регулювання	40
2.9 Імітаційне моделювання системи асинхронного частотно-керувального приводу	42
2.9.1 Розробка функціональної схеми приводу охолоджувача агломерату	42
2.9.2 Математичний опис та структурна схема асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у нерухомій системі координат α , β	43
2.9.3 Побудова імітаційної моделі асинхронної машини у двофазній системі координат	47

2.9.4 Імітаційна модель силового каналу електроприводу	49
2.9.5 Обґрунтування вибору та параметрів задатчика інтенсивності	50
2.9.6 Імітаційні дослідження електроприводу охолоджувача агломерату	52
2.10 Заходи із охорони праці та безпеки при експлуатації електроприводу охолоджувача агломерату	57
2.10.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників	57
2.10.2 Засоби зниження дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників	58
2.10.3. Пожежна безпека та санітарія	60
ВИСНОВКИ	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	63
ДОДАТКИ	65

ВСТУП

У сучасній чорній металургії процес виробництва агломерату є енергоємним та технологічно складним етапом. Однією з ключових ланок агломераційної машини є охолоджувач, призначений для зниження температури продукту до рівня, що дозволяє його подальше транспортування та використання в доменному виробництві. Ефективність роботи охолоджувача безпосередньо залежить від надійності та точності функціонування його приводних механізмів. Використання багаторухових систем (зокрема дводвигунового асинхронного електроприводу) продиктовано необхідністю забезпечення високого пускового моменту та резервування потужності. Однак експлуатація таких систем пов'язана з проблемою статичної та динамічної нерівномірності розподілу моментів між двигунами, що призводить до передчасного зношування механічного обладнання та зниження ККД установки. У зв'язку з цим оптимізація систем управління, що забезпечують узгоджену роботу двигунів, є актуальним науково-технічним завданням.

Мета роботи полягає в проектуванні та дослідженні системи автоматизованого асинхронного електроприводу охолоджувача агломерату, що забезпечує вирівнювання та узгодження навантажень між двома приводними агрегатами для підвищення надійності та енергоефективності процесу охолодження.

Використання частотно-регульованого електроприводу замість застарілих систем нерегульованого пуску є пріоритетним напрямом цифровізації важкої промисловості. В умовах експлуатації охолоджувача агломерату, що характеризується високою інерційністю та змінним моментом опору, використання сучасних алгоритмів векторного або скалярного управління з корекцією по струму дозволяє мінімізувати енергетичні втрати та виключити "перетягування" навантаження одним із двигунів

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз технологічного процесу виробництва агломерату

Основними залізовмісними продуктами доменної плавки є агломерат і коти́ни, вироблені відповідно на агломераційних та випалювальних фабриках. Для виробництва агломерату гірничо-збагачувальні комбінати на агломераційну фабрику постачають руди та концентрати з основними розмірами шматочків 6 – 8 мм, а для виробництва окатишів концентрати, подрібнені до 0,050 – 0,070 мм.

Агломераційна фабрика призначена для одержання офлюсованого агломерату з: руди, концентрату, відходів металургійного виробництва руд, флюсів та палива. Після їх підготовки, спікання та сортування кондиційний агломерат відправляють у доменні цехи.



Рис. 1.1. Агломерат

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

Для отримання агломерату до складу фабрики входять підрозділи:

- корпусів для розвантаження вагонів із сипучими матеріалами;
- складів для усереднення та зберігання матеріалів;
- корпусів для дроблення вапняку та подрібнення палива;
- корпусів для дозування компонентів шихти;
- корпусів для змішування та оздоблення агломераційної шихти;
- корпусів спікання, охолодження та сортування агломерату.

Зі складів шихтові матеріали стрічковими конвеєрами 1 і 2 (рис. 1.2, 1.3) в бункера 3 подають залізовмісну частину шихти (руду, концентрат, колошниковий пил і повернення), паливо (дрібниця коксу та вугілля), флюси (вапняк і доломіт) і відходи металургійного виробництва. Перед подачею вапняк дроблять у молотковій дробарці, а коксик – у чотирьох валковій. З бункерів шихтові матеріали у певних співвідношеннях, контрольованих вагами 4, видають живильниками 4 та стрічковими дозаторами 5 на збірний стрічковий конвеєр 6. Крім залізовмісних компонентів до складу шихти вводять флюси (15 - 20%), паливо (4 - 6%). Всі перераховані компоненти шихти подають у барабанний змішувач 8 де їх зволожують (4 - 5 % води) і ретельно перемішують. Після перемішування з бункерів 10 в шихту додають дрібницю (менше 5,0 мм) агломерату (повернення) (20 - 30%) і передають її для озброєння (одержання гранул) барабанний окомкователь 9.

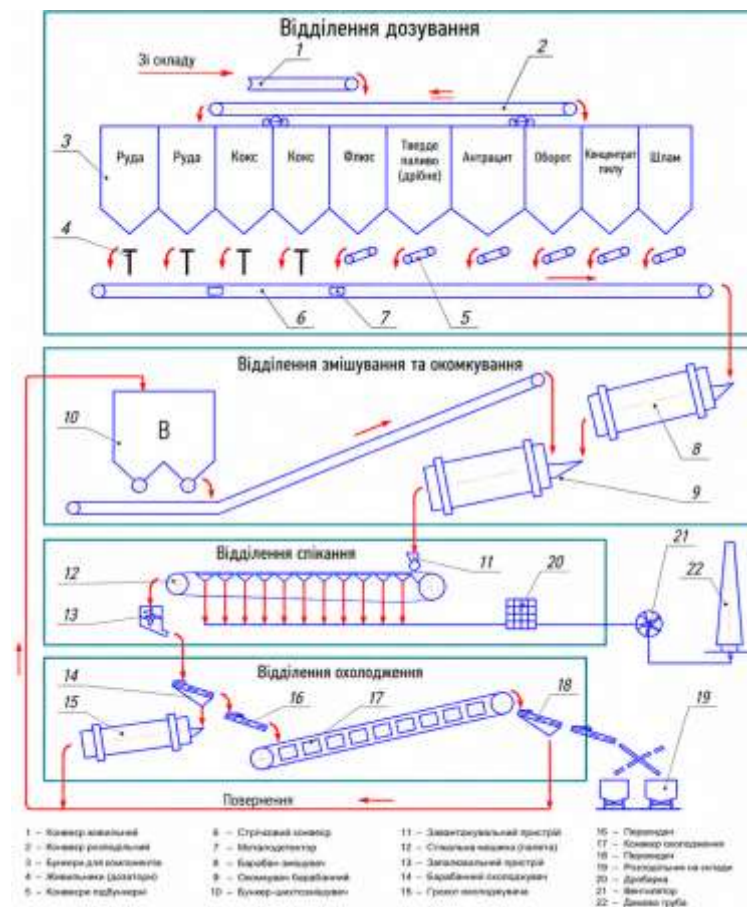
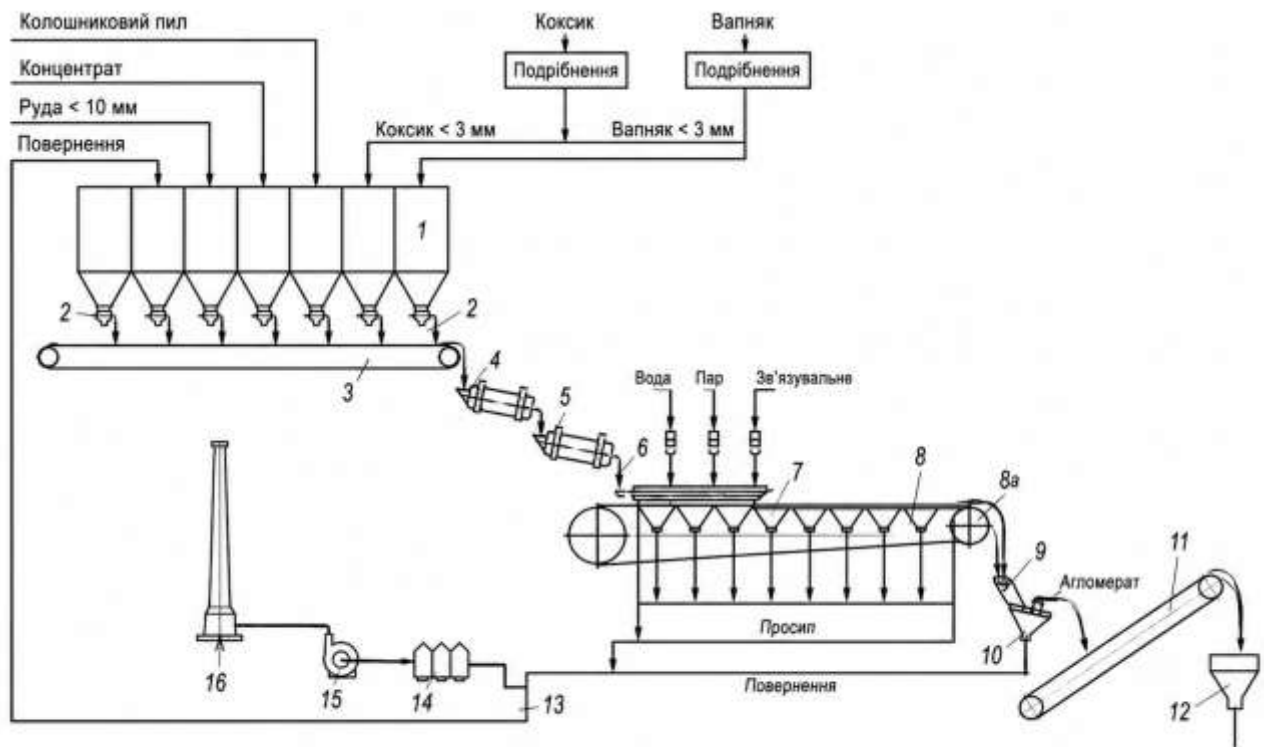


Рис. 1.2. Принципова схема виробництва агломерату

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]



1 - бункери для компонентів шихти; 2 - живильники (дозатори); 3 - стрічковий конвеєр (збірний); 4 - пересипний вузол / завантаження в змішувач; 5 - барабанний змішувач; 6 - зволоження шихти (вода, пара, зв'язуюче); 7 - гранулятор (окомковувач); 8 - стрічка агломераційної машини; 8а - привідний барабан; 9 - розвантаження агломерату; 10 - дробарка агломерату; 11 - конвеєр готового продукту; 12 - бункер готового агломерату; 13 – газопровід; 14 – пилоуловлювач; 15 – димосос; 16 - димова труба

Рис. 1.3. Принципова схема виробництва агломерату

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

Підготовлена до спікання шихта човниковим розподільником, приймальної лійки та барабанного живильника 11 укладається на стрічку агломераційної машини 12 шаром заввишки 350-450 мм. Шихта, що укладається на візки (стрічці), що безперервно рухаються, надходить під запальний горн, в якому факел пальників запалює коксик, що знаходиться в шихті. Горіння, що почалося у верхньому шарі, поступово поширюється вниз до колосникових грат візків. У шарі горіння розвивається температура 1300-1500 ° С, яка призводить

до утворення легкоплавких сполук (фаяліту, силікату і фериту кальцію та ін.). Рідка фаза, що містить ці сполуки, при затвердінні скріплює частинки шихти в твердий пористий матеріал - агломерат.

Для протікання процесу горіння кисень повітря ексгаустером просмоктують через шар шихти в спікальному візку зверху-вниз. Ексгаустер створює розрядження 10-14 кПа під робочою гілкою машини у вакуум – камерах, що забезпечує видалення в атмосферу через димову трубу 22 газоподібних продуктів згоряння, які проходячи через циклони – пиловловлювачі 20, очищаються від пилу та просипу шихти та агломеру.

На виході з агломашини агломерат у вигляді «пирога» піддається руйнуванню в одновалковій дробарці 13 і розсіву по фракціях на гуркоті 14. Дрібна фракція після охолодження в охолоджувачі 15 дрібниці агломерату (повернення) повертається в бункер 10 на повторно.

Велика фракція агломерату (більше 10 мм) має температуру у верхньому шарі 500-600 °С, а в нижній частині – 1200 °С. Тому агломерат піддається охолодженню в лінійних, кільцевих або чашеві охолоджувачах 17, розсіву на гуркоті холодного агломерату 18 і відправки його агловозах 19.

Процес охолодження є завершальним етапом виробництва агломерату перед його відправкою доменного цеху (рис.1.4). На охолоджувач надходить «пиріг» спеченого матеріалу із температурою 700–900°С.

Основні етапи та фізика процесу:

Агломерат після дроблення на одновалковій дробарці потрапляє на лотки або чаші охолоджувача. Охолодження відбувається примусовим способом – шляхом продування холодного повітря через шар матеріалу потужними вентиляторами (ексгаустерами). Двохруховий привід забезпечує безперервне переміщення полотна охолоджувача. Швидкість руху має бути суворо синхронізована з продуктивністю агломашини. На виході температура агломерату повинна становити не більше 100-150 ° С, щоб не пошкодити гумові стрічки магістральних конвеєрів.

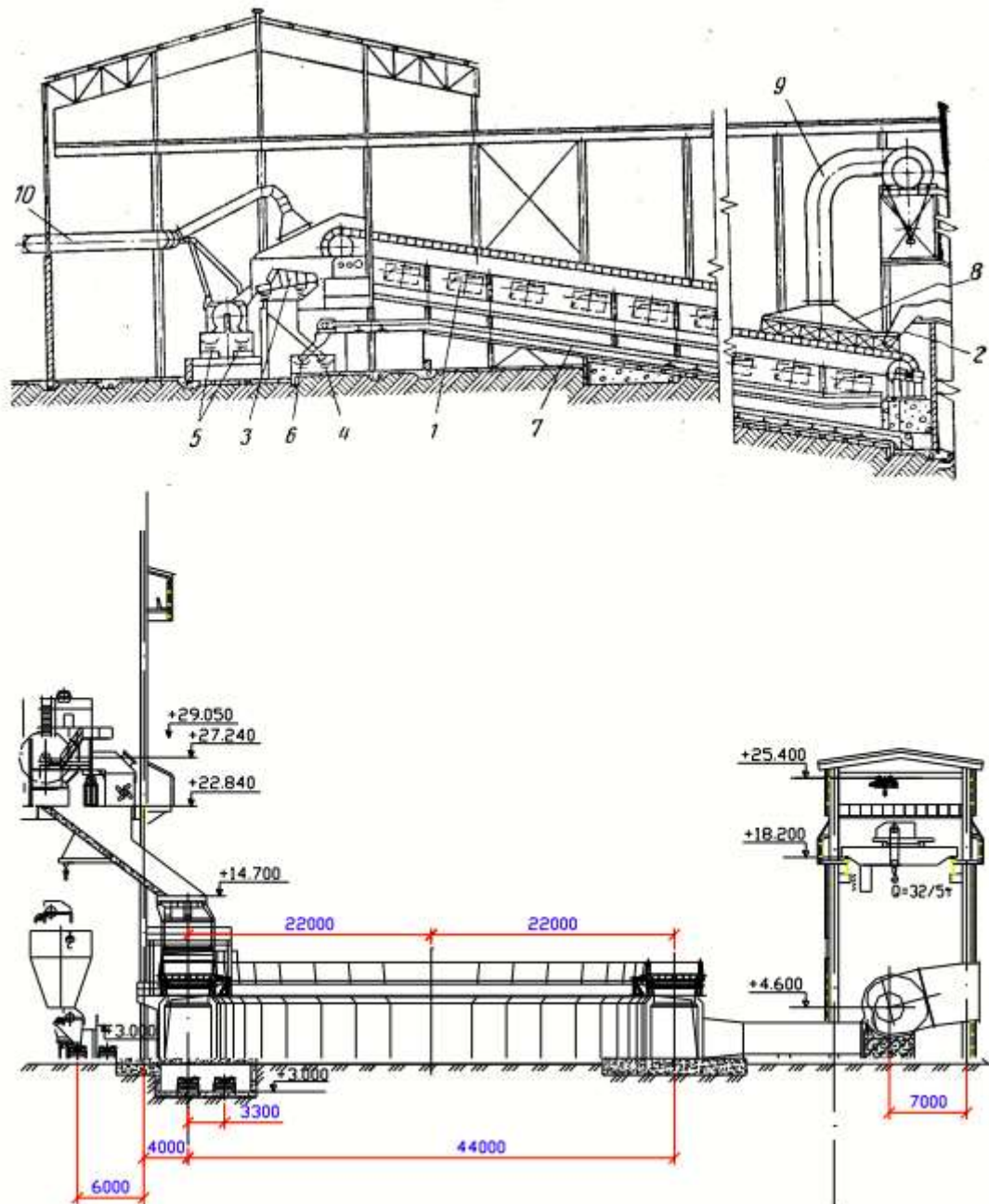


Рис. 1.4. Відділення охолодження агломерату

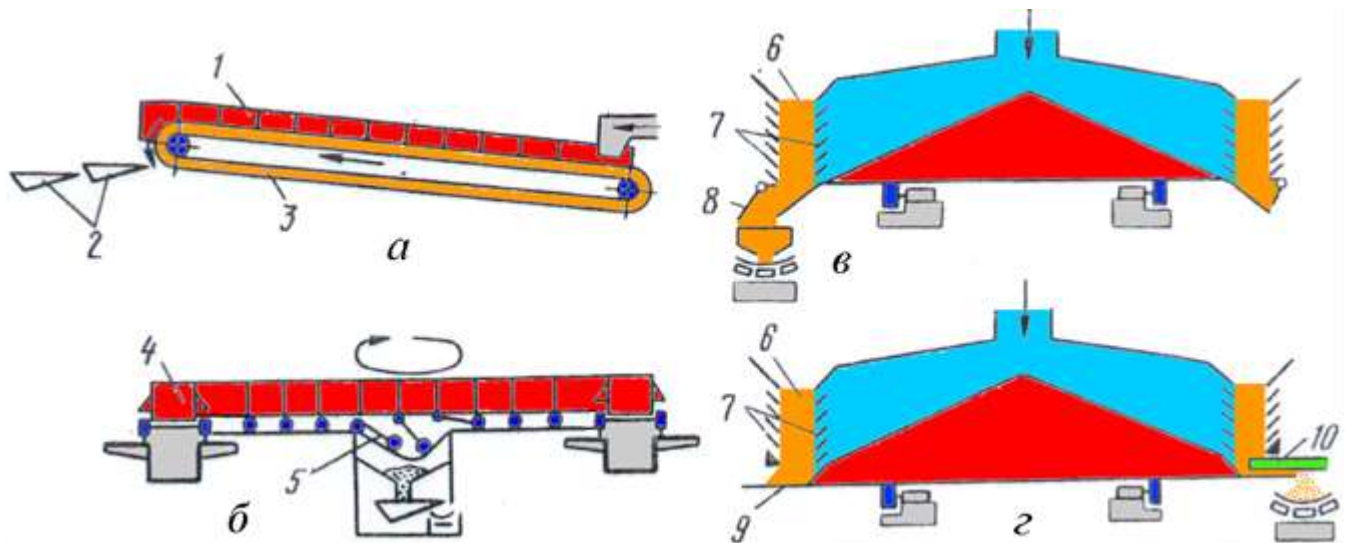
Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

1.2 Обладнання для охолодження агломерату

З агломераційних машин піріг агломерату сходить із середньою температурою 500 – 600 °С, значна його частина, що прилягає до колосників, має температуру 1200 °С. Висока температура агломерату створює додаткові труднощі при його обробці на аглофабриці, транспортуванні і завантаженні в

доменну піч. Тому на сучасних агломераційних фабриках агломерат після дроблення охолоджують до температури не вище 100 °С, що полегшує умови роботи обладнання та дозволяє транспортувати агломерат стрічковими транспортерами.

В агрегатах для охолодження рівномірно покладений гарячий агломерат охолоджується просмоктуванням або продуванням повітря. Прямолінійні, кільцеві і чашеві охолоджувачі, що застосовуються (рис. 1.5) відрізняються не так технологією охолодження, скільки конструкцією.



а-прямолінійний; б - кільцевий; в – чашовий секційний; г – чашовий кільцевий

Рис. 1.5. Охолоджувачі агломерату

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

Прямолінійний охолоджувач (рис. 1.5, а) являє собою пластинчастий конвеєр 1 з колосниковим полотном. Під розвантажувальним кінцем охолоджувача розташовані грохоти 2 для розсіву агломерату. Недоліком прямолінійних охолоджувачів є наявність холостої гілки 3 і у зв'язку з цим низьке використання площі колосникового полотна для охолодження (менше 50 %).

Кільцевий охолоджувач (рис. 1.5, б) має обертовий в горизонтальній площині кільцевий жолоб 4 з колошниковим днищем 5, що складається з окремих секцій. Розвантаження охолодженого агломерату здійснюється

поворотом секцій днища. В охолоджувачах цього типу площа колосникового полотна майже повністю використовується для охолодження агломерату. Недоліком охолоджувачів є значні розміри діаметра кільцевого жолоба, що ускладнює компонування фабрик, що складаються з окремих розташованих поруч аглолент.

Чашові охолоджувачі мають кільцевий бункер, що обертається 6. Охолоджувальне повітря просмоктується або продувається в радіальному напрямку через жалюзійні стінки 7 бункера. Чашові охолоджувачі при однаковій продуктивності мають менший розмір за діаметром, ніж кільцеві.

За конструкцією бункера чашеві охолоджувачі поділяються на два типи: із секційним бункером (рис. 1.5, в) та кільцевим (рис. 1.5, г).

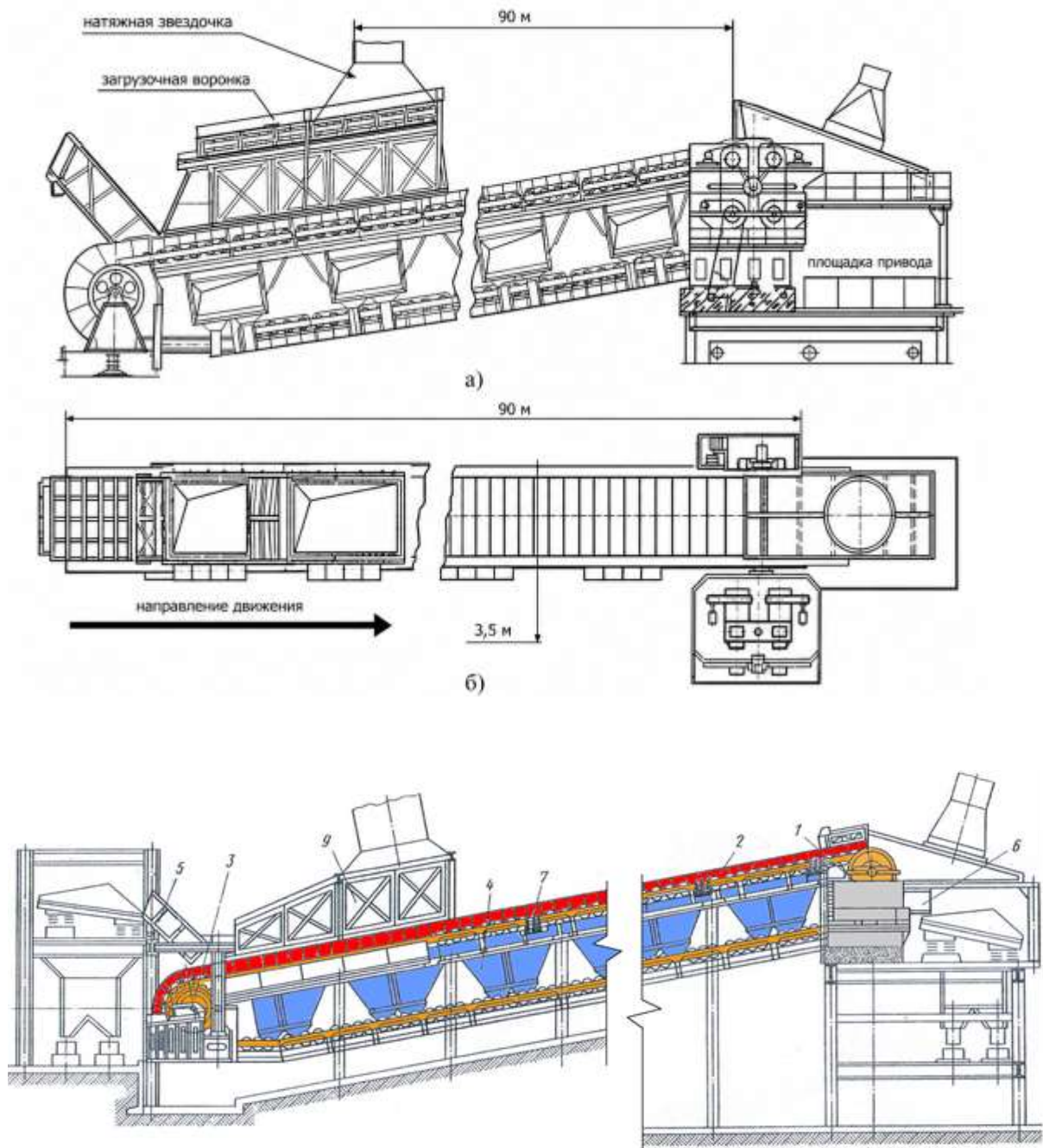
Секційний бункер розділений вертикальними перегородками на кілька секцій. При обертанні охолоджувача секції бункера послідовно повністю заповнюються гарячим агломератом і після повороту охолоджувача повністю розвантажується через відкидні днища 8. В охолоджувачі з кільцевим чашним бункером радіальних перегородок немає. Агломерат під кутом природного укосу висипається на таріль, що обертається 9, з якої скидається розвантажувальним ножом 10. Завантаження і розвантаження агломерату на охолоджувачах цього типу здійснюється безперервно. На охолоджувачах прямолінійного типу процес завантаження, охолодження та розвантаження агломерату безперервний. Охолодження здійснюється шляхом продування або просмоктування повітря через шар агломерату, що лежить на полотні охолоджувача.

1.3 Принцип дії та конструкція охолоджувача агломерату

Основна середня температура спеклого агломерату становить 500-600°C, а в нижній частині 1200 °C. Використання горячого агломерату у доменній плавці не активізує процес відновлення, водночас воно негативне впливає на стійкість електричного обладнання системи подачі шихти до доменних печей та посилює умови роботи в доменному цеху. Тому агломерат потрібно охолоджувати. Щоб

досягти бажаного результату, в агломераційному цеху використовують охолоджувач агломерату ОП-315. Вид охолоджувача представлений рис. 1.6 (а, б). Його робота базується на принципі примусового продуву повітря крізь шар гарячого матеріалу. Охолоджувач агломерату ОП-315 (рис. 1.6) складається з нескінченного колосникового полотна 2, на верхню гілку якого укладається охолоджуваний агломерат, приводних 1 і 3 натяжних зірочок, завантажувальної воронки 5 гарячого агломерату і приймального пристрою 6 охолодженого агломерата. Робоче полотно охолоджувача складається з окремих, виконаних у вигляді колосникових зварних ґрат з бортами і закріплених на ланках двох пластинчастих ланцюгів. Рами та борти з'єднані болтами. У нижній частині бортів встановлені поздовжні ущільнення контакту рухомого полотна з нерухомими камерами для дуття. Кожен ланцюг, на якому закріплені рами полотна, мають зовнішні та внутрішні пластини, з'єднані між собою осями.

Виступаючі кінці осей захищені втулками і служать для зачеплення із зубами приводних та натяжних зірочок. Між зовнішніми та внутрішніми пластинами ланцюгів встановлені на підшипниках кочення опорні ролики 17 полотна. На завантажувальному кінці охолоджувача встановлені ведені натяжні зірочки 3 ланцюгів полотна. Для подачі охолоджуючого повітря під колосникове полотно всієї робочої довжини охолоджувача встановлено дванадцять дутьових камер 4 (див. 1.6). Гарячий агломерат від агломашины надходить у завантажувальну воронку 5 і рівномірно видається на полотно, що рухається охолоджувача. Охолоджений агломерат розвантажується в бункер приймальний 6 і направляється на грохот. Привід полотна охолоджувача (рис. 1.7), що знаходиться в розвантажувальній частині, складається з двох окремих приводів (лівого та правого), з'єднаних з корінним валом провідних зірочок. Кожен привід - навісного типу, який включає тихохідний редуктор, встановлений на вихідний кінці корінного валу, і два швидкохідні редуктори з електродвигунами потужністю 22,0 кВт.



1 – привідна зірочка; 2 – пластинчасте полотно (палети); 3 натяжна зірочка;
 4 - дванадцять дутьових камер; 5 - завантажувальна воронка гарячого агломерату; 6 - приймальний пристрій охолодженого агломерату; 7 – опорні ролики; 9 - витяжний зонт (кожух)

Рис. 1.6. Прямолінійний охолоджувач агломерату ОП-315

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]



Рис. 1.7. Привід лінійного охолоджувача агломерату

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

Детальний опис об'єкта:

1 - Приводна зірочка (ведуче колесо): здійснює передачу крутного моменту від двохдвигунового електропривода до робочого полотна охолоджувача. Саме тут відбувається основне навантаження, яке вимагає узгодження роботи двигунів.

2 - Пластинчасте полотно (палети): основний тяговий та несучий орган, на якому розташовується шар гарячого агломерату. Палети мають колосникові решітки для проходження охолоджувального повітря.

3 - Натяжний пристрій (ведена зірочка): розташований у хвостовій частині машини; забезпечує необхідний натяг ланцюгів полотна та компенсує їх термічне розширення.

4 - Дуттьові камери (холодильні короби): розташовані під робочою гілкою охолоджувача; через них вентилятори подають холодне повітря під тиском.

5 - Завантажувальний пристрій (лоток): подає гарячий подрібнений агломерат після дробарки на палети охолоджувача.

6 - Розвантажувальний вузол: місце скидання охолодженого агломерату на подальші конвеєри або грохоти.

7 - Напрямні колії (рейки): по них переміщуються ролики палет, що забезпечує стабільну траєкторію руху полотна.

9 - Витяжний зонт (кожух): встановлюється над початковою ділянкою охолоджувача для збору та відведення запиленого гарячого повітря на очистку.

Технологічні особливості охолоджувача як об'єкта управління:

Висока інерційність: Маса матеріалу, що охолоджується, досягає сотень тонн, що вимагає величезних пускових моментів.

Змінне навантаження: Вага агломерату на полотні змінюється залежно від режиму роботи печі, вологості шихти та фракційного складу.

Тяжкі умови старту: Пуск «під завалом» (коли охолоджувач повний матеріалу після аварійної зупинки) є критичним режимом для двигунів.

Обґрунтування необхідності автоматизації електроприводу

Перехід від простого нерегульованого приводу до автоматизованого частотно-регульованого (ЧРП) продиктований такими факторами:

Технологічна гнучкість та точність

Без автоматизації неможливо оперативно змінювати швидкість охолодження. Якщо агломашина сповільнюється, охолоджувач на постійній швидкості працюватиме «вхолосту», перевитративши електроенергію. Автоматизація дозволяє реалізувати принцип підлеглого регулювання, де швидкість приводу підлаштовується під датчики ваги чи температури агломерату.

Вирішення проблеми дворухового виконання

Привід охолоджувача складається із двох двигунів, що працюють на загальний вал. Без системи автоматичного узгодження виникає ефект «перетягування» навантаження: один двигун може працювати з перевантаженням (до згоряння обмоток). Другий двигун може переходити в генераторний режим, працюючи «гальмом». Автоматизація (Master-Slave конфігурація) забезпечує ідеальне вирівнювання струмів та моментів між ними.

Зниження зносу механічного обладнання

Прямий пуск від мережі викликає величезні ударні навантаження на редуктори, муфти та зубчасті зачеплення полотна. Автоматизований привід забезпечує: плавний розгін та гальмування (S-подібні рампі). Виняток ривків, що збільшує термін служби дорогих механічних вузлів у 2-3 рази.

Енергоефективність та захист

Впровадження частотних перетворювачів дозволяє заощаджувати до 20–30 % електроенергії за рахунок виключення пускових струмів (які у 7 разів перевищують номінал) та оптимізації роботи на знижених частотах у періоди зниження продуктивності.

Таким чином, автоматизація електроприводу охолоджувача агломерату є не просто покращенням, а технічною необхідністю. Реалізація дворухової системи на базі перетворювачів частоти із загальною системою управління дозволяє забезпечити синхронізацію моментів, захистити механічну частину від ударів та гарантувати необхідний температурний режим агломерату за мінімальних енерговитрат.

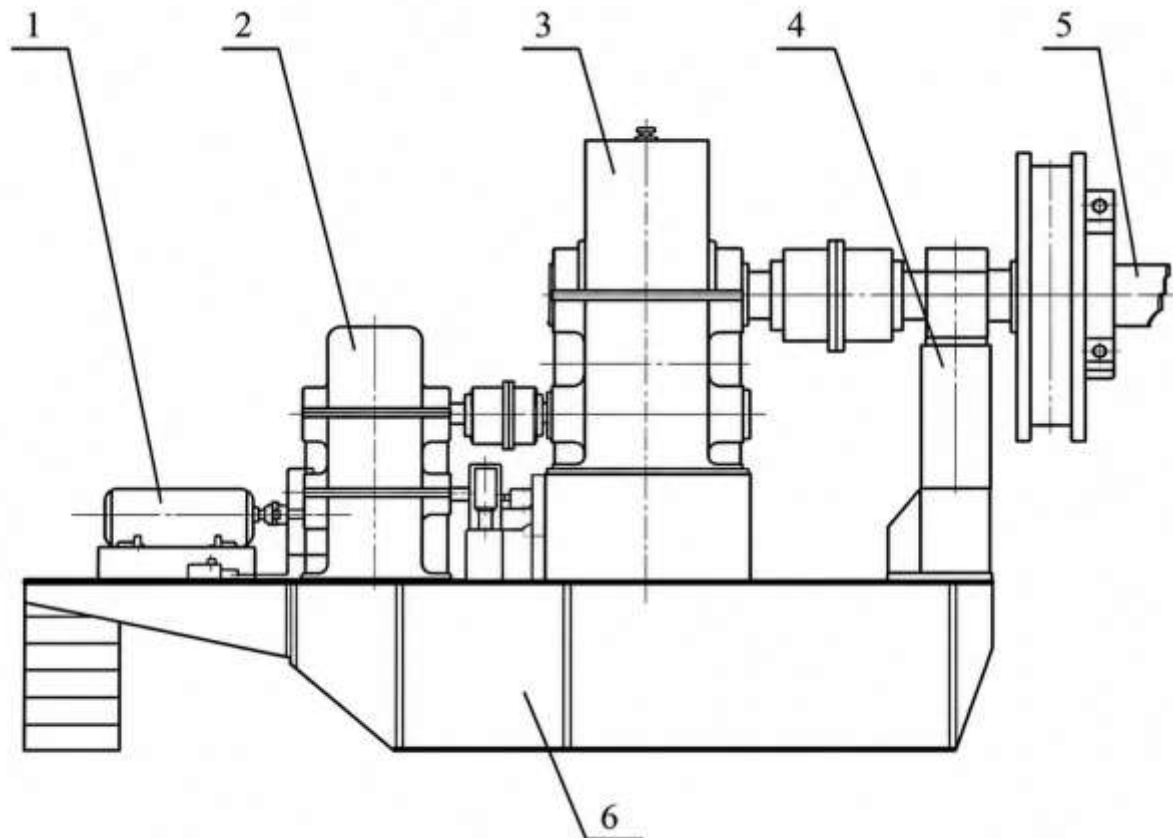
Технічні дані охолоджувача агломерату ОПЗ-315 зведені в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1

Технічні дані охолоджувача агломерату ОПЗ-315

Найменування	Одиниця виміру	Значення
Потужність	т/год	740
Активна робоча площа	м ²	315
Довжина	м	90
Ширину	м	3,5
Швидкість руху полотна	м/хв	1-3
Висота шару агломерату	мм	600-700
Підпір у дутьових камерах	мм в/ст	220
Кут нахилу охолоджувача	градус	16
Коефіцієнт опору		0,05
Швидкість ведених зірочок	с ⁻¹	0,15
Потужність електродвигунів	кВт	2·55

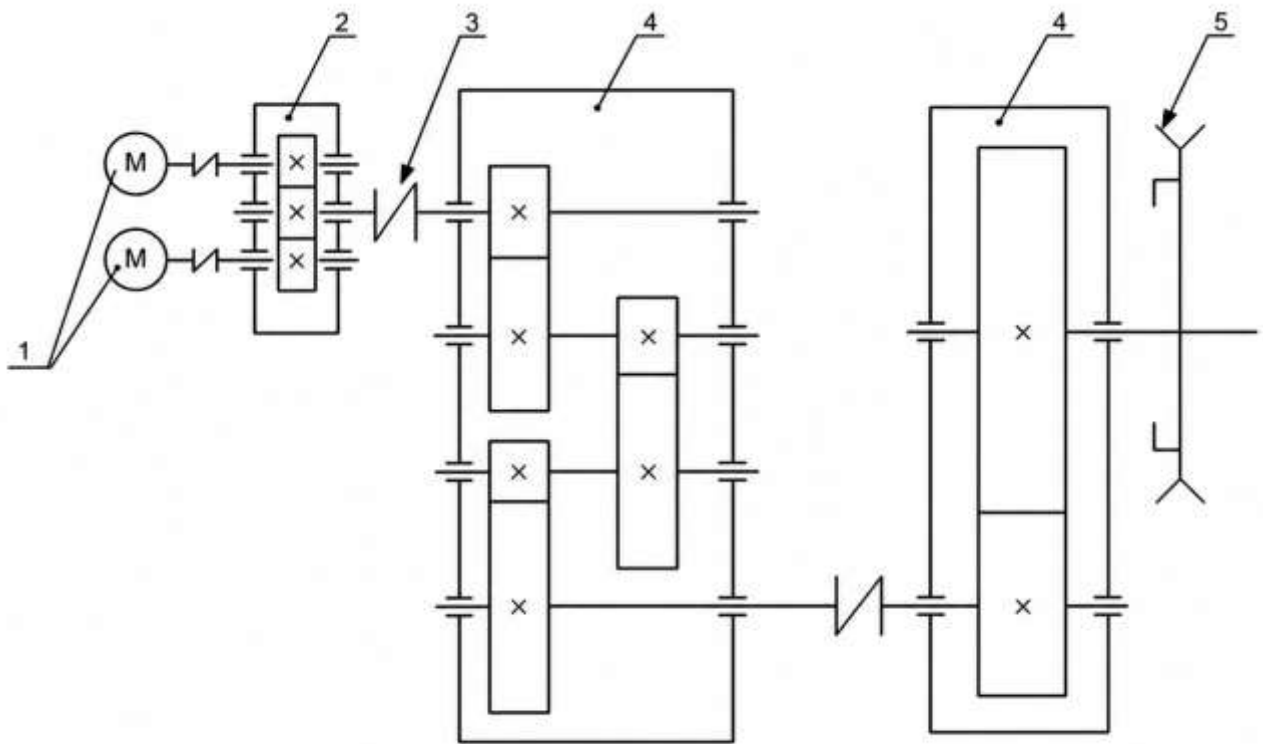
Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]



1- електричний двигун, 2 - спеціальний редуктор, 3 -редуктор циліндричний одноступінчастий, 4 - стійка опорного підшипника, 5 - корінний вал у зборі із зірочками та траверсами, 6 -основу майданчика приводу

Рис. 1.8. Привід лінійного охолоджувача агломерату

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]



1 – електродвигуни; 2 – редуктори; 3 - муфта (з'єднувальний вузол); 4 - багатоступенева коробка передач / трансмісія; 5 - виконавчий механізм (робочий орган)

Рис. 1.9. Кінематична схема приводу охолоджувача

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Вибір електрообладнання та розрахунок параметрів силового ланцюга електроприводу

Вибір і обґрунтування потужності електроприводу

Вибір силового електрообладнання, а також розрахунок параметрів і характеристик його елементів проводяться на підставі вимог технічного завдання з урахуванням специфіки технологічного процесу, умов експлуатації та параметрів мережі живлення ($U_c=380$ В, $f_c=50$ Гц). Електропривод охолоджувача повинен функціонувати в тривалому режимі роботи (S1) з тривалістю включення ПВ = 100 %.

Обґрунтований вибір потужності електродвигуна має визначальне значення, так як він забезпечує:

- мінімізацію питомих витрат і втрат електроенергії при експлуатації;
- високу продуктивність агрегату;
- систематичному перегріву двигуна, передчасному старінню ізоляції обмоток і виходу обладнання з ладу, що тягне за собою збільшення експлуатаційних витрат на ремонт;
- повинна суворо відповідати розрахунковому навантаженню на валу та заданому режиму роботи.

Розрахунок потужності приводу охолоджувача виконується за методикою, прийнятою в технічній документації профільних проектних відділів та спеціалізованій літературі. У разі виходу з ладу одного з агрегатів другий зберігає працездатність приводу в резервному режимі, що дозволяє уникнути аварійної зупинки процесу. У штатному режимі роботи на загальний редуктор навантаження розподіляється між обома двигунами, що забезпечує їх помірний тепловий режим і підвищує загальний ресурс системи. Сумарна потужність двох двигунів для охолоджувача визначається за формулою:

$$P_{\Sigma} = \frac{K \cdot Q \cdot q}{1000 \cdot \eta} \cdot (c \cdot L + H) = \frac{1.3 \cdot 740 \cdot 9.81}{1000 \cdot 0.86} \cdot (0.15 \cdot 90 + 24.8) = 109.132 \text{ кВт} \quad (2.1)$$

де К - 1,3 - коефіцієнт, що враховує збільшення потужності в динамічний режим.

Q – продуктивність (кг/с);

q – прискорення вільного падіння ($q=9,81 \text{ м/с}^2$);

c – дослідний коефіцієнт;

L - Довжина конвеєра (м);

H - висота підйому вантажу, що транспортується (м);

η – коефіцієнт корисної дії двигуна ($\eta = 0,92$)

Визначимо висоту підйому вантажу, що транспортується:

$$H = L \cdot \sin \alpha, \quad (2.2)$$

де α – кут нахилу охолоджувача, $\alpha = 16^\circ$ (за даними табл. 2.1)

$$H = 90 \cdot \sin 16^\circ = 24,8 \text{ м.}$$

Потужність одного двигуна:

$$P = \frac{P_{\Sigma}}{2} = \frac{109.132}{2} = 54.556 \text{ кВт} \quad (2.3)$$

Обираємо двигун серії 2AГУ280М10 (рис.2.1). Оскільки електродвигун працює в тривалому режимі, його перевірка не потрібна.



Рис. 2.1. Асинхронний електродвигун серії 2AIY280M10

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

Дані електродвигуна 2AIY280M10:

$P_H = 55$ кВт. - Номінальна потужність;

$U_H = 380$ В. – номінальна напруга;

$n_H = 600$ об/хв. – номінальна швидкість обертання;

$I_{д.н} = 125$ А - номінальний струм електродвигуна;

$J_{дв} = 5$ кг/м² – момент інерції електродвигуна.

$R_1 = 0,093$ Ом - Активний опір обмотки статора;

$R'_2 = 0,036$ Ом - Активний опір обмотки ротора, наведений до обмотування статора асинхронного двигуна;

$\eta = 0,92$ - ККД двигуна.

$p = 5$ – кількість пар полюсів.

2.2 Розрахункові параметри двигуна

Синхронна кутова частота обертання двигуна:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_{1н}}{z_p} = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3.14 \cdot 600}{30} = 62.832, \text{ рад/с.} \quad (2.4)$$

Розрахуємо частоту та кутову швидкість обертання двигуна:

$$n_{\text{дв.н}} = (1 - s_{\text{н}}) \cdot n_0 = (1 - 0.017) \cdot 600 = 589.8 \text{ об/мин}, \quad \omega_{\text{дв.н}} = (1 - s_{\text{н}}) \cdot \omega_0 = 61.764 \text{ рад/с}.$$
(2.5)

Розрахуємо момент двигуна:

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{дв.н}}} = \frac{55 \cdot 10^3}{61.764} = 875.352 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$
(2.6)

Розрахуємо максимальний струм двигуна при прямому пуску:

$$I_{\text{л макс}} = k_{\text{л дв}} \cdot I_{\text{лн}} = 5 \cdot 124.082 = 620.409 \text{ А}.$$
(2.7)

Розрахуємо критичний момент двигуна на природній характеристиці:

$$M_{\text{к}} = m_{\text{к}} \cdot M_{\text{дв.н}} = 2.2 \cdot 875 = 1926 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$
(2.8)

Розрахуємо пусковий момент двигуна при прямому пуску:

$$M_{\text{дв.пуск}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{дв.н}} = 1.5 \cdot 875 = 1313 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$
(2.9)

2.3 Визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна за каталожними даними

Для математичного опису електромеханічних та механічних характеристик асинхронного двигуна (АТ) необхідно використовувати його еквівалентну схему заміщення. В інженерній практиці для розрахунку систем електроприводу найбільш зручною та поширеною є Т-подібна схема заміщення, представлена на рис. 2.2. Дана модель дозволяє з достатньою мірою точності визначити внутрішні параметри електричної машини на підставі стандартних довідкових даних. Використання Т-подібної схеми забезпечує наочність фізичних процесів в обмотках статора та ротора, а також полегшує алгоритм

розрахунку характеристик, необхідних для подальшого аналізу динамічних режимів роботи охолоджувача агломерату.

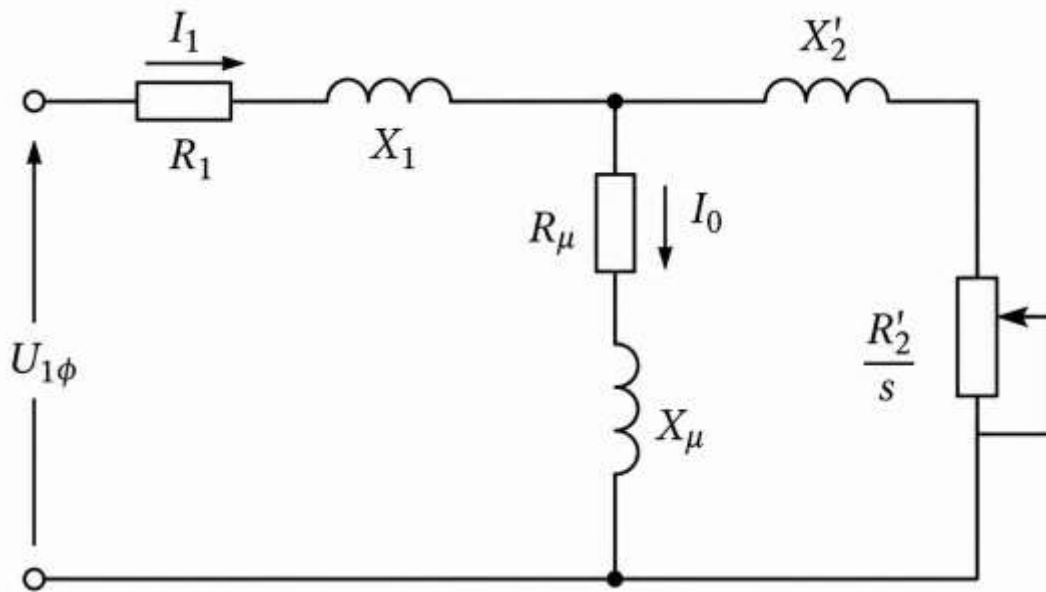


Рис. 2.2. Схема заміщення асинхронного двигуна

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

Основні рівняння асинхронного двигуна, що відповідають прийнятій схемі заміщення:

$$\overline{U_{1\phi}} - \overline{E_1} - j \cdot X_1 \cdot \overline{I_1} = 0; \quad \overline{E_1} + j \cdot X'_2 \cdot \overline{I'_2} + \overline{R'_2} \cdot \frac{\overline{I'_2}}{s} = 0; \quad \overline{I_1} + \overline{I'_2} - \overline{I_0} = 0. \quad (2.10)$$

Використовуючи паспортні характеристики асинхронного електродвигуна марки 2AIY280M10, здійснимо розрахунок елементів його Т-подібної схеми заміщення. Обчислення базуватимуться на низці полегшених умов: по-перше, сума механічних і магнітних втрат приймається рівною 2% від номінальної потужності ($0,02 P_n$); по-друге, значення активних опорів обмоток статора і ротора вважаються постійними (не залежить від поточного режиму роботи), отже, явище витіснення струму до уваги не береться.

Розрахуємо значення струму холостого ходу електродвигуна:

$$I_0 = \sqrt{\frac{(I_{11})^2 - \left[\frac{p^* \cdot (1 - s_n)}{(1 - p^* \cdot s_n)} \right]^2}{1 - \left[\frac{p^* \cdot (1 - s_n)}{(1 - p^* \cdot s_n)} \right]^2}} = 49.101, \text{ A}, \quad (2.11)$$

$$I_{11} = \frac{p^* \cdot P_{\text{двн}}}{3 \cdot U_{\text{фн}} \cdot (\cos \phi_{p^*} \cdot \eta_{p^*})} = \frac{0.915 \cdot 55000}{3 \cdot 220 \cdot (0.72 \cdot 0.92)} = 115.112 \text{ A} \quad (2.12)$$

- струм фази статора при частковому завантаженні;

p^* – ступінь завантаження;

η_{p^*} , $\cos \phi_{p^*}$ – ККД та коефіцієнт потужності в режимі часткового завантаження.

Проведемо розрахунок приведенного до обмотки статора активного опору обмотки ротора у номінальному режимі:

$$R_2' = \frac{3 \cdot U_{\text{фн}}^2 \cdot (1 - s_n)}{2 \cdot m_k \cdot P_{\text{двн}} \cdot C_1^2 \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_k} \right)} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0.017)}{2 \cdot 3 \cdot 55000 \cdot 1.04^2 \cdot \left(2.5 + \frac{1}{0.079} \right)} = 0.036, \text{ Ом}, \quad (2.13)$$

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_t \cdot I_{\text{фн}}} = 1 + \frac{49.101}{2 \cdot 5 \cdot 124.082} = 1.04 \quad (2.14)$$

-коефіцієнт, що характеризує співвідношення:

$$\frac{X_\mu + X_{1\sigma}}{X_\mu}; \quad (2.15)$$

- критичне ковзання;

$$s_k = s_n \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - [1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (m_k - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} =$$

$$0.017 \cdot \frac{2.2 + \sqrt{2.2^2 - [1 - 2 \cdot 0.017 \cdot 2.5 \cdot (2.2 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0.017 \cdot 2.5 \cdot (2.2 - 1)} = 0.079 \quad (2.16)$$

Для оцінки співвідношення активних опорів ротора і статора застосовується параметр β , що варіюється в діапазоні 5,2 ... 6,0. На практиці його рекомендують задавати, спираючись на пропорцію R_1/R'_2 із каталогів для моторів серії 4А з ідентичною потужністю та синхронною швидкістю (n_s). При цьому діє базове правило: якщо у двигуна низьке номінальне ковзання β , вибирається менше або дорівнює одиниці, а при високому ковзанні - більше або дорівнює одиниці.

Активний опір статорної обмотки R_1 приводиться до теплового режиму роботи машини, що встановився. Для коректності розрахунків враховується температурний коефіцієнт, що залежить від матеріалу провідника та класу нагрівальності використаної ізоляції. Розрахуємо R_1 :

$$R_1 = R'_2 \cdot \beta \cdot C_1 = 0.036 \cdot 2.5 \cdot 1.04 = 0.094, \text{ Ом.} \quad (2.17)$$

Параметр $X_{\text{кн}}$ обчислюється з метою оцінки електромагнітних процесів як пуску. Індуктивний опір короткого замикання обмежує величину пускового струму та визначає нахил механічної характеристики двигуна на її робочій ділянці. Розрахунок виконується виходячи з умови, що активні опори значно менші за реактивні в режимі загальмованого ротора.

Розрахуємо індуктивний опір короткого замикання у номінальному режимі:

$$X_{\text{кн}} = R'_2 \cdot \gamma \cdot C_1 = 0.036 \cdot 12.37 \cdot 1.04 = 0.464, \text{ Ом,} \quad (2.18)$$

де γ - коефіцієнт, що характеризує співвідношення індуктивного опору короткого замикання та наведеного активного опору ротора. Проведемо його розрахунок:

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_{\text{к}}}\right)^2 - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0.079}\right)^2 - 2.5^2} = 12.371 \quad (2.19)$$

Розрахуємо індуктивний опір розсіювання обмотки статора у номінальному режимі:

$$X_{1\sigma} = 0.42 \cdot X_{\text{кн}} = 0.42 \cdot 0.464 = 0.195, \text{ Ом.} \quad (2.20)$$

Розрахуємо індуктивність обмотки статора, яка обумовлена потоком розсіювання, в номінальному режимі:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{0.195}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.0006205, \text{ Гн}. \quad (2.21)$$

Розрахуємо приведеній до обмотки статора індуктивний опір розсіювання обмотки ротора в номінальному режимі:

$$X'_{2\sigma} = 0.58 \cdot \frac{X_{кн}}{C_1} = 0.58 \cdot \frac{0.464}{1.04} = 0.259, \text{ Ом}. \quad (2.22)$$

Розрахуємо індуктивність обмотки ротора, обумовлена потоком розсіювання, в номінальному режимі:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{0.259}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.0008243, \text{ Гн}. \quad (2.23)$$

Розрахуємо індуктивний опір контуру намагнічування (головний індуктивний опір):

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{195.212}{49.101} = 3.976, \text{ Ом}, \quad (2.24)$$

де

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1фн} \cdot \cos \phi_n - I_{1фн} \cdot R_1)^2 + (U_{1фн} \cdot \sin \phi_n - I_{1фн} \cdot X_{1\sigma})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0.73 - 124.082 \cdot 0.094)^2 + (220 \cdot 0.73 - 124.082 \cdot 0.195)^2} = 195.212, \text{ В} \end{aligned} \quad (2.25)$$

- ЕРС гілки намагнічування, наведена потоком повітряного зазору (Головним полем), в номінальному режимі, В.

Розрахуємо результуючу індуктивність, що обумовлена магнітним потоком в повітряному зазорі:

$$L_m = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{3.976}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.013, \text{ Гн}. \quad (2.26)$$

Оцінка достовірності знайдених показників асинхронної машини проводиться шляхом зіставлення розрахункового електромагнітного моменту з його номінальним значенням. Для цього в розрахункову формулу моменту підставляються певні опори і параметри схеми заміщення за умови роботи двигуна з номінальним ковзанням s_n :

$$M_{эм.н}^* = \frac{3 \cdot U_{1фн}^2 \cdot R_2}{\omega_0 \cdot s_n \cdot \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2}{s_n} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s_n \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} =$$

$$\frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0.036}{62.832 \cdot 0.017 \cdot \left[0.464^2 + \left(0.094 + \frac{0.036}{0.017} \right)^2 + \left(\frac{0.094 \cdot 0.036}{0.017 \cdot 3.9} \right)^2 \right]} = 955.908, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.27)$$

$$M_{эм.н}^{**} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{(L_m + L_{2\sigma})} \cdot \Psi_{2н} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1н}^2 - I_0^2} =$$

$$\frac{3}{2} \cdot 5 \cdot \frac{0.013}{(0.013 + 0.0008243)} \cdot 0.842 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{124.082^2 - 49.101^2} = 997.173, \text{ Н} \cdot \text{м}$$

де

$$\Psi_{2н} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 49.101 \cdot 0.013 = 0.879, \text{ Вб.} \quad (2.28)$$

Повинні виконуватись умови:

$$M_{дв.н} < M_{ем.н}^* \leq 1,1 \cdot M_{дв.н} \quad M_{ем.н}^{**} \approx M_{ем.н}^* \quad (2.29)$$

Визначаємо, що умови виконуються.

2.4 Функціональна схема асинхронного електроприводу з скалярним керуванням

Функціональну схему реалізації асинхронного частотно-регульованого електроприводу зі скалярним керуванням без датчика швидкості наведено на рис. 2.3. Основними функціональними елементами регульованого асинхронного електроприводу з частотним скалярним керуванням є:

- перетворювач частоти;
- блок управління перетворювачем, що включає формувач 3-фазної системи керуючих напруг u_{1a} , u_{1b} , і u_{1c} , формувач 6 канального ШІМ-сигналу та блок драйверів;
- формувач $-\frac{U}{f}$ характеристики;
- задатчик інтенсивності швидкості з лінійною характеристикою;
- датчики в загальному випадку лінійного струму двигуна;
- блок розрахунку фактичного значення чинного фазного струму двигуна;
- блок ІR-компенсації;
- блок компенсації ковзання;

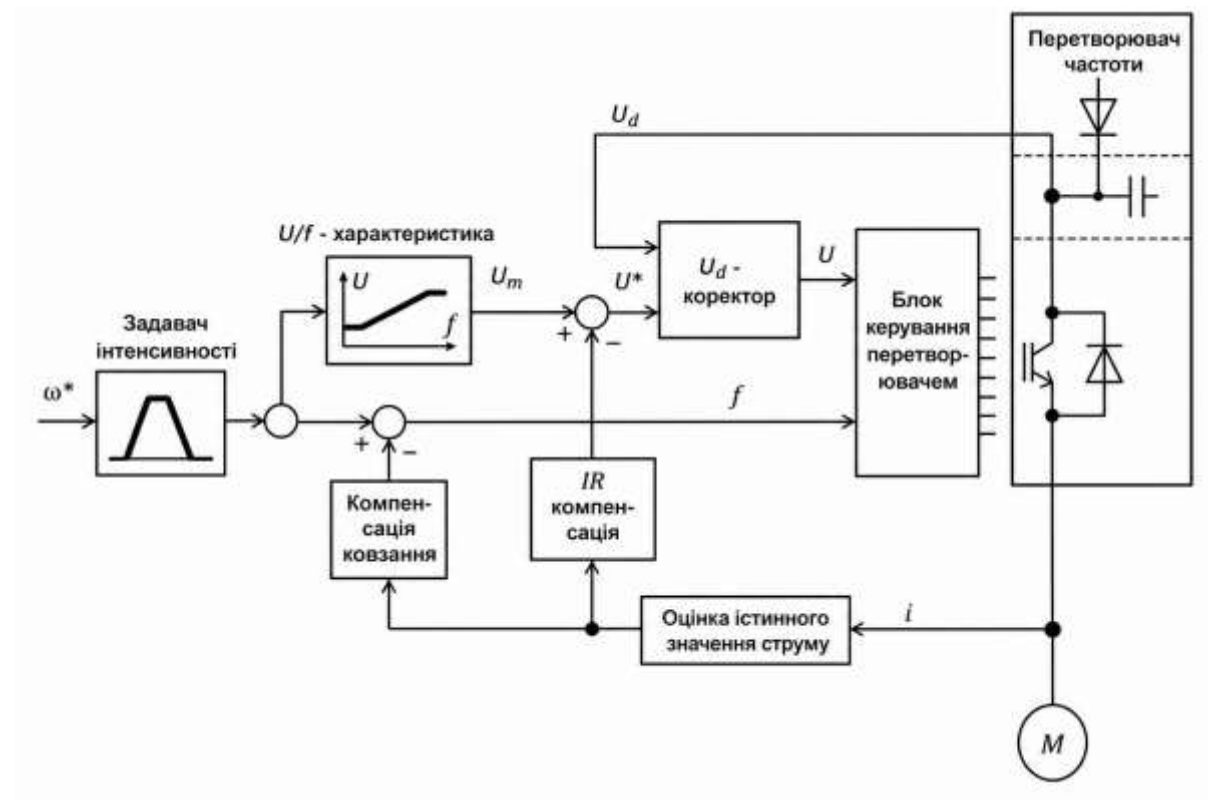


Рис. 2.3. Функціональна схема асинхронного електроприводу зі скалярним частотним керуванням без датчика швидкості

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

2.5 Специфіка підбору частотно-регульованого електроприводу для охолоджувача агломерату

Процес вибору системи частотного регулювання для охолоджувача агломерату обумовлений низкою технічних нюансів, специфічних для даного обладнання. Розглянемо ключові фактори, що визначають конфігурацію електроприводу в даних умовах.

Режими керування та діапазон регулювання

Для механізмів охолоджувача агломерату характерна відносно невелика глибина зміни швидкості. Це дозволяє використовувати найпростіший і наймасовіший метод управління - скалярний (вольт-частотний), за якого підтримується умова: $\frac{U_1}{f_1} = const$. Сучасні перетворювачі частоти, що працюють у даному режимі, забезпечують діапазон регулювання до 1:40, що повністю перекриває технологічні потреби охолоджувача. Теоретично, фіксація співвідношення напруги до частоти дозволяє зберігати стабільність поточосцеплення і величину критичного моменту двигуна у всьому робочому інтервалі частот.

Для нівелювання цього ефекту в сучасних перетворювачах застосовуються наступні програмні інструменти:

Функція форсування початкової напруги (буст);

Модулі IR-компенсації та Ud-корекції.

Необхідно враховувати, що через природну м'якість механічних характеристик асинхронних машин, використання розімкнених систем (без зворотного зв'язку за швидкістю) накладає свої обмеження. У таких схемах стійкий та якісний діапазон регулювання зазвичай не перевищує співвідношення 1:10, що слід брати до уваги при проектуванні системи автоматизації.

Вибір та технічна характеристика перетворювача частоти

Як регулюючий пристрій для приводу охолоджувача агломерату прийнято перетворювач частоти серії ACS550 виробництва компанії ABB. Ця серія обрана з її функціональних можливостей з інтеграції в комплексні автоматизовані

системи управління технологічними процесами (АСУ ТП). Структура умовного позначення вибраної моделі ACS550-01-125A-4 наведена нижче:

ACS550 – ідентифікатор серії виробу;

01 - конструктивне виконання (призначений для настінного монтажу);

125A - значення номінального вихідного струму (125 А), що відповідає розрахунковим навантаженням приводу;

4 - клас вхідної напруги (трифазна мережа змінного струму в діапазоні 380-480 В).

Технічні параметри ПЛ

Нижче наведено ключові паспортні дані, необхідні для подальших електротехнічних розрахунків та перевірки сумісності з вибраним асинхронним двигуном.

Таблиця 2.1

Паспортні дані

Параметр	Значение
Номінальна потужність (P _n)	55–75 кВт (в зависимости от типа нагрузки)
Номінальний струм (I _n)	125 А
Максимальний струм (короткий час)	1.1 × I _n (нормальный режим) / 1.5 × I _{2hd} (тяжелый режим)
Напруга мережі	380...480 В (±10%)
Частота мережі	48...63 Гц
Діапазон вихідної частоти	0...500 Гц
ККД при номінальному навантаженні	> 98%
Ступінь захисту корпусу	IP21 (стандарт) / IP54 (опционально)

Нормальний режим

Важкий режим

P _н , кВт	P _н , л.с.	I _н , А	P _{тяж} , кВт	P _{тяж} , л.с.	I _{тяж} , А
55	100	125	45	75	96

P_н, кВт – номінальна потужність двигуна при 400 В, нормальний режим,

P_н, л.с. – номінальна потужність двигуна при 460 В, нормальний режим,

I_н, А – номінальний струм двигуна, нормальний режим,

P_{тяж}, кВт – номінальна потужність двигуна при 400 В, важкий режим,

P_{тяж}, л.с. - Номінальна потужність двигуна при 460 В, важкий режим,

$I_{\text{тяж}}$, A – номінальний струм двигуна, важкий режим.

Специфіка навантажувальних режимів перетворювача

Експлуатаційні параметри ПЧ ABB ACS550 визначаються характером технологічного навантаження та умовами роботи виконавчого механізму.

Виробником передбачено два основні алгоритми використання потужності:

Нормальний режим (Normal Duty): орієнтований на механізми з квадратичним або пологим моментом опору, де не потрібні значні пускові зусилля або часті навантаження. До цієї категорії відноситься більшість відцентрових насосів, вентиляційних установок та стрічкових конвеєрів зі стабільним потоком матеріалу.

Тяжкий режим (Heavy-Duty): застосовується для обладнання з високими вимогами до перевантажувальної здатності. Цей режим необхідний для систем з великою інерційністю, високим моментом торкання або циклічними навантаженнями, що перевищують номінальні значення.

Порівняльні характеристики перевантажень

Вибір конкретного режиму впливає на допустимий вихідний струм. У таблиці нижче наведено порівняння перевантажувальних можливостей для вибраної серії (табл.2.2):

Таблиця 2.2

Характеристика	Нормальный режим (PN,IN)	Тяжелый режим (Phd,Ihd)
Типове застосування	Насосы, вентиляторы, легкие конвейеры	Мешалки, дробилки, тяжелые охладители
Допустиме навантаження	110% от IN в течение 1 мин каждые 10 мин	150% от Ihd в течение 1 мин каждые 10 мин
Пусковий момент	Стандартный	Повышенный (до 180% при пуске)

Враховуючи специфіку охолоджувача агломерату як важкого промислового агрегату, що характеризується значною масою завантаження та можливими заклинюваннями або неоднорідністю матеріалу, доцільно розглядати вибір параметрів ПЧ саме за важким режимом (Heavy-Duty). Це забезпечить необхідний запас струму для впевненого пуску та стабільної роботи при коливаннях моменту опору на валу двигуна.



Рис. 2.4. Зовнішній вигляд перетворювача ACS550-01-125A-4

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [10]

2.6 Розрахунок параметрів елементів структурної схеми силового каналу електроприводу

У найпростішому випадку без урахування ШІМ інвертор є лінійний підсилювач з чистим запізненням на величину періоду широко імпульсної модуляції шим T :

$$T_{\text{и}} = T_{\text{шим}} = \frac{1}{f_{\text{шим}}} = \frac{1}{10^4} = 1 \cdot 10^{-4}, \text{ с}, \quad (2.30)$$

де $f_{\text{шим}}$ – несуча частота інвертора (частота ШІМ), Гц.

Максимальні значення діючої та амплітудної фазної напруги двигуна приймаються, відповідно, рівними:

$$U_{1\text{фн}} = 220 \text{ В}; \quad U_{1\text{фm}} = \sqrt{2} \cdot U_{1\text{фн}} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311.1 \text{ В}. \quad (2.31)$$

З урахуванням ШІМ напруги інвертора та при з'єднанні обмоток статора

двигуна в зірку параметри перетворювача вибираються відповідно до наведеними нижче виразами.

$U_{d0} = 1,35 U_c$ – напруга ланки постійного струму перетворювача,

де U_c - лінійна напруга джерела живлення перетворювача, В;

$\gamma_{\max} < 1$ – максимальне значення коефіцієнта відносної тривалості включення ключів інвертора (рекомендується прийняти

$\gamma_{\max} = 0,95$) о.е.

Умова узгодження напруги перетворювача та двигуна:

$$U_{d0} \geq \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{1H}}{\gamma_{\max}}, \text{ В.} \quad (2.32)$$

Коефіцієнт посилення інвертора:

$$k_{\text{и}} = \frac{U_{d0}}{\sqrt{3}}. \quad (2.33)$$

Умови вибору перетворювача за напругою та струмом:

$$U_{\text{и.н}} \geq \sqrt{3} \cdot U_{1H}; \quad I_{\text{и.н}} \geq I_{1H}; \quad I_{\text{и.макс}} \geq I_{1\text{макс}}. \quad (2.34)$$

2.7 Розрахунок електромеханічних та механічних характеристик при частотному управлінні

Природна механічна характеристика (M_s) електродвигуна для частоти Гц $f_{1H}=50$ розраховується за виразом:

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[(f^* \cdot X_{\text{кн}})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot f^*} \right)^2 \right]}. \quad (2.35)$$

де s - ковзання двигуна, приймаємо у руховому режимі від 0 до 1.

Далі швидкість обертання валу двигуна обчислюємо за виразом:

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s). \quad (2.36)$$

Механічні характеристики (M_s) електродвигуна для частот: $f = 5, 10, 20, 30, 40$ Гц розраховуються за виразом:

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[(f^* \cdot X_{\text{кн}})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu \cdot f^*} \right)^2 \right]} \quad (2.37)$$

де $f^* = f / 50$ - облік зміни індуктивних опорів;

$U_1 = 4,4 \cdot f$ – зміна напруги при скалярному законі управління

$U/f = \text{const}$.

На рис. 2.5 представлено сімейство механічних характеристик.

Електромеханічні характеристики електродвигуна розраховуються для таких же частот за виразом (струм у ланцюгу ротора):

$$I_2(s) = \frac{U_{\text{лфн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (f^* \cdot X_{\text{кн}})^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu \cdot f^*} \right)^2}} \quad (2.38)$$

Зміни ковзання s , напруги живлення U_1 , частоти мережі f , відносної частоти f^* виробляємо так само як і для побудови механічних характеристик. За результатами розрахунку будуються електромеханічні характеристики, що представлені на рис. 2.6.

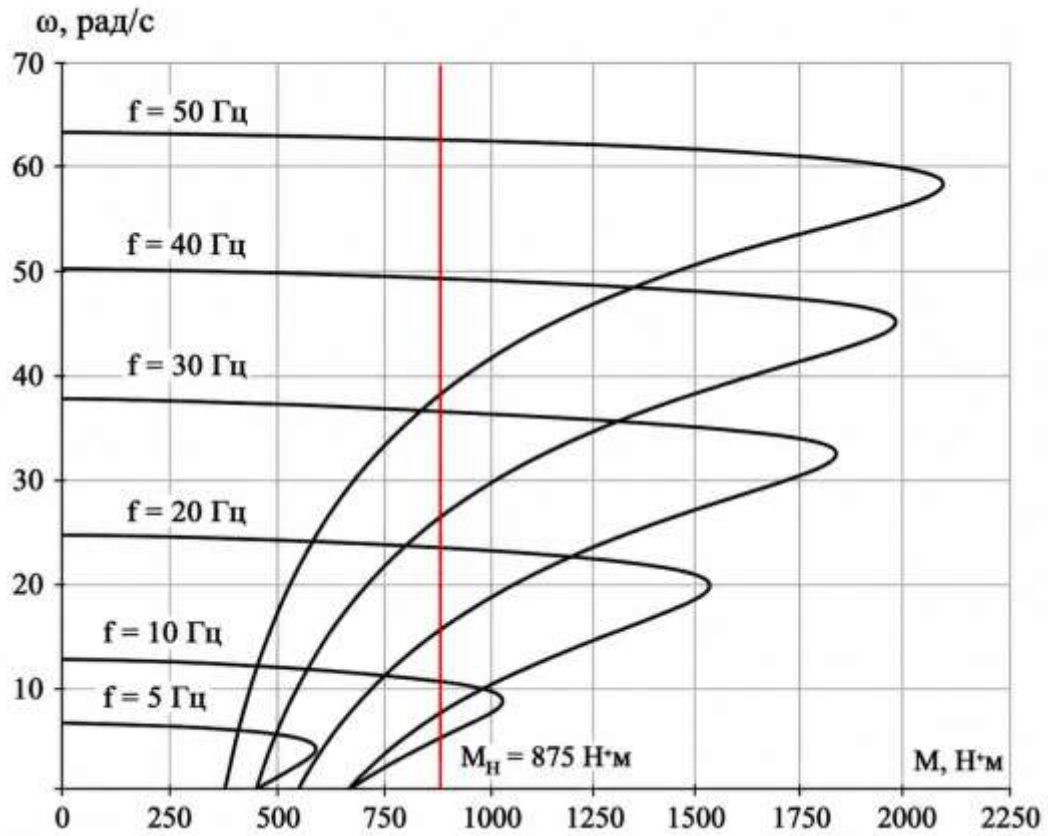


Рис. 2.5. Механічні характеристики асинхронного двигуна

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [11]

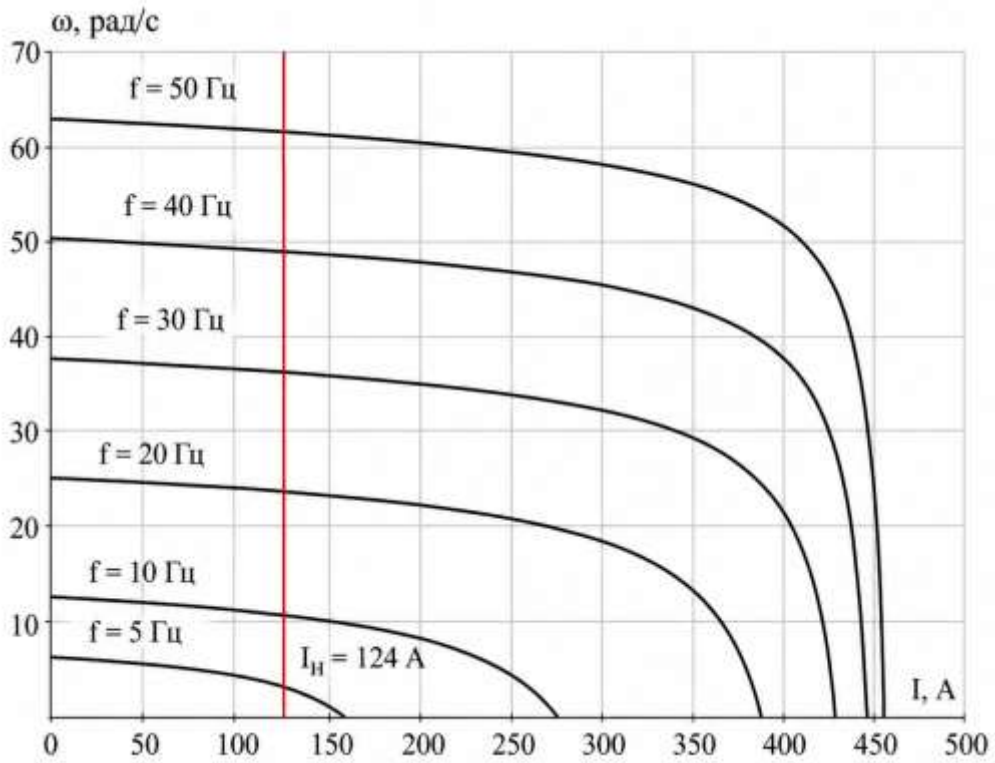


Рис. 2.6. Електромеханічні характеристики асинхронного двигуна

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [11]

2.8 Аналіз та розрахунок механічних характеристик у системі частотного регулювання

При серійному виробництві асинхронних машин неминучий певний технологічний допуск, що призводить до розкиду паспортних та фактичних параметрів. В рамках цього розділу досліджується специфіка спільної роботи двох двигунів, що мають схожі характеристики, при їх функціонуванні на загальне механічне навантаження (один вал). Зокрема, для «умовного» другого двигуна значення активних опорів обмоток статора і ротора були штучно збільшені на 30 %. Така зміна параметрів дозволяє наочно продемонструвати, як внутрішні втрати та зміна жорсткості механічної характеристики впливають на загальну працездатність електроприводу охолоджувача обох агрегатів. Для повноти картини на графік (рис.2.7) також нанесена лінія статичного опору, що відповідає номінальному моменту навантаження (M_n). Аналіз графічних залежностей дозволяє зробити наступні висновки: Відмінність в активних опорах призводить до розходження характеристик, що при жорсткому механічному зв'язку двигунів (на один вал) викликає ними. Двигун з підвищеним опором («м'яка» характеристика) буде приймати на себе меншу частку навантаження, в той час як двигун з номінальними параметрами буде працювати з перевантаженням. На рис. 2.7 б) представлені ті ж характеристики двох двигунів збільшеному масштабі. Т.к. швидкість двигунів буде однакова (механічно жорстко пов'язані), тобто моменти і струми двигунів будуть різні M_{c1} та M_{c2} , тобто один двигун буде перевантажений, а другий не довантажений. Перевантаження двигуна може спричинити перегрів з подальшим виходом його з ладу. Недовантаження також є негативним фактором з енергетичної точки зору.

Методи стабілізації і розподілу навантаження між двигунами.

З метою усунення дисбалансу потужностей при роботі двох агрегатів на загальний вал реалізована система корекції, що включає механізми ІR-компенсації та компенсації ковзання $K_{кс}$. Для двигуна з «просіданням»

характеристик частота коригується у бік збільшення, що дозволяє синхронізувати фактичні швидкості обертання.

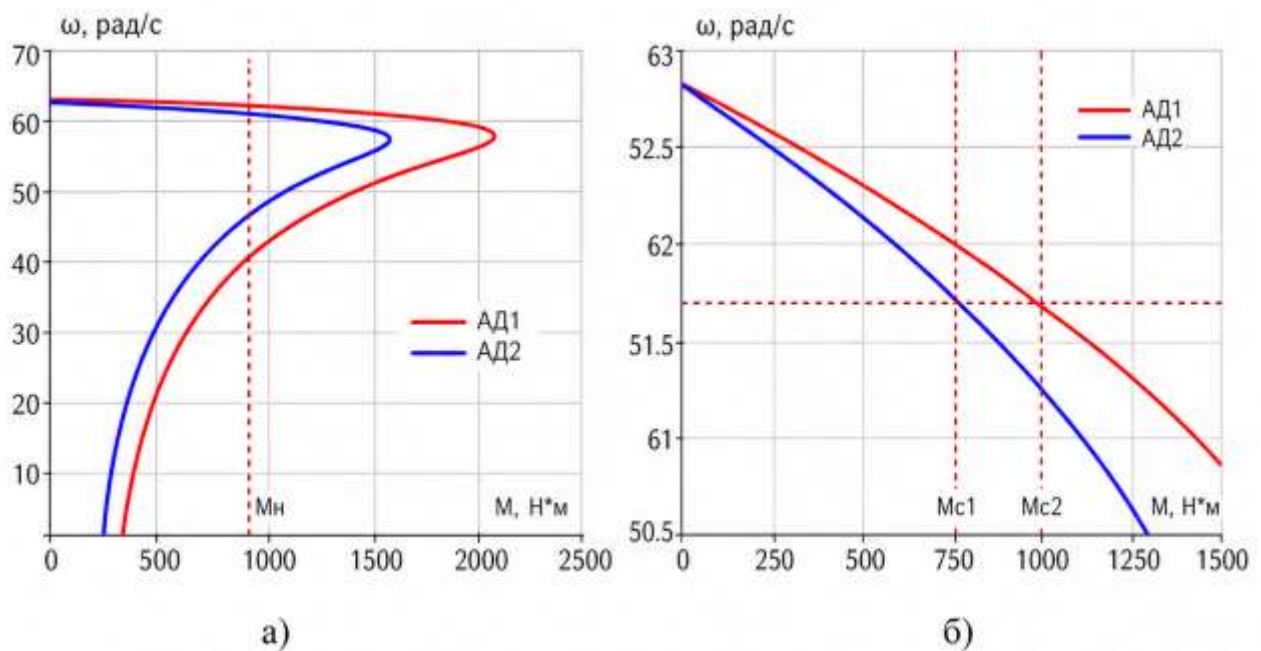


Рис. 2.7. Статичні механічні характеристики $M = f(\omega)$ двох двигунів

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [11]

IR-компенсація ($K_{\text{км}}$): реалізується через використання коефіцієнтів позитивного зворотного зв'язку по струму. Це дозволяє компенсувати падіння напруги на активному опорі обмоток, тим самим посилюючи механічну характеристику двигуна на низьких частотах. Аналіз отриманих результатів Ефективність введених заходів підтверджується графіками статичних характеристик, наведеними на рис. 2.8. Детальний аналіз збільшеного фрагмента (рис. 2.8 б) наочно демонструє, що в точці номінального навантаження моменти обох двигунів ідентичні: $M_{c1} = M_{c2}$. Досягнута рівність моментів свідчить про повне вирівнювання навантаження між приводними одиницями. Це виключає перегрів одного з двигунів та забезпечує оптимальний режим експлуатації всієї електромеханічної системи охолоджувача агломерату.

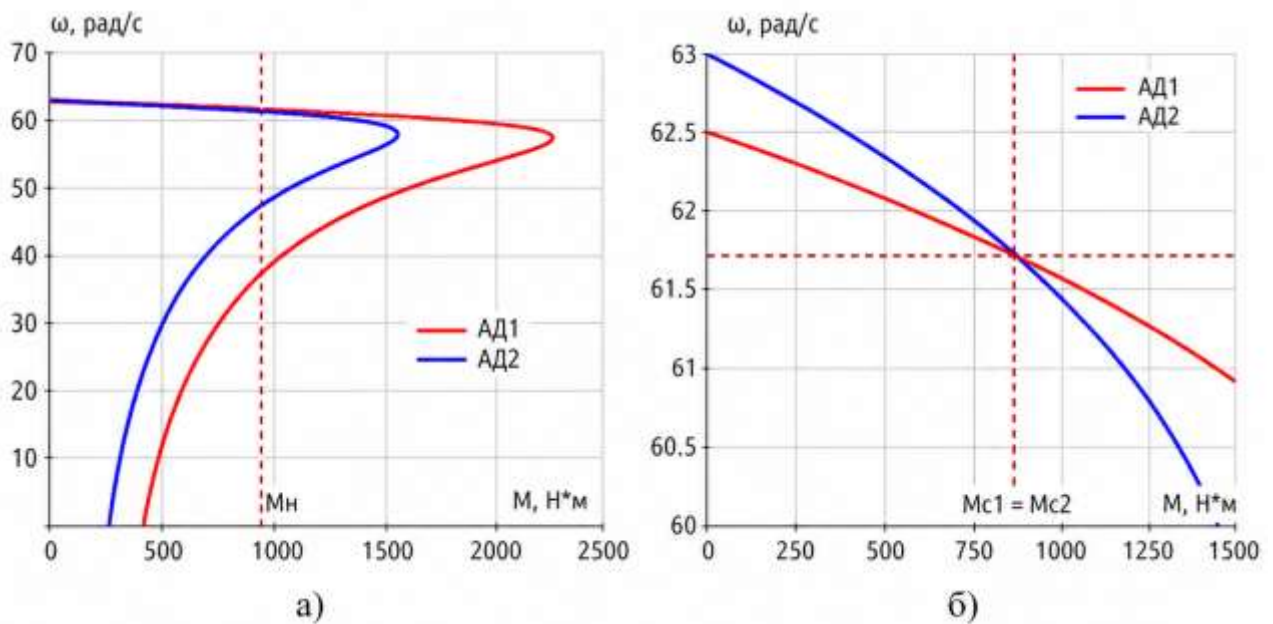


Рис. 2.8. Статичні механічні характеристики $M = f(\omega)$ двигунів з введеними компенсаціями моменту та ковзання

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [11]

2.9 Імітаційне моделювання системи асинхронного частотно-керувального приводу

2.9.1 Розробка функціональної схеми приводу охолоджувача агломерату

На рисунку 2.9 представлена функціональна структура досліджуваного електроприводу. Дана конфігурація спроектована для забезпечення стабільної роботи охолоджувача агломерату в заданих технологічних режимах. До складу модельованого електроприводу включені наступні ключові компоненти: Блок формування завдання: задатчик інтенсивності (ЗІС), що забезпечує плавну зміну частоти обертання і обмежує динамічні навантаження в механічних передачах. ACS550-01-125A-4, що працюють паралельно на загальне навантаження. Виконавчі механізми: асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором типу 2AIY280M10. (f_1), що визначає швидкість обертання. Реалізація закону

управління $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$ з активним використанням алгоритмів корекції моменту (IR-компенсація) та мінімізації статичної помилки за швидкістю (компенсація ковзання).

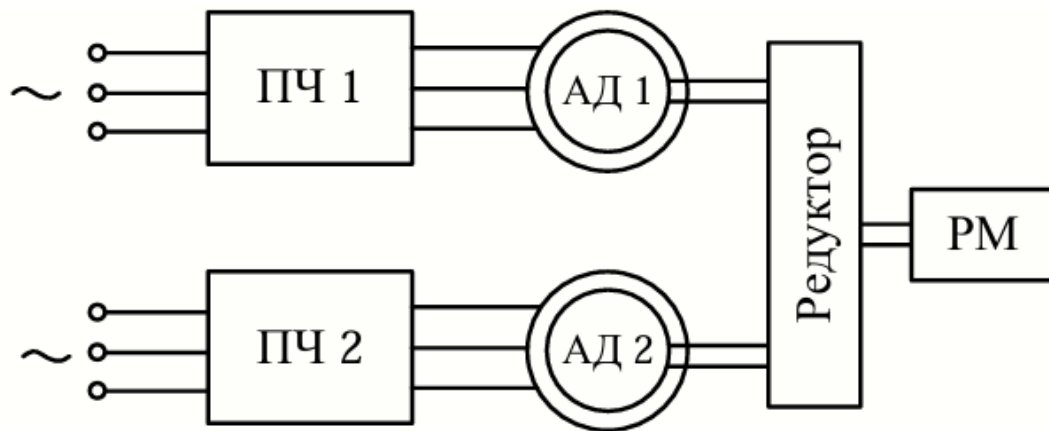


Рис. 2.9. Функціональна схема частотно-регульованого асинхронного електроприводу охолоджувача агломерату зі скалярним керуванням

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [11]

2.9.2 Математичний опис та структурна схема асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у нерухомій системі координат α, β

Система рівнянь, що описують роботу асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором у нерухомій системі координат α, β , має вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dI_{1\alpha}}{dt} &= \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\alpha} - \frac{R_s}{\sigma \cdot L_1} \cdot I_{1\alpha} + \frac{R_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2^2} \cdot \Psi_{2\alpha} + \\ &\quad + \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ \frac{dI_{1\beta}}{dt} &= \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot u_{1\beta} - \frac{R_s}{\sigma \cdot L_1} \cdot I_{1\beta} + \frac{R_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2^2} \cdot \Psi_{2\beta} - \\ &\quad - \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} &= -\frac{R_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} + \frac{R_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot I_{1\alpha} - z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} &= -\frac{R_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\beta} + \frac{R_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot I_{1\beta} + z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ M_{\text{эм}} &= \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \Psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}); \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot (M_{\text{эм}} - M_c) \end{aligned} \right. \quad (2.39)$$

де:

$$U_{1\alpha} = U_{1m} \cdot \sin(2\pi \cdot f_1) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_1)$$

– синусоїдальна за формою складова напруги статора по осі α ортогональної нерухомої системи координат α, β, B ;

$$U_{1\beta} = U_{1m} \cdot \cos(2\pi \cdot f_1) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos(2\pi \cdot f_1)$$

- косінусоїдальна за формою складова напруги статора по осі β системи координат α, β, B ;

$$U_{1m} = \sqrt{2} \cdot U_1 \text{ - амплітудне значення фазної напруги статорної обмотки, В;}$$

U_1 - діюче значення фазної напруги статорної обмотки, В;

f_1 – частота напруги статора, Гц;

$I_{1\alpha}, I_{1\beta}$ – складові струму статора у системі координат α, β, A ;

$\Psi_{2\alpha}, \Psi_{2\beta}$ – складові потокозчеплення ротора в системі координат $\alpha, \beta, B\bar{b}$;

$M_{\text{ем}}$ - електромагнітний момент двигуна, Н·м;

M_c – момент статичного опору на валу двигуна, включаючи власний момент тертя двигуна, Н·м;

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2} \quad - \text{ коефіцієнт розсіювання;}$$

J – момент інерції двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

В операторній формі запису система рівнянь (2.39) набуває вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1\alpha} = R_1 \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot I_{1\alpha} - \frac{R_2 \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \Psi_{2\alpha} - \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ U_{1\beta} = R_1 \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot I_{1\beta} - \frac{R_2 \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \Psi_{2\beta} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2\alpha} - L_m \cdot I_{1\alpha} - \frac{L_2}{R_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2\beta} - L_m \cdot I_{1\beta} + \frac{L_2}{R_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ M_{\text{эм}} - \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \Psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}); \\ \omega = \frac{1}{J \cdot p} \cdot (M_{\text{эм}} - M_c), \end{array} \right. \quad (2.40)$$

$$R_e = R_1 + R_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2}; \quad T_e = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_e}; \quad T_2 = \frac{L_2}{R_2} \quad (2.41)$$

Рівнянням системи (2.40) відповідає структурна схема асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором у нерухомій системі координат статора α, β наведена на рис. 2.10.

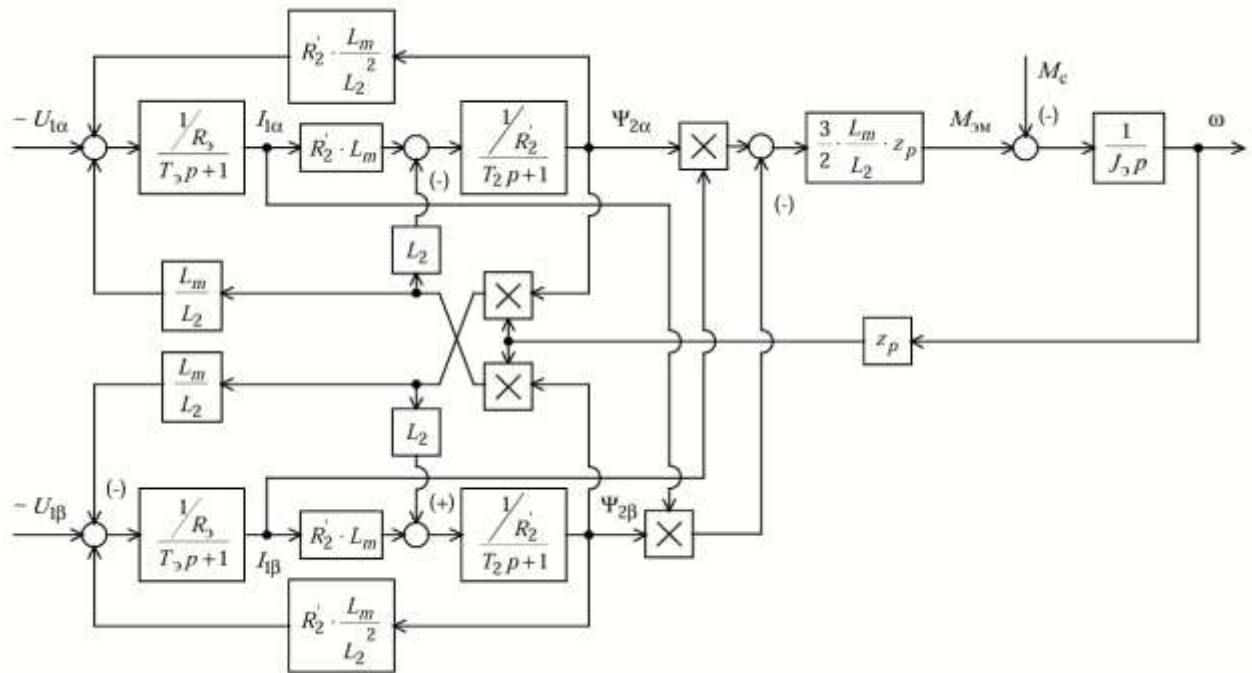


Рис. 2.10. Структурна схема асинхронного електродвигуна у нерухомій системі координат статора α, β

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

Параметри ланок структурної схеми двигуна

Еквівалентні індуктивності обмоток:

– статора:

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 6.205 \cdot 10^{-4} + 0.013 = 0.013, \text{ Гн}; \quad (2.42)$$

- ротора, приведена до ланцюга статора:

$$L_2' = L_{2\sigma} + L_m = 8.24 \cdot 10^{-4} + 0.013 = 0.013, \text{ Гн}. \quad (2.43)$$

Коефіцієнт розсіювання магнітного поля:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2'} = 1 - \frac{0.013^2}{6.205 \cdot 10^{-4} \cdot 8.243 \cdot 10^{-4}} = 0.105. \quad (2.44)$$

Еквівалентний активний опір ланцюга статора (без урахування опору сполучних проводів):

$$R_{13} = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2'^2} = 0.096 + 0.036 \cdot \frac{0.013^2}{8.243 \cdot 10^{-4}} = 0.126, \text{ Ом} . \quad (2.45)$$

Електромагнітні постійні часу ланцюги статора та ротора:

$$T_{13} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{13}} = \frac{0.105 \cdot 6.205 \cdot 10^{-4}}{0.096} = 0.011, \text{ с}; \quad T_2 = \frac{L_2'}{R'_2} = \frac{8.243 \cdot 10^{-4}}{0.036} = 0.373, \text{ с} . \quad (2.46)$$

Вибір інструментарію та методики дослідження

Для проведення глибокого аналізу перехідних процесів, що пройшли у вузлах асинхронного двигуна і в комплексній системі частотно-керованого приводу охолоджувача агломерату, обраний метод імітаційного моделювання.

Як основне програмне середовище для проектування та верифікації електромеханічних систем використовується пакет MATLAB (версія R2008b) з прикладною бібліотекою Simulink. Даний програмний комплекс дозволяє з високою точністю відтворити динаміку взаємодії силових перетворювачів та виконавчих двигунів, враховуючи нелінійність характеристик та вплив коригувальних зворотних зв'язків.

Використання даного середовища моделювання обґрунтовано:

Наявністю стандартних блоків сигової електроніки та електричних машин.

Можливістю детального аналізу графіків струмів, моментів та швидкостей у реальному часі.

Високою достовірністю одержуваних результатів щодо алгоритмів скалярного управління.

2.9.3 Побудова імітаційної моделі асинхронної машини у двофазній системі координат

Використовуючи математичний опис та структурну схему, представлену на рис. 2.10, серед MATLAB/Simulink була реалізована комп'ютерна модель асинхронного електродвигуна. Моделювання виконано в нерухомій системі координат статора (α, β), що є класичним підходом для дослідження динамічних

режимів при частотному управлінні. Оптимізації загальної схеми електроприводу і зручності проведення багатоваріантних розрахунків, модель двигуна згрупована в єдиний функціональний суперблок (Subsystem).

Особливості програмної реалізації:

Облік навантаження:

Модель включає в себе блок реактивного навантаження, що дозволяє аналізувати поведінку електроприводу при впливі статичного моменту охолоджувача агломерату (рис. 2.11). (Subsystem).

Уніфікація: Зовнішній вигляд та інтерфейс даного суперблоку (представлений на рис. 2.12) дозволяють інтегрувати його в загальну систему управління, забезпечуючи зручне підключення джерел живлення та датчиків зворотного зв'язку.

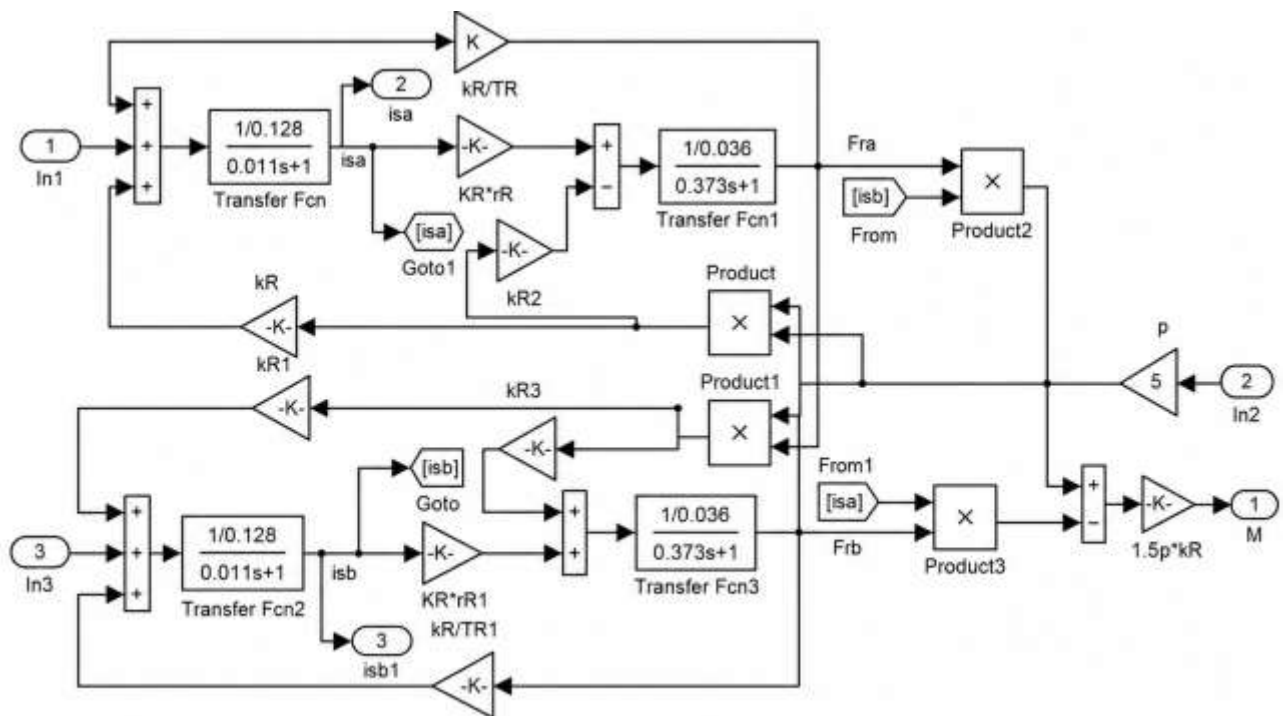


Рис. 2.11. Схема набору імітаційної моделі двофазного асинхронного електродвигуна у нерухомій системі координат статора α, β

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

2.9.4 Імітаційна модель силового каналу електроприводу

Схема набору імітаційної моделі силового каналу електроприводу двофазним асинхронним двигуном та реактивним навантаженням наведено на рис. 2.13. На схемі суперблоком – двигун представлений асинхронним.

електродвигун, суперблоком – ПЧ – перетворювач частоти, а суперблоком – ЗІС – задатчик інтенсивності швидкості.

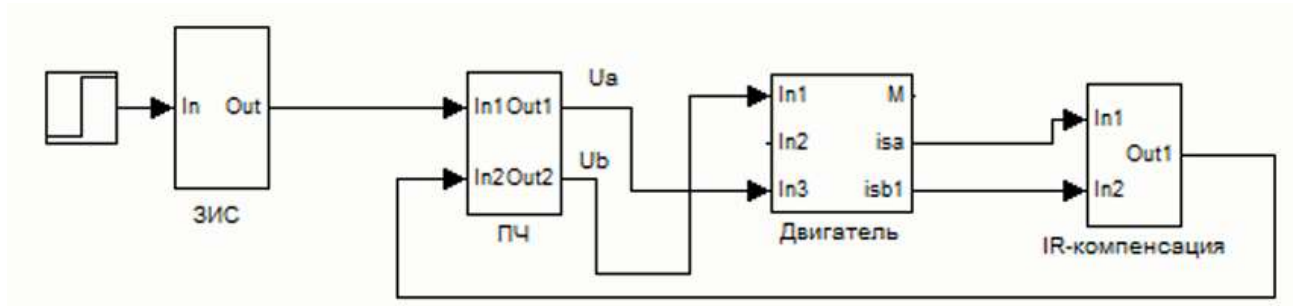


Рис. 2.12. Схема набору імітаційної моделі силового каналу електроприводу

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

Схема набору імітаційної моделі перетворювача частоти наведена на рис. 2.13.

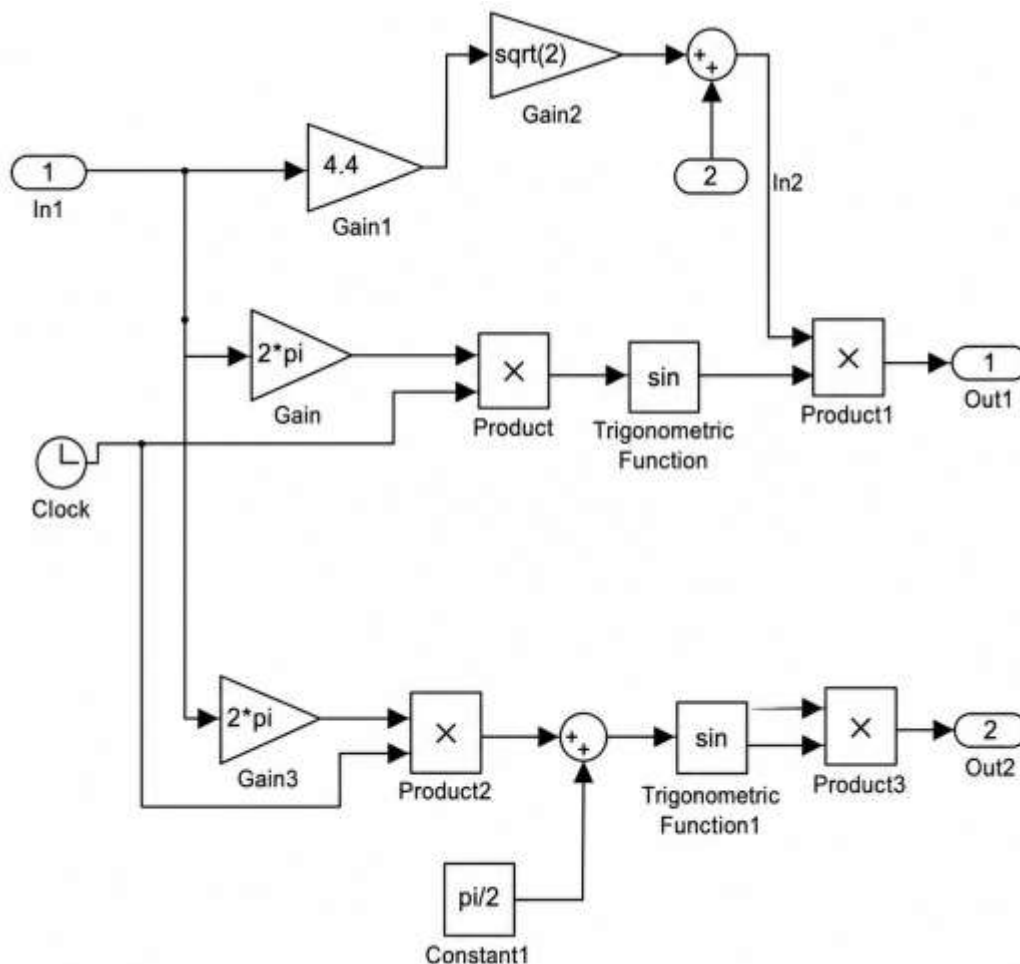


Рис. 2.13. Схема імітаційної моделі перетворювача частоти

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

2.9.5 Обґрунтування вибору та параметрів задатчика інтенсивності

У розімкнених структурах управління електроприводом для лімітування величини моменту в перехідних режимах (пуск, реверс, гальмування) використовується задатчик інтенсивності (ЗІ), інтегрований у вхідний ланцюг контуру управління. Принцип дії та динаміка моменту сигналу. Це забезпечує: Стабільне прискорення або уповільнення приводного механізму. Підтримка незмінного значення динамічного моменту системи протягом усього етапу розгону. В умовах роботи охолоджувача агломерату, якщо навантаження на валу суттєво зростає, поточний момент двигуна може наблизитись до критичної позначки. У разі заклинювання (стопоріння) агрегату двигун перейде в режим

роботи з пусковим моментом, що відповідає поточній частоті. В обох ситуаціях це призведе до різкого стрибка струму в інверторі, перевищення уставки захисту та аварійної зупинки перетворювача частоти. ($f_{xв.}$). Стабілізація потоку: Витримується пауза до моменту завершення перехідних процесів, коли параметри потокосцеплення досягають встановилися значень.

Розгін: після стабілізації активується задатчик інтенсивності, що забезпечує плавний підйом частоти до необхідного технологічного рівня. рис. Такий вибір обумовлений необхідністю забезпечення рівномірного розподілу механічних зусиль у трансмісії охолоджувача. Було обрано задатчик інтенсивності лінійною характеристикою (рис. 2.14).

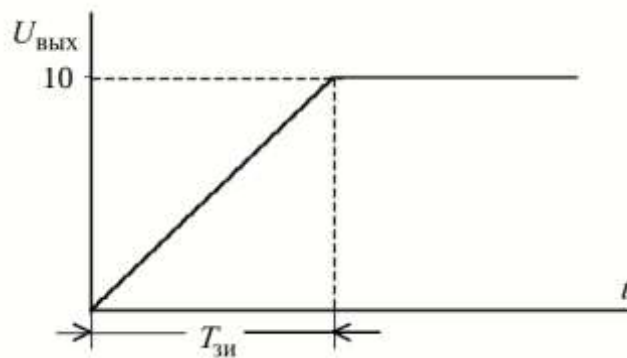


Рис. 2.14. Тимчасова характеристика лінійного задатчика інтенсивності

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

Схема набору імітаційної моделі задатчика інтенсивності швидкості наведено на рис. 2.15

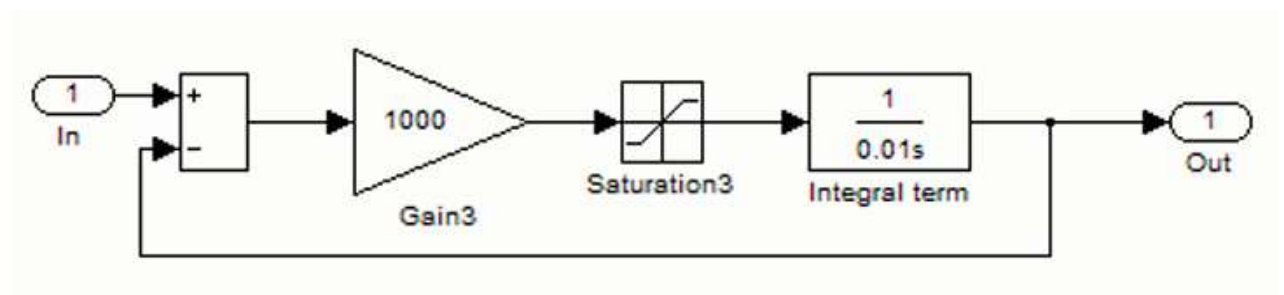


Рис. 2.15. Схема набору імітаційної моделі задатчика інтенсивності швидкості з лінійною характеристикою

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

Перехідні процеси в електроприводі з лінійним задатчиком інтенсивності підтвердили суттєве зменшення коливання моменту двигуна в пуско-гальмівних режимах роботи, що й визначило остаточний вибір задатчик інтенсивності лінійною характеристикою. Суперблок «Інерційна маса» містить імітаційну модель одномасової механічної системи з моментом навантаження реактивного характеру – представлено на рис. 2.16.

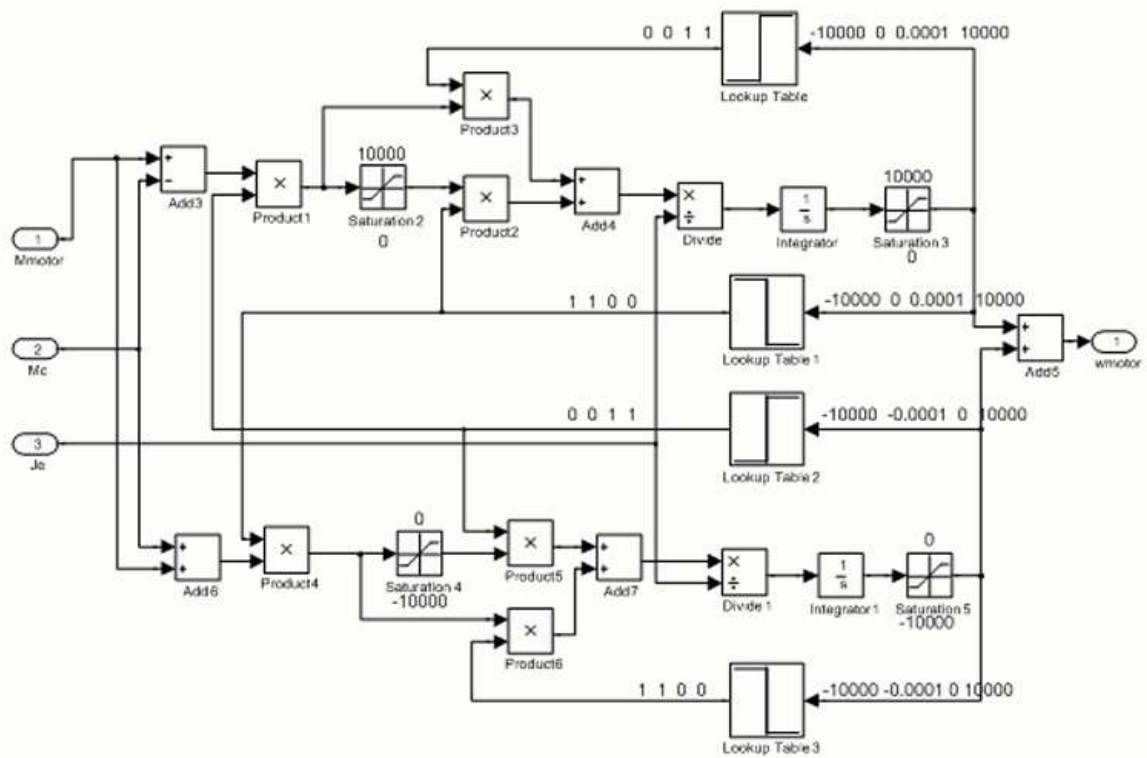


Рис. 2.16. Імітаційна модель одномасової механічної системи

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

2.9.6 Імітаційні дослідження електроприводу охолоджувача агломерату

Мета імітаційних досліджень електроприводу охолоджувача агломерату полягала у перевірці працездатності електроприводу у всіх основних технологічних режимах роботи:

- пуск електроприводу;
- Регулювання швидкості електроприводу;

- робота електроприводу з компенсацією ковзання та моменту та без компенсацій;
- Вирівнювання навантаження.

Імітаційна модель дворухового приводу конвєсера показана на рис. 2.17.

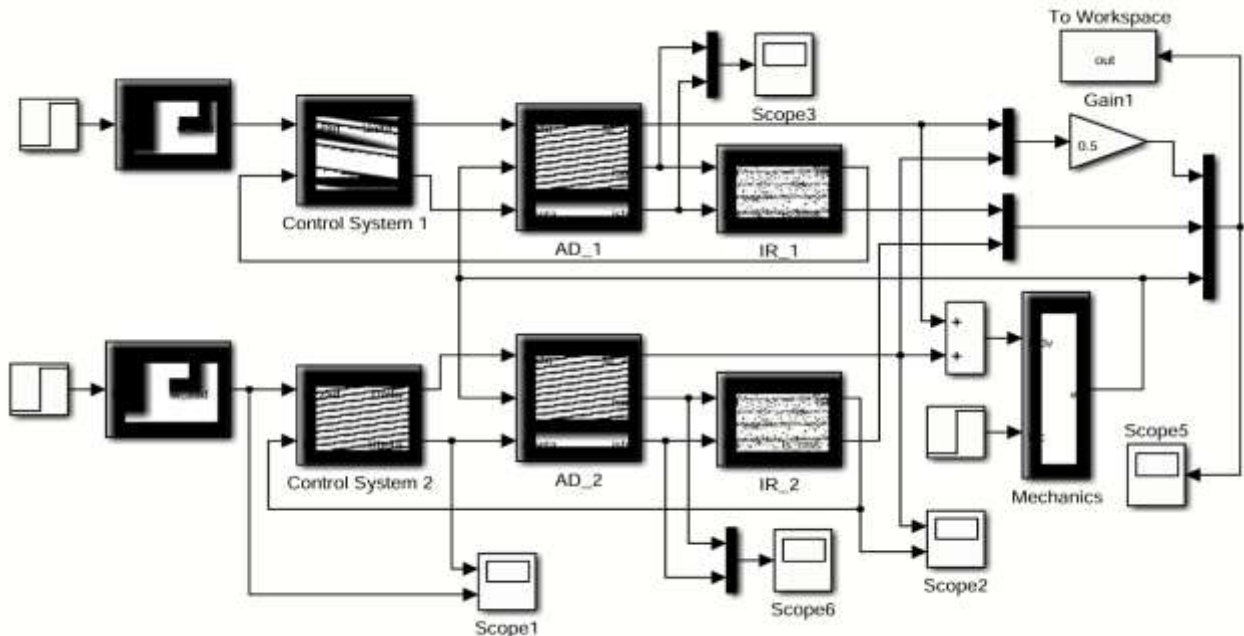


Рис. 2.17. Імітаційна модель частотно-регульованого електроприводу конвєсера без вантажу із задатчиком інтенсивності швидкості

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

Вона складається з двох приводів, кожен із яких складається з блоків: задатчик інтенсивності, приватне регулювання з алгоритмом управління, асинхронний двигун, розрахунок компенсацій ковзання та моменту, а також загальний блок, який відповідає за механічну частину. На рис. 2.18 представлені динамічні характеристики швидкості, моментів та струмів двох двигунів без компенсації ковзання та моменту.

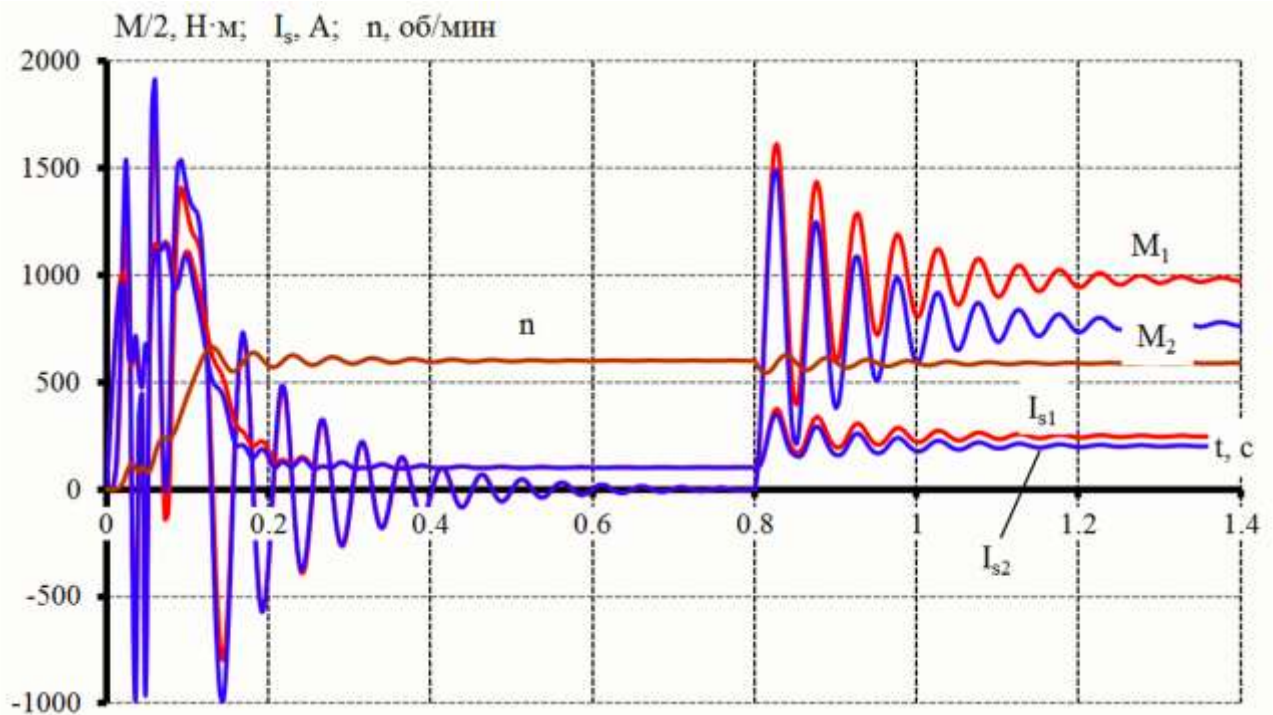


Рис. 2.18. Динамічні характеристики швидкості, моментів та струмів двигунів без компенсації ковзання та моменту

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

На першому етапі відбувається пуск двигунів, а потім в момент часу 0,8 с відбувається начерк номінального навантаження. Після пуску на неодруженому ходу

$M_1 = M_2 = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$, навантаження відсутнє. А після накидання навантаження $M_1 = 1000 \text{ Н}\cdot\text{м}$,

$M_2 = 750 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Внаслідок природного вирівнювання навантаження, моменти та струми різні. Для вирівнювання навантаження введемо компенсації ковзання та моменту. Після коригування коефіцієнтів отримаємо характеристики зображені на рис. 2.19. Як впливає з графіків перехідних процесів після начерку навантаження (0,8 с) моменти вирівнюються $M_1 = M_2 = 875 \text{ Н}\cdot\text{м}$. А до начерку навантаження, тобто. на неодруженому ходу моменти різні. Причому двигун АД1 працює у режимі рекуперативного гальмування, а АД2 у руховому режимі.

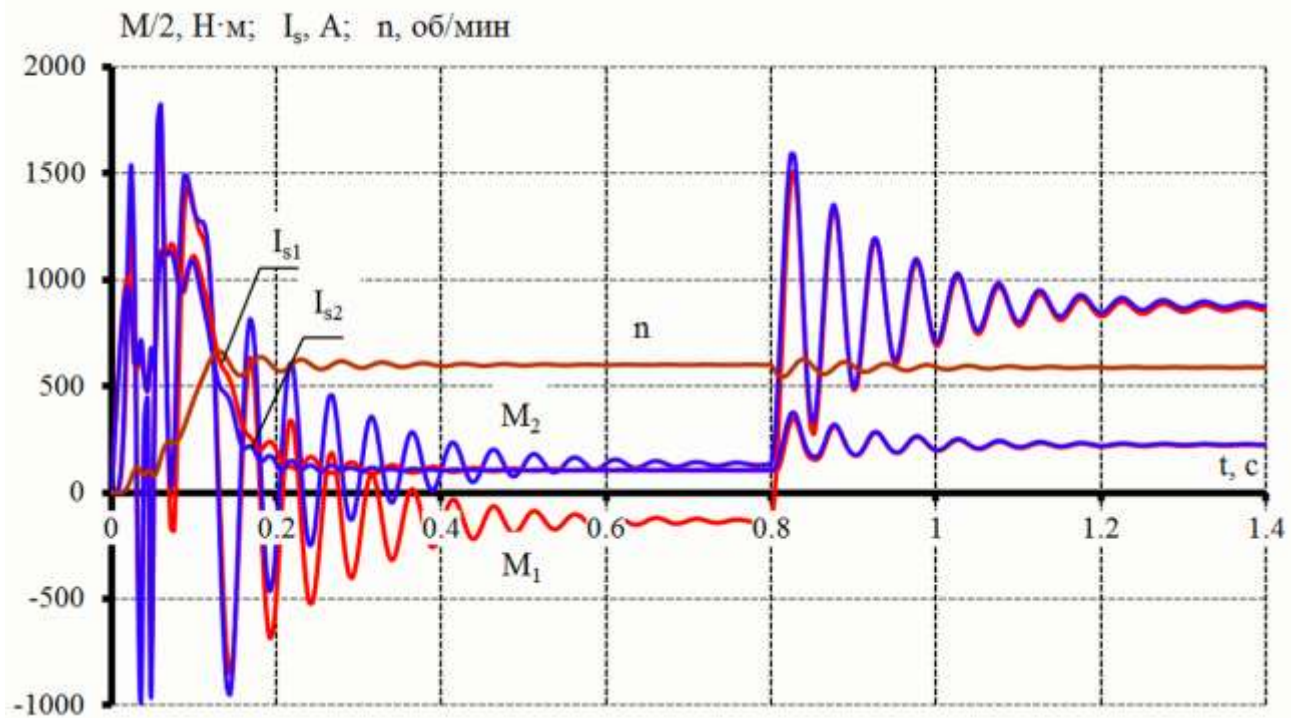


Рис. 2.19. Динамічні характеристики швидкості, моменту та струмів двох двигунів з коефіцієнтом $K_{\text{км}}=0,5$ першого двигуна та коефіцієнтом $K_{\text{км}}=1$ другого двигуна

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

Це підтверджує необхідність зміни коефіцієнтів компенсацій у процесі роботи електроприводу. Якщо запам'ятати настроювальні коефіцієнти для номінального навантаження та застосувати їх у потрібний момент часу, то отримаємо графіки перехідних процесів, зображених на рис. 2.20. Як впливає з графіків моменти $M_1 = M_2$ і струми $I_1 = I_2$ вирівняні і до і після накидання навантаження. Це досягається тим, що при холостому ході не використовуються зворотні зв'язки, а при начерку навантаження, включаємо компенсації моменту та ковзання із заздалегідь встановленими коефіцієнтами. Недоліком даного алгоритму є сильний кидок струму та моменту під час введення компенсацій. У процесі роботи електроприводу навантаження може змінюватися залежно від технологічного процесу, особливо в конвеєрних механізми. Тому провівши аналіз перехідних процесів, отриманих на імітаційної моделі можна виробити рекомендації щодо використання алгоритму вирівнювання навантаження:

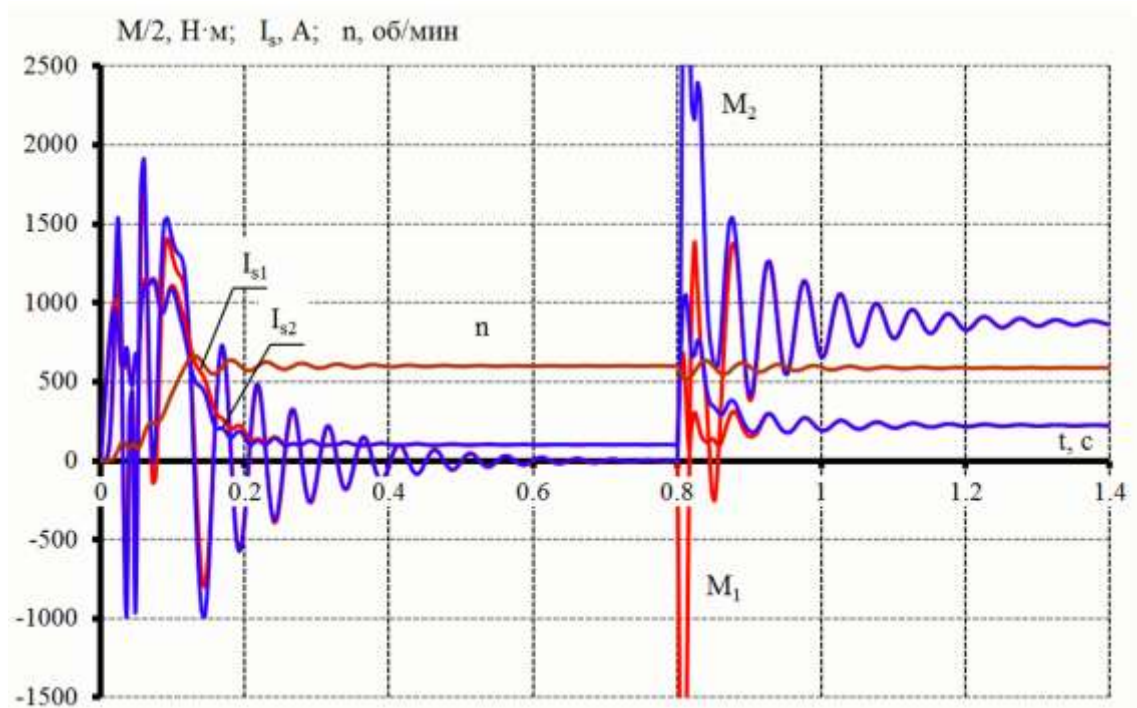


Рис. 2.20. Динамічні характеристики швидкості, моменту та струмів двигунів при накиданні навантаження

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [12]

1. Необхідно підлаштовувати коефіцієнти компенсації моменту та ковзання в процесі експлуатації електроприводу охолоджувача агломерату
2. Підстроювання коефіцієнтів повинно проводитись в залежності від навантаження двигуна. Інформацію про поточне навантаження зручніше визначати шляхом вимірювання струмів статора асинхронних двигунів I по різниці струмів визначати величину компенсації моменту та ковзання.
3. Зміни коефіцієнтів, тобто. зміни амплітуди та частоти напруги на виході перетворювача частоти необхідно змінювати плавно, для виключення сильних кидків струму. Швидкодія в даному випадку не є основним критерієм.
4. Алгоритм розрахунку коефіцієнтів зворотних зв'язків має враховувати (виключати) такі перехідні процеси як пуск, зупинка та реверс. Отримані результати імітаційних досліджень підтверджують здатність частотно-регульованого електроприводу конвеєра забезпечити технічні вимоги щодо діапазону регулювання швидкості та перевантажувальної здатності.

2.10 Заходи із охорони праці та безпеки при експлуатації електроприводу охолоджувача агломерату

2.10.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників

При експлуатації і технічному обслуговуванні електропривода охладителя агломерата на персонал воздействует комплекс факторов, обусловленных как спецификой электрооборудования, так и тяжелыми условиями металлургического цеха. Эксплуатація електроприводу охолоджувача агломерату в умовах аглоцеху (наприклад, ПАТ «АМКР») супроводжується факторами, що наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Фактори	Вплив шкідливих факторів	Джерело	Специфіка
Фізичні чинники	Небезпека ураження електричним струмом. Роботи з монтажу та демонтажу важких вузлів (двигунів вагою сотні кілограмів, муфт) у стиснених умовах.	Струмопровідні частини перетворювачів частоти (ПЧ), клемні коробки асинхронних двигунів, силові кабелі 0,4 кВ.	Підвищена небезпека через наявність металевого струмопро-відного пилу та високої вологості, що знижує опір ізоляції.
Механічні фактори:	обертові вали, муфти і частини охолоджувача, що рухаються.	Машини, що рухаються, і механізми	Ризик: Затягування одягу або кінцівок у необгороджені вузли, що обертаються при проведенні оглядів «на ходу».
Термічні фактори:	Підвищена температура поверхонь обладнання. Висока температура агломерату (до 600 °С) та інфрачервоне випромінювання	Корпуси двигунів (що працюють з перевантаженням або при поганому обдуві) та елементи технологічної частини охолоджувача, розігріті агломератом.	Ризик: Термічні опіки під час ремонтних або налагоджувальних робіт.
Виробниче середовище:	Підвищена запиленість повітря робочої зони: висока концентрація абразивного пилу	Агломераційний пил (що містить оксиди заліза, кремнію).	Ризик: абразивне знос ізоляції (що призводить до КЗ) та ураження органів дихання персоналу.

Підвищений рівень шуму та вібрації:		Робота системи примусової вентиляції ПЧ та двигунів, шум зубчастих передач редукторів.	Ризик: Розвиток професійних захворювань (глухість, вібраційна хвороба) при тривалому знаходженні в зоні приводу.
Хімічні чинники	Продукти термічної деструкції:	У разі аварійного перегріву обмоток двигуна або кабелів можливе виділення токсичних парів хлористого водню, окису вуглецю та інших продуктів ізоляції.	Ризик: У разі обмеженого простору щитових ПЧ це створює ризик гострого отруєння.
Психофізіологічні фактори	Нервово-психічні навантаження:	Висока відповідальність за безаварійну роботу охолоджувача, оскільки його зупинка веде до зупинки всієї агломації.	Монотонність під час спостереження за параметрами на дисплеї ПЧ разом із необхідністю миттєвої реакції на аварійний сигнал.

2.10.2 Засоби зниження дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Специфіка безпечного обслуговування дворухового приводу охолоджувача

1. Організаційні заходи: система біркового режиму та LOTO

Оскільки охолоджувач рухається двома двигунами, що працюють на один вал або загальну механічну передачу, виникає ризик «транзитного» обертання.

Блокування енергії (LOTO): Перед початком будь-яких робіт (заміна щіток, перевірка контактів, підтяжка муфт) персонал зобов'язаний не просто вимкнути автомат, а фізично заблокувати ручку роз'єднувача індивідуальним замком.

Синхронізація відключення: При обслуговуванні механічної частини охолоджувача блокуються обидва частотні перетворювачі, оскільки пуск одного двигуна призведе до руху всієї установки та травмування персоналу.

2. Захист від пилу та перегріву під час обслуговування

Агломераційний пил має високу абразивність і електропровідність.

Регламент очищення: У проект закладається щозмінний огляд чистоти ребер охолодження асинхронних двигунів. Нашарування пилу понад 5 мм порушує тепловідведення, що веде до деградації ізоляції та ризику займання.

Обслуговування під тиском: У шафах управління з ПЧ передбачена система надлишкового тиску або використання кондиціонерів із замкнутим циклом, що унеможливорює попадання струмопровідного пилу на плати управління в процесі експлуатації.

3. Безпека під час роботи у зоні високих температур

Охолоджувач – це джерело інтенсивного інфрачервоного випромінювання.

Температурний допуск: Ремонтні роботи на двигунах, які розташовані в безпосередній близькості до чаш охолоджувача, дозволяються тільки після остигання корпусу обладнання до температури не вище +45 °C.

Екранування: У проекті передбачена установка металевих екранів, що відбивають, між зоною проходження гарячого агломерату і посадковими місцями електродвигунів для захисту кабельних трас і датчиків швидкості (енкодерів) від теплового руйнування.

4. Особливості обслуговування системи датчиків

Синхронізація двох двигунів потребує наявності датчиків зворотного зв'язку.

Безпечний доступ: Місця встановлення енкодерів на валах двигунів повинні бути закриті знімними кожухами, що унеможливлюють захоплення одягу.

Низьковольтні ланцюги: Усі контрольні кабелі від датчиків до ПЧ прокладаються окремо від силових трас в екранованих гофрах, що унеможливлює наведення, які можуть призвести до помилкового пуску або ривка приводу під час налагодження.

5. Аварійна зупинка (Emergency Stop)

Відповідно до вимог безпеки для довгомірних механізмів (яким є охолоджувач):

Кнопки аварійної зупинки з фіксацією («грибки») встановлюються: на пульті оператора агломашины; біля кожного із двох приводних двигунів; вздовж проходу охолоджувача (тросовий вимикач, що дозволяє зупинити привід будь-якої точки шляху).

Особливу увагу у роботі приділено виключенню несанкціонованого запуску системи. Застосування частотних перетворювачів із функцією Safe Torque Off (STO) дозволяє обслуговуючому персоналу безпечно проводити вимірювання та огляд механічних вузлів без повного зняття напруги з силових шин, що скорочує час простою при збереженні найвищого рівня безпеки за стандартом SIL3».

2. Технічні заходи електробезпеки

Заземлення: Усі корпуси двигунів та шафи ПЧ приєднані до контуру заземлення з опором не більше 4 Ом.

Виконання обладнання: Враховуючи запилення, обладнання вибрано зі ступенем захисту не нижче IP54.

Функція STO (Safe Torque Off): У вибраних перетворювачах частоти передбачена апаратна функція безпечного зняття моменту, що запобігає випадковому запуску під час проведення робіт.

2.10.3. Пожежна безпека та санітарія

Пожежі гасіння: Приміщення електрощитових обладнані сповіщувачами та вуглекислотними вогнегасниками (ОУ). Кабелі застосовані у виконанні, яке не підтримує горіння (нг-LS).

Боротьба з пилом: Передбачено регулярне вакуумне очищення обладнання. Використання стисненого повітря для обдування заборонено.

Висвітлення: У зоні обслуговування встановлено комбіноване освітлення світлодіодними світильниками з рівнем щонайменше 200 лк.

4. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Персонал забезпечується спецодягом з вогнестійким просоченням, захисними окулярами, респіраторами, а також діелектричними рукавичками для оперативних робіт.

Розроблені заходи з охорони праці та технічні рішення щодо автоматизації приводу дозволяють знизити ризик виробничого травматизму, забезпечити пожежну безпеку та створити умови праці, що відповідають чинним нормам ДНАОП та ПУЕ.

Таблиця 2.2

Оцінка ризиків для основних операцій обслуговування

Операція	Основний фактор ризику	Міра захисту
Огляд щітково-контактного вузла (якщо є) або клемника	Електричний струм	Перевірка відсутності напруги, використання діелектричного килимка.
Центрівка валів двох двигунів	Механічне травмування	Застосування системи LOTO (блокування)
Заміна фільтрів у шафі ПЧ	окопровідний пил	Використання респіратора типу FFP2/FFP3, знеструмлення шафи.
Налагодження ПЧ (програмування)	Психоемоційна напруга	Дотримання режиму праці та відпочинку, висока кваліфікація персоналу

Для нейтралізації фактора ураження струмом використовуємо не тільки заземлення, а й захисний поділ ланцюгів (силова частина окремо від ланцюгів управління), а для захисту від пилу - двигуни у виконанні IP55 (пилозахищене та струєзахищене).

ВИСНОВКИ

Основною метою даної випускної кваліфікаційної роботи була модернізація електроприводу охолоджувача агломерату шляхом переходу від використання зношених двигунів постійного струму до сучасної системи на базі асинхронних машин з частотним регулюванням.

В ході виконання роботи була обґрунтована доцільність заміни морально застарілого і на підставі проведених силових розрахунків для впровадження був прийнятий сучасний асинхронний електродвигун типу 2AIY280M10, що працює у зв'язці з високотехнологічним перетворювачем частоти ABB ACS850-04-103A-5+J414.

Ключові результати проектування:

Відповідність ТП необхідний діапазон регулювання частоти обертання. Динамічні показники: Досягнуто необхідних кратностей пускового та критичного моментів. При цьому точність стабілізації швидкості обертання становить не менше 5%, що є оптимальним для даного технологічного процесу. дозволяє адаптувати швидкість руху охолоджувача до змін у технології виробництва агломерату.

Інтеграція до АСУ ТП:

Вибрані перетворювачі частоти є інтелектуальними вузлами автоматизації. Вони легко інтегруються в системи верхнього рівня, володіють розвиненою самодіагностикою і широким спектром захисних функцій (контроль струму, перенапруги, перегріву). Зокрема, планується створення інтелектуального регулятора, здатного автоматично коригувати коефіцієнти IR-компенсації ($K_{км}$) і компенсації ковзання ($K_{кс}$) в режимі реального часу, підлаштовуючись під умови навантаження, що змінюються, і параметри навколишнього середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. Редакція від 01.01.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12> (дата звернення: 05.05.2026).
2. Правила улаштування електроустановок. Четверте видання, переробл. і доповн. Харків : Форт, 2017. 608 с.
3. Терещенко О. П. Автоматизований електропривод : підручник. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 412 с.
4. Рудаков В. В., Столяров І. М., Костильов К. Ю. Моделювання систем електроприводу в середовищі MATLAB : навч. посіб. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2019. 184 с.
5. Попович М. Г., Лозинський О. Ю. Теорія електропривода : підручник. 4-те вид. Київ : Либідь, 2016. 610 с.
6. Чермалих В. М. Системи керування електроприводами : навчальний посібник. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2018. 256 с.
7. Приводи ACS550-01 (0,75–160 кВт). Керівництво з експлуатації / ABB Group. 2021. 284 с.
8. Перетворювачі частоти серії ACS850. Технічний каталог / ABB Group. 2022. 112 с.
9. Малиновський Л. С. Автоматизація виробничих процесів у металургії : підручник. Запоріжжя : ЗНУ, 2020. 320 с.
10. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепіков та ін.; за ред. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
11. ДСТУ 2814-94. Електродвигуни асинхронні. Загальні технічні умови. [Чинний від 1996-01-01]. Київ : Держстандарт України, 1995. 45 с.
12. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : НПАОП 40.1-1.21-98. Вид. офіц. Київ : Основа, 2023. 384 с. (Нормативний документ Держпраці України).

- 13.Методичні вказівки до виконання практичних та самостійних робіт з дисципліни "Теорія електропривода" (для студентів 3, 4 курсів усіх форм навчання напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка» та слухачів другої вищої освіти спеціальності 7.05070203 «Електричний транспорт») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: О. В. Донець, П. М. Пушков, М. І. Шпіка. – Х. : ХНАМГ, 2013. – 39 с.
- 14.Автоматизований електропривод машин та установок: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою
- 15.«Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/ О.В. Чермалих, О.В.
- 16.Данілін, А.В. Босак. Л.В. Торопова; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,09 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 60 с.
- 17.Про затвердження Вимог безпеки та захисту здоров'я під час використання виробничого обладнання працівниками : Наказ Міністерства соціальної політики України від 28.12.2017 № 2072. Редакція від 23.01.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0083-18> (дата звернення: 06.05.2026).
- 18.Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників : НПАОП 0.00-7.11-12. Київ : Форт, 2022. 56 с.
- 19.Правила охорони праці в металургійній промисловості : НПАОП 27.0-1.01-08. Вид. офіц. Київ : Держгірпромнагляд, 2018. 212 с.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

141-7з-2026врб

Автор

141-7з-2026врб

Науковий керівник / Експерт

Модло Є.

ІД документу

334168289

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

Підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту

6/4/2026

Дата редагування

Обсяг знайдених подібностей

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



7199

Кількість слів



59244

Кількість символів

Тривога

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

Заміна букв		5
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		155

Джерела

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

10 найдовших фраз		Копію тексту
#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	РОЗРОБКА МЕТОДУ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА АГЛОМЕРАЦІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА 6/4/2024	131 (1.82 %)

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

Я, Кульбіда Валерій Валерійович, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна бакалаврська робота «Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Асинхронний електропривод охолоджувача агломерату» виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

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

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

Дата 01.06.2026

Підпис