

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

ННІ/факультет	Електромеханічний
Кафедра	Електричної інженерії та автоматизації
Спеціальність	141 «Електроенергетика електротехніка та електромеханіка»
Форма навчання	Денна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Бондаренко Микола Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему «Електромеханічне обладнання ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Електропривод ексгаустеру агломераційного цеху.»

за матеріалами **АрселорМіттал Кривий Ріг**

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник	Д.Т.Н.		Чорний О.П.
	(наук. ступінь, вчене звання)	(підпис)	(прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від _____ 20__ р. № _____

Завідувач кафедри

(підпис)

_____	Є.О. Модло
Наук. ступінь, вчене звання	Ініціали, прізвище

Кривий Ріг – 2026

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Спеціальність 141 «Електроенергетика електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри Модло Є.О.

« » 20 року

З А В Д А Н Н Я

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТА(КИ)

Бондаренка Миколи Андрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи «Електромеханічне обладнання ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Електропривод ексгаустеру агломераційного цеху.»

керівник випускної роботи Чорний О.П., доктор технічних наук.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від « » 20 року №

2. Строк подання студентом випускної кваліфікаційної роботи

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи Ексгаустер агломераційного цеху. Агломераційний цех №2

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналітична частина; Основна частина

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Схема загальна, схема математичних моделей, схема електрична принципова, схема структурна

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Частина 1	Чорний О.П.		
Частина 2	Чорний О.П.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної роботи	Строк виконання етапів випускної роботи	Примітка
1	Аналітична частина		
2	Основна частина		
3	Здача роботи на кафедрі		
4	Захист випускної роботи		

Студент _____ Бондаренко М. А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи _____ Чорний О.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

№ ряд ка	Фор мат	Позначення			Назва	Кіл. листів	№ екз.	Прим.	
1	A3	КРБ.141.161-см.01 Е1			Схема електрична	1			
2					структурна				
3									
4	A3	КРБ.141.161-см.01 Е3			Схема електрична	1			
5					принципова				
6									
7	A3	КРБ.141.161-см.01 СБ			Схема загальна	1			
8									
9	A3	КРБ.141.161-см.01 І3			Схема моделювання	1			
10					електродвигуна				
11									
12	A4	КРБ.141.161-см.01 П3			Пояснювальна записка	49			
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
					КРБ.141.161-см.01 ВР				
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Електромеханічне обладнання ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Електропривод ексгаустеру агломераційного цеху Відомість роботи	Літера		Аркуш	Аркушів
Розроб.		Бондаренко М.А.						4	1
Пров.		Чорний О.П.				ННТІ ДУЕТ			
						Каф.ел.інж. та авт.			
Н.контр.		Чорний О.П.				гр. ЕПА-23ск			
Затв.		Модло Є.О.							

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ.....	6
1.1 Огляд основних виробничих механізмів АЦ №2.....	6
1.2 Технологія виробництва агломерату.....	7
1.3 Плани реконструкції та модернізації устаткування.....	9
1.4 Детальне ознайомлення з механізмом «Експаустер».....	14
1.5 Розрахунок необхідної потужності та вибір електродвигуна.....	16
1.6 Проектні рішення щодо енергозбереження.....	23
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	24
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ.....	25
2.1 Обґрунтування вибору та технічні характеристики високовольтного перетворювача частоти).....	25
2.2. Аналітичний розрахунок показників енергетичної ефективності частотного регулювання	28
2.3 Розрахунок параметрів схеми заміщення та моделювання динамічних режимів пуску електродвигуна	33
2.4 Розробка системи автоматичного керування розрядженням та організація інтерфейсу оператора	40
2.5 Охорона праці.....	45
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49

ВСТУП

«АрселорМіттал Кривий Ріг» — публічне акціонерне товариство; найбільше гірничо-металургійне підприємство в Україні (20 % від усього ринку металопродукції). Входить у склад міжнародної корпорації АрселорМіттал, одного з найбільших іноземних інвесторів в Україні. Місцезнаходження комбінату: місто Кривий Ріг, поблизу житлового масива Червона.

Підприємство у своєму роді унікальне, оскільки охоплює весь виробничий процес від видобутку залізної руди до виготовлення готової металопродукції. «АрселорМіттал Кривий Ріг» виробляє багато видів металопродукції, зокрема: довгомірний прокат, арматура й катанка, сортовий прокату, кутики, смуги та заготовки. Значні виробничі потужності комбінату з повним металургійним циклом розраховані на щорічний випуск понад 6 млн тонн сталі, більше 5 млн тонн прокату й понад 5,5 млн тонн чавуну.

До складу підприємства входять:

- шахтоуправління гірничого департаменту з підземного видобутку руди;
- гірничо-збагачувальний комплекс гірничого департаменту (раніше — -Новокриворізький ГЗК), до складу якого входять два кар'єри (№ 3 та № 2-біс), дві рудозбагачувальні фабрики (РОФ-1, РОФ-2), чотири дробильні фабрики (ДФ-1, ДФ-2, ДФ-3, ДФ-4);
- три агломераційних цехи;
- коксохімічне виробництво;
- металургійне виробництво: два доменні цехи, конвертерний цех, блюмінг, три прокатні цехи.

РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ

1.1 Огляд основних виробничих механізмів АЦ №2

Агломераційний цех № 2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» виробляє офлюсований агломерат для доменних цехів комбінату, забезпечуючи продуктивність 4,770 тис. тон готового агломерату на рік.

До складу агломераційного цеху № 2 входять такі основні об'єкти технологічного призначення:

- корпус аглофабрики №2 (корпус агломерації №2) із відділенням охолодження агломерату;
- корпус первинного змішування №2;
- корпус бункерів повернення;
- корпус дроблення та сортування;
- естакада барабанів гасіння тракту гарячого повернення;
- перевантажувальний вузол агломерату;
- вантажні бункери;
- перевантажувальний вузол № 13А (перевантажувальний вузол ПУВ № 13);
- перевантажувальний вузол № 14 (перевантажувальний вузол ПУВ № 14);
- перевантажувальний вузол №13;
- галерея В-1;
- галерея В-2;
- галерея №31;
- галерея конвеєрна №32;
- галерея №33;
- галереї №35;
- галереї №36;
- галерея А-1;
- галерея А-2;

- галерея ПР-1;
- галерея ПР-2;
- технологічне газоочищення;
- Комплекс електрофільтра №6;
- Комплекс електрофільтра №5;
- Комплекс рукавного фільтра В6;
- Комплекс електрофільтра В3;
- Корпус екстаустерів;
- пробороздільний корпус.

Також на проммайданчику агломераційного цеху № 2 знаходяться об'єкти, які обслуговують технологічний процес:

- центральна витяжна станція (ЦВС-2);
- Корпус фільтрації;
- аспіраційні установки;
- Трансформаторні підстанції;
- ГПП-3;
- ЗРУ-6 кВ та інші.

1.2 Технологія виробництва агломерату

У загальному вигляді процес виробництва агломерату складається з наступних операцій:

- підготовка та дозування сировинних матеріалів у корпусі шихтових бункерів агломераційного цеху №3;
- дозування матеріалів у корпусі бункерів повернення;
- змішування дозованих сировинних матеріалів у корпусі первинного змішування №2;
- обгорткування шихти в корпусі аглофабрики №2 (корпусі агломерації №2);
- укладання шихти на агломашину;
- спікання аглошихти на агломашині;
- дроблення аглоспеку в щоківій дробарці;

- виділення гарячого повернення та сортового агломерату на гуркоті;
- охолодження гарячого агломерату на лінійному охолоджувачі;
- виділення холодного повернення та сортового агломерату на гуркоті;
- транспортування агломерату у бункери дозування агломерату у залізничні вагони;
- постачання агломерату в доменний цех комбінату;
- збирання та відведення газів та пилу після спікання агломерату;
- Повернення уловленого пилу в технологічний процес.

Шихта, до складу якої входять певні технологією компоненти, транспортується конвеєрами ПС2-1 та ПС2-2 з корпусу шихтових бункерів агломераційного цеху №3 в агломераційний цех №2. Конвеєри ПС2-1 і ПС2-2 проходять через корпус бункерів повернення, в якому встановлені 4 накопичувальні бункери з тарілчастими живильниками, що дозують повернення на конвеєри ПС2-1 і ПС2-2.

Потік шихти та повернення надходить у корпус первинного змішування, в якому встановлені два барабанні змішувачі, що перемішують матеріали до отримання однорідного складу. Підготовлена шихта конвеєрами П13-1, П13-2 та А2-1, А2-2 транспортується в корпус агломерації №2 і розподіляється по бункерах, звідки надходить у барабанні окомкователі, потім човниковим розподільником шихта укладається на візки агломераційних машин № 1...6. Там шихта під дією високих температур спікається в агломераційний пиріг.

Агломерат після спікання в агломашинах потрапляє в одновалкову дробарку, а потім на гуркіт, де відбувається поділ на фракції мінус 5 мм і плюс 5 мм.

Надрешітний продукт гуркотів надходить на лінійні охолоджувачі, а потім на гуркоти для відсіву дрібних частин (холодне повернення).

Повернення гарячої фракції мінус 5 мм з-під гуркотів надходить у барабани гасіння гарячого повернення та охолоджується водою до температури нижче 100 °С.

З вузла гасіння гарячого повернення фракція мінус 5 мм конвеєрами В-7 та В-8 (один робочий, один резервний) перевантажується на конвеєри ПС2-3 та ПС2-4 (один робочий, один резервний), на які у перевантажувальному вузлі ПУВ №14 перевантажується холодне повернення з конвеєрів В-3 і В-4 (один робочий, один резервний). Холодне та гаряче повернення конвеєрами ПС2-3, ПС2-4, встановленими в галереях № 35 та № 36, подається в бункери корпусу бункерів повернення.

Готовий агломерат (після відсіву дрібниці) транспортується конвеєрами через перевантажувальний вузол агломерату і надходить: або в навантажувальні бункери, або доменний цех (за допомогою шибєрів здійснюється напрямок вантажопотоків - або на відвантаження в залізничний транспорт, або в доменне виробництво комбінату). Відібрана пробовідбірниками частина агломерату транспортується у проборозробний корпус. Скинутий матеріал при скороченні проб повертається в перевантажувальний вузол агломерату.

Технологічне газоочищення пилогазового потоку агломашин №1-3 в даний час здійснюється наступним чином:

- очищення від великих фракцій у вакуум-колекторі, з поверненням уловленого пилу в технологічний процес стрічковими конвеєрами;
- наступний ступінь очищення великої та середньої фракцій відбувається у групі одиночних циклонів (10 шт.);
- очищення дисперсного пилу, що залишився, відбувається в трубах «Вентурі» і скруберах - краплеуловлювачах.

Уловлений пил видаляється гідрозмивом, по шламових лотках і шламопроводах, в шламовідстійник.

1.3 Плани реконструкції та модернізації устаткування

Основними проектними рішеннями, реконструкції будівель та споруд комплексу агломашин № 1-3 агломераційного цеху № 2 передбачається:

1. Модернізація агломашин №1-3 із збільшенням шару спікання до 450 мм. Для цього проводиться заміна наступного технологічного обладнання агломашин:

- встановлення нового запального горна із сучасною енергоефективною системою запалювання;
- укриття агломашины;
- тічки комплексу агломашин №1-3;
- каркасів завантажувальної, розвантажувальної головної, середньої та хвостової частин агломашин;
- системи мастила комплексу агломашин №1-3.
- заміна спікальних візків ТС-2,5 на нові;

2. Установка нового колектора газів, що відходять, включає:

- встановлення нових вакуум-камер;
- встановлення нових патрубків;
- встановлення нових пилових бункерів із двоклапанними затворами;
- реконструкцію конвеєрної системи транспортування пилу з-під пилових бункерів газового колектора.

3. Реконструкція існуючих лінійних охолоджувачів в обсязі:

- заміна повітряних камер, включаючи систему ущільнення та забезпечення з'єднань головної магістралі з повітряними камерами в межах одного відгалуження;
- встановлення нової системи збирання просипу агломерату (скреперний конвеєр);
- для забезпечення ефективного охолодження агломерату передбачається встановлення п'яти нових та трьох існуючих дутьових вентиляторів;
- з метою боротьби з вібрацією у проекті намічено встановлення основного та допоміжного обладнання на автономні залізобетонні фундаменти. Вентилятори підключаються до газоходів через гнучкі вставки;
- встановлення маслостанції для централізованої системи змащення деталей лінійного охолоджувача, що обертаються.

Маслоприміщення оснащено системою автоматичного пожежогасіння "МВП "Спрут-90" з ЦД". Детальний опис системи автоматичного запуску пожежогасіння наведено в комплекті ПС, ПТ.

4. Установка системи пневмотранспорту транспортування пилу від проєктованих електрофільтрів у корпус подачі пилу та вапна та проєктований проміжний силос.

5. Будівництво нового проміжного силосу у районі хвостової частини конвеєра В-9.

6. Заміна двоступінчастої мокрої системи очищення відхідних газів на одноступінчасту суху систему очищення газів, що відходять в електрофільтри;

7. Заміна ексгаустерів №1-3 у корпусі ексгаустерів;

8. Будівництво нових допоміжних об'єктів: компресорної №1, ПСУ 123, газоаналізаторної №1, матеріального складу електрофільтрів №1-6.

Технологічне газоочищення

Реконструкцією технологічного газоочищення агломашин №1, №2 та №3 передбачається застосування апаратів сухого газоочищення – електростатичних фільтрів.

Очищення технологічних газів агломераційного виробництва у світовій практиці здійснюється електрофільтрами вже понад 30 років. Наявний досвід їхньої роботи на аглофабриках говорить про їхню високу ефективність. У цій роботі передбачається заміна фізично зношеного і морально застарілого «морого» газоочищення на сухе, з використанням електростатичних фільтрів компанії Ekorplant (Італія).

Заміна існуючого «морого» газоочищення високоефективним газоочищенням сухого типу дозволить забезпечити виконання збільшених нормативних вимог до вмісту шкідливих компонентів у технологічних газах, що викидаються в атмосферу.

Застосування як газоочисного обладнання сухого електростатичного фільтра обумовлено такими позитивними факторами:

- висока ефективність очищення (до 98,75%), особливо за дрібними фракціями, що важливо у зв'язку зі збільшенням у шихті частки дрібнодисперсних залізовмісних матеріалів;

- зниження опору газового тракту за рахунок нижчого аеродинамічного опору та, як наслідок, зниження витрати електроенергії;
- відмова від використання оборотної води як при очищенні, так і при транспортуванні уловленого пилу (90 м3/год);
- збільшення тривалості міжремонтного періоду (при низькій швидкості газового потоку всередині електрофільтра знижується ступінь зносу його елементів).

Проектована система газоочищення включає:

1. Газоходи «брудного» газу, що прокладаються від нових газових колекторів агломашин до електростатичних фільтрів. Газоходи мають умовний діаметр від 3000 до 3800 мм. На газоходах встановлюються компенсатори та опори. Газоходи теплоізолюються по всій довжині.

2. Електростатичні фільтри компанії Ekorplant (Італія), продуктивністю до 12000 м3/хв.

3. Газоходи чистого газу, що прокладаються від електростатичних фільтрів до ексгаустерів. На газоходах встановлюються нові дросель-клапани для можливості запуску ексгаустерів та регулювання продуктивності системи газоочищення. На газоходах встановлюються компенсатори та опори. Газоходи теплоізолюються по всій довжині.

4. Ексгаутери 9000-11-5. Зношені існуючі ексгаутери, в рамках реконструкції, що виконується, замінюються новими.

Ексгаустер забезпечує розрядження у вакуум-камерах агломашини та долає аеродинамічний опір газового тракту, включаючи електростатичний фільтр.

5. Існуючі борови за ексгаустерами та викидні труби, висотою 120 м, зберігаються та використовуються для викиду газів від роботи шести агломашин.

Електрофільтр є універсальним апаратом очищення промислових газів від твердих частинок. До переваг електрофільтра ставляться:

- Високий ступінь очищення, що досягає до 98,75%;
- Низькі енергетичні витрати на уловлювання частинок за рахунок низького газодинамічного опору апарату;
- можливість уловлювання частинок розміром 100-0,1 мкм та менше;

- очищати гази з температурою 500 °C та більше.

До недоліків електрофільтра можна віднести високу чутливість процесу електростатичної фільтрації газів до відхилень від заданих параметрів технологічного режиму.

Електрофільтр складається з наступних основних частин: металевого корпусу з розміщеними всередині нього осадовими і коронуючими електродами, холодного укриття, двох рядів бункерів для збору пилу, двох ланцюгових конвеєрів для переміщення уловленого пилу, двох двоклапанних затворів для можливості вивантаження уловленого пилу без втрати герметичності .

На вході в електрофільтр встановлено газорозподільний пристрій, що забезпечує рівномірне розподілення газів в активній зоні апарату.

Сутність процесу електричної фільтрації газів ось у чому. Пилегазоповітряна суміш, що містить зважені частинки, проходить через систему, що складається із заземлених осаджувальних електродів і розміщених на деякій відстані (міжелектродним проміжком) електродів, що коронують, до яких підводиться випрямлений електричний струм високої напруги. При досить великій напрузі, прикладеному до міжелектродного проміжку, у поверхні коронуючого електрода відбувається інтенсивна ударна іонізація газу, що супроводжується виникненням коронного розряду (корони), який на весь міжелектродний проміжок не поширюється і згасає в міру зменшення напруженості електричного поля в напрямку. Газові іони різної полярності, що утворюються в зоні корони, під дією сил електричного поля рухаються до різноіменних електродів, внаслідок чого міжелектродний проміжок виникає електричний струм, званий струмом корони. Частки, що уловлюються, через адсорбцію на їх поверхні іонів набувають у міжелектродному проміжку електричного заряду і під впливом сил електричного поля рухаються до електродів, осаджуючись на них. Основна кількість частинок осаджується на розвиненій поверхні осадових електродів, менша частина їх потрапляє на коронуючі електроди. Для ефективнішого уловлювання дрібних частинок на четвертому електрополі компанія Ekorplant передбачає спеціальну систему регулювання величини електричного струму високої напруги. По мірі

накопичення на електродах осаджені частинки видаляються струшуванням за допомогою спеціальних механізмів.

1.4 Детальне ознайомлення з механізмом «Ексфаустер»

Темою дипломного проекту став механізм під назвою «Ексфаустер», який зображений на рис. 1.1



Рис.1.1. Ексфаустер агломашини

Ексфаустер – це один з головних елементів агломераційної установки. Ексфаустер виконує дві основні функції:

- Засмоктування в шар агломерату, що спікається достатньої кількості повітря;
- Відсмоктування продуктів хімічних реакцій процедури спікання;

Тобто ексфаустер створює сприятливі умови для перебігання процесу агломерації та видаляє продукти горіння. Також ексфаустер відіграє важливу роль в системі газоочищення просмоктуючи повітря через систему фільтрації.

Існуючий ексгаустер №1 являє собою агрегат, що складається з відцентрового вентилятора, редуктора, приводного електродвигуна, масляної системи, органів захисту та контролю.

В якості ротору ексгаустера використовується «Нагнітач відцентровий 9000-11-5» 1988 року випуску. Механічне обертаюче зусилля передається на ротор через редуктор мультиплікатор, який має певні механічні витрати при передачі. Це знижує ефективність системи в цілому. Також редуктор потребує змащування та обслуговування, що знижує надійність системи.

Для приводу ексгаустера №5 застосовується синхронний електродвигун типу СДС317-64-6УХЛ4 з нерегульованою швидкістю обертання. Основні характеристики електродвигуна приведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Потужність, кВт	Напруга, В	Струм статора, А	Частота обертів, об/хв	Струм ротора, А	cos φ	Пусковий струм, Ін
4000	10000	270	1000	290	0,9	6.5

Для роботи електродвигун синхронного типу потребує подання напруги на ротор, цю задачу виконує щітково-колекторний вузол. Щітки забезпечують механічний ковзний контакт з ротором, через що зношуються у процесі експлуатації електродвигуна. Такий уразливий вузол потребує постійного догляду та обслуговування, що знижує надійність системи.

Запуск електродвигуна здійснюється прямим включенням вимикача на мережу 10 кВ, що супроводжується великим сплеском струму та, відповідно, великими ударними електродинамічними зусиллями в обмотках електродвигуна, що знижує термін служби електродвигуна. Також у механічних вузлах ексгаустера виникають значні крутні моменти. Це знижує термін служби електродвигуна та механічних вузлів ексгаустера. Також, при пусках виникають просідання напруги в мережі, що негативно позначається на роботі інших електроспоживачів агломераційного цеху.

При короткочасних простоях агломашины, тривалістю менше однієї години (заміна повних вагонів, заміна зношених палет, відсутність порожніх вагонів тощо) відключення ексгаустера від мережі не виконується. Під час поточних простоїв ексгаустер працює на закриту напірну шиберну засувку, при цьому навантаження на електродвигун знижується незначно. Такий режим роботи є неекономічним, призводить до зниження ККД ексгаустера та непродуктивних витрат електроенергії.

1.5 Розрахунок необхідної потужності та вибір електродвигуна

Розрахунок потужності двигуна починається з ознайомлення з кінематичною схемою майбутнього ексгаустера (рис.1).

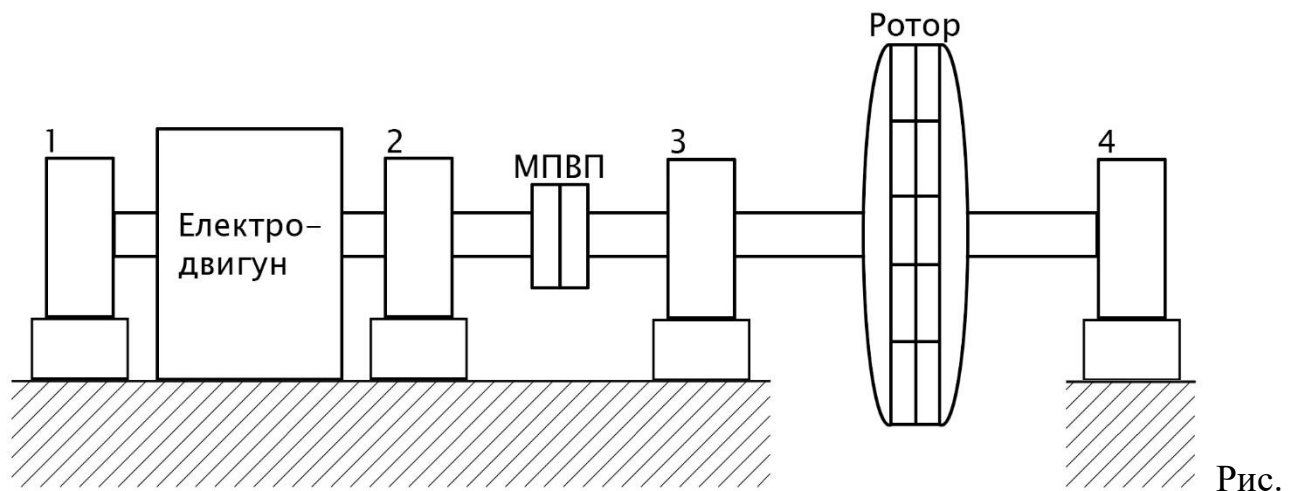


Рис.1.2 Кінематична схема ексгаустера

На схемі можна побачити:

1. Електродвигун
2. Муфта пружна втулково-пальцева (МПВП)
3. Ротор ексгаустера
4. Підшипники електродвигуна (1;2)
5. Підшипники ротору (3;4)

Як видно зі схеми, момент сили електродвигуна передається на ротор ексгаустера через з'єднувальну пружну втулко-пальцеву муфту. Таке рішення обумовлено високою ефективністю передачі обертового моменту простотою монтажу і обслуговування та надійністю.

В якості ротора технічним відділом був обраний «Ексгаустер DHRV 45B-1800» від виробника Venti Oelde (Німеччина).

Основні характеристики ротора наведені у таблиці:

Таблиця 1.1

Робоча характеристика	Позначення	Значення	Од. вим.
Об'ємна витрата, нормальний стан	V _{norm}	422.703	Нм³/год
Об'ємний потік, вхід	V ₁	720.000	м³/год
Об'ємний потік, вхід	V _e	720.000	м³/год
Масовий потік	m	552.500	кг/год
Масовий потік пилу	m _{st}	36,0	кг/год
Тиск повітря	Δp _b	100.318	Па
Різниця тисків (1-2), статична	Δp ₁₋₂	13.240	Па
Статичний тиск (із боку всмоктування)	Δp _e	92.154	Па
Статичний тиск (із боку нагнітання)	Δp _a	105.394	Па
Внутрішні втрати з боку всмоктування (1 - E)	Δp _{ie}	0	Па
Внутрішні втрати з боку нагнітання (A - 2)	Δp _{ia}	0	Па
Динамічний тиск (із боку всмоктування)	Δp _{de}	376	Па
Динамічний тиск (із боку нагнітання)	Δp _{da}	562	Па
Швидкість надходження	c _e	31,30	м/с
Швидкість витікання	c _a	36,66	м/с
Температура (вхід)	t _e	150,00	°C
Газова стала	R	283,80	Нм/кг К
Питома робота потоку	Y _t	16.701	Нм/кг
Загальне збільшення тиску (E - A)	Δp _t	13.426	Па
Загальне збільшення тиску при щільності ρ ₀ = 1,205 кг/м³	Δp _{t1,205}	20.180	Па
Щільність (із боку всмоктування)	ρ ₁	0,767	кг/м³

Щільність (із боку всмоктування)	ρ_e	0,767	кг/м ³
Щільність (із боку нагнітання)	ρ_a	0,836	кг/м ³
Число обертів	n_v	996	об./хв
Діаметр робочого колеса	D_2	3,230	м
Коефіцієнт корисної дії	η_w	81,83	%
Корисна потужність	P_n	2.563,35	кВт
Потужність вала	P_w	3.132,36	кВт

Для забезпечення заданих технологічних параметрів роботи тягодутьової машини виконується перевірочний розрахунок її потужності та крутного моменту на валу. Секундна об'ємна витрата переміщуваного середовища на вході в нагнітач визначається за формулою:

$$Q_v = \frac{V_1}{3600} = \frac{720000}{3600} = 200 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Теоретична (розрахункова) потужність нагнітача розраховується за класичною залежністю:

$$P_{calc} = \frac{Q_v * \Delta p_t}{\eta_\omega} = \frac{200 * 13426}{0,8183} = 3281437 \text{ Вт}$$

де Δp_t — загальне збільшення тиску (повний тиск нагнітача), Па;
 η_ω — коефіцієнт корисної дії (ККД) машини.

Для врахування реальних властивостей димового газу за робочої температури, ефектів стисливості та мікропоправок на механічні втрати вводиться поправочний коефіцієнт зміни питомої роботи потоку. Даний коефіцієнт відображає відношення питомої роботи машини за базових (стандартних) умов до питомої роботи за реальних експлуатаційних умов:

$$k = \frac{\left(\frac{\Delta p_{t1,205}}{\rho_0}\right)}{\left(\frac{\Delta p_t}{\rho_1}\right)} = \frac{\left(\frac{20180}{1,205}\right)}{\left(\frac{13426}{0,767}\right)} = \frac{16746,88}{17504,56} = 0,955$$

Таким чином, дійсна необхідна потужність на валу нагнітача з урахуванням адаптаційного коефіцієнта становить:

$$P_{\omega} = \frac{Q_v * \Delta p_t}{\eta_{\omega}} * k = \frac{200 * 13426}{0,8183} * 0,955 = 3132363 \text{ Вт}$$

Отримана потужність повністю відповідає паспортній специфікації обладнання.

Номінальна кутова швидкість обертання вала визначається за формулою:

$$\omega_{nom} = \frac{2 * \pi * n_{nom}}{60} = \frac{2 * 3,14159 * 996}{60} = 104,301 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

де n_{nom} — номінальне число обертів робочого колеса, об./хв.

Номінальний крутний момент на валу двигуна, необхідний для подолання аеродинамічного опору та забезпечення сталого обертання робочого колеса, розраховується як відношення потужності на валу до кутової швидкості:

$$M_{nom} = \frac{P_{\omega}}{\omega_{nom}} = \frac{3132363}{104,301} = 30031,991 \text{ Н * м}$$

ККД муфт МПВП, як зазначено вище, зазвичай в межах 0.96...0.98. Для розрахунку було взяте значення ККД муфти $\eta_m=0.97$.

Тоді еквівалентна потужність на валу двигуна:

$$P_e = \frac{P_{\omega}}{\eta_m} = \frac{3132363}{0,97} = 3229240 \text{ Вт}$$

Тепер є можливість обчислити каталожну потужність ($P_{кат}$). Для цього потрібно врахувати коефіцієнт запасу двигуна, для підвищення надійності електроприводу, компенсації динамічних моментів якими знехтували при проектуванні і т.д. Зазвичай коефіцієнт запасу для двигунів подібної потужності вибирається в межах 1.05...1.1. Для розрахунку був вибраний коефіцієнт запасу $k_3=1.07$.

Тоді каталожна потужність дорівнює:

$$P_{кат} = P_e * k_3 = 3229240,2 * 1,07 = 3455,3 \text{ кВт}$$

Останнім критерієм для підбору майбутнього електродвигуна став вибір режиму роботи. Згідно з технологією виробництва екстаустер повинен постійно працювати у неперервному циклі спікання агломерату, тому був обраний режим S1 (Тривалий номінальний режим роботи).

Далі з каталогу був підібраний електродвигун типу 1RQ4 636-6JE80-Z (рис.1.3) виробництва компанії Siemens (Німеччина).



Рис.1.3. Електродвигун Siemens 1RQ4 636-6JE80-Z

Основні характеристики електродвигуна приведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

1.	Найменування показників	Одиниці вимірювання	Значення
2.	Потужність	кВт	3 500
3.	Напруга живлення	В	10 000
4.	Частота мережі	Гц	50
6.	Номінальний струм	А	245
7.	Швидкість обертання валу	об/хв	994
8.	Напрямок обертання	Проти годинникової стрілки	
9.	Коефіцієнт потужності	cos φ	0,85
10.	Коефіцієнт корисної дії	ККД, %	96,9
11.	Тип	-	МOT
12.	Ступінь захисту обладнання	IP	55

13.	Схема з'єднання обмоток статор/ротор		Y/Y
14.	Режим тривалості роботи	-	S1
15.	Клас допустимої стійкості ізоляції	-	F (155° C)
16.	Клас тривалої стійкості ізоляції	-	B (130° C)
17.	Середовище охолодження	вид	Повітряне, примусове
18.	Вимоги конструктивного виконання	-	ІМ В3/ІМ 1001
19.	Висота встановлення над рівнем моря, м		До 1 000
20.	Вага ротора	кг	4 292
21.	Загальна вага	кг	14700

Габаритне креслення електродвигуна представлено на рис. 1.4

1.6 Проектні рішення щодо енергозбереження

На сучасному етапі модернізації металургійного виробництва екстаутери агломераційних машин є найбільш енергомісткими агрегатами, які споживають значну частку електроенергії агломераційного цеху. Традиційне регулювання продуктивності таких великих тягодутьових машин за допомогою направляючих апаратів (шиберів) є вкрай неефективним через високі аеродинамічні втрати тиску та штучне підвищення опору мережі.

В даному проекті пропонується впровадження повнофункціонального частотно-регульованого електроприводу (ЧРП) на базі високовольтного перетворювача частоти SINAMICS PERFECT HARMONY GH180 компанії Siemens. Необхідність застосування ЧРП обумовлена специфікою вентиляторного навантаження агрегату та наявністю двох принципово різних технологічних режимів роботи АЦ-2:

1. Поточний режим експлуатації: Технологічна карта передбачає роботу зі зниженою висотою шару шихти (320 мм), що вимагає підтримки розрідження в колекторі на рівні 8,0 кПа. Замість неефективного гасіння надлишкового тиску засувкою, використання ЧРП дозволяє знизити оберти агрегату до фактичної технологічної потреби, що є класичним і найбільш ефективним способом енергозбереження для відцентрових машин.
2. Перспективна модернізація: При подальшій реконструкції фабрики та збільшенні шару шихти до 400 мм газодинамічний опір значно зростає, що вимагатиме підвищення розрідження до номінального рівня. Впроваджений частотний перетворювач забезпечить плавне виведення електроприводу на номінальні параметри роботи без необхідності заміни або капітальної перебудови самого тягодутьового комплексу.

Окрім базового регулювання швидкості, перехід до концепції ЧРП забезпечує усунення важких пускових струмів у заводській мережі 10 кВ, мінімізує механічні ударні моменти при розгоні важкого ротора екстаустера.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У розділі 1 був розглянутий технологічний процес виробництва агломерату, основні виробничі механізми, їх порядок в ієрархії та виконувані ними функції. Зокрема більш детально було розглянуто ексгаустер визначено його характеристики. Також проведений аналіз основних проектних рішень щодо модернізації системи виробничого устаткування АЦ-2.

Розглянуто кінематичну схему ексгаустера. За характеристиками ротору ексгаустера розраховано потрібну потужність електродвигуна, з урахуванням втрат енергії в механічних частинах. За результатами розрахунку був підібраний підходящий двигун типу 1RQ4 636-6JE80-Z потужністю 3500 кВт, виробництва компанії Siemens (Німеччина). Двигун задовільняє усім вимогам технологічного процесу, таким як режим роботи, потужність, клас ізоляції, номінальна напруга і т.д.

Запропонований захід з енергозбереження – високовольтного перетворювача частоти SINAMICS PERFECT HARMONY GH180 для керування електродвигуном ексгаустера. Сформульовано основні технологічні переваги частотного регулювання швидкості для відцентрових нагнітачів, ліквідацію пускових перевантажень мережі та забезпечення гнучкої адаптації агрегату до перспективної інтенсифікації виробництва.

РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ

2.1 Обґрунтування вибору та технічні характеристики високовольтного перетворювача частоти.

Для реалізації ефективного частотного регулювання продуктивності ексгаустера агломераційної машини в умовах змінного технологічного навантаження необхідний вибір високовольтного перетворювача частоти (ПЧ), який відповідає жорстким промисловим вимогам щодо надійності, якості вихідної напруги та електромагнітної сумісності з заводською мережею електропостачання.

Вихідними даними для вибору частотного перетворювача є параметри раніше підбраного високовольтного асинхронного електродвигуна типу 1RQ4 636-6JE80-Z виробництва Siemens:

- Номінальна потужність - 3500 кВт;
- Номінальна напруга – 10 кВ;
- Номінальний струм - 245 А;
- Частота мережі – 50 Гц;
- Характер навантаження — вентиляторний (квадратичний залежний момент на валу).

Аналіз сучасного ринку високовольтної перетворювальної техніки показує, що для напруги 10 кВ найбільш доцільним є застосування перетворювачів із багатоуровневою топологією послідовно з'єднаних низьковольтних силових комірок. Серед доступних рішень світового рівня цим критерієм ідеально відповідає серія високовольтних інверторів SINAMICS PERFECT HARMONY GH180 компанії Siemens.

Основним критерієм вибору конкретної модифікації ПЧ є відповідність його номінального тривалого струму номінальному струму статора електродвигуна з урахуванням необхідного технологічного запасу на можливі

короткочасні перевантаження агрегату. Згідно з каталогом технічних даних виробника для номінальної напруги мережі та приводу 10,0 кВ, найближчим стандартним типорозміром, що повністю покриває струм двигуна 245 А, є перетворювач із номінальним струмом комірок 260 А та вихідним номінальним струмом 245 А.

Детальні технічні характеристики обраного високовольтного перетворювача частоти SINAMICS PERFECT HARMONY GH180 зведені в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

Найменування параметра	Значення
Номінальна напруга живлення мережі	10.0 кВ
Номінальна вихідна напруга на двигун	10.0 кВ
Номінальний струм силових комірок інвертора	260 А
Номінальний вихідний струм ПЧ	245 А
Повна вихідна потужність перетворювача	4240 кВА
Номінальна потужність підключаємого двигуна	3600 кВт
Потужність вбудованого ізолюючого трансформатора	4500 кВА
Базовий замовний номер серії (MLFB)	6SR4502-5JM44-5BF1
Габаритний розмір корпусу (Типорозмір)	I
Загальна маса конструкції (нетто)	10458 кг
Тип охолодження силової частини	Повітряне примусове

Технічне обґрунтування застосування перетворювача частоти саме цієї серії базується на його унікальних конструктивних та схемотехнічних особливостях,

які дозволяють інтегрувати систему ЧРП у діючу мережу підприємства без додаткових капітальних витрат:

1. Концепція «Clean Power» (Чиста енергія) на вході: ПЧ оснащений інтегрованим сухим ізолюючим трансформатором із багатообмотковою вторинною структурою. Фазовий зсув між вторинними обмотками забезпечує багатопульсну схему випрямлення (для даного класу напруги реалізується 30-пульсна або вища схема). Це дозволяє практично повністю взаємно компенсувати вищі гармоніки струму на вході ПЧ. Рівень гармонійних спотворень (THD) жорстко відповідає вимогам міжнародного стандарту IEEE 519, що виключає необхідність встановлення додаткових дорогих вхідних фільтрів та захищає сусіднє чутливе обладнання підстанції від завад.
2. Концепція «Perfect Harmony» (Ідеальна синусоїда) на виході: Багатоуровневе формування вихідної напруги шляхом послідовного включення низьковольтних IGBT-комірок дозволяє отримати практично ідеальну синусоїдальну форму струму та напруги на виході інвертора. Швидкість наростання напруги dv/dt мінімізована до безпечних значень, що знімає проблему підвищеного нагріву та передчасного старіння ізоляції обмоток статора двигуна. Система не генерує значних синфазних напруг, що захищає підшипникові вузли ексгаустера від проходження підшипникових струмів та ерозії. Це дозволяє використовувати стандартний електродвигун без спеціальних вихідних синус-фільтрів та без обмеження довжини силового кабельного кабелю.
3. Висока живучість системи (Функція Cell Bypass): Специфіка агломераційного виробництва вимагає безперервності технологічного процесу ексгаустера. Перетворювач частоти SINAMICS GH180 оснащений інтелектуальною системою автоматичного шунтування пошкоджених комірок (Cell Bypass). У разі виходу з ладу будь-якого силового напівпровідникового елемента в одній із комірок, система керування за

кілька мілісекунд ізолює та закорочує цю комірку. Привод продовжує роботу без зупинки технологічного процесу, лише незначно знижуючи максимальний запас вихідної напруги, що є критично важливим для надійності всього агломераційного цеху.

Таким чином, обраний частотний перетворювач за своїми струмовими, потужнісними та конструктивними характеристиками є оптимальним технічним рішенням для побудови енергоефективної та надійної системи керування високовольтним електроприводом екстаустера.

2.2. Аналітичний розрахунок показників енергетичної ефективності частотного регулювання

Для кількісної оцінки потенціалу енергозбереження та визначення доцільності впровадження високовольтного частотно-регульованого електроприводу виконано порівняльний аналіз енергетичних режимів роботи комплексу екстаустера для першого (поточного) етапу експлуатації агломашини. Даний етап характеризується висотою шару шихти 320 мм та вимагає стабільного технологічного розрідження в колекторі газу на рівні 8,0 кПа.

Розрахунок базується на порівнянні двох методів контролю продуктивності тягодутьової машини:

1. Традиційне дроселювання потоку за допомогою зміни положення направляючого апарату (робота на засувку) при постійній номінальній частоті обертання двигуна = 996 об/хв.
2. Регулювання продуктивності шляхом зміни частоти обертання ротора за допомогою перетворювача частоти SINAMICS PERFECT HARMONY GH180 при повністю відкритому шибері.

При регулюванні засувкою штучно збільшується аеродинамічний опір газоходу, що призводить до значних втрат тиску безпосередньо на робочих органах шибера. За даними заводу-виробника механічного обладнання, повний тиск, який розвиває екстаустер на закритий шибер для забезпечення необхідної

витрати, досягає величини 14300 Па. Залежність споживання потужності з мережі та зміщення робочої точки нагнітача при роботі на засувку наведено на рисунку 2.1.

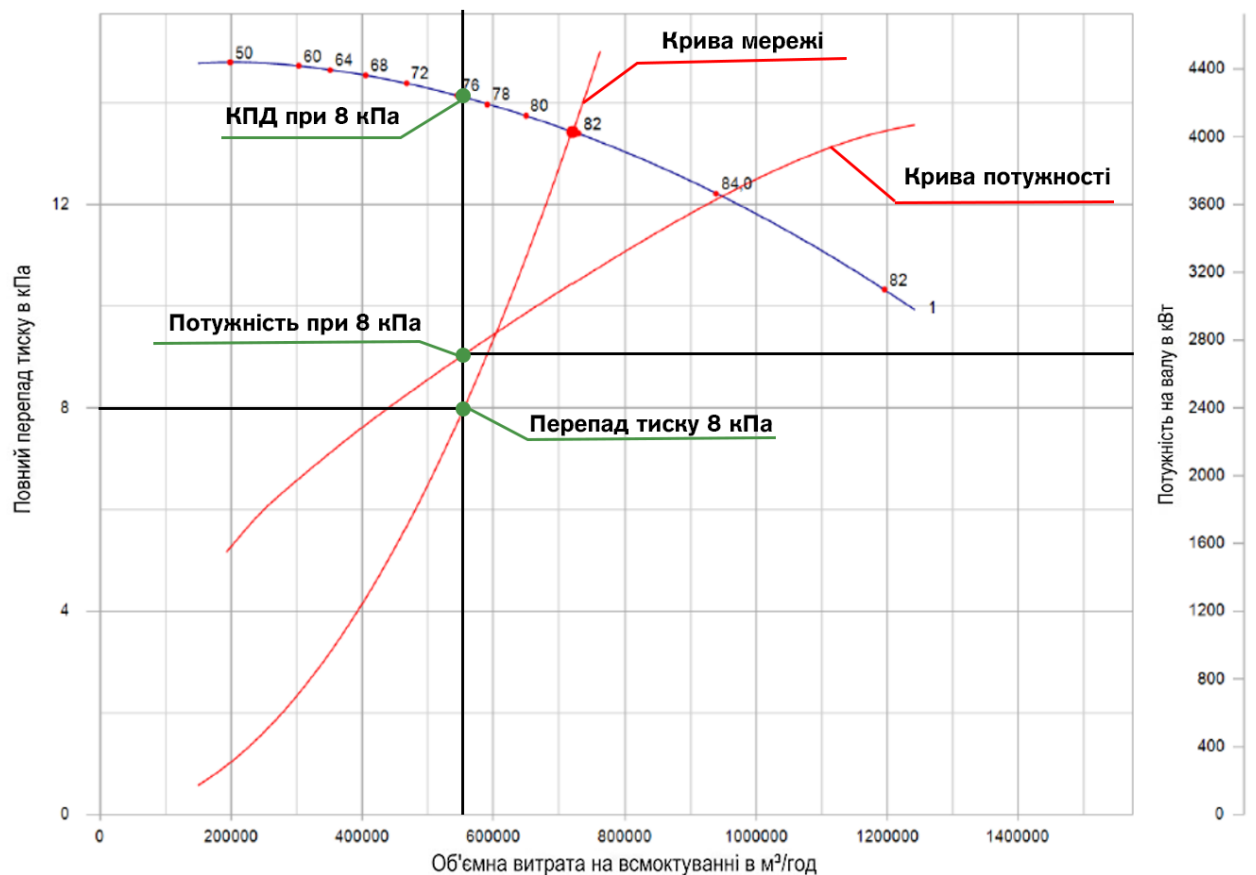


Рис.2.1. Характеристики роботи ексгаустера при дросельному регулюванні (на засувку)

При переході на частотне регулювання робоча точка агрегату переміщується по природній характеристиці мережі. Необхідна продуктивність ексгаустера для забезпечення технологічного розрідження 8000 Па визначається згідно із пропорційною залежністю характеристик відцентрових нагнітачів:

$$V_{\text{чрп}} = V_{\text{ном}} * \sqrt{\frac{\Delta p_{\text{чрп}}}{\Delta p_{\text{ном}}}} = 720000 * \sqrt{\frac{8000}{13426}} = 555781,6 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$$

Величина додаткового штучного дросельного опору, який повністю ліквідується завдяки впровадженню частотного перетворювача, становить:

$$\Delta p_{\text{дрос}} = \Delta p_{\text{зас}} - \Delta p_{\text{чрп}} = 14300 - 8000 = 6300 \text{ кПа}$$

Потужність, що споживається синхронним двигуном з мережі при шиберуванні (згідно із заводськими навантажувальними кривими), становить:

$$P_{\text{зас}} = 2700 \text{ кВт}$$

Завдяки дії законів афінності для відцентрових гідродинамічних машин, споживана потужність на валу ексгаустера при частотному регулюванні знижується пропорційно кубу зміни продуктивності:

$$P_{\text{чрп}} = P_{\text{ном}} * \left(\frac{V_{\text{чрп}}}{V_{\text{ном}}} \right)^3 = 3132,363 * \left(\frac{555781,6}{720000} \right)^3 = 1440,745 \text{ кВт}$$

Таким чином, чистий ефект безперервного збереження активної потужності на валу двигуна лише за рахунок ліквідації втрат на дроселювання та переходу на знижену частоту обертання становить:

$$\Delta P = P_{\text{зас}} - P_{\text{чрп}} = 2700 - 1440,745 = 1259,255 \text{ кВт}$$

Зміна швидкості обертання також веде до розвантаження механічної частини. Залежність моменту опору ексгаустера має чітко виражений вентиляторний (квадратичний) характер. При зниженні обертів для утримання тиску 8,0 кПа необхідний статичний момент опору механізму становить лише 55 % (рисунок 2.2) від номінального крутного моменту нагнітача (30031,99 Н·м):

$$M_{\text{чрп}} = 0,55 * M_{\text{вн} \cdot \text{ном}} = 0,55 * 30031,99 = 16517,595 \text{ Н} * \text{м}$$

Крива обертового моменту навантаження від швидкості

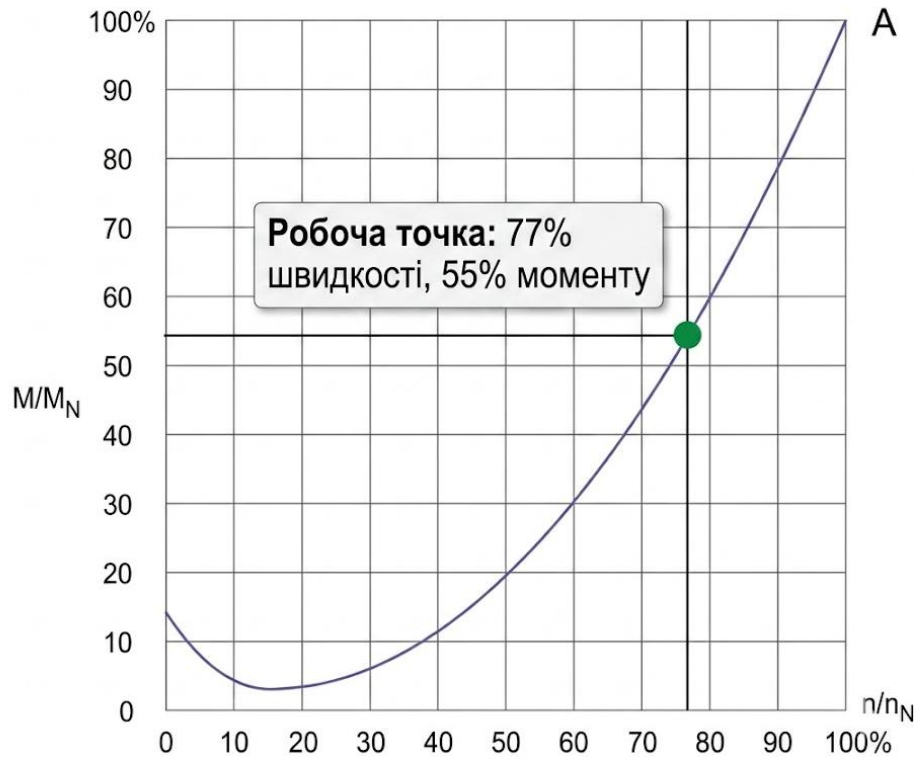


Рис.2.2 Момент навантаження ексгаустера при 77% швидкості

Необхідна частота обертання робочого колеса нагнітача для забезпечення фактично необхідної (зниженої) об'ємної витрати середовища визначається на основі лінійної залежності центробіжних машин відносно номінальних параметрів:

$$n_{\text{чрп}} = n_{\text{ном}} * \left(\frac{V_{\text{чрп}}}{V_{\text{ном}}} \right) = 996 * \left(\frac{555700}{720000} \right) = 768,831 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$$

Для визначення річного ефекту енергозбереження та терміну окупності капітальних інвестицій у дане екологічно-орієнтоване рішення враховується тривалість безперервної роботи агломераційної машини протягом року, яка для умов металургійного підприємства становить 8400 годин.

Річна економія електричної енергії в результаті модернізації приводу складе:

$$\Delta W_{\text{рік}} = \Delta P * T_{\text{рік}} = 1259,255 * 8400 = 10577743 \text{ кВт} * \text{год}$$

Для розрахунку грошового еквівалента заощаджених коштів використовується середньозважена вартість електроенергії для промислових споживачів першого класу напруги в Україні. Розрахунок середньої вартості

базується на фактичних погодинних цінах ринку «на добу наперед» (РДН) станом на 2026 рік. Детальний помісячний та погодинний розподіл тарифних ставок електроенергії, що використовувався для фінансово-економічного аналізу, наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Погодинні ціни купівлі- продажу електричної енергії на РДН 2026 (середнє за місяць)	Години	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Середнє
	1	7027	9457	8150	5198	7859	7538
	2	5659	7753	5729	4484	5854	5896
	3	5570	7109	4988	4138	4258	5213
	4	5342	6464	4611	3881	4005	4861
	5	5276	5953	4670	3911	3904	4743
	6	5403	6858	5617	4447	4903	5446
	7	5826	7286	7544	5174	6051	6376
	8	6769	9896	9142	6221	6124	7630
	9	8264	11161	7839	6091	5431	7757
	10	8874	10792	5981	5050	3670	6874
	11	8792	9668	3772	3060	2003	5459
	12	7953	8296	2862	1529	1128	4353
	13	7651	7647	2098	933	934	3853
	14	7660	7539	2253	862	1001	3863
	15	7981	8908	2798	1054	974	4343
	16	7885	10436	4255	1191	1111	4976
	17	8665	13077	7044	2290	1580	6531
	18	12549	13862	10774	5613	3403	9240
	19	12806	13938	12925	9484	5679	10966
	20	12245	13725	13688	11710	8547	11983
	21	11841	13185	13571	12777	10364	12348
	22	11169	12090	12056	12486	11776	11915
	23	9797	10830	9739	11226	9967	10312
	24	7072	8928	7731	6579	7901	7642
Середнє		8253	9786	7076	5391	4934	7088

Виходячи із середньої вартості електроенергії, отриманої в результаті аналізу даних таблиці 2.2 середнє значення становить 7088/МВт*год, річний економічний ефект у грошовому вираженні становить:

$$\Delta E_{\text{рік}} = \Delta W_{\text{рік}} * \left(\frac{C_{\text{ее}}}{10^3} \right) = 10577743 * \left(\frac{7088}{10^3} \right) = 74975039 \text{ грн}$$

Орієнтовна капітальна вартість реалізації даного проекту модернізації «під ключ» — яка включає безпосередню закупівлю високовольтного перетворювача

частоти SINAMICS PERFECT HARMONY GH180 серії 6SR4502, силових високовольтних кабелів, проектування, будівельно-монтажні роботи, інтеграцію в існуючу АСУ ТП цеху та пусконаладження — оцінюється у суму ~1 M\$ (що в еквіваленті за курсом Національного банку України на 25.05.2026 становить 44261900 грн).

Простий термін окупності (ТО) запропонованого енергозберігаючого заходу визначається за формулою:

$$TO = \frac{K_{\text{проект}}}{\Delta E_{\text{рік}}} = \frac{44261900}{74975039} = 0,59 \text{ року}$$

Таким чином, навіть за умови значних первинних капітальних інвестицій у високовольтне обладнання компанії Siemens, проект частотно-регульованого приводу ексгаустера демонструє надзвичайно високу економічну ефективність за рахунок колосальних обсягів заощадження енергії (понад 10,5 млн кВт·год на рік), повністю окупаючи себе в найкоротші терміни.

2.3 Розрахунок параметрів схеми заміщення та моделювання динамічних режимів пуску електродвигуна

Для дослідження перехідних процесів та побудови адекватної математичної моделі асинхронного високовольтного двигуна необхідно визначити параметри його схеми заміщення. Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна наведена на рисунку 2.3.

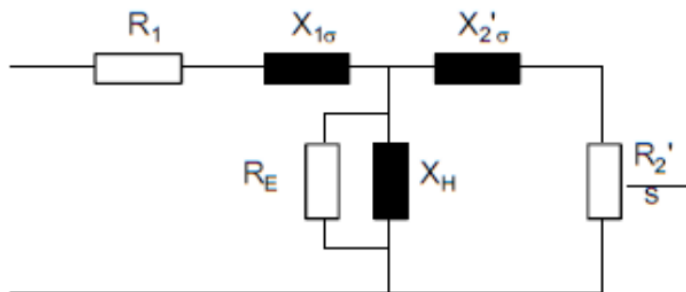


Рис.2.3. Т-подібна схема заміщення асинхронного електродвигуна

Враховуючи вихідні номінальні паспортні дані електродвигуна, визначимо фазну напругу та повний опір:

$$U_{\Phi} = \frac{U_H}{\sqrt{3}} = \frac{10000}{\sqrt{3}} = 5773.503$$

$$Z_H = \frac{U_{\Phi}}{I_H} = \frac{5773.503}{245} = 23.565$$

Повна потужність та активна потужність статора визначаються наступним чином:

$$S_H = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_H = \sqrt{3} \cdot 10000 \cdot 245 = 4243524 \text{ ВА}$$

$$P_1 = S_H \cdot \cos(\varphi_H) = 4243524.479 \cdot 0.85 = 3606995 \text{ Вт}$$

Сумарні втрати в електродвигуні:

$$\Delta P = P_1 - P_H = 3606995.807 - 3500000 = 106995 \text{ Вт}$$

Згідно зі статистичними даними для великих високовольтних машин, втрати в міді статора становлять близько 35-40% від сумарних втрат. Для розрахунку прийнято значення 38%, відповідно, активний опір статора дорівнює:

$$\Delta P_{\{\text{мідь1}\}} = 0.38 \cdot \Delta P = 0.38 \cdot 106995.807 = 40658.407 \text{ Вт}$$

$$R_1 = \frac{\Delta P_{\{\text{мідь1}\}}}{3 \cdot I_H^2} = \frac{40658.407}{3 \cdot 245^2} = 0.226 \text{ Ом}$$

Електромагнітна потужність та втрати в міді ротора з урахуванням номінального ковзання:

$$\Delta P_{\{\text{ем}\}} = \frac{P_H}{1 - s_H} = \frac{3500000}{1 - 0.006} = 3521126 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_{\{\text{мідь2}\}} = \Delta P_{\{\text{ем}\}} \cdot s_H = 3521126 \cdot 0.006 = 21126 \text{ Вт}$$

Зведений активний опір ротора:

$$R'2 = \frac{\Delta P_{\{\text{мідь2}\}}}{3 \cdot I_H^2} = \frac{21126.761}{3 \cdot 245^2} = 0.117 \text{ Ом}$$

Магнітні втрати в сталі для машин даного класу складають орієнтовно 30% від загальних втрат. Відповідний опір втрат у сталі:

$$\Delta P_{\{\text{сталь}\}} = \Delta P \cdot 0.3 = 106995 \cdot 0.3 = 32098 \text{ Вт}$$

$$R_E = \frac{3 \cdot U_{\Phi}^2}{\Delta P_{\{\text{сталь}\}}} = \frac{3 \cdot 5773.5^2}{32098} = 3115 \text{ Ом}$$

Струм неробочого ходу для двигунів такої потужності приймається на рівні 20-25% (для розрахунку візьмемо 22%) від номінального струму. Тоді опір гілки намагнічування становить:

$$I_0 = 0.22 \cdot I_H = 0.22 \cdot 245 = 53.9 \text{ А}$$

$$X_H = \frac{U_{\Phi}}{I_0} = \frac{5773.503}{53.9} = 107.115 \text{ Ом}$$

Для розрахунку індуктивних опорів розсіяння знайдемо реактивні потужності:

$$\sin(\varphi_H) = \sqrt{1 - \cos(\varphi_H)^2} = \sqrt{1 - 0.85^2} = 0.527$$

$$Q_H = S_H \cdot \sin(\varphi_H) = 4243524 \cdot 0.527 = 2235415 \text{ ВАр}$$

$$Q_{\mu} = 3 \cdot I_0^2 \cdot X_H = 3 \cdot 53.9^2 \cdot 107.115 = 933575 \text{ ВАр}$$

$$Q_{\sigma} = Q_H - Q_{\mu} = 2235415 - 933575 = 1301839 \text{ ВАр}$$

Сумарний індуктивний опір короткого замикання:

$$X_k = \frac{Q_{\sigma}}{3 \cdot I_H^2} = \frac{1301839}{3 \cdot 245^2} = 7.229 \text{ Ом}$$

У високовольтних двигунах потужністю вище 1МВт з глибокими пазами ротора опір розсіяння статора значно більший за опір ротора. Тому розподіл індуктивного опору приймається у пропорції 65/35 на користь статора:

$$X_{\{1\sigma\}} = 0.65 \cdot X_k = 0.65 \cdot 7.229 = 4.699 \text{ Ом}$$

$$X'_{\{2\sigma\}} = 0.35 \cdot X_k = 0.35 \cdot 7.229 = 2.53 \text{ Ом}$$

Варто зазначити, що наведений вище аналітичний розрахунок виконаний для усталеного режиму роботи при номінальному ковзанні ($s = 0.006$). Розраховані параметри вносять певну похибку під час моделювання перехідних динамічних процесів пуску, коли ковзання нелінійно змінюється від 1 до номінального значення. Відхилення параметрів, розрахованих аналітичним шляхом, від реальних паспортних даних наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Назва	Од. Вим.	Значення		Відхилення, %	Від виробника
		Аналітичн е	Від виробника		
Ковзання, s	-	0.006	0,006		1
Активний опір обмотки статора, R_1	Ом	0,2260	0,1454	-55%	0,1454
Реактивний опір розсіювання обмотки статора, $X_{1\sigma}$		4,6990	4,0016	-17%	2,6730
Активний опір обмотки ротора, R'_2		0,1170	0,1388	16%	0,4522
Реактивний опір розсіювання обмотки ротора, $X'_{2\sigma}$		2,5300	2,1548	-17%	1,6333
Реактивний опір розсіювання основного поля, X_H		107,115	96,288	-11%	98,550
Опір через втрати в сталі, R_E		3115	3281	5%	3281

Для забезпечення максимально коректної роботи симуляції та адекватної реакції моделі в середовищі OpenModelica, за основу були прийняті паспортні дані виробника, розраховані саме при пусковому ковзанні ($s = 1$). Це дозволило уникнути похибок аналітичного методу та точно відтворити динаміку розгону двигуна під навантаженням. Для імітації вентиляторного навантаження використовувався метод динамічного формування гальмівного моменту на основі замкненого зворотного зв'язку за частотою обертання. Значення кутової швидкості ротора інтегрується в інтерполяційний блок табличних даних у якому задано криву залежності моменту від швидкості, надану заводом-виробником ротору ексгаустера, що дозволяє з високою точністю відтворити реальний механічний перехідний процес під час пуску та роботи системи.

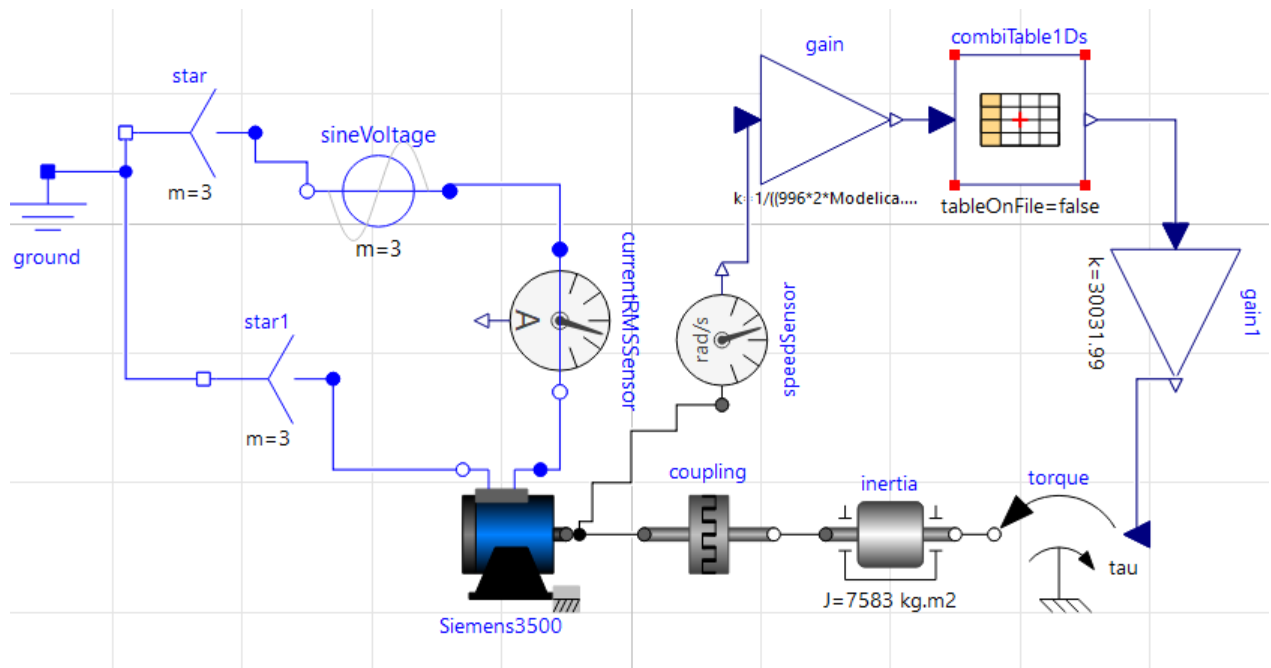


Рис.2.4. Модель АД ексгаустера з урахуванням вентиляторного моменту навантаження та прямим пуском.

На основі розробленої моделі було досліджено динамічні режими пуску електродвигуна. При прямому пуску (Direct-On-Line) від мережі спостерігається значний стрибок пускового струму, який досягає значень 1400 А (близько 5,7 від номінального), що створює важкі електродинамічні та теплові навантаження на обмотки і живильну мережу.

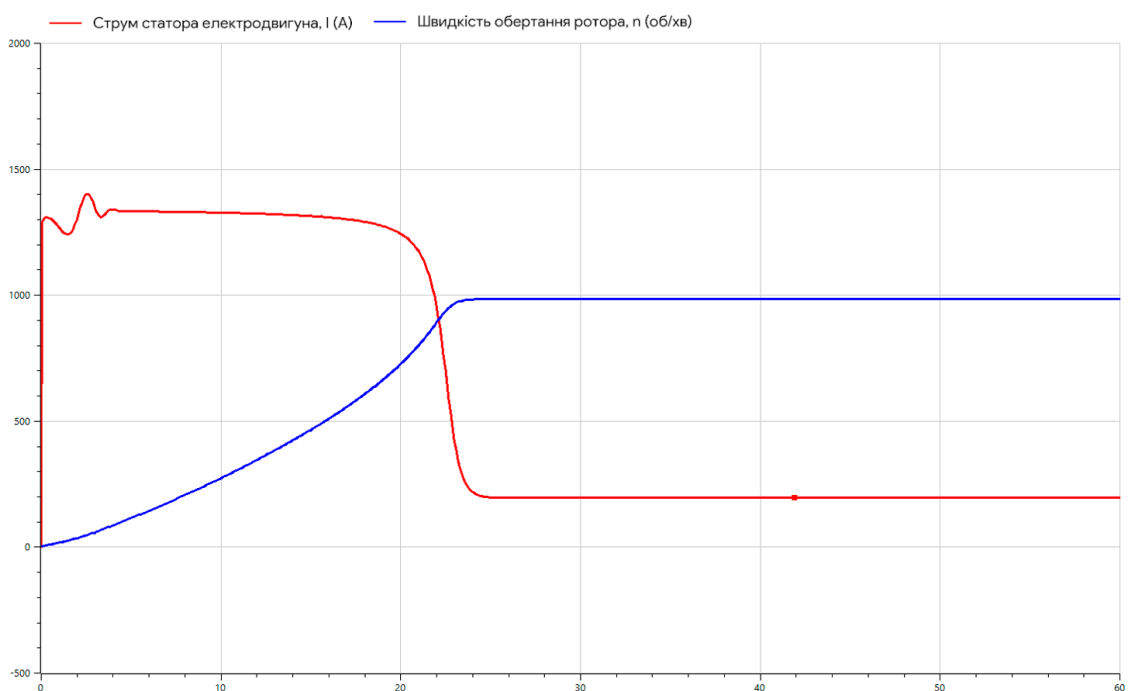


Рис.2.5. Графік току та швидкості обертів АД при прямому пуску від мережі

З метою оптимізації режиму розгону було змодельовано пуск двигуна за допомогою частотного перетворювача.

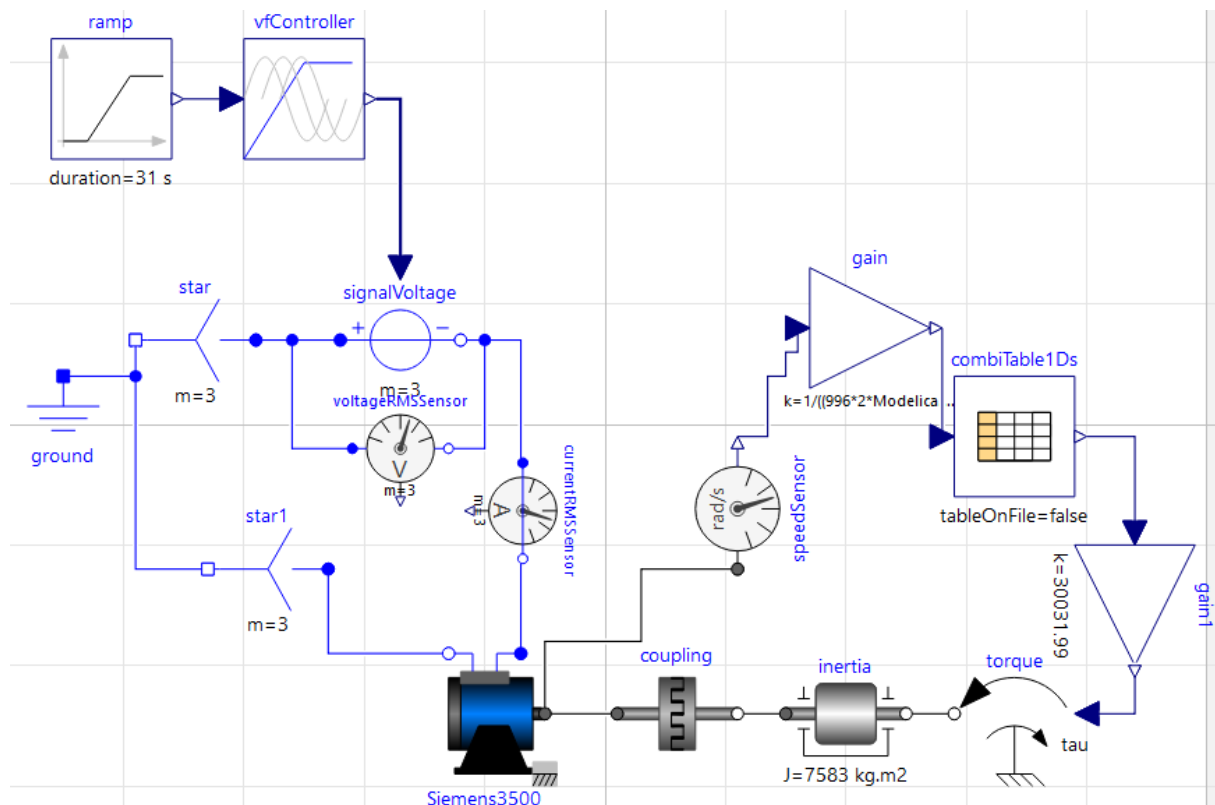


Рис.2.6. Модель АД ексгаустера з пуском від частотного перетворювача

Далі необхідно виконати аналітичний розрахунок часу пуску електродвигуна при роботі з частотним перетворювачем.

Першочергово визначимо номінальний обертальний момент електродвигуна, виходячи з його паспортних потужності та обертів:

$$M_{\text{дв} \cdot \text{ном}} = 9550 \cdot P_{\text{дв}} \cdot \frac{\text{ном}}{n_{\text{дв}} \cdot \text{ном}} = 9550 \cdot \frac{3500}{994} = 33626 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для аналітичного інтегрування рівняння руху привода визначимо середній динамічний момент навантаження за період розгону на основі відомих масивів експериментальних точок навантажувальної характеристики (M1...M5):

$$M_{\text{вент} \cdot \text{дин}} = \frac{M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5}{5} = \frac{4204 + 1501 + 3603 + 9009 + 16517}{5} = 6967 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Зведений до валу двигуна сумарний момент інерції системи складається з власного моменту інерції ротора електродвигуна та моменту інерції робочого колеса ексгаустера:

$$J_{\text{заг}} = J_{\text{дв.}} + J_{\text{вен.}} = 270 + 7583 = 7853 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Розрахуємо зміну кутової швидкості привода при розгоні від нульового значення до заданої робочої швидкості в системі частотного регулювання, а також робочу частоту для перетворювача частоти:

$$\Delta\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{\text{чрп}} - 0}{60} = 2 \cdot 3.14 \cdot \frac{768.83 - 0}{60} = 80.512 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$f_{\text{чрп}} = \frac{3 \cdot n_{\text{чрп}}}{60} = \frac{3 \cdot 768.83}{60} = 38.442 \text{ Гц}$$

Середній надлишковий (динамічний) момент, який безпосередньо забезпечує прискорення механізму, визначається як різниця між номінальним моментом двигуна та динамічним моментом навантаження:

$$M_g = M_{\text{дв. ном}} - M_{\text{вент. дин}} = 33626 - 6967 = 26659 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Варто відзначити, що при частотному пуску струм статора жорстко обмежується перетворювачем частоти на рівні 1.2 від номінального (для режимів роботи Normal Duty). Тому в аналітичний розрахунок тривалості пуску доцільно ввести поправочний коефіцієнт обмеження току $k_{\text{обм}} = 1.3$. Використання даного коефіцієнта в аналітичній моделі дозволяє забезпечити необхідний запас і гарантує, що при подальшому комп'ютерному моделюванні пусковий струм суворо утримуватиметься в межах заданого обмеження 1.2 від номінального.

З урахуванням прийнятого коефіцієнта, загальний час аналітичного розгону електродвигуна до робочої швидкості становить:

$$t = \frac{J_{\text{заг}} \cdot \Delta\omega}{M_g} \cdot k_{\text{обм}} = \frac{7853 \cdot 80.512}{26659.339} \cdot 1.3 = 30.83 \text{ с}$$

У результаті симуляції отримуємо наступний графік плавного розгону двигуна від частотного перетворювача, при цьому видно що пусковий струм не перевищує 294 А (1.2 від номінального):

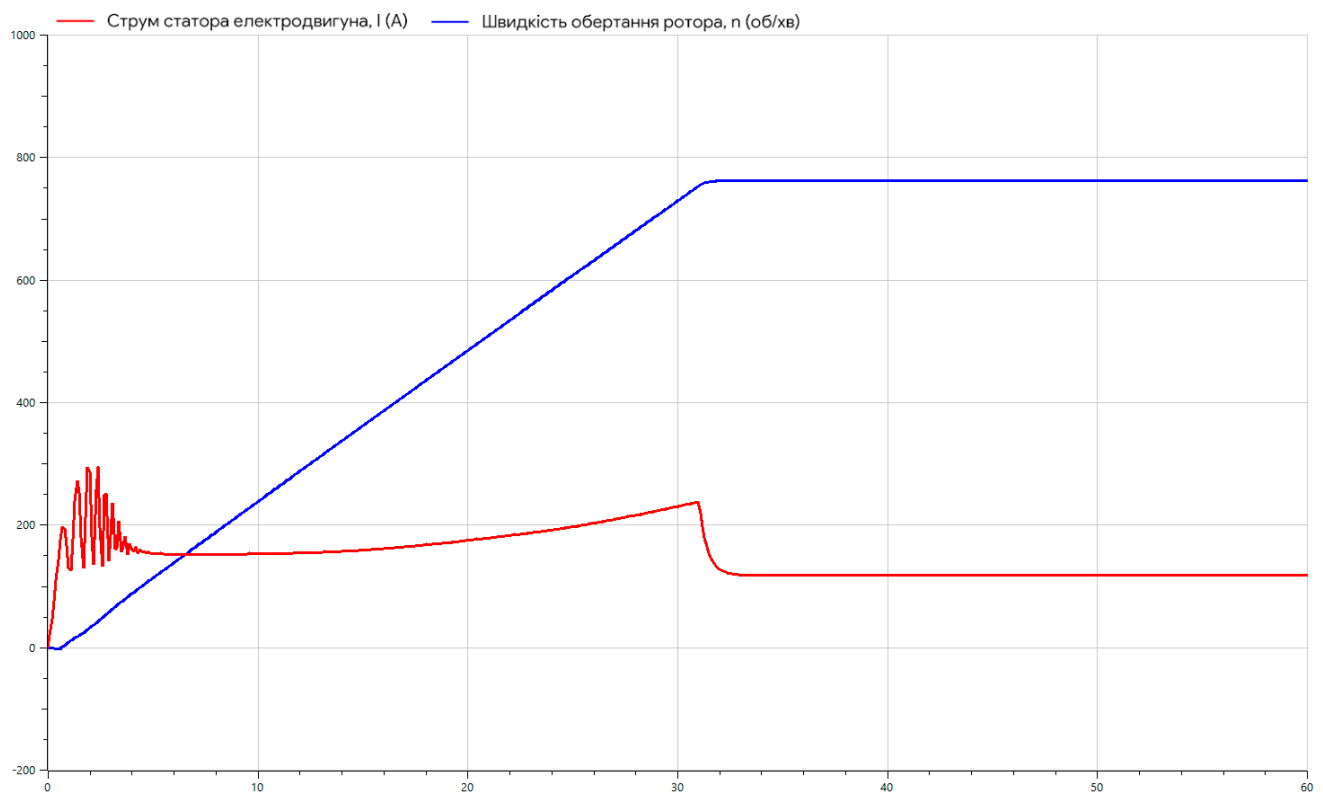


Рис.2.7. Графік току та швидкості обертів АД при пуску від ЧРП з плавним зростанням частоти від 0 до 38.44 Гц за 31 секунду.

Плавний розгін електродвигуна до робочих обертів у симуляції наочно підтверджує ефективність обраного методу керування для захисту електродвигуна та зниження пускових струмів без втрати динамічних характеристик.

2.4 Розробка системи автоматичного керування розрідженням та організація інтерфейсу оператора

Для забезпечення стабільної та енергоефективної роботи ексгаустера в умовах змінних технологічних навантажень металургійного виробництва розроблено систему автоматичного керування (САК) розрідженням. Основним завданням системи є прецизійне утримання заданого тиску (розрідження) у газоході шляхом автоматичної зміни частоти обертання приводного асинхронного електродвигуна потужністю 3500 кВт за допомогою перетворювача частоти SINAMICS Perfect Harmony GH180.

Логіка роботи та налаштування ПД-регулятора:

В основі контуру автоматичного регулювання лежить використання вбудованого апаратно-програмного ПД-регулятора перетворювача частоти SINAMICS GH180. Організація зворотного зв'язку здійснюється за допомогою інтелектуального цифрового датчика надлишкового тиску та розрідження SITRANS P320 (виробництва Siemens). Даний датчик має високу точність (основна зведена похибка становить 0,065 %) та підтримує протокол HART. Окрім передачі поточного значення параметра за допомогою уніфікованого аналогового сигналу 4-20 мА, підтримка HART дозволяє здійснювати дистанційне конфігурування та діагностику датчика (включаючи перевірку функцій безпеки SIL) через систему SIMATIC PDM, що мінімізує необхідність обслуговування безпосередньо за місцем встановлення.

Оскільки об'єкт керування має специфічну динаміку (при збільшенні частоти обертання ротора ексгаустера розрідження збільшується, тобто абсолютний тиск падає), ПД-регулятор частотного перетворювача налаштовується в інверсному (зворотному) режимі. Логіка керування реалізується таким чином:

- При зростанні надходження газів тиск у системі починає підвищуватися (розрідження зменшується), неузгодженість сигналу ПД-регулятора викликає автоматичне збільшення вихідної частоти ПЧ, прискорюючи ексгаустер для відновлення технологічного розрідження.
- При зниженні об'єму газів тиск падає, і регулятор плавно знижує частоту обертання, мінімізуючи споживання електроенергії.

Пріоритети та захисні функції системи:

Розроблена алгоритмічна структура САК базується на чіткій ієрархії пріоритетів, що гарантує безперебійність технологічного процесу та повну безпеку обладнання:

1. Перший (найвищий) пріоритет — Струмова відсічка та тепловий захист: Незалежно від вимог технологічного процесу щодо утримання тиску, внутрішня система захисту ПЧ обмежує вихідний струм на рівні $1,2 I_{ном}$

(згідно з динамічним моделюванням). Це виключає перегрів обмоток статора та дію ударних електромагнітних моментів.

2. Другий пріоритет — Аварійний захист електрофільтра (14 кПа): При виникненні аварійних режимів у газоході та досягненні критичного рівня розрідження у 14 кПа, система автоматично ініціює безпечний зупин агрегату для запобігання механічному руйнуванню конструкцій електрофільтра.
3. Третій пріоритет — Технологічні режими роботи: Робота системи оптимізована під два базові режими, які перемикаються оператором:
 - Енергоефективний режим частотного регулювання ЧРП: Утримання оптимального технологічного розрідження для тиску 8,0 кПа.
 - Максимальний (номінальний) режим: Робота на природній характеристиці нагнітача для тиску 13,426 кПа.

Організація місцевого пульта оператора та специфікація НМІ:

Для оперативного керування, контролю параметрів та візуалізації перехідних процесів безпосередньо біля екстаустера передбачено місцевий пульт керування. Інтерфейс реалізується комбінованим способом за допомогою промислової НМІ-панелі та фізичних органів комутації, що працюють у безпечних ланцюгах напруги (24 В постійного струму та 220 В змінного струму):

- Графічна НМІ-панель: Застосовано операторську панель Siemens SIMATIC НМІ KTP700 Basic (7 дюймів, живлення 24 В постійного струму). Вона підключається до плати керування ПЧ через інтерфейс RS-485 / Modbus RTU. На екран виводяться поточна частота, струм двигуна, поточне розрідження з датчика SITRANS P320 та тренди температур.
- Кнопки та перемикачі (клас напруги 24 В / 220 В): Для надійності дублювання використано промислову арматуру серії Schneider Electric Harmony XB4 (металевий корпус, IP65):
 - Кнопка аварійного зупину «E-STOP» (XB4BS8444) з фіксацією.
 - Перемикач режимів роботи «ЧРП / Мережа» (XB4BD21).

- Кнопки «Пуск» (XB4BA31, зелена) та «Зупин» (XB4BA42, червона).
- Світлосигнальні лампи: Світлодіодні індикатори Schneider Electric XB4BVB (живлення 24 В) для відображення режимів: «Робота ЧРП» (зелена), «Мережа» (жовта), «Аварія» (червона).

Температурний моніторинг та підключення до портів ПЧ:

Для запобігання тепловому руйнуванню високовольної машини в систему інтегровано безперервний моніторинг теплового стану за допомогою шести вбудованих в електродвигун 1RQ4 636-6JE80-Z восьми термодатчиків:

- 6 датчиків для обмоток статора електродвигуна (по одному на кожний полюс).
- 2 датчики на підшипникових вузлах електродвигуна (передній та задній підшипники).

Згідно з повною електричною принциповою схемою перетворювача частоти SINAMICS Perfect Harmony GH180, комутація зовнішніх ланцюгів керування (Customer Connections) виконується на спеціалізовані клемні колодки інтерфейсної плати:

1. Аналогові входи (AI): Сигнал 4-20 мА від датчика розрідження SITRANS P320 заводиться на аналоговий вхід клемного блоку X2 (клеми X2:1 (+) та X2:2 (-)).
2. Термодатчики: Підключення 8 датчиків температури здійснюється до спеціалізованого модуля розширення A60 (входи RTD1-1:RTD-1-8).
3. Дискретні входи (DI): Фізичні кнопки пульта підключаються до цифрових входів клемного блоку X1:
 - Кнопка «Пуск» — вхід X1:1.
 - Кнопка «Зупин» — вхід X1:2.
 - Перемикач режимів — вхід X1:3.
4. Релейні (дискретні) виходи (DO): Сигнали стану для ламп пульта та системи верхнього рівня АСУ ТП знімаються з перекидних контактів реле клемного блоку X3:

- Реле DO1 (клеми X3:1–3) — сигналізація «Готовність / Робота».
- Реле DO2 (клеми X3:4–6) — сигналізація «Аварія ЧРП» (видає сигнал на червону лампу місцевого пульта).

Висновок щодо стійкості та ефективності системи

Розроблена система автоматичного керування розрідженням на базі SINAMICS GH180 та SITRANS P320 характеризується винятковою надійністю, динамічною стійкістю та гнучкістю. Завдяки впровадженню інверсного ПД-регулювання, система миттєво відпрацьовує будь-які збурення технологічного потоку газів, підтримуючи заданий режим з мінімальною статичною похибкою.

Найважливішою інженерною перевагою даної архітектури є реалізація принципу «розумної безпеки»: система максимізує ресурс високовольтного електродвигуна потужністю 3500 кВт, захищаючи його від струмових перевантажень, ударних пускових моментів та перегріву підшипників. Водночас вона не призводить до безпідставного повного аварійного зупину агрегату при некритичних відхиленнях. За рахунок багаторівневої системи попереджувальної сигналізації та гнучкого обмеження параметрів, САК забезпечує безперервний, плавний та глибоко енергоефективний режим роботи всього ексгаустерного комплексу.

2.5 Охорона праці

До небезпечних та шкідливих виробничих факторів при експлуатації та обслуговуванні високовольтного електроприводу екстаустера агломераційного цеху належать:

- небезпека ураження електричним струмом високої напруги (10 кВ) при дотику до струмоведучих частин електродвигуна, перетворювача частоти або кабельних ліній;
- підвищений рівень шуму та вібрації від роботи відцентрового нагнітача та електродвигуна потужністю 3500 кВт;
- рухомі та обертові частини механізмів (ротор екстаустера, вал електродвигуна, муфта);
- електромагнітне випромінювання від силових компонентів високовольтного перетворювача частоти;
- конвективне тепло від корпусу нагнітача та пиловиділення в умовах агломераційного виробництва.

Для створення нормальних та безпечних умов праці на робочих місцях проект передбачає низку комплексних заходів. Усі конструктивно-компонувальні рішення розроблено відповідно до вимог норм та правил безпечного обслуговування електроустановок.

Електробезпека та захист від електромагнітних полів З метою захисту персоналу від ураження електричним струмом передбачено надійне захисне заземлення корпусів електродвигуна Siemens, шаф перетворювача частоти SINAMICS GH180, трансформаторів та місцевого пульта керування. Високовольтне обладнання розміщується у спеціальних закритих приміщеннях (електромашинних залах), доступ до яких має лише кваліфікований електротехнічний персонал із відповідною групою допуску.

Обраний у проекті перетворювач частоти має багатопульсну схему випрямлення (концепція «Clean Power»), що значно знижує рівень гармонійних спотворень та електромагнітних завад, забезпечуючи електромагнітну сумісність із заводською мережею та безпеку персоналу.

Захист від механічних травм, шуму та вібрації Усі рухомі частини механізмів (особливо пружна втулково-пальцева муфта між електродвигуном та ексгаустером) обгороджуються суцільними металевими кожухами. Компонування обладнання виконане з урахуванням створення безпечних прохідних та ремонтних майданчиків. З метою боротьби з вібрацією проектом передбачено встановлення електродвигуна та ексгаустера на масивні автономні залізобетонні фундаменти, а також використання гнучких вставок на газоходах. Для захисту органів слуху персоналу в умовах працюючого ексгаустерного комплексу обов'язковим є використання індивідуальних засобів захисту (протишумових навушників або берушів).

Автоматизація та протиаварійний захист Управління електроприводом максимально автоматизовано, що виводить обслуговуючий персонал із зон підвищеної небезпеки. На місцевому пульті керування (НМІ-панель) використовуються безпечні ланцюги напруги 24 В постійного струму. У разі виникнення позаштатних ситуацій безпека гарантується наступними рішеннями:

- наявністю кнопки аварійного зупину «E-STOP» з фіксацією безпосередньо біля агрегату;
- автоматичним захистом від струмових перевантажень (обмеження струму на рівні 1,2 Іном);
- вбудованим температурним моніторингом підшипників та обмоток електродвигуна для запобігання перегріву та пожежі;
- автоматичним зупином агрегату при досягненні критичного розрідження (14 кПа) для уникнення руйнування газоходів та електрофільтрів.

Роботи з обслуговування та ремонту ексгаустерного комплексу повинні здійснюватися за нарядом-допуском у суворій відповідності до вимог галузевих правил безпеки у металургійному виробництві та правил технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломній роботі вирішено актуальне інженерне завдання щодо модернізації електромеханічного устаткування ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» шляхом впровадження енергоефективної системи частотного керування електроприводом ексгаустера агломераційного цеху №2. За результатами виконаних досліджень, розрахунків та моделювання можна зробити наступні висновки:

1. Проведено аналіз технологічного процесу виробництва агломерату та визначено роль ексгаустера як одного з найбільш енергоємних агрегатів підприємства. Встановлено, що існуюча система нерегульованого приводу із синхронним двигуном та дроселюванням потоку засувкою є вкрай неефективною та призводить до значних втрат електроенергії.
2. На основі аеродинамічних характеристик ротора DHRV 45B-1800 виконано розрахунок необхідної потужності. Підібрано сучасний високовольтний асинхронний електродвигун Siemens типу 1RQ4 636-6JE80-Z номінальною потужністю 3500 кВт (напруга 10 кВ), який повністю задовольняє вимоги безперервного режиму роботи S1.
3. Технічно та економічно обґрунтовано впровадження високовольтного перетворювача частоти SINAMICS PERFECT HARMONY GH180. Доведено, що відмова від шибєрування та перехід на регулювання продуктивності зміною обертів ротора дозволяє економити понад 10,5 млн кВт·год електричної енергії на рік. Розрахунковий термін окупності капітальних інвестицій становить близько 0,6 року, що підтверджує високу фінансову привабливість проекту.
4. Здійснено аналітичний розрахунок параметрів схеми заміщення двигуна та розроблено математичну модель електроприводу в середовищі OpenModelica. Результати симуляції підтвердили, що прямий пуск двигуна від мережі супроводжується руйнівними струмами до 1400 А (5,7 Іном), тоді як використання перетворювача частоти дозволяє здійснити плавний розгін

важкого ротора, жорстко обмежуючи пусковий струм на безпечному рівні до 294 А (1,2 Іном) та усуваючи ударні механічні навантаження.

5. Розроблено систему автоматичного керування розрідженням у газоході на базі інтегрованого ПІД-регулятора та інтелектуального датчика тиску SITRANS P320. Спроековано апаратну частину місцевого пульта оператора з НМІ-панеллю. Реалізовано чітку ієрархію протиаварійних пріоритетів та систему температурного моніторингу, що гарантує надійність, безпеку та безперебійність технологічного процесу агломерації.
6. Розглянуто комплекс заходів з охорони праці та техніки безпеки при експлуатації проектованого високовольтного електромеханічного обладнання, що гарантує захист персоналу від специфічних виробничих факторів АЦ №2.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. СніП 2.09.03-85 Споруди промислових підприємств;
2. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація ;
3. ГОСТ 12.2.003-91. ССБТ. Устаткування виробниче. Загальні вимоги безпеки
4. ДСТУ ГОСТ 12.2.061:2009 Устаткування виробниче. Загальні вимоги до робочих місць.
5. ГОСТ 12.3.002-75 Процеси виробничі. Загальні вимоги безпеки ;
6. Реконструкція будівель та споруд комплексу агломашин №4-5 АЦ №2. Корпус ексгаустерів. Технічне переоснащення ексгаустера №5.
7. Корпус ексгаустерів. Технічне переоснащення ексгаустера №1. Електропривод.
8. Реконструкція комплексу будівель та споруд агломашини №1 агломераційного цеху №2. Управління та вібродіагностика ексгаустера АМ №1. Основний комплект робочих креслень
9. Паспорт виробу Ексгаустер Venti Oelde DHRV-45B-1800
10. Посібник з експлуатації "Високовольтний частотний перетворювач SINAMICS Perfect Harmony GH180"
11. Двигун змінного струму тип 1RQ7 636 6JA80 0CG0 Z. Паспорт технічний.
12. Копилов І. П. Проектування електричних машин, 2002.
13. А.І. Вольдек. Електричні машини, 1978.
14. Б.І. Фіраго, Л.Б. Павлячик. Теорія електроприводу. - М.: Техноперспектива, 2007.
15. М.М. Кацман. Електричний привід. - М.: Академія, 2013.
16. Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник для студентів вищих закладів освіти України I-IV рівнів акредитації /За ред. Є.П.Желібо і В.М.Пічі. – Київ:
17. "Каравелла", Львів: "Новий світ-2000", 2001. – С.190-191..Закон України "Про пожежну безпеку" від 17 грудня 1993 року.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

141-2д-2026врб

Автор

141-2д-2026врб

Науковий керівник / Експерт

Модло Є

ІД документу

334133343

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

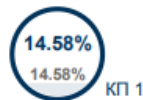
Дата звіту

6/2/2026

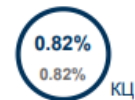
Дата редагування

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.



7530
Кількість слів



59119
Кількість символів

Тривога

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

Заміна букв		56
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		80

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір 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	Колір тексту
#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)
	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)

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

Я, Бондаренко Микола Андрійович, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна магістерська (бакалаврська) робота (назва роботи повністю) виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) 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(а). Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформований(на), 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(на) з умовами такого розміщення.

01.06.2026