

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

АНАЛІЗ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЯГИ
КОТЛОАГРЕГАТУ ТЕЦ-3 ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»

Виконав: здобувач групи ЕЕМ-22-1

Дмитро БОРОВИК

Керівник випускної роботи _____ д-р ф-ї, ст. викладач Олег ДОЗОРЕНКО

Нормоконтролер _____ д-р ф-ї, ст. викладач Олег ДОЗОРЕНКО

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг
2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Боровика Дмитра Сергійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз та модернізація системи регулювання тяги котлоагрегату ТЕЦ-3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

2. Строк подання студентом роботи 11 червня 2026 р.

3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи

Мета роботи – комплексне підвищення енергоефективності, експлуатаційної надійності та точності регулювання тягодуттєвих процесів на ТЕЦ-3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Завдання кваліфікаційної роботи: проаналізувати режими експлуатації та стан систем автоматизації димотягів теплоелектроцентралі; виявити недоліки діючого контуру керування та сформулювати висновки до модернізованого механізму; науково обґрунтувати доцільність переходу на топологію «перетворювач частоти – асинхронна машина»; здійснити вибір силового електрообладнання та засобів автоматизації на основі розрахованих навантажень; провести модельні дослідження динамічних процесів у контурі «ПЧ-АД» за використання комп'ютерних програм; оцінити техніко-економічну ефективність та термін окупності впроваджуваних рішень.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)

1. Аналіз умов експлуатації та режимів роботи димотягів теплоелектроцентралі; 2. Обґрунтування доцільності впровадження системи частотного регулювання електроприводу; 3. Розрахунок силових навантажень та вибір електротехнічного обладнання комплексу; 4. Розробка схеми електропостачання та розрахунок параметрів для налаштування пристроїв релейного захисту; 5. Модельні дослідження перехідних процесів у системі керування «перетворювач частоти – асинхронний двигун»; 6. Техніко-економічне обґрунтування рентабельності проєкту модернізації.

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

1. Загальний вигляд димососу; 2. Аеродинамічна, напірна і характеристика ККД димососу; 3. Схема підключення електроприводу Тріол типу АТ-03; 4. Результати моделювання роботи системи; 5. Схема заміщення фази асинхронного двигуна при частотному керуванні; 6. Математична модель швидкісних характеристик; 7. Сімейство швидкісних характеристик; 8. Модель САК ЕП з об'єктом регулювання – нагнітачем; 9. Пуск САК ЕП з об'єктом регулювання – нагнітачем.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Дозоренко О.В.		
II	Дозоренко О.В.		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Аналіз діючих експлуатаційних режимів димотягів ТЕЦ та оцінювання систем автоматики	21 травня 2026 р.
2	Обґрунтування доцільності впровадження системи частотного регулювання електроприводу	24 травня 2026 р.
3	Обчислення навантажень, вибір електродвигуна, перетворювача частоти та засобів телеметрії	28 травня 2026 р.
4	Розробка схеми електропостачання та розрахунок параметрів для налаштування пристроїв релейного захисту	31 травня 2026 р.
5	Модельні дослідження перехідних процесів у системі керування «перетворювач частоти – асинхронний двигун»	2 червня 2026 р.
6	Оцінка техніко-економічної ефективності проєкту, розрахунок енергозбереження та термінів окупності	6 червня 2026 р.
7	Аналіз результатів, формування висновків та оформлення пояснювальної записки	10 червня 2026 р.

Дата видачі завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Дмитро БОРОВИК
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олег ДОЗОРЕНКО
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Аналіз та модернізація системи регулювання тяги котлоагрегату ТЕЦ-3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» містить: 68 с., 21 рис., 10 табл., 22 літературні джерела.

Предмет проектування – електромеханічна система дуттьового агрегату (димотяга), що працює в умовах ТЕЦ-3 на базі підприємства ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Головною метою роботи є розробка системи частотно-регульованого електроприводу для механізму димотяга. Проєктом передбачено заміну існуючого дросельного способу регулювання тяги за допомогою напрямних апаратів на метод безпосереднього керування швидкістю обертання електродвигуна. Реалізація даного технічного рішення спрямована на оптимізацію витрат електроенергії на власні потреби станції та зниження динамічних навантажень на механічні вузли агрегату в перехідних пускових режимах.

Аналитичний розділ містить стислий огляд виробничого циклу станції та детальну оцінку її експлуатаційних режимів. Тут розглянуто специфіку роботи димотяга та базові принципи функціонування діючої апаратури автоматики. Спираючись на жорсткі технічні критерії, висунуті до приводної установки, здійснено пошук і затвердження оптимальної конфігурації приводу. Крім того, сформовано оновлену концепцію автоматичного контролю, прописано логіку управління агрегатом, виконано розрахунки силових навантажень та ухвалено рішення щодо вибору конкретної моделі тягового електродвигуна.

У спеціальній частині підібрано силовий перетворювач частоти, а також комплект комутаційних і запобіжних апаратів разом із первинними перетворювачами (датчиками) технологічного процесу. Складено однолінійну

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.Р						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Бсровик Д.С.			Реферат			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Дозсренко О.В.								4	2
								КНУ гр. ЕЕМ-22-1			
Н. Контр.		Дозсренко О.В.									
Затверд.		Пересунько І.І.									

схему живлення та визначено струмові показники, що необхідні для правильного конфігурування пристроїв релейного захисту. Здійснено аналіз замкнутої системи керування формату «перетворювач частоти – асинхронна машина». Обчислено еквівалентні параметри для кола заміщення, після чого реалізовано цифрову модель контуру регулювання задля зняття перехідних характеристик установки.

Розглянуті графіки перехідних процесів показують ефективність запропонованого рішення. Впровадження частотного перетворювача дозволяє майже повністю усунуває кидки пускових струмів, що помітно знижує зношення механіки димотяга. Крім того, відмова від традиційних напрямних апаратів на користь керування обертами двигуна дає змогу набагато точніше підтримувати задане розрідження в котлі.

Виділена увага до питань інтеграції оновленого електроприводу в існуючу автоматизовану систему керування станції. Забезпечено необхідну координацію з апаратурою релейного захисту та автоматики, що гарантує селективне відключення обладнання в ненормальних режимах і підвищує загальну безвідмовність роботи енергоблоку.

Така схема робить роботу тягодуттьової установки надійнішою. Проте найбільша перевага – це реальна економія електроенергії на власні потреби станції, особливо коли обладнання працює з неповним навантаженням. Саме ці показники енергозбереження і лягли в основу розрахунку фінансової вигоди та окупності проекту.

Проведена оцінка техніко-економічних індикаторів беззаперечно підтверджує фінансову доцільність та високу окупність впровадження запропонованої розробки на реальному виробництві.

ДИМОСОС, ТЯГОДУТТЬОВА УСТАНОВКА, ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.Р	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3MICT

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ОБҐРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	9
1.1 Основні відомості про ТЕЦ – 3.....	9
1.2 Характеристика тягодуттьового обладнання та опис димососа Д-20х2.....	11
1.3 Задачі керування, аналіз існуючої системи та обґрунтування модернізації.....	16
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК САК ЕП З ТЕХНОЛОГІЧНОЮ УСТАНОВКОЮ ТА ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ РОБОТИ.....	19
2.1 Розрахунок технічних характеристик електродвигуна та вибір оптимальної структури системи.....	19
2.1.1 Розрахунок потужності і вибір електродвигуна.....	22
2.1.2 Вибір оптимального перетворювача частоти.....	24
2.2 Складання схеми заміщення системи і розрахунок механічних характеристик технологічної системи.....	24
2.2.1 Розрахунок механічних характеристик з навантаженням.....	27
2.3 Моделювання структури, характеристик та режимів роботи САК електропривода.....	33
2.3.1 Обґрунтування структури САК, визначення передавальних функцій та синтез регуляторів	42
2.3.2 Загальна характеристика об’єкта автоматизації та його конструктивних елементів	48
2.3.3 Аналіз динамічних характеристик САК електропривода з вентиляторним навантаженням	52
2.4 Обґрунтування елементної бази та розробка функціонально-блочної схеми керування САК	57
2.5 Розрахунок економічної ефективності обраного технічного рішення.....	61
ВИСНОВКИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.3					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.		Бсровик Д.С.			Зміст			Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Дозренко О.В.							6	1
								КНУ гр. ЕЕМ-22-1		
Н. Контр.		Дозренко О.В.								
Затверд.		Пересунько І.І.								

ВСТУП

На сьогодні автоматизація електропривода є фундаментом надійної експлуатації як окремих вузлів, так і всього технологічного комплексу в цілому. Нинішні реалії воєнного стану та системний дефіцит генеруючих потужностей змушують переглянути основні завдання автоматизації. Пріоритетною задачею таких процесів стає не лише керування процесом, а й економія електричної енергії. Сучасне промислове обладнання повинно мати високий рівень енергоефективності. Впровадження новітніх технологій та оптимізація режимів роботи потужних електроприводів дозволяють суттєво зменшити споживання електроенергії на власні технологічні потреби підприємства.

Сучасні системи автоматичного керування (САК) електроприводами є базовим інструментом для надійного функціонування як окремих електромеханічних комплексів, так і всього виробничого циклу в цілому. Завдяки ефективному обміну даними, локальні підсистеми інтегруються в єдину інформаційну мережу вищого рівня, що забезпечує централізований контроль над технологічним процесом. Оптимізація робочих режимів потужних двигунів та впровадження новітніх засобів керування стають ключовими факторами, які дозволяють здійснювати превентивну діагностику та оперативно усувати аварійні ситуації на виробництві.

Метою даної дипломної роботи є обґрунтування заміни існуючої схеми регулювання димососа (напрямним апаратом у поєднанні з двошвидкісним двигуном) на сучасну систему «перетворювач частоти – двигун». Ця модернізація дозволить не лише досягти максимальної продуктивності тягодуттьової машини, а й значно полегшити її щоденне обслуговування та вивести культуру виробництва на якісно новий рівень.

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.ВС				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Бсровик Д.С.			Вступ	Літ.		Арк.	Акрушіє
Перевір.		Дозсренко О.В.						7	1
Н. Контр.		Дозсренко О.В.				КНУ гр. ЕЕМ-22-1			
Затверд.		Пересунько І.І.							

РОЗДІЛ 1. ОБҐРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Основні відомості про ТЕЦ – 3

Головним призначенням теплоелектроцентралі (ТЕЦ-3) є забезпечення технологічних процесів доменної печі №9 (подача дуття, пари та гарячої води), опалення виробничих цехів підприємства і житлово-комунального фонду НКГЗК, а також паралельне постачання електроенергії споживачам комбінату. Сумарна встановлена електрична потужність станції становить 120 МВт.



Рисунок 1.1 – Турбінний цех ТЕЦ-3 «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Теплові та аеродинамічні навантаження об'єкта розподіляються наступним чином:

- дуття атмосферне – 11000 м³/хв;
- дуття збагачене киснем до 35% – 7100 м³/хв;
- тепло для потреб опалювання – 237 ГКал/год;
- пара тиском 18 ата – 200 т/год.

Генеруючий комплекс ТЕЦ-3 укомплектований двома турбогенераторами типу ПТ-60-90/13 та трьома турбокомпресорами К-700-41-1, які приводяться в

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.01		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1		
Розроб.		Бсровик Д.С.					
Перевір.		Дозсренко О.В.					
Н. Контр.		Дозсренко О.В.					
Затверд.		Пересунько І.І.					
					Літ.	Арк.	Акрушів
						8	10
					КНУ гр. ЕЕМ-22-1		

рух турбінами Т-30 (розрахункові параметри пари: 100 ата, 535°C). Парокотельне відділення оснащено чотирма енергетичними котлами ПК-14-2М продуктивністю по 220 т/год (100 ата, 540°C) та одним водогрійним котлоагрегатом ПТВМ-180 на 180 Гкал/год [1].

Як основне паливо на ТЕЦ-3 використовується доменний газ в суміші з висококалорійним природним газом. Резервне паливо – мазут.

Вузол живлення станції укомплектований чотирма електронасосами марки ПЕ-500-180 та чотирма деаераторами ДСА-200 (робочий тиск 6 ата). Для збору виробничого конденсату та хімічно знесоленої води ці деаератори мають акумулюючі баки об'ємом по 70 м³.

Що стосується тягодуттьового обладнання, то кожен котел індивідуально оснащується парою дуттьових вентиляторів ВДН-20-П та двома димососами Д-20 [2].

Технологічна пара для власних і виробничих потреб (з тиском 10-16 атм) подається з відповідних відборів турбоагрегатів ПТ-60-90/13. Якщо основний виробничий відбір необхідно зарезервувати, в роботу включається редукційно-охолоджувальна установка (РОУ) із продуктивністю 250 т/год.

Видача електроенергії споживачам підприємства здійснюється на генераторній напрузі 6,3 кВ. Надлишок електроенергії передається в енергосистему на напрузі 154 кВ через два трансформатори зв'язку 154/6,3 кВ [3].



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд теплоелектроцентралі

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.01	Арк. 9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Хімводоочистка (ХВО) для підживлення парових котлів функціонує за такою схемою: вапнування та коагуляція в освітлювачах, механічна фільтрація, ступінчасто-протитечійне Н-катіонування, декарбонізація, ступінчасто-протитечійне аніонування із застосуванням низькоосновного аніоніту. Продуктивність лінії ХВО для підживлення парових котлів становить 250 т/год. Хімводоочистка для підживлення теплової мережі реалізована за схемою: Н-катіонування з регенерацією за «голодним режимом», буферні саморегенеруючі фільтри, декарбонізація. Продуктивність лінії ХВО для підживлення теплової мережі дорівнює 200 т/год.

Система технічного водопостачання ТЕЦ організована за оборотною схемою з охолодженням циркуляційної води на градирнях. На даний час експлуатуються дві градирні з площею зрошення по 2600 м² кожна. Схема технічного водопостачання передбачає наявність центральної насосної станції, що з'єднана з насосною станцією доменної печі №9 за допомогою сталевих магістральних водоводів.

До складу мазутного господарства входять:

- 2-х путеві приймально-зливні пристрої, що забезпечують розвантаження 8 залізничних цистерн вантажопідйомністю по 50 тон;
- мазутонасосна;
- склад для зберігання мазуту переведення двома залізобетонними баками ємкістю по 10000 м³.

1.2 Характеристика тягодуттьового обладнання та опис димососа Д-20х2

Кожен з парових котлів ПК-14-2М обслуговується двома дуттьовими вентиляторами ВДН-20-П та двома димососами Д-20 (лівого та правого обертання). Надійність експлуатації такого котельного обладнання безпосередньо залежить від рівня автоматизації технологічних процесів [4] та своєчасної модернізації основних вузлів енергетичних блоків [5]. Застосування системного підходу до проектування та реконструкції тягодуттьових систем

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.01	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяє мінімізувати аварійність допоміжних установок ТЕС [6]. Відцентровий димосос двостороннього всмоктування Д-20х2 призначений для відведення відхідних димових газів. Відцентровий димосос двостороннього всмоктування Д-20х2 призначений для відведення відхідних димових газів. Конструктивно він складається з робочого колеса, ходової частини, спірального корпусу («равлика»), двох всмоктувальних кишень та напрямних апаратів.

Основним робочим органом димососа є робоче колесо, яке конструктивно поділяється на крильчатку та маточину. Крильчатка виконана у вигляді надійної зварної конструкції та містить 32 листові лопатки, загнуті вперед. Ці лопатки жорстко зафіксовані між кореневим (основним) та двома покривними (конічними) дисками. З'єднання крильчатки з валом здійснюється через литу сталеву маточину. Використання загнутих вперед лопаток у відцентрових машинах дозволяє отримати вищий тиск при менших габаритах робочого колеса. Проте така конструкція є більш чутливою до відкладень золи та вимагає точного статичного і динамічного балансування ротора під час експлуатації.[7]. Вона кріпиться до основного диска за допомогою болтових з'єднань, а на самому валу ходової частини фіксується двома розрізними конічними втулками, що стягуються торцевими шпильками.

Ходова частина агрегату базується на трубчастому валу, який спирається на два радіальні сферичні роликopідшипники, розміщені у роз'ємних чавунних корпусах. Для правильного розподілу навантажень підшипник з боку електродвигуна виконує функцію опорно-упорного, тоді як підшипник з протилежного боку є виключно опорним. Передача крутного моменту від двигуна до димососа здійснюється через пружну втулково-пальцеву муфту. Самі корпуси підшипників жорстко змонтовані на фундаментних плитах за допомогою болтів. Ущільнення валу реалізовано за комбінованою відцентрово-сальниковою схемою .

Особлива увага при експлуатації приділяється системі змащення та охолодження. Внутрішні порожнини корпусів підшипників заповнюються консистентним мастилом або спеціалізованим маслом марки «Турбінне-22» Для

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.01	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підтримання оптимального температурного режиму та охолодження мастила безпосередньо в корпусах підшипників змонтовані трубчасті зміювики, через які організовано постійну циркуляцію охолоджувальної води. Недотримання температурного режиму роботи опорно-упорних підшипників димососів є однією з головних причин їх аварійних зупинок, тому система водяного охолодження мастила є критично важливим елементом конструкції. [8]

В існуючій системі регулювання продуктивності димососа здійснюється механічним шляхом. Для цього використовуються спрощені напрямні апарати шибєрного типу, які просторово вбудовані у всмоктувальні кишені та кінематично з'єднані між собою шарнірними механізмами. Зміна положення шибєрів виконується за допомогою дистанційного приводу, виконавчим потенціалом і відносно стійкою мережевою інфраструктурою: південь, захід, центр, окремі промислові вузли з відкритими майданчиками та доступом до мереж 35-110 кВ. Найдоцільнішими є не ізольовані технічні рішення, а комплексні енергетичні схеми, у яких ВЕС працює спільно з електричною мережею підприємства, системою прогнозування генерації, автоматизованим керуванням навантаженням, компенсацією реактивної потужності та, за потреби, батарейним накопичувачем.

Окремо слід враховувати, що промислове застосування ВЕС в Україні буде ефективним лише за умови переходу від спрощеного підходу «встановити генератор і приєднати до шин» до повноцінного режимного проектування. На етапі техніко-економічного обґрунтування необхідно зіставляти погодинні профілі вітрової генерації з графіками активного і реактивного навантаження підприємства, визначати частку самоспоживання, можливі обмеження видачі потужності та економічний ефект від зменшення втрат у внутрішній мережі. Для великих підприємств також доцільно оцінювати сценарії участі у попит-керуванні, використання гнучких технологічних процесів у періоди високої генерації та встановлення автоматизованих систем керування, які координують роботу ВЕС, трансформаторних підстанцій, компенсувальних пристроїв і

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.01	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідальних електроприймачів, механізмом якого є сервомотор типу РБ у комплекті з колонкою дистанційного керування (КДУ).

Загальний вигляд димососу приведенний на рис. 1.3.

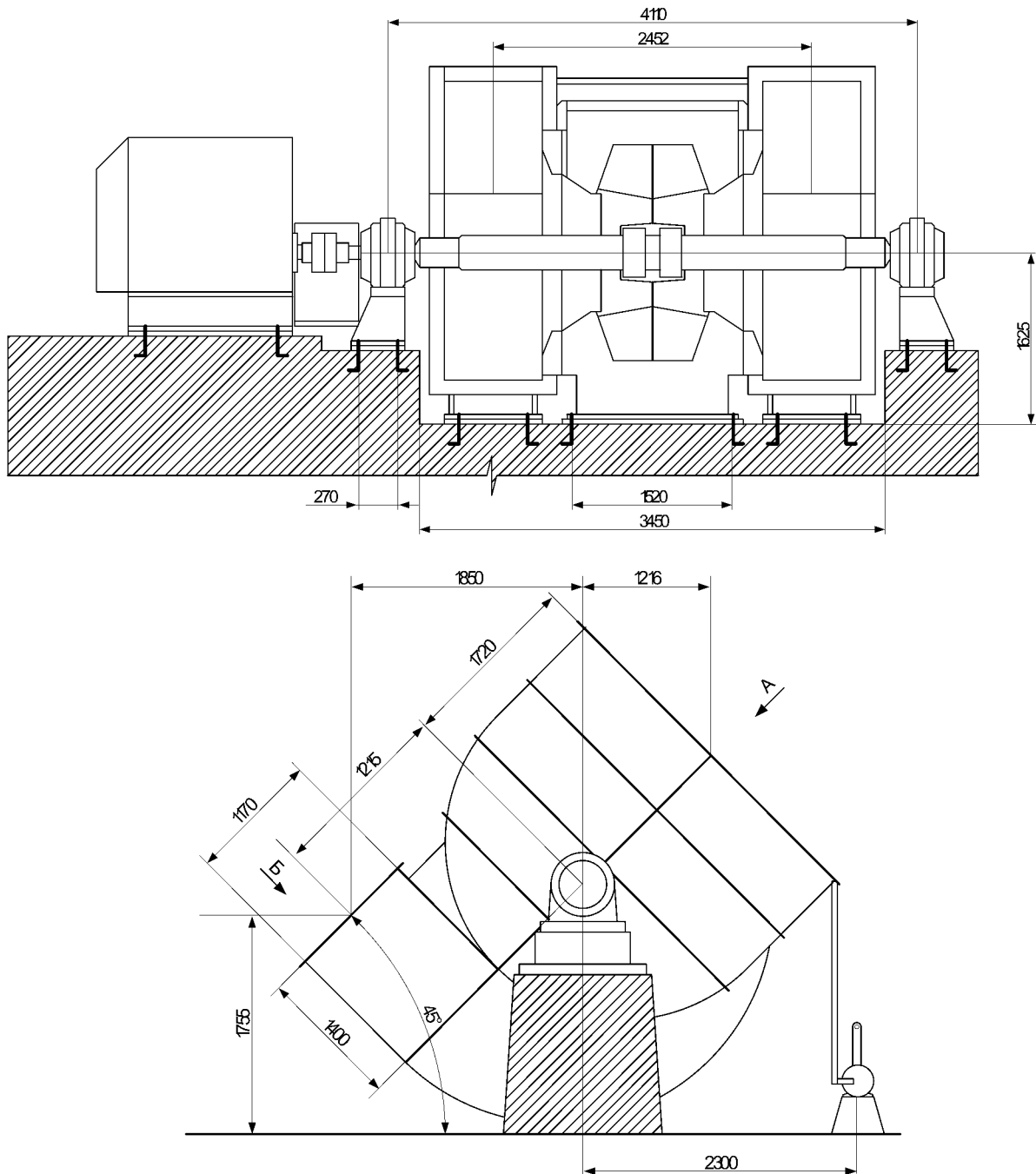


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд димососу

Технічна характеристика димососу приведена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічна характеристика димососу [9]

Найменування	Одиниця вимірювання	Величина	Примітка
Димосос типу Д 20х2			

Діаметр робочого колеса	мм	2000	
Габарити			
Висота		4520	
Довжина без двигуна	мм	3200	
Висота		1800	
Маховий момент ротора	кг*м ²	4500	
Вага ротора	кг	3543	
Загальна вага	кг	10730	
Кількість на 1 котел	шт	2	1- правого обертання 1- лівого обертання
Продуктивність	м ³ /г	245000	
Повний тиск	кПа (кгс/м ²)	4,08 (408)	
Частота обертання	об/хв	730	
Маховий момент	кг*м ²	4500	
Найбільший ККД	%	70	
Потужність	кВт	460	
Електродвигун типу ДА 30-15-69-8/10			
Потужність	кВт	700/400	
Частота обертання	об/мин	743/594	
Сила струму	А	94/52	
Напруга	В	6000	

Схема електропостачання та компонування приводу димососа має свою специфіку. Оскільки Дх20 є двостороннім агрегатом, його вал обертають два електродвигуни, які змонтовані по обидва боки від спірального корпусу (умовно їх позначають як сторони «А» та «Б»).

Таке рішення застосували переважно заради надійного резервування. Якщо один з двигунів раптом виходить з ладу, інший продовжує працювати і тягне навантаження далі. Це дозволяє уникнути аварійної зупинки енергетичного котла і зриву всього технологічного процесу.

Крім того, іноді виникає потреба в паралельній роботі обох машин. Зазвичай це необхідно під час пікових навантажень або в перехідних режимах, коли треба швидко збільшити тягу і створити додаткове розрідження в топковій камері.

Зрозуміло, що для нормального резервування ці двигуни заживлені від різних незалежних секцій шин 6 кВ. Підключення зараз виконано через високовольні коміртки зі старими малооливними вимикачами типу ВМГ-133. До того ж самі кабельні траси свого часу проектувалися суто під прямий пуск двигунів.

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.01	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Задачі керування, аналіз існуючої системи та обґрунтування модернізації

Головною технологічною задачею керування тягодуттєвим механізмом є підтримання заданого розрідження в топочній камері котла ПК-14-2М. Відповідно до технічного завдання, електропривід димососа повинен відповідати таким вимогам: висока надійність роботи, автоматизація процесу, діапазон регулювання продуктивності 3:1, а також можливість як місцевого (ручного) від кнопок, так і автоматичного керування.

В існуючій системі для приводу димососів застосовується нерегульований двохшвидкісний асинхронний електродвигун із прямим пуском. Регулювання витрати відхідних газів здійснюється неефективним аеродинамічним методом – шляхом зміни положення шиберів напрямного апарату за допомогою дистанційного приводу (сервомотор РБ та колонка КДУ). При штучному збільшенні аеродинамічного опору мережі за рахунок прикриття напрямних апаратів, робоча точка димососа зміщується вліво по напірній характеристиці. Це неминуче супроводжується різким падінням загального ККД установки, оскільки значна частина енергії витрачається на подолання опору самих заслінок.

Аеродинамічна, напірна і характеристика ККД димососу приведені на рис.

1.4.

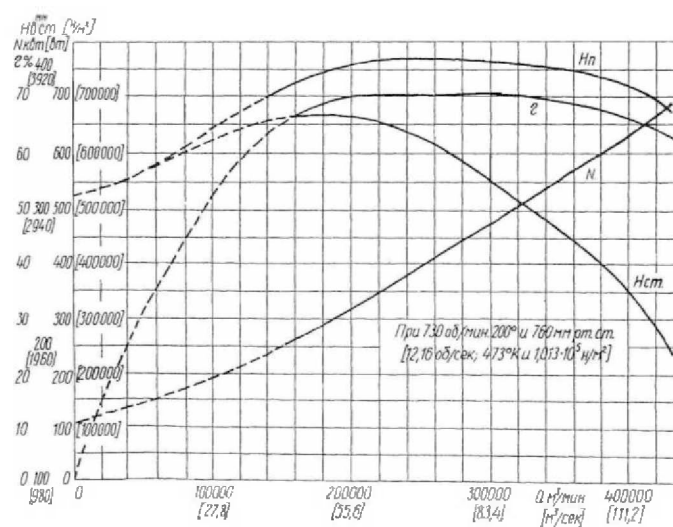


Рисунок 1.4 – Аеродинамічна, напірна і характеристика ККД димососу

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.01	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз аеродинамічних та енергетичних характеристик показує, що такий підхід є критичною зоною втрат енергії. По-перше, прямий пуск агрегатів такої потужності генерує значні пускові струми, що викликає ударні механічні навантаження та перевантаження електромережі. По-друге, штучне створення аеродинамічного опору за допомогою заслінок при зменшенні витрати газів не призводить до пропорційного зниження споживаної активної потужності. Устаткування постійно працює у зоні неефективних характеристик зі зниженим ККД, оскільки на практиці напрямні апарати часто залишаються прикритими на третину, спричиняючи колосальні та постійні перевитрати електроенергії.

Найбільш сучасним та техніко-економічно обґрунтованим рішенням цієї проблеми є повна відмова від механічного дроселювання і впровадження частотно-регульованого електроприводу (ЧРЕП). Ефективне зниження споживаної потужності можливе виключно шляхом плавного зниження частоти обертання ротора двигуна за допомогою перетворювача частоти.

Це дозволить агрегату незалежно від технологічного навантаження завжди працювати по кривій максимального коефіцієнта корисної дії (макс. ККД = 0,7).

Крім прямої економії електроенергії, система «перетворювач частоти – асинхронний двигун» створює додаткові експлуатаційні переваги. До них належать можливість гнучкого програмування режимів плавного пуску і гальмування, забезпечення надійного захисту електродвигуна від струмових перевантажень, а також автоматичний перехід в режим енергозбереження при зниженому моменті навантаження ($M_c < 0,7 M_{nom}$). Окрім цього, класичні системи з механічними виконавчими пристроями (сервомоторами типу РБ) мають значну інерційність, гістерезис та люфти у зчленуваннях. Перехід на частотно-регульований електропривод дозволяє усунути ці недоліки та інтегрувати сучасні мікропроцесорні ПІД-регулятори, забезпечуючи високу точність і швидкодію відпрацювання збурень технологічного процесу [10]. Комплексна модернізація приводу сприяє економії витратних матеріалів та суттєво подовжує загальний термін служби основного технологічного устаткування станції

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.01	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Варто звернути увагу і на інший важливий аспект модернізації – зменшення механічного зносу обладнання. Агрегат Д-20х2 має доволі масивний ротор, маховий момент якого за паспортними даними становить $4500 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Під час прямого пуску від мережі виникають не тільки суттєві перевантаження по струму. Значний динамічний удар припадає на саму механіку: вал, підшипники та муфтові з'єднання зазнають різкого ривка.

Як підтверджується в літературі з теорії електропривода [7], перехід на частотне регулювання дозволяє усунути цю проблему. Двигун розганяється плавно, тому великі інерційні маси більше не зазнають ударних навантажень під час пусків або зупинок. Відповідно, міжремонтний період для механічної частини тягодуттєвої установки в перспективі може бути збільшений приблизно в 1,5–2 рази.

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.01	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК САК ЕП З ТЕХНОЛОГІЧНОЮ УСТАНОВКОЮ ТА ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ РОБОТИ

2.1 Розрахунок технічних характеристик електродвигуна та вибір оптимальної структури системи

2.1.1 Розрахунок потужності і вибір електродвигуна

Підбір асинхронного електродвигуна з каталогу здійснюється на основі наступних критеріїв:

1. Характеристики електричної частини

- робоча напруга двигуна має відповідати розрахунковій ($U_n = U_{\text{нАД}}$);
- паспортна потужність електромашини повинна перекривати або дорівнювати мінімально необхідній потужності приводного механізму ($P_{\text{нАД}} \geq P_{\text{мінНав}}$);

2. Механічні характеристики

- паспортна частота обертання ротора ($n_{\text{ном}}$);
- розрахунковий крутний момент механізму (M_n).

Головним орієнтиром під час розрахунку потужності електроприводу виступає фактичне навантаження на його валу: специфіка та величина статичного опору формуються під впливом зусиль, що прикладаються до головного робочого елемента агрегату – крильчатки. Фізика виникнення цих зусиль є досить комплексною і зумовлена конструктивними особливостями самої машини.

Необхідна потужність приводного двигуна димососу визначається за заданою продуктивністю та напором:

$$P = \frac{Q \cdot H}{\eta_B} \cdot 10^{-3} \cdot k_3 \text{ кВт}; \quad (2.1)$$

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Бсровик Д.С.			Розділ 2			Літ.		Арк.	Акрушіє
Перевір.		Дозсренко О.В.								19	48
Н. Контр.		Дозсренко О.В.						КНУ гр. ЕЕМ-22-1			
Затверд.		Пересунько І.І.									

$$P_{\text{двmax}} = \frac{68.05 \cdot 4080}{0.7} \cdot 10^{-3} \cdot 1.1 = 436 \text{ кВт},$$

де: $Q = 68,05 \text{ м}^3/\text{с}$ – номінальна продуктивність; $H = 4080 \text{ Па}$ – номінальний тиск; k_3 – коефіцієнт запасу (1,1); η – ККД димососу.

Дані номінальної продуктивності, а також номінального тиску обрані з урахуванням технологічного процесу: а саме навантаженням парогазового котла К-14-2М. Ці показники дозволяють створювати та зберігати номінальний режим для розрідження топочної камери котлу.

Визначу необхідну потужність при максимальних перевантаженнях:

$$P_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{max}} \cdot H_{\text{max}}}{\eta_B} \cdot 10^{-3} \cdot k_3, \text{кВт}; \quad (2.2)$$

$$P_{\text{двmax}} = \frac{70 \cdot 4100}{0.7} \cdot 10^{-3} \cdot 1.1 = 451 \text{ кВт};$$

Додатково зробимо обчислення необхідної перевантажувальної здатності двигуна:

$$\lambda_M = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}} \approx \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{451}{436} = 1.03 \quad (2.3)$$

ОТОЖ:

$$P_n \geq P_{\text{розр}}, \lambda \geq 1.03$$

Використання низькообертової 8-полюсної машини дозволяє з'єднати вал двигуна безпосередньо з робочим колесом через муфту (Враховуючи конструкцію робочого колеса димососа). Відмова від редуктора спрощує кінематичну схему, підвищує загальний ККД установки та збільшує міжремонтний інтервал за рахунок меншої швидкості зносу підшипникових вузлів.

Виходячи з такого висновку:

$$n = \frac{60 \cdot 50}{8} = 750 \text{ об / хв}; \quad (2.4)$$

Оптимальна частота обертання 750 об/хв. При такій частоті обертання робоча точка агрегату максимально наближена до розрахункових параметрів мережі. Це дозволяє обладнанню видавати потрібний напір та об'єм повітря у

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

природному режимі, без штучного затискання потоку заслінками чи напрямними апаратами(Щоб створити необхідне розрідження у топці Котлу).

Виходячи із проведених розрахунків потужності та необхідної частоти обертання, остаточний вибір конкретної моделі здійснювався на базі спеціалізованих довідників [11]. Найбільш економічно вигідним рішенням для нашої задачі є електродвигун типу А4-450УК-8МУ3 з короткозамкненим ротором.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики двигуна

Номинальна напруга електродвигуна U_n	6000 В
Значення номінального струму I_n	$I_n = 61,5$ А
Робоча потужність агрегату P_n	500 кВт
Коефіцієнт потужності $\cos \phi_n$	0,83
Коефіцієнт корисної дії установки η	94,2 %
Частота обертання ротора n	750 об/хв
Параметр номінального ковзання s_n	0,014
Відношення максимального моменту до номінального ($M_{\max}/M_{\text{ном}}$)	1,8
Повна маса електродвигуна	2790 кг

Перевірка електродвигуна за умовами нагрівання є обов'язковим етапом. Надмірні температури не лише провокують прискорене теплове старіння ізоляції та руйнування підшипникових вузлів, а й створюють пряму загрозу повного вигорання статорних обмоток.

Номинальна кутова швидкість валу двигуна:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30}, \text{ рад/с}; \quad (2.5)$$

$$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,5 \text{ рад/с}$$

Номинальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}, \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad (2.6)$$

$$M_n = \frac{500 \cdot 10^3}{78,5} = 6369,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки розгін і гальмування здійснюється без навантаження і робочі навантаження мають постійну величину, то двигун перевіряється по умові:

$$P_{\text{дв.н}} \geq P_{\text{дв.р}} \text{ при } M_{\text{дв.н}} \geq M_{\text{дв.р}}$$

$$P_{\text{дв.н}} = 500 \text{ кВт} \geq P_{\text{дв.р}} = 456 \text{ кВт} \text{ и}$$

$$M_{\text{дв.н}} = 6389,4 \text{ Н} \cdot \text{м} \geq M_{\text{дв.р}} = 5808,9 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

У висновку – двигун перегріватись не буде.

2.1.2 Вибір оптимального перетворювача частоти

Фундаментом надійної роботи проекрованої системи є коректний розрахунок параметрів силового перетворювача. Під час цього процесу критично важливо дотримуватись техніко-економічного балансу:

1. Недолік потужності: якщо номінал перетворювача менший за розрахункові дані, це спричиняє пробій тиристорів та подальшу відмову схеми.

2. Надлишок потужності: завищені характеристики не заважають коректній роботі, проте роблять впровадження фінансово недоцільним внаслідок збільшення періоду окупності.

3. Метод керування: обраний підхід до управління безпосередньо корелює з обсягами споживання реактивної потужності, які можуть не виправдано зрости при помилкових налаштуваннях.

Перетворювач частоти повинен задовольняти таким умовам:

$$P_{\text{пр.}} \geq P_{\text{дв.}}, U_{\text{пр.}} \geq U_{\text{дв.}}, I_{\text{пр.}} \geq I_{\text{дв.}} \quad (2.7)$$

Розглянувши каталог пропонованих перетворювачів, ми обираємо фірми «Тріол» АТ-03-500 за розрахунковими даними двигуна.

Таблиця 2.2 – Вхідні дані перетворювача

Тип електроприводу	АТО3-500
Максимальна номінальна потужність електроприводу, кВт	500
Потужність вхідного трансформатора, кВА	630
Повна вихідна потужність електроприводу, кВА	660
Потужність вихідного трансформатора, кВА	800
Номінальний вихідний струм низьковольтної частини електроприводу, А	1000
Номінальний вхідний струм низьковольтної частини електроприводу, А	900

Згідно даних табл. 2.2. перевіряємо вибраний нами перетворювач:

$$P_{\text{пр.}} = 500 \geq 500 \text{ кВт};$$

$$U_{\text{пр.}} = 6000 \geq 6000 \text{ В};$$

$$I_{\text{пр.}} = 1000 \geq 614.$$

За даними умовами перетворювач нам підходить.

Перетворювач Тріол АТ03 (потужність 500 кВт) виконує функції плавного розгону та безперервного керування швидкістю трифазних короткозамкнених асинхронних машин. Дана серія орієнтована на автоматизацію високовольтних приводів, що експлуатуються у промисловому секторі, машинобудуванні чи сфері ЖКГ.

Основою електроприводу є дволанкова схема. Тут використовується низьковольтний частотник, який комутується з високовольтною лінією та безпосередньо двигуном за допомогою трансформаторного підключення. За інвертування струму відповідає транзисторний АІН (IGBT) із ШІМ-управлінням. Сигнали для керування ключами генерує мікропроцесорний контролер.

Алгоритм роботи приводу спирається на скалярне частотне керування. Необхідний технологічний режим підтримується за рахунок програмованої зміни частоти основної гармоніки живлення у зв'язці зі зміною її напруги.

Принцип дії і устрій електроприводу АТ03 в одно шафовому виконанні пояснює функціональна схема, представлена на рис. 2.1.

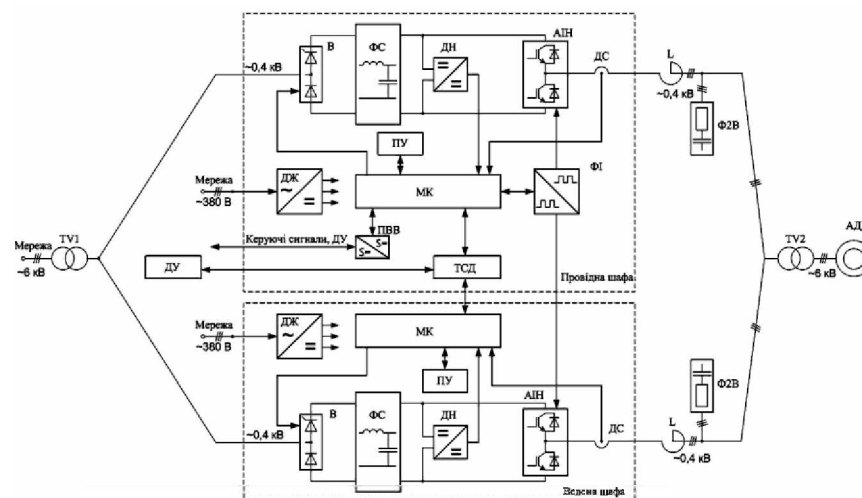


Рисунок 2.1 – Схема підключення Електроприводу Тріол типу АТ-03

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На схемі позначені: В – напівкерований силовий випрямляч (діодно-тиристорний); ФС – LC-фільтр силовий для ланки постійної напруги; АІН – автономний інвертор напруги (на IGBT-транзисторах); АД – асинхронний двигун приводу; ДН – сенсор (або вимірювач) напруги; ДС – сенсор (або вимірювач) струму; ДЖ – блок живлення; МК – контролер на базі мікропроцесора; ФС – драйвер (блок формування сигналів керування транзисторами); ПУ – інтегрований пульт керування; ПВВ – пристрій вводу-виводу даних (зовнішній інтерфейс); TV1, TV2 – силові трансформатори: вхідний (знижувальний) та вихідний (підвищувальний) відповідно; L – мережевий реактор (або дросель); Ф2В – фільтр на виході.

Процес перетворення енергії в електроприводі реалізується через ланцюг TV1 – В – ФС – АІН – L – TV2 (Рис. 2.1). Його суть полягає у поетапній зміні параметрів струму: спочатку мережева напруга знижується трансформатором приблизно до 0,4 кВ, після чого проходить стадію випрямлення. Далі автономний інвертор (АІН) методами широтно-імпульсної модуляції зі змінною частотою генерує нову змінну напругу з необхідними для двигуна характеристиками. Згодом ця напруга підвищується вихідним трансформатором до робочого номіналу. Для нейтралізації «ефекту довгої лінії» між інвертором та двигуном, а також для пом'якшення фронтів напруги на клеммах статора, використовуються мережевий реактор L та вихідний фільтр Ф2В.

2.2 Складання схеми заміщення системи і розрахунок механічних характеристик технологічної системи

Для аналізу статичних режимів роботи приводу, математичну модель необхідно спростити. Для цього вводиться ряд базових допущень:

По-перше, фазні обмотки розглядаються як повністю симетричні.

По-друге, ми нехтуємо явищем витиснення струму та активним опором контуру намагнічування, а саму криву намагнічування апроксимуємо лінійними відрізками. Завдяки такому підходу параметри схеми заміщення стають константами, що спрощує подальший математичний розрахунок.

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При цьому точність результатів залишається на високому рівні – розрахункова похибка рідко виходить за межі 5%.

Звісно, ці спрощення працюють не завжди. Якщо мова йде про розрахунок теплових чи енергетичних показників, або ж коли досліджуються режими з глибоким насиченням магнітопроводу, втрати в сталі та нелінійність обов'язково беруться до уваги.

Крім того, для зручності розрахунків ми фіксуємо умову, що кутова швидкість ротора залишається незмінною протягом одного періоду напруги живлення. Сама ж система рівнянь, за класичною практикою, складається лише для однієї фази двигуна.

Окрему увагу слід звернути на частотний перетворювач, адже його вихідні параметри прямо формують статичні характеристики електромашини. Щоб виявити реальні граничні можливості двигуна та підібрати найефективнішу структуру системи автоматичного керування, вплив перетворювача треба мінімізувати. Тому в подальших дослідженнях джерело живлення умовно вважається ідеальним: приймаємо, що ПЧ має нескінченну потужність і генерує ідеальну симетричну синусоїду напруги чи ЕРС.

Базуючись на описаних вище умовах, ми отримуємо сталі значення опорів для будь-якої заданої частоти. У якості розрахункової моделі обрано класичну Т-подібну схему заміщення (наведено на рис. 2.2). При цьому реактивні опори x_0 , x_b та x'_2 прив'язані до номінальної частоти мережі.

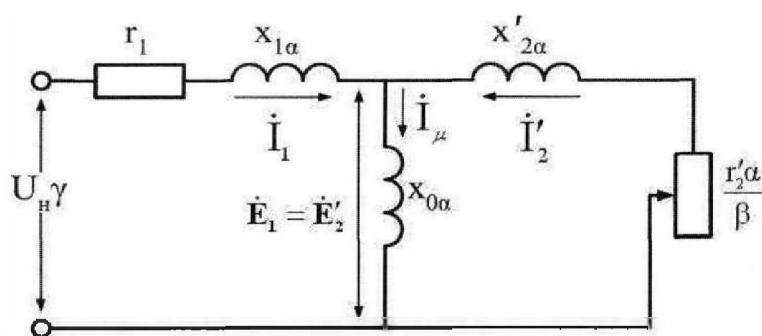


Рисунок 2.2 – Схема заміщення фази асинхронного двигуна при частотному керуванні

Відносна частота статора - відношення частоти струму статора до її номінального значення:

$$\alpha = f_1 / f_{1H} \quad (2.8)$$

Параметр абсолютного ковзання, або відносна частота ротора є відношення абсолютного ковзання $\Delta\omega$ до синхронної швидкості при номінальній частоті:

$$\beta = \Delta\omega / \omega_{1H} = (\omega_1 - \omega) / \omega_{1H} = f_2 / f_{1H} \quad (2.9)$$

Параметр β використовується замість ковзання s і пов'язаний з ним співвідношенням:

$$s = \Delta\omega / \omega_1 = f_2 f_{1H} / f_1 f_{1H} = \beta / \alpha \quad (2.10)$$

Відносна напруга на статорі

$$\gamma = U / U_H \quad (2.11)$$

Коефіцієнт розсіювання відповідно для статора і ротора:

$$\tau_1 = \frac{X_1}{X_0} \quad \text{і} \quad \tau_2 = \frac{X_2}{X_0} \quad (2.12)$$

Загальний коефіцієнт розсіювання:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2 \quad (2.13)$$

Крім того, введемо невідомі, для умовного позначення при розрахунках:

$$b = r_1 (1 + \tau_2); \quad c = x_0 \tau; \quad d = r_1 / x_0; \quad e = 1 + \tau_1..$$

Аналіз і розрахунки сталого режиму проводяться в діючих значеннях величин. З розрахунку схеми заміщення одержуємо:

струм статора

$$I_{1\alpha} = U_H \gamma \sqrt{\frac{r_2^2 / x_0^2 + (1 + \tau_2)^2 \beta^2}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2 r_1 r_2^* \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) r_2^2}} = U_H \gamma \sqrt{\frac{D(\beta)}{A(\alpha, \beta)}}, \quad (2.14)$$

Приведений струм ротора:

$$I_{1\alpha} = U_H \gamma \frac{\beta}{\sqrt{(b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2 r_1 r_2^* \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) r_2^2}} = U_H \gamma \frac{\beta}{\sqrt{A(\alpha, \beta) 2}}, \quad (2.15)$$

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Струм намагнічування:

$$I_{\mu\alpha} = U_H \gamma \sqrt{\frac{r_2^2 / x_0^2 + \tau_2^2 \beta^2}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2r_1 r_2^* \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) r_2^2}} = U_H \gamma \sqrt{\frac{D(\beta)}{A(\alpha, \beta)}}, \quad (2.16)$$

Електромагнітний момент двигуна:

$$M_\alpha = \frac{m_1 U_H^2}{\omega_{1H}} \gamma^2 \frac{r_2^* \beta}{(b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2r_1 r_2^* \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) r_2^2} = \frac{m_1 U_H^2}{\omega_{1H}} \gamma^2 \frac{r_2^* \beta}{A(\alpha, \beta)}. \quad (2.17)$$

де: $C_1 = 4,44 \omega_1 \kappa_\omega$ - конструктивна постійна фазної обмотки статора двигуна; m_1 - число фаз статора; $\omega = \omega_H(\alpha - \beta)$

У формулах (2.14) - (2.17) прийнято наступні позначення, для спрощення:

$$A(\alpha, \beta) = (b^2 + c^2 \alpha^2) \beta^2 + 2r_1 r_2^* \alpha \beta + (d^2 + e^2 \alpha^2) r_2^2;$$

$$C(\beta) = r_2^2 / x_2^2 + (1 + \tau_2)^2 \beta^2;$$

$$D(\beta) = r_2^2 / x_2^2 + \tau_2^2 \beta^2;$$

Коли регулювання відбувається при напрузі, що залежить тільки від частоти і не залежить від навантаження, то абсолютне критичне ковзання дорівнює:

$$\beta_{K(\alpha)} = \pm r_2 \sqrt{\frac{d^2 + e^2 \alpha^2}{b^2 + c^2 \alpha^2}}, \quad (2.18)$$

Максимальний момент агрегату:

$$M_{K(\alpha)} = \frac{3U_{НОМ}^2 \gamma^2}{2\omega_{1НОМ}} \frac{1}{r_{1\alpha} \pm \sqrt{(b^2 + c^2 \alpha^2)(b^2 + c^2 \alpha^2)}} \quad (2.19)$$

Детальний розгляд формули (2.19) доводить, що при роботі на високих частотах впливом параметра r_1 можна знехтувати через його малість порівняно з $xK = x_1 \alpha + x_2 \alpha$. Завдяки цьому досягається важливий ефект: за умови дотримання закону керування $U/f = \text{const}$ (що також записується як $\gamma = \alpha$), максимальний крутний момент двигуна перестане залежати від частоти і підтримується на постійному рівні $K_\alpha = \text{const}$.

2.2.1 Розрахунок механічних характеристик з навантаженням

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дослідження сталих станів приводу вимагає чіткого розуміння його поведінки під навантаженням.

Щоб описати ці процеси математично, необхідно спочатку сформувати еквівалентну схему заміщення та описати силовий ланцюг відповідною системою рівнянь. Цей алгоритм є універсальним для будь-якої конфігурації (від класичних систем постійного струму, як наприклад ТП-Д до змінного – АВК чи ВД). Модель опирається на баланс ЕРС джерела ($E_{\text{нп}}$) та проти-ЕРС рухомого агрегату ($E_{\text{дв}}$), обов'язково враховуючи їхні внутрішні опори ($R_{\text{пр}}$ та $R_{\text{дв}}$ відповідно).

Адекватність розробленої моделі повністю залежить від коректного обчислення цих величин. Відхилення у значеннях параметрів схеми заміщення неминуче спричиняють накопичення похибок під час подальшого розрахунку динамічних режимів та енергетичних характеристик приводу.

Розрахунок параметрів виконуємо на модульний оптимум:

Номінальна кутова синхронна швидкість:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{НОМ}}}{30}, \text{ рад/с}; \quad (2.20)$$

$$\omega_{\text{н}} = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,5 \text{ рад/с}$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}, \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.21)$$

$$M_{\text{н}} = \frac{500 \cdot 10^3}{78,5} = 6369,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Приведений активний опір ротора:

$$R_{\text{р}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{\text{н}} + P_{\text{МЕХ}}}{I_{\text{н}}^2 \frac{1-s_{\text{н}}}{s_{\text{н}}}}, \text{ Ом}; \quad (2.22)$$

$$R_{\text{р}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{500000 + 5000}{61,5^2 \cdot \frac{1-0,0133}{0,0133}} = 0,599 \text{ Ом}$$

Звідси знаходимо величину активного опору статора:

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_3 = \frac{U \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \eta)}{I_H} - C^2 R_p - \frac{P_{\text{МЭХ}}}{3 \cdot I_H^2}, \text{ Ом}; \quad (2.23)$$

$$R_3 = 3,627 \text{ Ом}$$

Приведена індуктивність розсіювання ротора:

$$L_{sp} = L_{rp} = \frac{U}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot (1 + C^2) \cdot k_1 \cdot I_H}, \text{ Гн}; \quad (2.24)$$

$$L_{sp} = L_{rp} = 0.00892 \text{ Гн}$$

Індуктивність статора:

$$L_s = \frac{U}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_H \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} - \frac{2}{3} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_{\text{МАКС}} \cdot s_H}{p \cdot U \cdot s_{\text{КР}}}}, \text{ Гн}; \quad (2.25)$$

$$L_s = 0.323 \text{ Гн}$$

$$L_m = L_s - L_{sp} = 0,314 \text{ Гн}$$

Додаткові коефіцієнти для розрахунку

$$k_2 = \frac{L_m}{L_s} = 0,972$$

$$L_{\Sigma} = L_{sp} + k_2 \cdot L_{rp} = 0.0176 \text{ Гн} \quad (2.26)$$

$$R_{\Sigma} = R_s + k_2^2 \cdot R_p = 4,193 \text{ Ом} \quad (2.27)$$

$$\text{Tel}_1 = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = 0,0042 \quad (2.28)$$

$$\text{Tel}_2 = \frac{L_s}{R_p} = 0,54 \quad (2.29)$$

Коефіцієнт струму:

$$k_c = \frac{U_{3c}}{I_H} = 0,163 \quad (2.30)$$

де: $U_{3c} = \text{const}$

Коефіцієнт потокозчеплення:

$$\psi_H = \frac{M_H}{1,5 \cdot I_H \cdot p \cdot k_2} = 17.99 \quad (2.31)$$

$$k_{\psi} = \frac{U_{3\psi}}{\psi_H} = 0,56$$

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт по швидкості:

$$k_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{зш}}}{\omega_{\text{н}}} = 0,129 \quad (2.32)$$

$$\text{Коефіцієнт перетворювача: } k_{\text{п}} = \frac{U_{\text{п}}}{U_3} = 346,4 \quad (2.33)$$

Моделювання системи управління приводу проводимо в програмному пакеті Matlab бібліотеки Simulink [12].

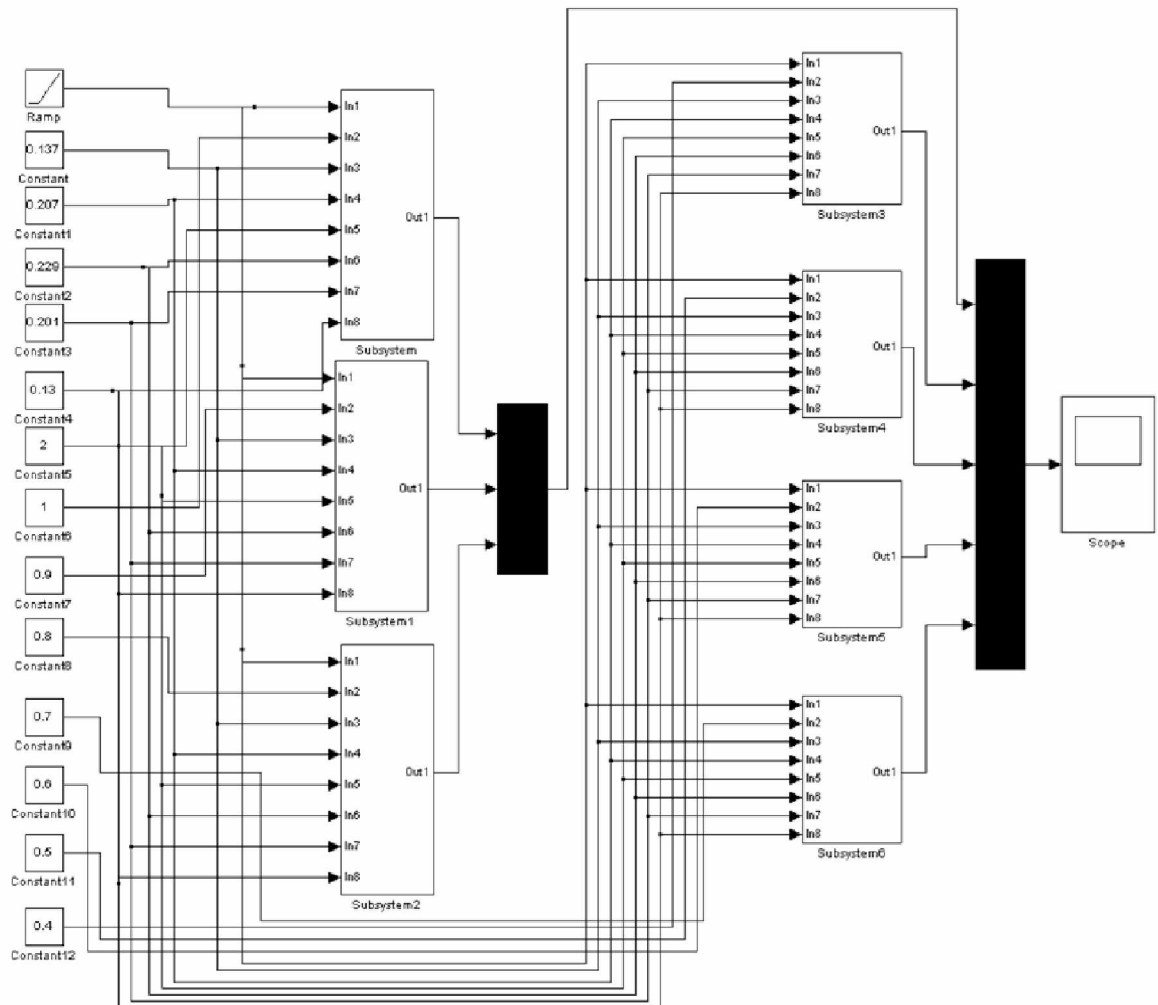


Рисунок 2.3 – Математична модель швидкісних характеристик.

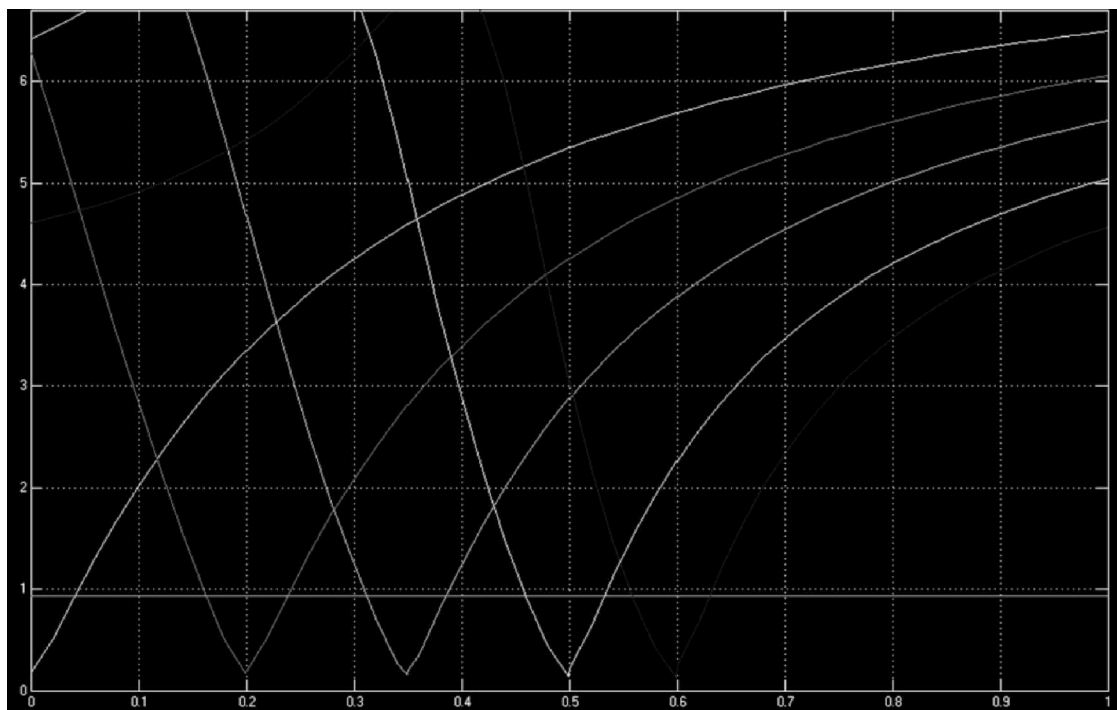


Рисунок 2.4 – Сімейство швидкісних характеристик $I_s^* = f(\beta)$

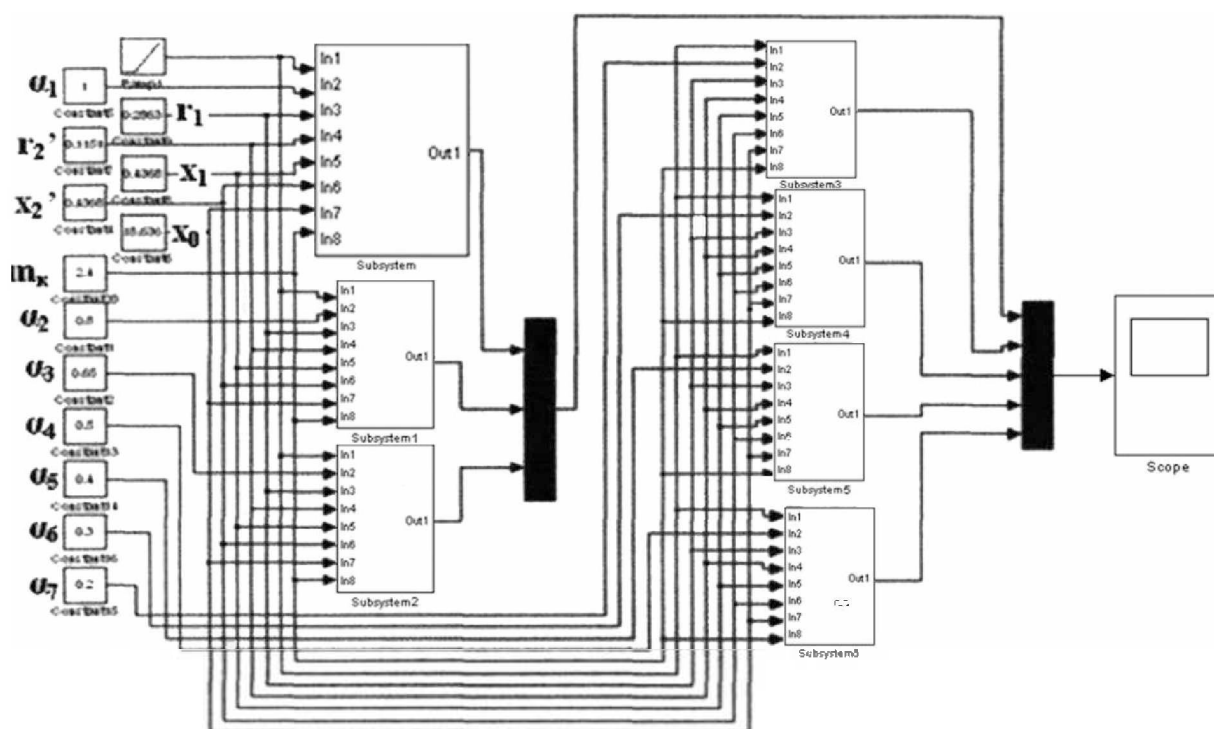


Рисунок 2.5 – Математична модель механічних характеристик

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КНУ.РБ.141.26.247с-4.02

Арк.
31

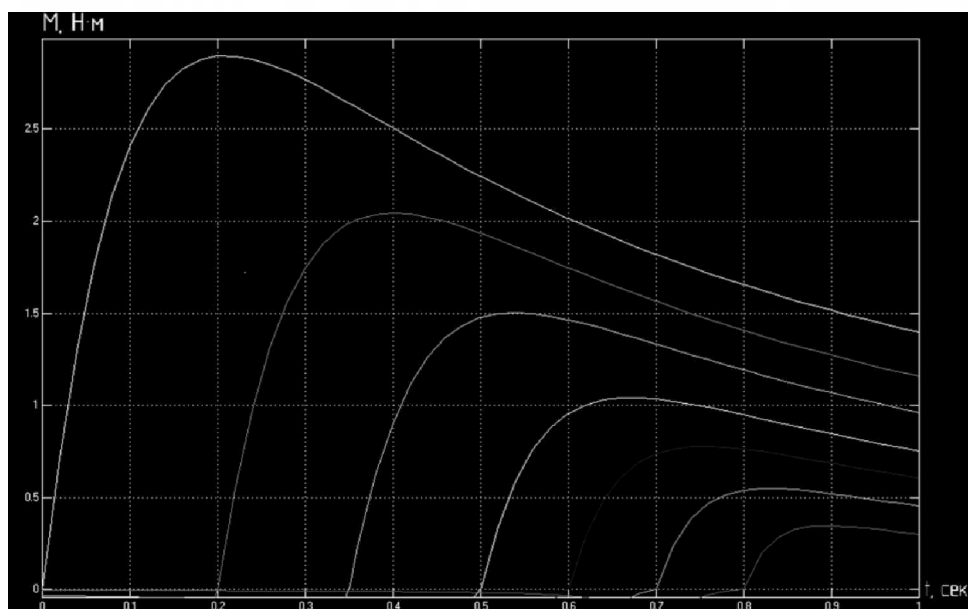


Рис. 2.6 – Сімейство механічних характеристик $M^* = f(\beta)$ з вентиляторним навантаженням.

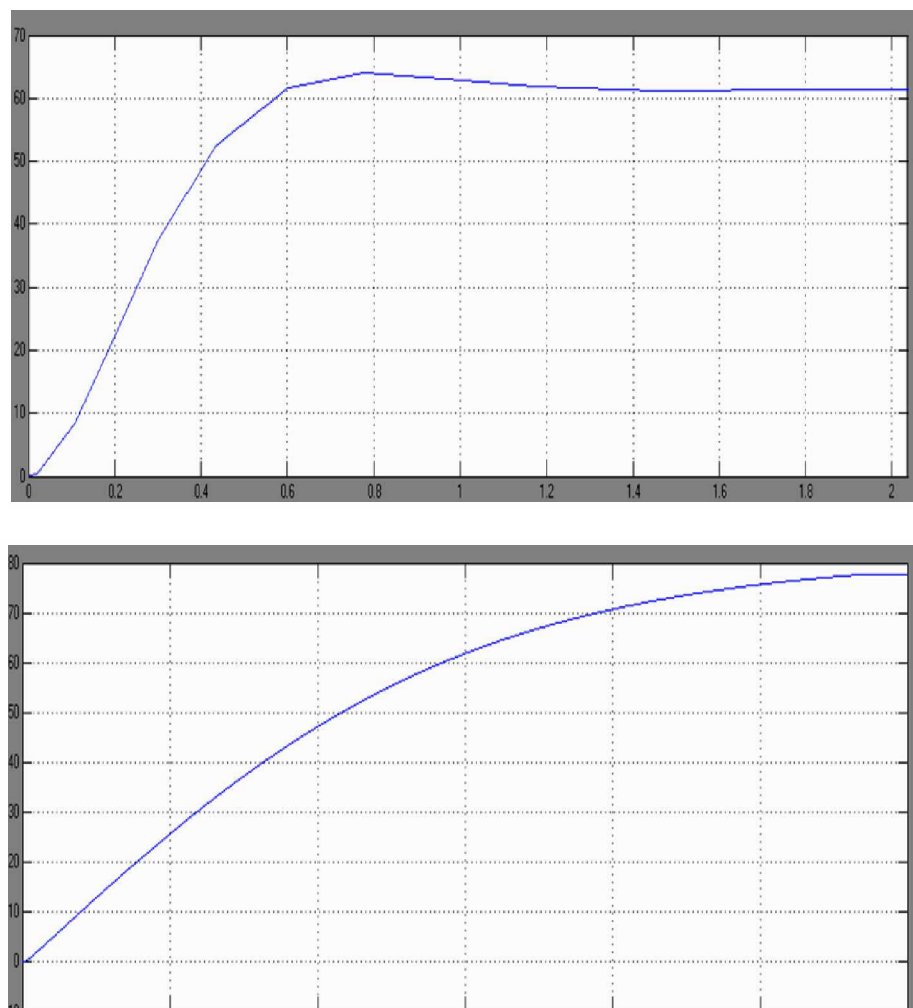


Рисунок 2.7 – Динамічні характеристики електроприводу на холостому ході.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КНУ.РБ.141.26.247с-4.02

Арк.
32

Діапазон регулювання кутової швидкості визначається статизмом, що може бути допущений при малій кутовій швидкості. Якщо момент навантаження прийнятий рівним

$$M_n = const; \quad \beta_c = \beta_{ном}$$

то статизм при малій кутовій швидкості за аналогією з приводом постійного струму можна визначити:

$$\Delta = \frac{\Delta W_{роз}}{W_0} \cdot 100 \% , \quad (2.34)$$

де: β_n - номінальне ковзання; $D_\alpha = f_\alpha / f_1$ - діапазон керування частоти.

Визначаємо ковзання:

$$S = \frac{W_0 - W_H}{W_0} ; \quad (2.35)$$

$$W = \frac{\pi \cdot n}{30} ; \quad (2.36)$$

$$n = n_0 - S \cdot n_0 ; \quad (2.37)$$

$$n_n = n_0 - S_n \cdot n_0 ; \quad (2.38)$$

Тому: $\Delta = S$.

Таким чином виходячи із характеристик (рисунок 2.6), статизм $\Delta_{роз.в.х} = \beta = 0,03$ $\Delta_{роз.н.х} = \beta = 0,03$ тобто дорівнює 3% на нижній характеристиці

$$\Delta_{роз.н.х} = \Delta_{роз.в.х} \cdot D = 0,03 \cdot 4 = 0,12 = 12\% \quad (2.39)$$

Велике значення статизму розімкненої системи підтверджує необхідність розробки замкненої структури САК ЕП.

2.3 Моделювання структури, характеристик та режимів роботи САК електропривода

Якщо математично описувати асинхронний двигун напряму, як систему зосереджених обмоток, ми отримаємо складні диференціальні рівняння з

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

періодичними коефіцієнтами. Аналітично розв'язувати їх дуже незручно. Тому, щоб обійти цю перешкоду, під час проектування традиційно переходять до еквівалентної моделі узагальненої машини, використовуючи ряд перевірених допущень. Щоб уникнути зайвого ускладнення розрахунків, ми використовуємо перехід до моделі узагальненої машини на базі класичних спрощень.

База якісного керування приводом полягає у здатності дуже точно регулювати електромагнітний момент. Досягається це шляхом управління просторовими векторами. При цьому одним із найвідповідальніших кроків стає пошук оптимальних рівнянь. Складність тут подвійна. З одного боку, ми маємо короткозамкнений ротор, до параметрів якого просто немає апаратного доступу. З іншого боку, формат обраного рівняння прямо формує кінцевий вигляд передавальних функцій. Якщо зробити не раціональний вибір, математичний опис стане громіздким, а мікропроцесор отримає невиправдане навантаження. Разом з тим, за будь-якої системи координат базова структура рівняння моменту матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} M &= -\frac{3}{2} z_p (\Psi_{2x} + j\Psi_{2y}) \times (i_{2x} + ji_{2y}) = \\ &= -\frac{3}{2} z_p (\Psi_{2x}i_{2y} - \Psi_{2y}i_{2x}) = \frac{3}{2} z_p (\Psi_{2y}i_{2x} - \Psi_{2x}i_{2y}) \end{aligned} \quad (2.40)$$

Згідно сучасної практики проектування систем керування [14], перехід до обертових систем координат залишається одним із найбільш дієвих інструментів для спрощення алгоритмів. Суть маневру зводиться до просторової фіксації розрахункових осей: ми жорстко прив'язуємо їх до одного з векторів, що генерують електромагнітний момент. Квадратурна проекція обраного орієнтира штучно обнуляється. Як наслідок, із громіздкого диференціального рівняння назавжди випадає ціла складова. Фізично ж процеси у двигуні змінного струму починають описуватися законами звичайної машини постійного струму. Тобто момент стає елементарним добутком величини струму на магнітний потік.

Прикметно, що фундаментальна електротехніка не обмежує нас у виборі базового вектора. Це завжди суто інженерне рішення, головна мета якого – зробити кінцевий програмний код максимально швидким для виконання.

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Якщо, до прикладу, узгодити координатні осі з просторовим положенням потокозчеплення ротора ($\Psi_1 = \Psi_{2d}; \Psi_{2q} = 0$), базова формула трансформується таким чином:

$$M = \frac{3}{2} z_p (\Psi_{2q} i_{2d} - \Psi_{2d} i_{2q}) = -\frac{3}{2} z_p \Psi_{2d} i_{2q} \Big|_{\Psi_{2q}=0} \quad (2.41)$$

А також:

$$M = \frac{3}{2} z_p \frac{L_m}{L_2} (\Psi_{2d} i_{1q} - \Psi_{2q} i_{1d}) = \frac{3}{2} z_p \frac{L_m}{L_2} \Psi_{2d} i_{1q} \Big|_{\Psi_{2q}=0} \quad (2.42)$$

Оцінка наведених математичних залежностей свідчить, що перше рівняння не може бути застосоване при синтезі алгоритмів керування для короткозамкнених асинхронних машин. Причиною є присутність у виразі неконтрольованої змінної (струму ротора), доступ до якої з боку вимірювальної апаратури відсутній.

Практичний інтерес становить рівняння (2.42): у режимі стабілізації роторного потокозчеплення воно формує лінійний зв'язок із вихідним моментом електродвигуна. Таким чином, керування моментотворюючою складовою здійснюється виключно шляхом зміни проекції струму статора i_{1q} .

Підсумовуючи цей етап, розробка системи векторного керування зводиться до чіткої послідовності кроків.

Першочергова задача полягає у пошуку оптимального опорного вектора для просторової орієнтації координатних осей. Як тільки ця прив'язка виконана, фіксується відповідний математичний вираз для електромагнітного моменту. На завершення залишається лише визначити фізичні значення всіх параметрів, необхідних для роботи обраного математичного апарату.

Асинхронна машина з короткозамкнутим ротором описується наступними рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_s &= r_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + j\alpha_k \bar{\psi}_s, \\ 0 &= r_R \bar{i}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\alpha_k - p\nu) \bar{\psi}_R, \\ \bar{\psi}_s &= x_s \bar{i}_s + x_m \bar{i}_R, \\ \bar{\psi}_R &= x_m \bar{i}_s + x_R \bar{i}_R, \\ m &= k \text{Mod}(\bar{\psi}_i \times \bar{i}_k), \\ \bar{T}_m \frac{dv}{dt} &= m - m_n. \end{aligned} \right\} \quad (2.43)$$

Якщо система працює в динаміці, ігнорувати перехідні електромагнітні явища просто неможливо. Для коректного математичного моделювання цих процесів ми виділяємо дві ключові змінні. Ними стануть просторовий вектор струму статора ($\bar{i}_s$) у парі з потокозчепленням ротора ($\bar{\psi}_R$).

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_s &= r_s \bar{i}_s + x_s \frac{d\bar{i}_s}{dt} + j\alpha_k x_s \bar{i}_s - \frac{k_R}{\bar{T}_R} \bar{\psi}_R + jk_R p\nu \bar{\psi}_R, \\ 0 &= -k_R r_R \bar{i}_s + \frac{1}{\bar{T}_R} \bar{\psi}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\alpha_k - p\nu) \bar{\psi}_R, \\ m &= k_R \text{Mod}(\bar{\psi}_R \times \bar{i}_s), \\ \bar{T}_m \frac{dv}{dt} &= m - m_n, \end{aligned} \right\} \quad (2.44)$$

$$\text{де: } r = (r_s + k_R^2 r_R), \quad x_s = \left(x_s - \frac{x_m^2}{x_R} \right), \quad k_R = \frac{x_m}{x_R} \bar{T}_R = \frac{x_R}{r_R} \quad (2.45)$$

Аналіз асинхронної машини з короткозамкнутим ротором у нерухомій системі координат показав, що в нерухомій комплексній системі координат ($\omega_k = 0, \alpha_k = 0$) дійсна вісь позначається я α , а уявна через β .

Просторові вектори у цьому випадку розкладаються по осям:

$$\bar{u}_s = u_{s\alpha} + j u_{s\beta}, \quad \bar{i}_s = i_{s\alpha} + j i_{s\beta}, \quad \bar{\psi}_R = \psi_{R\alpha} + j \psi_{R\beta} \quad (2.46)$$

Підставивши ці значення у рівняння (2.43) та прирівнявши окремо дійсну та уявні частини отримаємо:

$$\left. \begin{aligned}
 u_{s\alpha} &= r i_{s\alpha} + x_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\alpha} - k_R p v \psi_{R\beta}, \\
 u_{s\beta} &= r i_{s\beta} + x_s \frac{di_{s\beta}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\beta} - k_R p v \psi_{R\alpha}, \\
 0 &= -k_R r_R i_{s\alpha} + \frac{1}{T_R} \psi_{R\alpha} + \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} + p v \psi_{R\beta}, \\
 0 &= -k_R r_R i_{s\beta} + \frac{1}{T_R} \psi_{R\beta} + \frac{d\psi_{R\beta}}{dt} - p v \psi_{R\alpha}, \\
 m &= k_R (\psi_{R\alpha} i_{s\beta} - \psi_{R\beta} i_{s\alpha}), \\
 \bar{T}_m \frac{dv}{dt} &= m - m_n.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.47)$$

Система рівнянь (2.47) в операторній формі матиме вигляд :

$$\left. \begin{aligned}
 u_{s\alpha} &= r(1 + \bar{T}_s s) i_{s\alpha} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\alpha} - k_R p v \psi_{R\beta}, \\
 u_{s\beta} &= r(1 + \bar{T}_s s) i_{s\beta} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\beta} - k_R p v \psi_{R\alpha}, \\
 0 &= -k_R r_R i_{s\alpha} + \frac{1}{T_R} (1 + \bar{T}_R s) \psi_{R\alpha} + p v \psi_{R\beta}, \\
 0 &= -k_R r_R i_{s\beta} + \frac{1}{T_R} (1 + \bar{T}_R s) \psi_{R\beta} - p v \psi_{R\alpha}, \\
 m &= k_R (\psi_{R\alpha} i_{s\beta} - \psi_{R\beta} i_{s\alpha}), \\
 \bar{T}_m s v &= m - m_n, \bar{T}_s = \frac{x_s}{r}.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.48)$$

Модель асинхронної машини з короткозамкнутим ротором побудована по рівнянням (2.48) зображена на рис. 2.8.

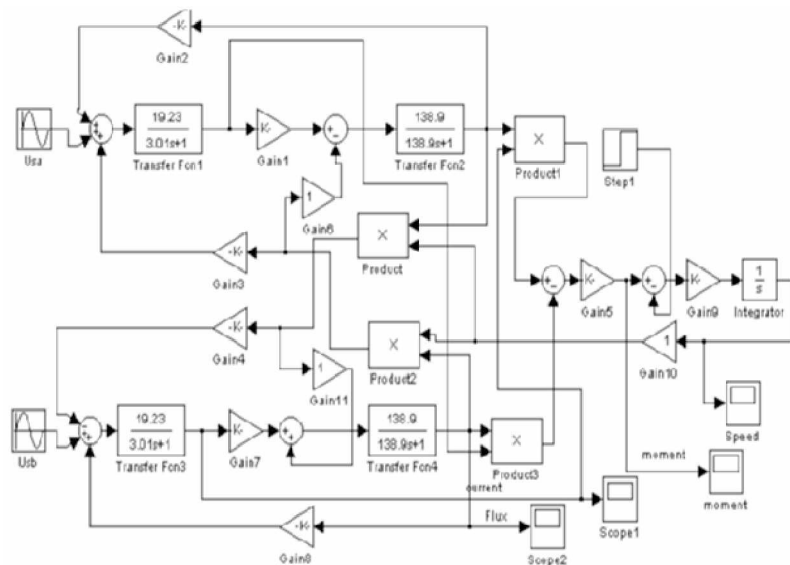


Рисунок 2.8 – Модель асинхронної машини у нерухомій системі координат

Обґрунтовуючи вибір системи електроприводу в цій роботі, ми спираємося на теорію результуючого вектора. Саме цей принцип закладено в основу керування і для асинхронної електромашини, і для інвертора (АІН). Цей підхід є надзвичайно цінним, оскільки він не є звичайною математичною абстракцією. Він має абсолютно чітку фізичну природу: магнітне поле в зазорі двигуна створюється безпосереднім накладанням сил від усіх обмоток. Перевівши ці реальні фізичні процеси на мову векторної алгебри, ми отримуємо можливість розрахувати електромагнітну динаміку узагальненої машини за допомогою відомих рівнянь Горєва-Парка:

$$\begin{cases} u_s = R_s i_s + d\psi_s / dt + j\omega_k \psi_s, \\ u_r = R_r i_r + d\psi_r / dt + j(\omega_k - \omega) \psi_s, \\ \psi_s = L_s i_s + L_m i_r, \\ \psi_r = L_m i_s + L_r i_r, \end{cases} \quad (2.49)$$

де: $U_s, U_r, i_s, i_r, \psi_s, \psi_r$ - результуючі вектори напруги, струмів і потокозчеплень статора і ротора; R_s, R_r, L_s, L_r, L_m – параметри ЕМ; ω_k - швидкість обертання системи координат; ω – швидкість обертання ротора.

Щоб описати взаємодію статора й ротора, всі рівняння зведені до спільної системи координат, яка обертається із заданою швидкістю ω_k . Завдяки такому переходу електромагнітні параметри двигуна фіксуються як постійні величини.

Якщо ж привід переходить у сталий режим ($\omega = \text{const}$), просторові вектори струмів та потокозчеплень взагалі зупиняються один відносно одного. Перехід до обертової системи координат дозволяє виключити тригонометричні залежності з математичної моделі, які постійно змінюються під час обертання валу. Як результат, розрахунок внутрішніх процесів і налаштування контурів керування виконуються набагато легше.

Рівняння можна представити в іншому вигляді, якщо розглядати результуючий потік у повітряному зазорі ω_0 :

$$\begin{cases} u_s = R_s i_s + dL_s' i_s / dt + d\psi_0 / dt + j\omega_k \psi_0, \\ u_r = R_r i_r + dL_r' i_r / dt + d\psi_0 / dt + j(\omega_k - \omega) \psi_0, \\ \psi_0 = L_m (i_s + i_r), \end{cases} \quad (2.50)$$

де: $L_s' = L_s - L_m$, $L_r' = L_r - L_m$ – індуктивності розсіювання статора і ротора відповідно.

Вибір опорного вектора є фундаментальним етапом проектування. Від того, до чого саме ми прив'яжемо рухому систему координат х-у, напряму залежить архітектура всього електроприводу. Якщо як базовий орієнтир обрати вектор напруги статора U_s , який обертається синхронно з полем ($\omega_k = \omega_1$), опис процесів у машині суттєво спрощується. Застосовуючи цей підхід до асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, ми переписуємо базові залежності в новій системі координат. В результаті таких перетворень система рівнянь (2.49) для АКЗ записується у такому вигляді:

$$\begin{cases} u_s = R_s i_s + d\psi_s / dt + j\omega_1 \psi_s, \\ 0 = R_r i_r + d\psi_r / dt + js\omega_1 \psi_r, \\ \psi_s = L_s i_s + L_m i_r, \\ \psi_r = L_m i_s + L_r i_r, \end{cases} \quad (2.51)$$

де: $s = \omega_1 - \omega / \omega_1$ – ковзання

Синтез алгоритмів керування вимагає попереднього формування точної математичної моделі об'єкта. У даному дослідженні для опису електродвигуна застосовано апарат просторових векторів. Ефективність цього методу в теорії частотно-керованого електропривода зумовлена можливістю просторової орієнтації координатної системи відносно векторів струму, напруги або потокозчеплення, що дозволяє вирішувати різнопланові задачі оптимізації.

У якості базового орієнтира для розрахункових осей обрано вектор потокозчеплення ротора Ψ_r . Відповідно до заданої умови та з урахуванням раніше наведеної системи, математичний опис статорного потокозчеплення набуває наступного вигляду:

$$\bar{\Psi}_s = L_s I_s + \bar{\Psi}_r k_r, \quad (2.52)$$

звідки:

$$k_r = \frac{L_m}{L_r}. \quad (2.53)$$

Підставивши це значення в вираз (2.49), отримаємо рівняння в операторній формі при нульових початкових умовах:

$$\bar{U}_s = I_s [R_s + (p + j\omega_k)L'_s] + (p + j\omega_k)k_r\bar{\Psi}_r. \quad (2.54)$$

Із останнього рівняння (2.52) отримаємо:

$$\bar{I}_r = k_r \left(\frac{\bar{\Psi}_r}{L_m} - I_s \right). \quad (2.55)$$

Підставивши в друге рівняння (2.50) отримаємо рівняння для двигуна:

$$\bar{U}_r = \bar{\Psi}_r \left[\frac{k_r R_r}{L_m} + p + j(\omega_k - \omega) \right] - k_r R_r \bar{I}_s \quad (2.56)$$

Із (2.55) та (2.56) знайдемо:

$$\bar{U}_s - k_r \bar{U}_r = I_s [R_s + (p + j\omega_k)L'_s] + \bar{\Psi}_r \left(jk_r \omega - \frac{k_r^2 R_r}{L_m} \right), \quad (2.57)$$

де: $R' = R_s + k_r^2 R_r$ – еквівалентний опір двигуна.

Розкладемо вираз (2.57) на дійсну і уявну частини:

$$\left. \begin{aligned} U_{1s} - k_r U_{1r} &= i_{1s} R' (1 + pT_1') - \omega_k L'_s i_{2s} - \frac{k_r}{T_r} \Psi_{1r} \\ U_{2s} - k_r U_{2r} &= i_{2s} R' (1 + pT_1') - \omega_k L'_s i_{1s} - k_r \omega \Psi_{1r} \end{aligned} \right\} \quad (2.58)$$

де: $T_1' = \frac{L'_s}{R'}, \quad T_1' = \frac{L_r}{R_r}$

U_{1s} – проекція вектора U_s на вісь 1;

U_{2s} – проекція вектора U_s на вісь 1;

U_{1r} – проекція вектора U_r на вісь 1;

U_{2r} – проекція вектора U_r на вісь 1;

Розклавши (2.56) на дійсну та уявну частини, знайдемо:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{1r} &= \frac{(U_{1r} T_r + i_{1s} L_m)}{1 + T_r p} \\ \omega_k &= \frac{\omega + (U_{2r} + k_r R_r i_{2s})}{\Psi_{1r}} \end{aligned} \right\} \quad (2.59)$$

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рівняння електромагнітного моменту:

$$M = \frac{3}{2} p_n k_r \Psi_r i_{2s}. \quad (2.60)$$

Для ЕМ необхідно додати рівняння рівноваги моментів на вихідному валу:

$$M_e - M - J \frac{d\omega}{dt} = 0 \quad (2.61)$$

де: M_n , J – відповідно моменти навантаження й інерції.

Таким чином, використовуючи рівняння (2.58), (2.59), (2.60), (2.61) складемо структурну схему асинхронного двигуна в системі відліку орієнтованій по вектору потокозчеплення ротора Ψ_r . Для АД з короткозамкненим ротором величини u_{1r} та u_{2r} приймають рівними нулю. На базі опису розроблена структурна схема САК ЕП, яка показана на рис. 2.9.

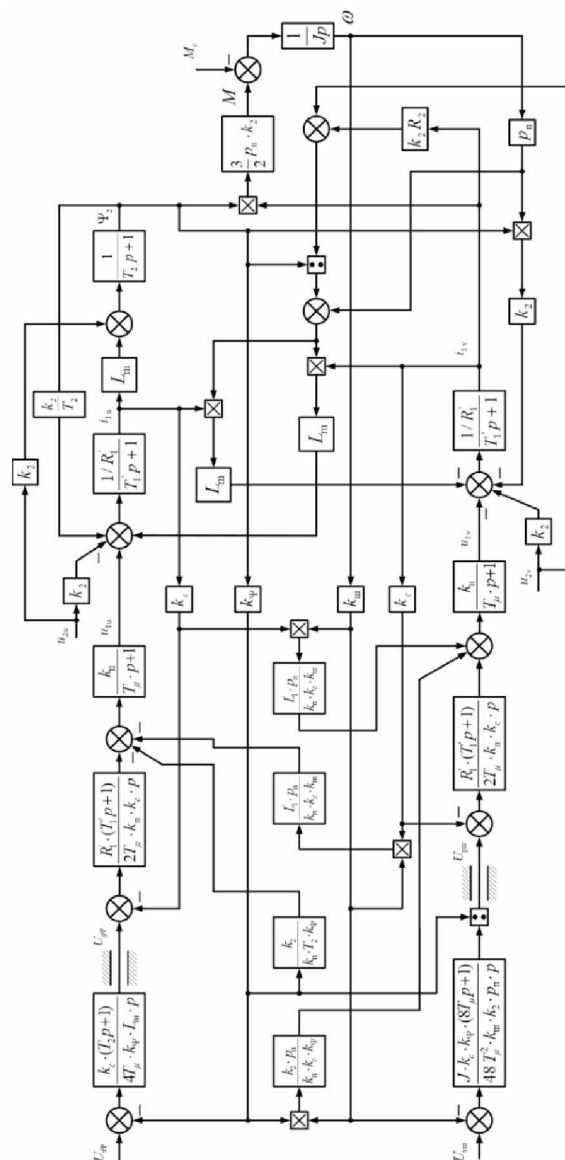


Рисунок 2.9 – Структурна схема САК ЕП ПЧ-АД

2.3.1 Обґрунтування структури САК, визначення передавальних функцій та синтез регуляторів

На основі обраного силового обладнання та розрахованих параметрів двигуна перейдемо до аналізу статичних і динамічних властивостей САК електроприводом за системою «перетворювач частоти – асинхронний двигун» (ТПЧ-АД).

Для математичного опису електромагнітних процесів використаємо обертову двофазну систему координат U - V , орієнтовану за результуючим вектором потокозчеплення ротора $\bar{\psi}_2$. Такий підхід дозволяє максимально спростити рівняння електромагнітного моменту та забезпечити незалежне керування потоком і швидкістю двигуна. Синтез контурів системи керування виконаємо на базі структурних схем асинхронного двигуна. Цей підхід спрощує розрахунок параметрів регуляторів і дозволяє легко перейти до опису системи у змінних стану.

Зважаючи на те, що ротор двигуна є короткозамкненим, його напруги в осях U - V дорівнюють нулю ($U_{2u}=U_{2v}=0$). Для реалізації лінійності системи та забезпечення автономного керування каналами в структурі САК передбачено повну компенсацію внутрішніх перехресних і нелінійних зв'язків. Під час синтезу компенсуючих контурів замість синхронної частоти поля статора використано електричну швидкість ротора (приведену до дво полюсної машини), що спрощує реалізацію алгоритму без погіршення динамічних показників привода.

Усі контури регулювання побудовані на базі пропорційно-інтегральних (ПІ) регуляторів, що гарантує статичний астатизм системи. Контур швидкості налаштовано на симетричний оптимум, що обумовлює встановлення на його вході згладжувального фільтра зі сталою часу $T_\phi=8T_\mu$ або задатчика інтенсивності. Силловий перетворювач частоти представлений двома безперервними аперіодичними ланками в осях U - V , тобто живлення статора здійснюється першою гармонікою напруги.

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таке представлення дозволяє виключити з розрахункової моделі блоки прямого та зворотного перетворення координат, які у свою чергу є обов'язковими лише для фізичного мікропроцесорного контролера. Наведена повна схема (див. рис. 2.9) у змінних стану об'єднує математичну модель асинхронного двигуна та структуру синтезованої системи регулювання разом із вхідним фільтром.

Перший канал керування призначений для стабілізації потокозчеплення ротора ψ_r . Структурно він містить дві значні сталі часу, які потребують компенсації під час синтезу: T_1' (у контурі струму i_{1s}) та T_r (у контурі потокозчеплення ψ_r).

Другий канал забезпечує стабілізацію кутової швидкості ω з одночасним обмеженням струмової складової i_{2s} , що дозволяє підтримувати електромагнітний момент двигуна в межах допустимих значень.

Синтез системи розпочнемо з внутрішнього контуру. Передавальну функцію регулятора струму i_{1s} , розраховану за критерієм модульного (технічного) оптимуму, визначимо за виразом:

$$W_{PC_1} = \frac{1}{2T_\mu P} \cdot \frac{1}{W_{k1}} \cdot \frac{1}{K_\Pi \cdot K_{OT}} \quad (2.62)$$

де: T_μ – постійна часу інвертора (що приймається рівною 0,0005с);

K_Π – коефіцієнт передачі інвертора; K_{OT} – коефіцієнт зворотного зв'язку по

струму; W_{k1} – передатна функція контуру струму i_{1s} .

$$W_{k1} = \frac{\frac{1}{R_1'}}{T_1' P + 1} \quad (2.63)$$

Передатна функція регулятора струму першого каналу:

$$W_{PC_1} = \frac{R_1' (T_1' P + 1)}{2T_\mu K_\Pi K_{OT} P} \quad (2.64)$$

Визначимо передатну функцію регулятора потокозчеплення ψ_r , налаштованого на технічний оптимум:

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_{P\Psi} = \frac{(T_2 P + 1) K_{OT}}{4 T_{\mu} L_m K_{\Psi} P} \quad (2.65)$$

де: K_{Ψ} – коефіцієнт зворотного зв'язку по поточкозчепленню.

В усіх випадках обрані пропорційно-інтегральні(ПІ) регулятори.

Передавальна функція регулятора струму другого каналу регулювання ідентична передавальній функції регулятора струму першого каналу, тобто

$$W_{PC_2} = \frac{R_1' (T_1' P + 1)}{2 T_{\mu} K_{\Pi} K_{OT}} \quad (2.66)$$

Оскільки до системи не висуваються жорсткі вимоги щодо обмеження динамічної похибки швидкості при стрибкоподібному зростанні моменту опору, приймаємо структуру контуру з однократним інтегруванням. Відповідно, як регулятор швидкості використовуємо пропорційну ланку.

Вираз для розрахунку його передавальної функції за критерієм технічного оптимуму має вигляд:

$$W_{PII} = \frac{1}{4 T_{\mu} P} \cdot \frac{1}{W_{k2}} \cdot \frac{K_{OT} K_{\Psi}}{K_{OC}} \quad (2.67)$$

де: W_{k2} – передатна функція об'єкта керування по швидкості:

$$W_{k2} = \frac{3}{2} K_r P_n \frac{1}{JP} \quad (2.68)$$

Підставивши значення W_{k2} з (2.68) в рівняння (2.67), отримаємо передатну функцію регулятора швидкості:

$$W_{PII} = \frac{JK_{OT} K_{\Psi}}{6 T_{\mu} K_{OC} K_r P_n} \quad (2.69)$$

Тоді перетворювач частоти представимо у вигляді інерційного ланцюга, в склад якого входить некомпенсуюча постійна часу T_{μ} :

$$W_n = \frac{K_n}{T_{\mu} P + 1} \quad (2.70)$$

де: K_n – коефіцієнт посилення перетворювача.

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виконаємо розрахунок постійної часу відповідно раніше вказаних виразів.

Коефіцієнт електромагнітного зв'язку ротора:

$$K_r = \frac{L_m}{L_r}; \quad (2.71)$$

$$K_r = \frac{0,0028}{0,0028} = 1$$

Еквівалентна індуктивність розсіювання двигуна:

$$L_1' = L_1 + K_r L_2'; \quad (2.72)$$

$$L_1' = 0,0001 + 1 \cdot 0,0001 = 0,0002;$$

де: $L_1(L_2)$ - повна індуктивність ротора; $L_1 = L_2'$; L_2' - індуктивність розсіювання обмоток статора і ротора; L_1 - повна індуктивність статора.

Еквівалентна електромагнітна постійна обмотки статора:

$$T_1' = \frac{L_1'}{R_1}; \quad (2.73)$$

$$T_1' = \frac{0,0002}{0,0105} = 0,01905$$

Еквівалентний опір статора:

$$R_1' = R_1 + K_r^2 R_2; \quad (2.74)$$

$$R_1' = 0,0042 + 1 \cdot 0,0063 = 0,0105.$$

Еквівалентна постійна обмоток ротора:

$$T_r = \frac{L_2}{R_2}; \quad (2.75)$$

$$T_r = \frac{0,0028}{0,0063} = 0,4444.$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку по статору:

$$K_{oc} = \frac{10}{\omega_n} \quad (2.76)$$

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\text{де: } \omega_n = n_n \frac{\pi}{30}, \text{ рад/сек.}; \omega_n = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,5 \text{ рад/сек.}$$

$$K_{oc} = \frac{10}{155,8} = 0,0642$$

Приймаючи напругу завдання струму, рівне 10В, визначаємо коефіцієнт зворотного зв'язку по струму:

$$K_{or} = \frac{10}{2I_n}; \quad (2.77)$$

$$K_{or} = \frac{10}{2 \cdot 830} = 0,00602$$

Коефіцієнт підсилення перетворювача:

$$K_{\Pi} = \frac{u_n}{u_{ex}}, \quad (2.78)$$

$$K_{\Pi} = \frac{380}{10} = 38.$$

Визначимо номінальне значення потокозчеплення ротора, виходячи із номінального значення електромагнітного моменту:

$$M_n = \frac{3}{2} K_r P_n I_n \Psi_n; \quad (2.79)$$

Звідки

$$\Psi_n = \frac{M_n}{1,5 \cdot K_2 P_n I_n}, \quad (2.80)$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} \quad (2.81)$$

$$M_n = \frac{500000}{155,8} = 3209 (\text{Н} \cdot \text{м}),$$

$$\Psi_n = \frac{3206}{1,5 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 830} = 1,29.$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку з потокозчепленням:

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K_{\Psi} = \frac{10}{\Psi_{\mu}} \quad (2.82)$$

$$K_{\Psi} = \frac{10}{1,29} = 7,75$$

При моделюванні відсутня необхідність прямого і зворотного перетворення координат (Оскільки силовий перетворювач ми представляємо двома неперервними аперіодичними ланками в осях U-V), що має місце в дійсній системі електропривода:

Підставляючи значення параметрів регулятора струму в (2.62), визначимо:

$$W_{PC} = \frac{R_1' (T_1' P + 1)}{2T_{\mu} K_{\Pi} K_{OT}} = \frac{0,0002P + 0,0105}{0,00229} = 4,58515 + \frac{0,0002P}{0,00229}. \quad (2.83)$$

Передавна функція регулятора потокозчеплення:

$$W_{PV} = \frac{K_{OT} (T_2 P + 1)}{4T_{\mu} K_{\Psi} L_m} = \frac{0,0027P + 0,00602}{0,000434} = 13,871 + \frac{0,0027P}{0,000434}. \quad (2.84)$$

Передавна функція регулятора швидкості, настроєного на модульний оптимум:

$$W_{PII} = \frac{JK_{OT} K_{\Psi}}{6T_{\mu} K_2 P_n K_{OC}} = \frac{0,00602 \cdot 7,75 \cdot J}{6 \cdot 0,005 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0,0642} = 12,112J. \quad (2.85)$$

Передавна функція перетворювача частоти:

$$W_n = \frac{K_{\Pi}}{T_{\mu} P + 1} = \frac{38}{0,005P + 1}. \quad (2.86)$$

Передавна функція контуру струму i_{1s} :

$$W_{k1} = \frac{\frac{1}{R_1'}}{T_1' P + 1}, W_{k1} = \frac{\frac{1}{R_1'}}{T_1' P + 1} = \frac{95,24}{0,01905P + 1}. \quad (2.87)$$

$$\frac{1}{T_2 P + 1} = \frac{1}{0,4444P + 1} \quad (2.88)$$

$$\frac{K_2 P_n}{K_{\Pi} K_{OT} K_{\Psi}} = \frac{2}{38 \cdot 0,00602 \cdot 7,75} = 1,128; \quad (2.89)$$

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{K_2}{K_{II} T_2 K_{\Psi}} = \frac{1}{38 \cdot 0,4444 \cdot 7,75} = 0,00764; \quad (2.90)$$

$$\frac{L_1' P_n}{K_{II} K_{OT} K_{OC}} = \frac{0,0002 \cdot 2}{38 \cdot 0,00602 \cdot 0,0642} = 0,02724 \quad (2.91)$$

2.3.2 Загальна характеристика об'єкта автоматизації та його конструктивних елементів

Нормальна робота котлоагрегату вимагає жорсткого дотримання аеродинамічного балансу: газовий тракт має бути максимально наближеним до герметичного стану, щоб унеможливити як вибивання газів назовні, так і неконтрольовані підсоси повітря.

Виходячи з цього, архітектуру керування газовим режимом найбільш доцільно будувати за дворівневим принципом. Базовий (нижній) контур бере на себе безпосередню стабілізацію розрідження. Натомість головна мета керування – оптимізація процесу – покладається на екстремальний рівень, який безперервно генерує уставки для нижньої ланки.

Оскільки якість регулювання прямо залежить від швидкодії реакції на збурення, алгоритм роботи регулятора розраховується з обов'язковим урахуванням інерційності обладнання. У теорії автоматичного керування математична модель перехідних процесів для газоходів зазвичай подається як апроксимація аперіодичною ланкою першого порядку із транспортним запізнюванням:

$$W_1(p) = \frac{P_{\text{нап}}(p)}{P_{\text{дим}}(p)} = \frac{K_r}{T_{r3} + 1} \cdot e^{\tau p}; \quad (2.93)$$

де $P_{\text{нап}}$, $P_{\text{дим}}$ – розрідження в напильнику й створюване нагнітачем.

Традиційний підхід до регулювання потоків у газовому тракті базувався на механічному дроселюванні – введенні додаткового опору у всмоктувальний або нагнітальний канал за допомогою шиберів. Хоча цей метод призводить до значних перевитрат енергії, він масово застосовувався на нерегульованих електроприводах через низькі тарифи на електроенергію та високу вартість

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

систем частотного керування у минулому. Сьогодні ж пріоритетним напрямком є зміна продуктивності нагнітачів безпосередньо через зміну частоти обертання робочого колеса.

Математичний опис того, як зміна частоти живлячої напруги трансформується у зміну кутової швидкості вала ω , базується на рівнянні механічної рівноваги. Оскільки регулювання продуктивності відцентрового нагнітача супроводжується динамічною зміною моменту двигуна та опору середовища, цей зв'язок описується класичним рівнянням руху привода:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\delta} - M_c; \quad (2.94)$$

де $J = J_d + J_{\text{двиг}}^{\text{прив}}$ – момент електродвигуна й нагнітача наведений до вала двигуна; M_d , M_c – відповідно момент двигуна й момент опору.

Оскільки регулювання продуктивності відцентрового нагнітача завжди супроводжується динамічною зміною моменту, ці процеси найзручніше описувати класичним рівнянням руху привода, використовуючи формулу Клосса [13]. По формулі Клосса дивлячись на те, що для робочої ділянки механічної характеристики агрегату має місце нерівність $s \ll s_{kp}$ маємо:

$$M_{\delta} = \frac{2M_k s}{s_k}; \quad (2.95)$$

де M_k - критичний момент двигуна; s , s_k - поточне й критичне ковзання.

Поточне ковзання можна визначити по формулі:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0};$$

де $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p_n}$ – синхронна частота обертання, p_n - число пар полюсів.

Момент опору нагнітача описується виразом:

$$M_c = k_c \omega^2;$$

де k_c – коефіцієнт навантаження.

Підставляючи співвідношення у вираз (2.94) одержимо:

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$J \frac{d\omega}{dt} + A\omega = Bf; \quad (2.96)$$

$$\text{де } A = \frac{M_{kp}}{\pi f_n s_k} + 2K_c \omega_n, \quad B = \frac{M_{kp}}{\pi f_n^2 s_k} \omega_n$$

Рівняння (2.96) можна записати у вигляді:

$$T_d + \omega = K_d f; \quad (2.97)$$

де $T_d = J/A$ - постійна часу двигуна, $K_d = B/A$ коефіцієнт передачі двигуна.

Передатна функція двигуна буде:

$$W_d(p) = \frac{\omega(p)}{f(p)} = \frac{K_d}{T_d p + 1} \quad (2.98)$$

Використання паспортних даних обраного електродвигуна дозволяє аналітично розрахувати всі необхідні коефіцієнти та сталі часу для формування його передавальної функції. (2.98).

Передатну функцію самого нагнітача можна представити як підсилювальна ланка:

$$W_{dc}(p) = \frac{P_{dc}(p)}{\omega(p)} = K_{dc} \quad (2.99)$$

Таким чином, передатна функція об'єкта керування, що включає газохід і нагнітач із двигуном описується виразом:

$$W_0^*(p) = \frac{K_d K_{dc} K_r}{T_d T_r p^2 + (T_d + T_r) p + 1} \cdot e^{\tau p} \quad (2.100)$$

де T_e – постійна часу об'єкта керування, K_0 – коефіцієнт передачі, ξ – коефіцієнт демпфірування, τ – час запізнювання.

Вираз (2.100) апроксимується передатною функцією виду:

$$W_0(p) = \frac{K_0}{T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1} \quad (2.101)$$

де T_0 , ξ - параметри апроксимуючої передатної функції, певні по способі найменших квадратів.

Для забезпечення нульової статичної похибки в контурі стабілізації розрідження найдоцільніше застосувати пропорційно-інтегральний (ПІ) закон

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керування. Математична модель такого типового регулятора описується наступною передавальною функцією:

$$W_p(p) = K_p \left(1 + \frac{K_0}{T_p p}\right); \quad (2.102)$$

де K_p і T_p - параметри регулятора, що підлягають визначенню.

Структурна схема контуру керування представлена на рис 2.10 [15].

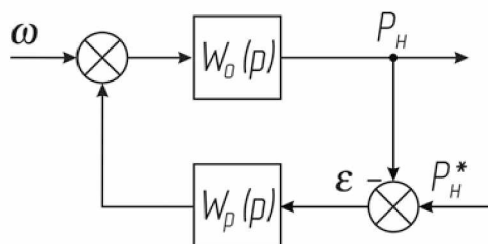


Рисунок 2.10 – Структурна схема контуру керування

Зважаючи на відсутність явного екстремуму інтегрального критерію для вихідної моделі (2.1.2), виникає необхідність у її спрощенні.

З цією метою вихідну передавальну функцію об'єкта (2.100) керування доцільно апроксимувати наступним виразом:

$$W_1(p) = \frac{K_0}{T_1 p + 1} \cdot e^{\tau p}; \quad (2.103)$$

При цьому числові значення параметрів можна одержати за способом найменших квадратів.

Щоб прискорити перехідний процес та зменшити його коливальність, доцільно обмежити вплив інтегральної складової закону керування. Найпростішим рішенням для реалізації цієї умови є введення в систему коригувальної ланки, передавальна функція якої має вигляд:

$$W_k(p) = \frac{k_p k_k}{T_p p + 1} \cdot e^{-\tau_k p}; \quad (2.104)$$

З урахуванням (2.1.4) передатна функція скоректованого регулятора буде:

$$W_k(p) = k_p + \left| \frac{k_p}{T_p p} \right| (1 - k_k \cdot e^{-\tau k p}). \quad (2.105)$$

Оскільки повна апаратно-програмна реалізація комбінованого закону керування потребує значного ускладнення структури контуру, у цьому дипломному проєкті для стабілізації розрідження прийнято регулятор пропорційного типу. Це дозволяє суттєво підвищити швидкодію контуру на етапі відпрацювання швидких збурень у газовому тракті.

2.3.3 Аналіз динамічних характеристик САК електропривода з вентиляторним навантаженням

Процес дослідження пускових характеристик керованої установки спирається на розрахунковий контур, зображений на рис. 2.11. Відповідальність за відтворення динаміки базового об'єкта в цій моделі покладено на операційні блоки 6 і 7. Зі свого боку, ланки 8 і 9 забезпечують введення в систему вентиляторного навантаження, адекватно реагуючи на зміну кутової швидкості привода.

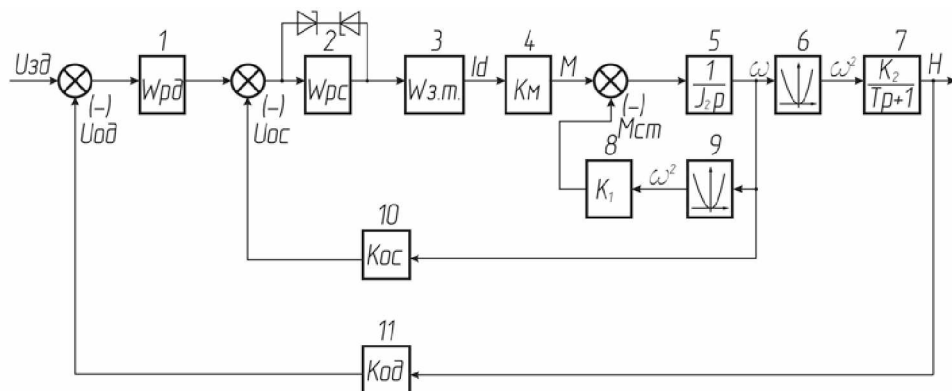


Рисунок 2.11 – Структурна схема ЕП з об'єктом регулювання.

Величина моменту навантаження буде визначатися виразом:

$$M_c = k_1 \cdot \omega_2; \quad (2.106)$$

У номінальному режимі роботи[16]:

$$M_n = k_1 \cdot \omega_{n2}; \quad (2.107)$$

Звідки коефіцієнт пропорційності K_1 :

$$k_1 = \frac{M_n}{\omega_{n2}} = \frac{12738,8}{1572} = 0,517 \frac{Hm}{rad}; \quad (2.108)$$

Для побудови структурної схеми нагнітач подано у вигляді інерційної (аперіодичної) ланки, стала часу якої дорівнює 2 с. Фізична природа процесу така, що генероване розрідження змінюється пропорційно квадрату швидкості двигуна. Відповідна математична залежність описується рівнянням:

$$\frac{\omega_2}{\omega_{n2}} = \frac{H}{H_{B2}} \quad (2.109)$$

Виконавши перетворення, отримаємо:

$$\omega = k_2 \cdot \omega; \quad (2.110)$$

У такий спосіб коефіцієнт пропорційності K_2 визначається виразом:

$$k_2 = \frac{H_n}{\omega_{n2}}; \quad (2.111)$$

Після підстановки значення номінального розрідження й швидкості у вираз (2.1.11) отримаємо:

$$k_{od} = \frac{U_a}{H_{max}} = \frac{10}{1500} = 0,007 \frac{B}{mm.v.cm.} \quad (2.112)$$

де U_a – значення напруги; H_{max} – максимальне значення розрідження.

Оскільки технологічний регламент допускає статичну похибку підтримання розрідження в межах до 5 %, для реалізації алгоритму керування цілком достатньо застосування класичного «П»-регулятора.

Передатна функція регулятора розрідження:

$$W_{pq}(p) = k_{pq} = 10$$

Функціональна схема системи автоматичного керування електропривода з об'єктом регулювання представлена на рис. 2.12.

Комп'ютерне моделювання в пакеті MATLAB дозволяє задавати специфічні початкові умови для пуску привода. Зокрема, розрахунок

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз графіків (осцилограм) доводить, що система успішно справляється зі стабілізацією технологічних параметрів об'єкта. Цільовий показник розрідження на рівні 1500 кгс/м^2 досягається та надійно утримується вже на 22–23 секунді перехідного процесу.

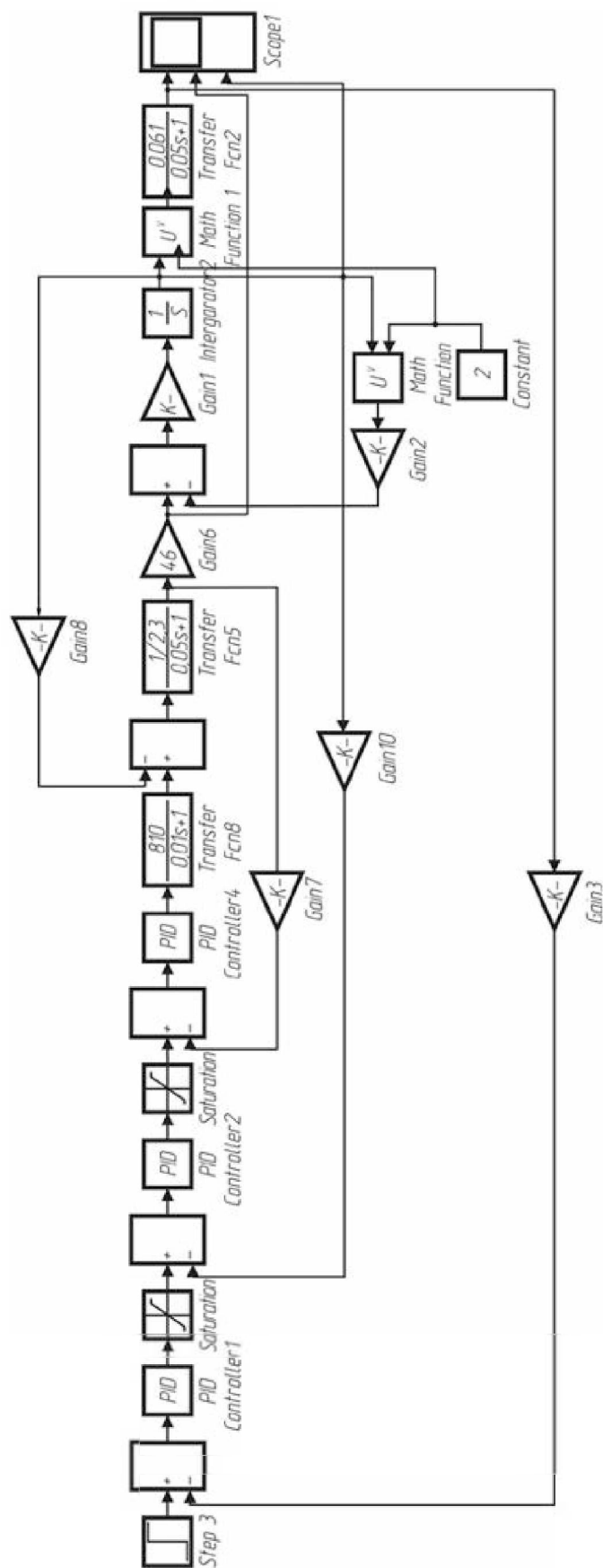


Рисунок 2.13 – Модель САК ЕП з об’єктом регулювання – нагнітачем

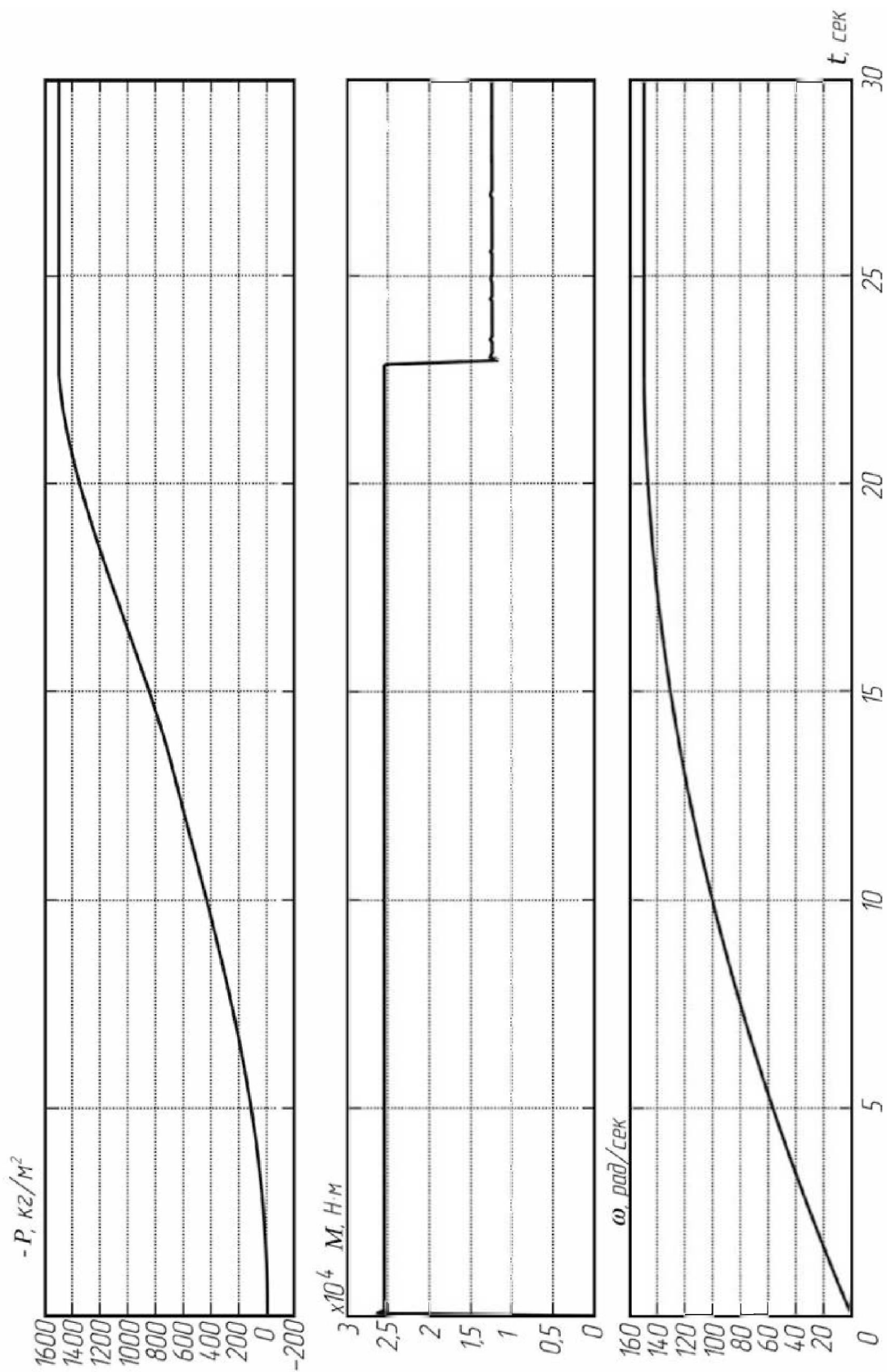


Рисунок 2.14 – Пуск САК ЕП з об'єктом регулювання – нагнітачем

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КНУ.РБ.141.26.247с-4.02

2.4 Обґрунтування елементної бази та розробка функціонально-блочної схеми керування САК

Щоб забезпечити належне керування розрідженням всередині топкової камери, виникає потреба в точному визначенні цього показника. З метою моніторингу рівня розрідження в системі застосовується вимірювальний перетворювач марки Honeywell, модель ST 900.

Загальний вигляд датчика вказаний на рис. 2.15.

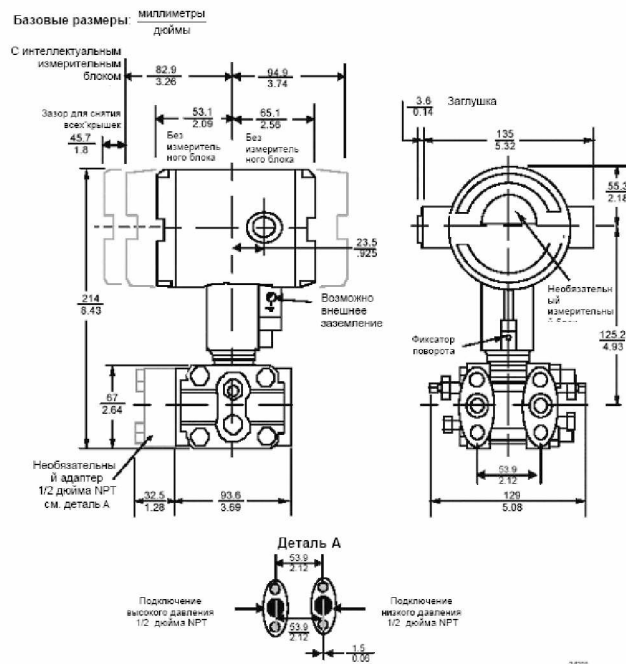


Рисунок 2.15 – Загальний вигляд датчика розрідження

1. Апаратне виконання та метрологічні характеристики

Прилад інтегрується в систему керування за допомогою двопровідної лінії з уніфікованим вихідним сигналом 4–20 мА. З метою підвищення завадостійкості та захисту від впливу агресивного середовища, електронна плата пристрою конструктивно ізольована від клемної коробки.

Основою вимірювального блоку є комплексний п'єзорезистивний сенсор, який одночасно фіксує три параметри: диференціальний тиск, статичний тиск та температуру середовища. За рахунок мікропроцесорної обробки перетворювач апаратно компенсує вплив температурних флуктуацій і змін статичного тиску на результати вимірювань. У разі використання цифрової інтеграції з верхнім

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рівнем АСУТП виключаються додаткові похибки, пов'язані з подвійним перетворенням АЦП/ЦАП.

2. Конфігурація та інтеграція в САК

Параметризація перетворювача здійснюється за допомогою комунікатора Smart Field Communicator (SFC), який підключається до будь-якої точки струмової петлі без необхідності виведення приладу з експлуатації.

З точки зору перевірки надійності контурів САК, важливою є функція апаратної імітації аналогового сигналу. Вона дозволяє тестувати реакцію керуючого контролера та виконавчих механізмів до моменту подачі реального технологічного середовища на об'єкт. Його особливість полягає в одночасному вимірюванні трьох параметрів: диференціального та статичного тиску, а також температури робочого середовища. Вплив температурних коливань автоматично компенсується на апаратному рівні завдяки вбудованому мікропроцесору. Для захисту від агресивних умов, вібраційних навантажень та волог, конструкція передбачає повну ізоляцію електронної плати від клемного відсіку. Експлуатаційна надійність цього рішення підкріплюється значним середнім часом наробітку на відмову (MTBF складає до 470 років) та мінімальним річним дрейфом характеристик (не більше $\pm 0,01\%$).

Використання цифрового формату зв'язку дає змогу передавати не лише поточне значення змінної (PV), а й код статусу її достовірності. Це критично важливо для безпеки технологічного процесу: у разі відмови сенсора система автоматично блокує надходження некоректних даних у замкнуті контури регулювання.

Функції самодіагностики приладу працюють безперервно, а результати тестування одразу транслуються на АРМ оператора. При цьому поточне обслуговування та параметризація перетворювача не потребують його демонтажу з технологічної лінії – усі налаштування виконуються за допомогою комунікатора Smart Field Communicator (SFC).

Збір даних у розробленій системі розділено за функціональним призначенням. Контроль експлуатаційного стану механізму здійснюється за

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

допомогою звичайних дискретних входів, які чітко фіксують режими «увімкнено/вимкнено». Тому обчислювальне ядро безперервно аналізує ще й параметри зворотного зв'язку. В реальному часі відстежується швидкість валу електродвигуна (значення М). Специфічним є канал контролю розрідження в магістралі (значення Р). Цей датчик видає безперервний аналоговий сигнал, тому система пропускає його через вбудований 10-бітний АЦП. Такої розрядності цілком вистачає для забезпечення необхідної точності регулювання.

Принципова схема мікропроцесорної системи управління приведена на рис. 2.17.

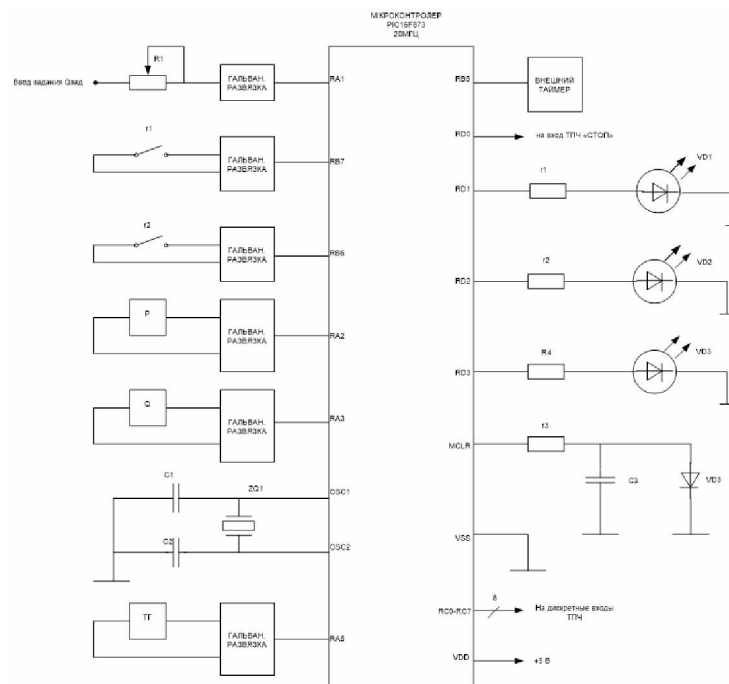


Рисунок 2.16 – Принципова схема мікропроцесорної системи управління

Застосування перетворювачів частоти для регулювання продуктивності турбомеханізмів є основним напрямком створення енергоощадних електромеханічних комплексів [17]. Проектування таких систем автоматизованого електроприводу базується на принципах мінімізації втрат енергії у перехідних режимах [18]. Використання силової перетворювальної техніки та цифрових контролерів забезпечує необхідну точність відпрацювання технологічних параметрів та електромагнітну сумісність обладнання з мережею [19]. Алгоритм функціонування перетворювача розбито на кілька ізолюваних етапів. Перший етап – суто діагностичний. Одразу після увімкнення система

опитує власну апаратну частину, і в разі знаходження дефектів генерується помилка («Аварія») з повним блокуванням подальших дій. За умови успішного тестування, логіка переходить до оцінки сигналів готовності. У режимі очікування дозволу на пуск контролер веде безперервний моніторинг випрямляча та відстежує стан кнопки «Стоп».

Безпосередній запуск двигуна відбувається виключно за наявності всіх дозвільних сигналів. Спочатку виконується зарядка батареї конденсаторів та активація моста випрямляча. Потім формується команда пуску, система валідую робочу напругу і лише після цього починає плавно підвищувати частоту, розганяючи ротор до технологічної уставки.

Що стосується механічних захистів, то вони виведені в окремий підпрограмний контур. Спрацювання кінцевика діє миттєво: воно перехоплює управління для аварійної зупинки приводу незалежно від поточного кроку програми. Заради спрощення візуального сприйняття базової блок-схеми, детальна розгортка цього сервісного переривання на ній не наводиться.

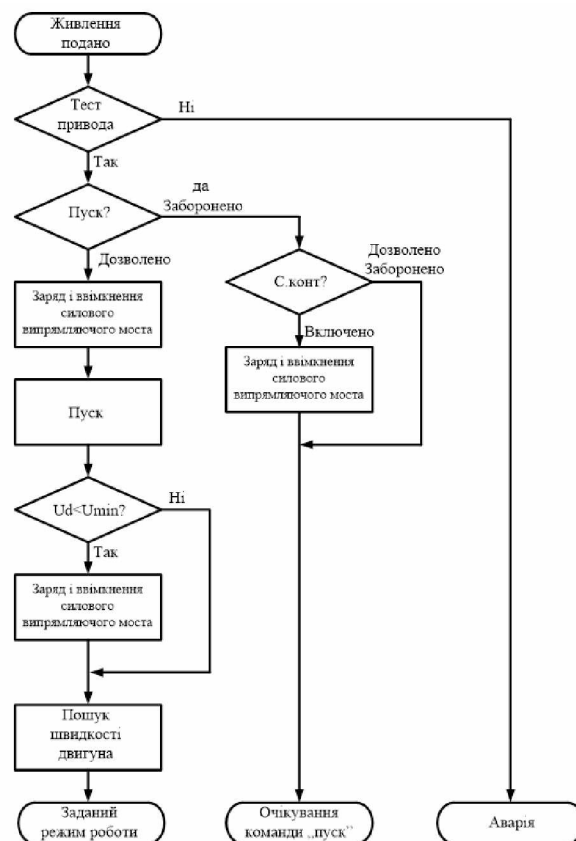


Рисунок 2.17 – Блок-схема управління електродвигуном

2.5 Розрахунок економічної ефективності обраного технічного рішення

Традиційний підхід до регулювання витрати газів, який базується на зміні положення напрямних заслінок, таке дроселювання майже не впливає на обсяг потужності, що споживається з електромережі. Воно лише штучно обмежує газовий потік, що призводить до ще більшого падіння загального ККД системи.

Реальне та ефективне зниження енергоспоживання при змінних навантаженнях можливе виключно шляхом безпосереднього регулювання частоти обертання вала електродвигуна. Інтеграція перетворювача частоти (ПЧ) дозволяє системі підтримувати роботу агрегату за кривою максимального ККД (на рівні 0,7) незалежно від обсягів газів, що перекачуються.

Крім прямого енергозбереження, перехід на зв'язку "перетворювач частоти – асинхронний двигун" забезпечує низку вагомих експлуатаційних переваг порівняно з нерегульованим приводом. Зокрема, мікропроцесорна система ПЧ гарантує комплексний програмований захист двигуна від перевантажень як у штатних, так і в аварійних ситуаціях. Можливість гнучкого налаштування режимів плавного пуску та гальмування значно знижує динамічні удари на механічні вузли.. У комплексі ці фактори дозволяють не лише оптимізувати витрати технологічних матеріалів, але й суттєво підвищити надійність та подовжити загальний термін служби основного обладнання.

Технологічна схема передбачає одночасне функціонування трьох котлів. Оскільки кожен агрегат оснащений парою тягодуттьових машин потужністю по 500 кВт кожна, загальна кількість задіяних у процесі димососів дорівнює шести. Їхня сукупна споживана потужність складає 3 МВт (3000 кВт), що формує значну статтю експлуатаційних витрат.

Для оцінки цих базових втрат виконаємо розрахунок вартості електроенергії за діючої схеми роботи:

Вартість 1 кВт/год складає – 4,32 грн. (Огляд на тарифи станом на 2026 р.).

$$C_{\text{ел}} = n_{\text{зм}} \cdot N_{\text{в}} \cdot W_{\text{н}} = 365 \cdot 24 \cdot 4,32 \cdot 3000 = 113\,529\,600 \text{ грн.} \quad (2.113)$$

Потужність освітлення (з розрахунку 15Вт на 1м²):

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W = 0,015 \cdot S_{\text{мз}} = 0,015 \cdot 7000 = 105 \text{ кВт} \quad (2.114)$$

Вартість споживаної електроенергії на освітлення за рік[20]:

$$C_{\text{осв}} = 365 \cdot 24 \cdot 0,6 \cdot 4,32 \cdot 105 = 2384121,6 \text{ грн.} \quad (2.115)$$

Котельний цех ТЕЦ в середньому за рік виробляє 4152000 Гкал/рік (за даними підприємства на 2007 рік).

Таблиця. 2.3 – Розрахунок капітальних витрат на придбання обладнання

№	Обладнання і апаратура	Кількість	Норма амортизації за рік	Первинна вартість		Річна сума амортизації, грн.
				грн.	усього	
1	Двигун А4-400	2	24	690000	1380000	331200
2	Димосос Дх20	2	24	160000	320000	76800
3	КРУ - 6 кВ	2	24	60000	120000	28000
4	Автоматичний вимикач 6 кВ	2	24	12000	24000	5760
5	Кран - балка	1	24	20000	20000	4800
6	Світильники	≈45	24	900	40500	9720
Разом		-	-	-	1904500	457080
Невраховане обладнання (10%)		-	24	-	190450	45708
Усього		-	-	-	2094950	502788

Річну витрату матеріалів розраховуємо по табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Кошторис витрат на матеріали

№	Матеріали	Одиниця виміру	Витрата матеріалів		Вартість одиниці, грн.	Сума витрат на рік, грн.
			на один агрегат	на річний обсяг		
1	2	3	4	5	6	7
1	Ветош	кг	60	120	5	600
2	Солідол	кг	75	150	100	15000
3	Масло машине	Л	240	480	450	216000
4	Цеатим	кг	125	250	200	50000
Разом		-	-	-	-	281600
Невраховані матеріали (3,5%)		-	-	-	-	9856
Разом		-	-	-	-	291456

На підставі попередніх розрахунків складаємо кошторис річних експлуатаційних витрат і визначаємо собівартість одиниці продукції по базовому варіанту (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Розрахунок собівартості продукції

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

№	Витрати	Витрати, грн.	
		на рік	на виробництво 1Гкал
1	Заробітна плата усіх робітників	19 191 870,15	4,622
2	Відрахування на соц.страхування	4 222 211,43	1,017
3	Енергія	299 684,25	0,072
4	Матеріали	61 652 729,76	19,666
5	Амортизація обладнання	51 969 177,6	12,52
6	Поточний ремонт і утримання обладнання, споруджень	40 913 001,85	9,85
	Разом виробничі витрати	178 248 675,04	42,93
	Інші витрати (5% від разом)	8 912 433,75	2,15
	Загалом	187 161 108,79	45,08

Технічна суть модернізації полягає у дооснащенні існуючого приводу. Проектом передбачено закупівлю та встановлення ПЧ із комунікаційним модулем і панеллю оператора, а також відповідної захисної апаратури (автоматичного вимикача) та первинного перетворювача (датчика розрідження). Щоб оцінити фінансову доцільність таких змін, проводиться порівняльний аналіз капітальних витрат.

Капітальні витрати по проектуваному варіанту:

$$K_2 = K_1 + K_y = 2094950 + 4901688 = 6996638 \text{ грн.} \quad (2.116)$$

де K_1 , K_y – в початкова вартість основних фондів по базовому варіанту і встановленого нового обладнання.

Розраховуємо кількість споживаної електроенергії після модернізації :

$$W_n = 3000 - (3000 \cdot 0,3) = 2100 \text{ кВт} \quad (2.117)$$

Таблиця 2.6 – Кошторис витрат на додаткове обладнання

№	Обладнання і апаратура	Кількість	Прейскурантна ціна за одиницю, грн.	Транспортні і складські розходи, грн.	Вартість монтажних робіт, грн.	Початкова вартість (усього) грн.	Норма амортизації	
							%	грн.
1	Частотний перетворювач 500 кВт	6	650000	20000	32500	4212000	24	1010880
2	Пульт керування і налаштування ПЧ	4	5000	175	400	22000	60	12960
3	Модуль зв'язку	6	3000	175	150	20000	60	11670
4	Датчик розрідження	4	5000	150	250	22000	24	5200

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5	Автоматичний вимикач	6	18000	540	900	117000	24	28000
6	Контактор	4	15000	450	750	64800	24	15552
Разом					207000	4456080	-	1084233
Невраховане обладнання (15% від загальної суми)						445608	24	106945
Усього						4901688	-	1191179
Поточний ремонт і утримання обладнання (7% від усього)						343118,1	-	-

Таблиця 2.7 – Зведений кошторис капітальних витрат

№	Капітальні витрати	Кошторисна вартість, тис.грн.	
		до впровадження	після впровадження
1	Електротехнічне обладнання	2094,95	4901,688
	Усього	2094,95	4901,688

Розраховуємо вартість спожитої електроенергії після модернізації:

$$C_{\text{ел}} = n_{\text{зм}} \cdot N_{\text{в}} \cdot W_{\text{н}} = 365 \cdot 24 \cdot 4,32 \cdot 2100 = 79470720 \text{ грн.} \quad (2.118)$$

Визначимо сумарну вартість енергії за димососному відділенню за рік:

$$C_{\Sigma} = C_{\text{ел}} + C_{\text{осв}} + C_{\text{г.в}} + C_{\text{хв.}} = 79470720 + 2384121,6 + 20800 + 7062 = 81882703,6 \text{ грн.} \quad (2.119)$$

Визначимо економію електроенергії після впровадження модернізації:

$$C_2 = C_1 - C_y = 113\,529\,600 - 81\,882\,703,6 = 31\,646\,896,4 \text{ грн.} \quad (2.120)$$

де C_y – витрати на енергію після впровадження; C_1 – витрати на електроенергію до впровадження нового обладнання;

Тоді амортизація обладнання після впровадження:

$$A_2 = A_1 + A_y = 51\,969\,177,60 + 1191179 = 53160356,6 \text{ грн.} \quad (2.121)$$

де A_1 – амортизаційні відрахування базового обладнання; A_y – амортизаційні відрахування встановленого обладнання.

Економія статей собівартості на матеріалах складає 10% по відношенню базового варіанту:

$$\Delta C_{\text{мат}} = 291456 \cdot 0,1 = 29145,6 \text{ грн.} \quad (2.122)$$

Щорічний та внеплановий ремонт і утримання обладнання :

$$T_2 = T_1 + T_y = 40913001,85 + 343188,1 = 41256119,95 \text{ грн.} \quad (2.123)$$

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.02	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Щоб комплексно оцінити фінансову доцільність запропонованої модернізації, необхідно спиратися на кілька базових критеріїв [21–22].

Головним мірилом виступає розрахункова сума річного економічного ефекту. Крім того, обов'язково вираховується час повної окупності додаткових інвестицій, витрачених на реалізацію проєкту. Фінальним індикатором успішності та рентабельності слугує відповідний коефіцієнт ефективності.

Річний економічний ефект визначається за формулою [21]:

$$E_p = \Delta C - E_n \cdot K_{\text{доо}} = 8678,119 - 0,15 \cdot 4901,688 = 7942,866 \text{ грн.} \quad (2.124)$$

де ΔC економія статей собівартості під впливом запропонованих рішень; E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності ($E_n = 0,15$).

Строк окупності капітальних вкладень:

$$T = K_{\text{доп}} / \Delta C = 4901,688 / 7942,866 = 0,61 \text{ року} \quad (2.125)$$

Коефіцієнт порівняльної ефективності у висновку:

$$E = 1 / T = 1 / 0,61 = 1,64. \quad (2.126)$$

Таблиця 2.8 – Розрахунок собівартості продукції

Витрати	Витрати, грн.				Відхилення	
	до модернізації		після модернізації			
	на рік	на одиницю продукції	на рік	на одиницю продукції	На обсяг	На одинцю продукції
Відрахування на соц.страхув	4222211,4	1,017	4222211,4	1,017	0	0,0000
Заробітна платня	19191870,15	4,622	19191870,15	4,622	0	0,0000
Матеріали	291456	0,072	262310,4	0,06	-29145,6	-0,007
Амортизація	51969177,6	12,52	53160356,6	12,8	-1191179	-0,29
Поточний ремонт і утримання обладнання	40913001,85	9,85	41256119,95	9,94	-343118	-0,08
Енергія	91652729,76	22,07	81882703,6	19,72	9770026,16	2,35

Разом виробничі витрати	208240446,76	50,15	199975570,7	48,16	8264876,06	1,99
Інші витрати (5% від разом)	10412022,338	2,51	9998778,534	2,41	413243,81	0,1
Усього	218652469,098	52,66	209974349,2	50,57	8678119,898	2,09

У висновку до розрахунків складемо зведену порівняльну таблицю техніко-економічних показників електростанції (табл. 2.9).

Таблиця 2.9 – Аналіз ефективності проектного рішення.

№	Показники	Од.вим.	Варіанти		Відхилення
			базовий	проектний	
1	2	3	4	5	6
1	Склад працівників за обл.	чол.	150	150	-
2	Річний об'єм продукції	тис.м ³	4148,7	4148,7	-
3	Продуктивність роботи	тис.м ³ /чол.	27,66	27,66	-
4	Собівартість об'єму продукції	тис. грн.	218652469,098	209974349,2	8678119,89
	зокрема:				
	- економія ЕЕ	тис.грн.	-	-	9770026,16
	- економія витрат на матеріали	тис.грн.	-	-	-29145,6
	- амортизаційні відрахування	тис.грн.	-	-	-1191179
5	Собівартість одиниці продукції	грн./тис.м ³	52,66	50,57	2,09
6	Строк окупності кап. вкладень	рік	-	0,61	-
7	Економічний ефект	тис.грн.		7942,866	
8	Коефіцієнт ефективності	-	-	1,64	-

Проведений техніко-економічний аналіз доводить, що модернізація тягодуттєвого комплексу ТЕЦ-3 є фінансово вигідною.

Як наслідок, час повної окупності початкових інвестицій звується до 0,61 року. Якщо оцінювати очікуваний річний економічний ефект, то він сягає 7942,866 тис. грн. Спираючись на ці цифри, систему керування можна впевнено рекомендувати до практичного впровадження на станції.

ВИСНОВКИ

У роботі виконано аналіз та розробку системи керування газовим режимом промислових об'єктів. Встановлено, що впровадження дворівневого принципу керування із застосуванням частотно-регульованого асинхронного електропривода є перспективним напрямом підвищення енергоефективності, точності та надійності стабілізації технологічних параметрів.

У першому розділі обґрунтовано дворівневу архітектуру побудови системи: де верхній рівень відповідає за оптимізацію робочого процесу, а локальна система автоматичної стабілізації розрідження будується на базі комплексу ПЧ-АЧ. Для розрахунку контурів керування визначено передавальні функції технологічного обладнання, де двигун, газохід та нагнітач подано у вигляді відповідних математичних моделей.

У другому розділі синтезовано структурну схему електромеханічної системи з вентиляторним моментом опору. На основі аналітичних досліджень встановлено, що для поточного об'єкта раціональним є застосування П-регулятора розрідження. Показано, що математичний опис повинен враховувати квадратичний зв'язок між продуктивністю та розрідженням, а сам нагнітальний агрегат доцільно розглядати як аперіодичну ланку.

Результати симуляції перехідних процесів у пакеті MATLAB підтвердили високу якість динамічних показників та повну відповідність системи висунутим вимогам. Замкнений контур забезпечує якісне відпрацювання завдання за швидкістю протягом 22,5 с, при цьому стабілізація розрідження на робочій позначці 1500 кгс/м² досягається не більше ніж за 23 секунди.

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.В						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Бсровик Д.С.			Висновки			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Дозсренко О.В.								67	1
								КНУ гр. ЕЕМ-22-1			
Н. Контр.		Дозсренко О.В.									
Затверд.		Пересунько І.І.									

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Климовицький М. Д., Копелович А. П. Автоматичний контроль і регулювання в чорній металургії. – М.: Металургія, 1967. – 787 с.

[2] «Інструкція з експлуатації агрегатів котельного цеху на ТЕЦ-3» ПАО «АрселорМіттал Кривий Ріг» - 2022р.

[3] Свято світла і тепла. URL: <https://metalurg.online/novyny/sviato-svitla-i-tepla>. - 2025.

[4] Клименко В. М., Ковальов О. П. Автоматизація теплоенергетичних процесів на ТЕС і ТЕЦ: Монографія. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 280 с.

[5] Денисов О. В., Козлов А. В. Експлуатація та модернізація котельного обладнання промислових підприємств. – Запоріжжя: НУ "Запорізька політехніка", 2019. – 305 с.

[6] Бойко А. В., Назаренко І. В. Модернізація та підвищення надійності обладнання теплових електростанцій. – Дніпро: НТУ "Дніпровська політехніка", 2022. – 198 с.

[7] Шлипченко З. С. Насосы, компрессоры и вентиляторы. – Київ: Техніка, 1976. – 368 с.

[8] Парасюк В. М. Експлуатація котлів. - 1999 р.

[9] «Інструкція з експлуатації двигунів власних потреб на ТЕЦ-3» ПАО «АрселорМіттал Кривий Ріг» - 2022р.

[10] Дозоренко О. В., Боровик Д. С. Аналіз модернізації тяго-дутьових механізмів ТЕС та ТЕЦ гірничорудних підприємств в умовах енергодефіциту. *Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства»*: матеріали конференції. Кривий Ріг, 2026.

[11] Ротач В. Я. Розрахунок настроювання промислових систем

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.Л		
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	Список використаних джерел		
Розроб.	Боровик Д.С.						
Перевір.	Дозоренко						
Н. Контр.	Дозоренко						
Затверд.	Пересунько						
					Літ.	Арк.	Акрушів
						68	2
					КНУ гр. ЕЕМ-22-1		

регулювання, -1984 р.

[12] Попович М.Г., Ковальчук О.В. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи, - 2005.

[13] Ротач В. Я. Розрахунок настроювання промислових систем регулювання. – М.: Енергоатомвидав, 1984.

[14] Попович М. Г., Ковальчук О. В. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посіб. – Київ: Либідь, 2005. – 672 с.

[15] Файнштейн В.Г. Конспект лекцій по теорії електропривода. Частина 1 НМетАУ, КМФ, 2001 р.

[16] Бесекерський В.А.,Павлов Е.П. Теорія систем автоматичного регулювання.- М: Наука 1975.

[17] Промислові прилади і засоби автоматизації : Довідник / В. Я. Садовий О. С., Чорний О. П. Енергоощадні електромеханічні системи з перетворювачами частоти: Навчальний посібник. – Кременчук: КрНУ, 2020. – 312 с.

[18] Лозинський О. Ю., Мороз В. І., Савойський Ю. В. Сучасні автоматизовані електроприводи: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 345 с.

[19] Іванов С. М. Промислова електроніка та перетворювальна техніка в електроенергетиці. – Київ: Університет економіки та права "КРОК", 2020. – 240 с.

[20] Осадчук Ю.Г., Пересунько І.І., Ткаченко Г.І., Федотов В.О., Кальмус Д.О. Системи керування електроприводами, - 2024р.

[21] Покропивний С. Ф. Економіка підприємства: Підручник. – Київ: КНЕУ, 2006. – 528 с.

[22] Дозоренко О. В., Боровик Д. С. Підвищення енергоефективності тягодуттьових установок засобами автоматизованого частотного керування електроприводами. *Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні питання гірничо-металургійного виробництва»: збірник тез доповідей.* Кривий Ріг: КНУ, 2026.

					КНУ.РБ.141.26.247с-4.Л	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		