

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

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

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

**до випускної кваліфікаційної роботи
бакалавра**

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Даровик Яни Олександрівни

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему: Електромеханічне обладнання металургійного виробництва.

Електропривод димососа котла ДЕ-25-14 в умовах теплосилового цеху

АТ «Південний ГЗК»

(повна назва теми)

за матеріалами технологічного процесу теплосилового цеху

АТ «Південного ГЗК»

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник

К.П.Н.

(наук. ступінь, вчене звання)

(підпис)

Модло Є.О.

(прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від 16.06 2026р. № 405-ст

Завідувач кафедри

(підпис)

доцент, к.п.н.

Наук. ступень, вчене звання

Є.О. Модло

Ініціали, прізвище

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

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« ____ » _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ(КИ)

Даровик Яні Олександрівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи: Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електропривод димососа котла ДЕ-25-14 в умовах теплосилового цеху АТ «Південний ГЗК»

керівник випускної роботи Модло Євгеній Олександрович

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «06» квітня 2026 року
№ 237-ст

2. Строк подання студентом випускної кваліфікаційної роботи 03.06.2026

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи Параметри котла ДЕ-25-14ГМО: паропроодуктивність 23 т/год; тиск у барабані 14,0 кгс/см²; температура насиченої пари 194°C; площа радіаційної поверхні нагрівання 60,5 м²; площа конвекційної поверхні нагрівання 212 м²; температура газів, що виходять при роботі на природному газі 135°C; ККД котла при роботі на природному газі 92,3%; довжина 11500 мм; ширина 5770 мм; висота 24352 мм.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 4.1 Аналітична частина. Опис технологічного процесу, послідовності роботи механізмів автоматизованого об'єкту. Обґрунтування способу регулювання асинхронного двигуна та вибору перетворювача. Визначення навантаження і розрахунок потужності електродвигуна 4.2 Основна частина. Аналіз існуючої системи керування приводом димососа. Способи регулювання розрядження в котлах. Розробка системи автоматичного регулювання швидкості димососу. Алгоритм регулювання швидкості димососу. Розрахунок параметрів електродвигуна для моделювання на ЕОМ. Заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Схема розташування - ВРБ.141.237-ст.01.Е7; Схема електрична функціональна - ВРБ.141.237-ст.01.Е2; Механічні характеристики двигуна - ВРБ.141.237-ст.01.Е0.1; Алгоритм регулювання швидкості димососу - ВРБ.141.237-ст.01.Е0.2; Графіки перехідних процесів - ВРБ.141.237-ст.01.Е0.3; Схема електрична принципова - ВРБ.141.237-ст.01.Е3.

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналітична частина	Модло Є.О.	06.04.2026	06.04.2026
Основна частина	Модло Є.О.	06.04.2026	06.04.2026

7. Дата видачі завдання 12.04.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної роботи	Строк виконання етапів випускної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	01.05.2026	
2.	Основна частина	24.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	29.05.2026	
4.	Виконання графічної частини	03.06.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	03.06.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	18.06.2026	

Студент

_____ (підпис)

Даровик Я.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи

_____ (підпис)

Модло Є.О.
(прізвище та ініціали)

№ ряд ка	Фор мат	Позначення			Назва	Кіл. листів	№ екз.	Прим.
1	A3	ВРБ.141.237-см.01.Е7			Схема розташування	1		
2								
3	A3	ВРБ.141.237-см.01.Е2			Схема електрична	1		
4					функціональна			
5								
6	A3	ВРБ.141.237-см.01.Е0.1			Механічні характеристики	1		
7					двигуна			
8								
9	A3	ВРБ.141.237-см.01.Е0.2			Алгоритм регулювання	1		
10					швидкості димососу			
11								
12	A3	ВРБ.141.237-см.01.Е0.3			Графіки перехідних	1		
13					процесів			
14								
15	A3	ВРБ.141.237-см.01.Е3			Схема електрична	1		
16					принципова			
17								
18	A4	ВРБ.141.237-см.01.П3			Пояснювальна записка	52		
19								
20								
					ВРБ.141.237-см.01.ВР			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розроб.	Даровик Я.О.				. Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електропривод димососа котла ДЕ-25-14 в умовах теплосилового цеху АТ «Південний ГЗК» Відомість роботи	Літера	Аркуш	Аркушів
Пров.	Модло Є.О.						4	1
						ННТІ ДУЕТ Каф.ЕІА гр. ЗЕПА-22		
Н.контр.	Модло Є.О.							
Затв.	Модло Є.О.							

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 52 с., 17 рис., 7 табл., 35 джерел.

Об'єкт дослідження - система підтримання розрідження у топці парового котла ДЕ 25-14.

Предмет дослідження - методи й технічні засоби автоматизованого керування електроприводом димососа котельної установки теплосилового цеху гірничо-збагачувального комбінату.

Мета роботи - досягти вищої точності регулювання та зниження питомих витрат електроенергії шляхом заміни застарілого шибєрного механізму на систему частотного керування електроприводом димососа.

Методи дослідження: порівняльна оцінка способів управління асинхронними двигунами, виконання інженерних розрахунків параметрів електропривода, імітаційне моделювання перехідних процесів у пакеті MatLab/Simulink.

Отримані результати: спроектовано автоматизовану систему регулювання розрідження на базі частотного перетворювача Danfoss VLT 6000 HVAC та промислового контролера Beckhoff CX5130; за підсумками імітаційного моделювання підтверджено достатню швидкодію та енергоефективність розробленої системи.

Ключові слова: автоматичне регулювання, асинхронний двигун, димосос, котел, перетворювач частоти, розрідження, система підпорядкованого регулювання, топка, частотне керування.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Опис теплосилового цеху	9
1.2 Опис технологічного процесу, послідовності роботи механізмів автоматизованого об'єкту	11
1.3 Обґрунтування способу регулювання асинхронного двигуна	14
1.3.1 Реостатне регулювання.....	14
1.3.2 Регулювання зміною напруги статора двигуна.....	14
1.3.3 Частотне регулювання	15
1.3.4 Регулювання швидкості зміною числа пар полюсів.....	16
1.4 Визначення навантаження і розрахунок потужності електродвигуна	16
1.5 Обґрунтування вибору перетворювача частоти.....	20
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	23
2.1 Аналіз існуючої системи керування приводом димососа.....	23
2.2 Способи регулювання розрядження в котлах	25
2.3 Розробка системи автоматичного регулювання швидкості димососа.....	26
2.4 Алгоритм регулювання швидкості димососа.....	28
2.5 Вибір технічних засобів системи автоматичного регулювання.....	30
2.6 Вибір системи автоматичного регулювання електропривода.....	32
2.7 Розробка структурної схеми для математичного моделювання на ЕОМ..	33
2.8 Розрахунок параметрів електродвигуна для моделювання на ЕОМ	36
2.9 Побудова механічних характеристик асинхронного двигуна. Моделювання на ЕОМ.....	40
2.10 Заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності	44

2.10.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих чинників	44
2.10.2 Заходи щодо зниження впливу шкідливих і небезпечних виробничих чинників.....	46
2.10.3 Протипожежна безпека.....	47
ВИСНОВКИ.....	49
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	50

ВСТУП

Продукція гірничо-металургійної промисловості є матеріальною основою для більшості галузей сучасного індустріального виробництва. Надійне і дешеве постачання машинобудівної, транспортної, хімічної та енергетичної галузей металопрокатом і виробами з нього визначає конкурентоспроможність економіки в цілому. Аналітичні дані довгострокових галузевих прогнозів вказують на те, що продукти чорної металургії збережуть позиції пріоритетних конструкційних матеріалів щонайменше на найближчі два-три десятиліття. З огляду на це, підвищення ресурсної та енергетичної ефективності металургійних підприємств набуває стратегічного значення.

Котел ДЕ 25-14, що експлуатується в теплосиловому цеху АТ «Південний ГЗК», обладнаний системою управління приводом димососа, яка фізично й морально вичерпала свій ресурс. Підтримання розрідження в топці реалізовано шляхом ручного переставляння шибєрів, що унеможлиблює точне автоматичне регулювання і змушує двигун димососа постійно працювати на максимальній потужності. Наслідком є перевитрата електроенергії, прискорений знос механічного обладнання та підвищений ризик виходу системи з нормального режиму роботи.

Виконана кваліфікаційна робота спрямована на усунення зазначених недоліків через впровадження автоматизованого частотного керування електроприводом димососа. Рівень актуальності теми визначається двома факторами: по-перше, нагальною потребою підприємств гірничо-металургійного комплексу у зниженні енергоємності виробництва; по-друге, наявністю сучасних технічних засобів, застосування яких дає змогу вирішити задачу без капітальної реконструкції котельні.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Опис теплосилового цеху

Відкрите розроблення Скелеватського родовища магнетитових кварцитів ведеться з 1953 р. силами АТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат». Головним видом корисних копалин, що видобуваються тут, є магнетитові кварцити, переробка яких дає залізорудний концентрат і агломерат [1]. Для довідки: у типовий рік підприємство піднімає з кар'єру понад 16,7 млн т руди та 6,9 млн т скришних порід, одержуючи 7,56 млн т концентрату та 3,68 млн т агломерату.

Виробничу інфраструктуру комбінату утворюють кар'єр відкритого розроблення, дробильно-збагачувальні та агломераційні фабрики, хвостосховища та відвали, об'єкти транспортної й енергетичної інфраструктури, матеріальні склади, адміністративно-побутові будівлі та інші споруди.

Теплосиловий цех функціонує як самостійний структурний підрозділ комбінату. Його організаційна структура охоплює ділянки:

- водопостачання та каналізації;
- котельних установок;
- теплопостачання;
- технічного обслуговування газопроводів і газової апаратури;
- механічну службу;
- електротехнічну службу.

Завдання цеху - забезпечити безперебійну подачу на всі споживачі комбінату технічної й питної води, теплової енергії, природного та змішаного газу, а також організувати відведення промислових і побутових стоків.

На котельній ділянці функціонують три групи обладнання. Котли ДЕ 25-14 виробляють технологічну пару для потреб підприємства. Система водопідготовки готує гарячу воду для комбінату і прилеглого селища. Водогрійні установки ПТВМ-100 забезпечують теплоносій для опалення об'єктів.

Котельні установки прийнято класифікувати залежно від їх функціонального призначення. Опалювальні котельні обслуговують виключно житлові та адміністративні будівлі. Виробничі - задовольняють потреби технологічних процесів. Виробничо-опалювальні реалізують обидві функції одночасно. Котельня теплосилового цеху АТ «Південний ГЗК» належить до виробничо-опалювального типу.

У технічному розумінні котел являє собою закритий посудину під тиском, що перевищує атмосферний, у якій енергія спалюваного палива передається теплоносію через нагріті поверхні. Залежно від виду теплоносія котли поділяють на парові та водогрійні. За матеріалом поверхонь нагріву - на чавунні та сталеві. Водогрійні котли конструктивно завжди виконуються за прямоточною схемою.

Вертикально-водотрубні парові котли серії ДЕ спроектовані для роботи на газі або мазуті й забезпечують вироблення насиченої пари або пари, перегрітої до 225 °С. Паропродуктивність серії охоплює п'ять стандартних ступенів: 4; 6,5; 10; 16 і 25 т/год при робочому тиску 1,4 або 2,4 МПа. Конструктивна уніфікація серії досягнута застосуванням однакового діаметра барабанів (1 000 мм), однакової відстані між їхніми осями (2 750 мм) та однотипних труб екранів і конвекційного пучка (51×2,5 мм). Масштабування паропродуктивності реалізується виключно зміною довжини циліндричних частин барабанів.

Ключовою умовою стійкого горіння в топковому просторі є підтримання балансу між витратою палива і витратою повітря. Регулювати цей баланс без відповідного рівня розрідження неможливо: при його надмірному значенні факел відривається від пальника і горіння переривається; при недостатньому - продукти горіння потрапляють у приміщення. Отже, точне підтримання розрідження є не лише умовою ефективності, а й умовою безпеки котла.

1.2 Опис технологічного процесу, послідовності роботи механізмів автоматизованого об'єкту

Котел ДЕ-25-14ГМО вирішує три виробничі завдання: генерацію технологічної пари для виробничих потреб підприємства, забезпечення теплової енергії для вентиляції та постачання гарячої води [2]. Конструктивно він складається з верхнього та нижнього барабанів діаметром 1 000 мм, конвекційного пучка і топкової камери, розташованої паралельно конвекційній секції збоку. Паропродуктивність збільшується від 4 до 25 т/год шляхом пропорційного подовження барабанів, камери згоряння та пучка.

Технічну характеристику котла наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Технічна характеристика котла ДЕ-25-14ГМО [2]

№	Найменування параметра	Одиниця виміру	Значення
1	Паропродуктивність	т/год	23
2	Тиск у барабані котла	кгс/см ²	14,0
3	Температура насиченої пари	°С	194
4	Площа поверхні нагріву: радіаційна	м ²	60,5
5	Площа поверхні нагріву: конвекційна	м ²	212
6	Температура відхідних газів (природний газ)	°С	135
7	ККД котла при роботі на природному газі	%	92,3
8	Довжина (з майданчиками та сходами)	мм	11 500
9	Ширина	мм	5 770
10	Висота	мм	24 352

Газоповітряний тракт котла обслуговується двома типами турбомашин. Дуттьові вентилятори нагнітають повітря до пальникових пристроїв; робочий діапазон температур повітря для них обмежений знизу значенням $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Димососи відсмоктують продукти горіння й направляють їх до димаря; максимально допустима температура газу для них становить $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Конструктивно обидва типи машин уніфіковані за схемою равликового кожуха з осьовим вхідним напрямним апаратом.

Регламент введення димососа в роботу передбачає кілька послідовних операцій. Спочатку виконується зовнішній огляд машини, підтягуються болтові з'єднання, а напрямний апарат закривається. Перший пуск здійснюється вхолосту - для перевірки напрямку обертання та відсутності механічних дефектів (вібрації, сторонніх шумів). Лише після підтвердження справності двигун підключають до робочого навантаження, поступово відкриваючи напрямний апарат.

Зовнішній вигляд димососа наведено на рис. 1.1.

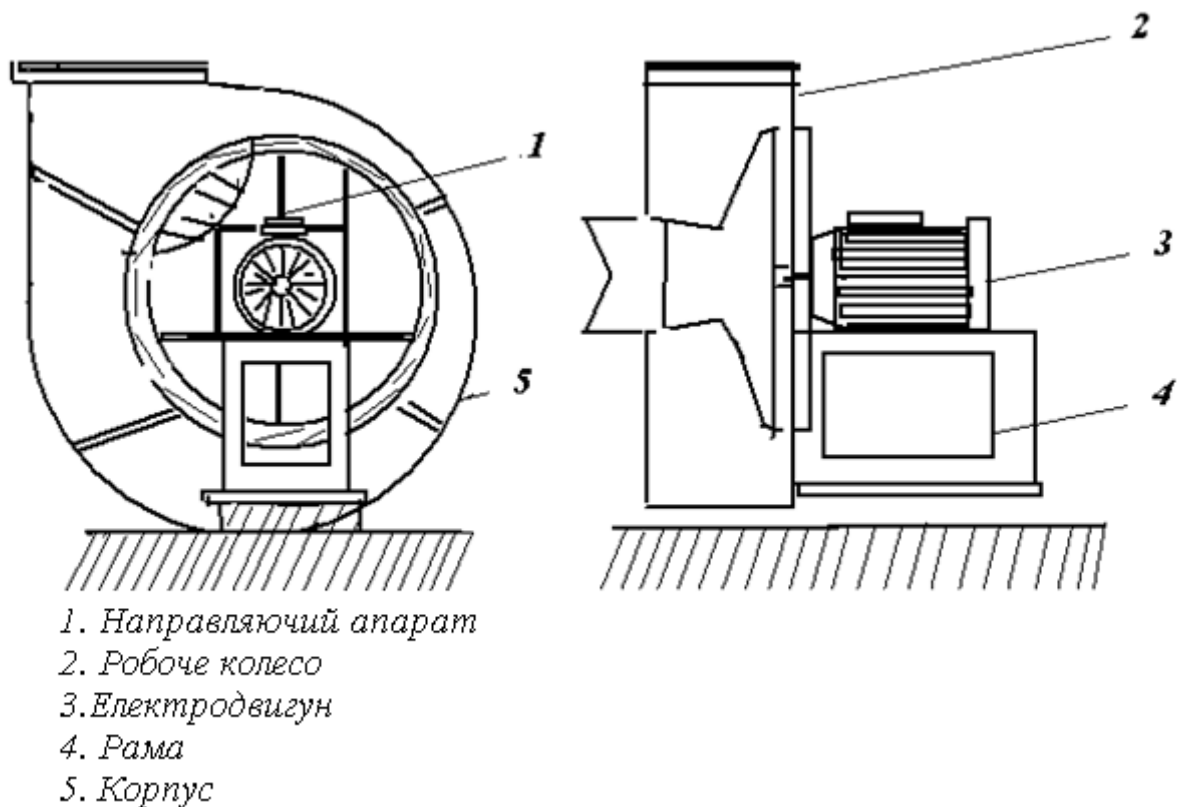


Рис. 1.1. Зовнішній вигляд димососа ДН-12,5У

(розроблено автором з використанням [2])

Під час роботи черговий персонал зобов'язаний стежити, щоб температура корпусу електродвигуна не перевищувала $+70^{\circ}\text{C}$. Не рідше одного разу на два місяці проводять планові огляди, під час яких очищають двигун від забруднення, перевіряють надійність заземлення та стан з'єднання вала двигуна з робочим колесом.

Фізична природа тяги в котловому агрегаті заснована на різниці густини холодного зовнішнього повітря і нагрітих відхідних газів: легший газ витісняється вгору, створюючи у топці зону зниженого тиску. Цей принцип покладено в основу природної тяги. Втім у котельних середньої та великої потужності природної тяги виявляється недостатньо для подолання аеродинамічного опору тракту, тому додатково встановлюють примусову тягу: вентилятор нагнітає повітря, димосос примусово витягує газ.

Конструкція димообладнання з примусовою тягою включає ротор із лопатками та нерухомий кожух. Матеріал проточної частини - жаростійка сталь, корпус ізольований від впливу довкілля. Масляна ванна підшипників охолоджується водяним змішувиком. Розрахункові запаси при виборі димососа: за продуктивністю - $+10\%$; за напором - $+15\%$.

Технічну характеристику димососа наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Технічна характеристика димососа ДН-12,5У [3]

№	Найменування параметра	Одиниця виміру	Значення
1	Тип	—	ДН-12,5У
2	Виробнича потужність	м ³ /год	36 900
3	Повний тиск	Па	44
4	Тип електродвигуна	—	ABB M2AA250SB4
5	Потужність електродвигуна	кВт	75
6	Синхронна частота обертання	об/хв	1 500

1.3 Обґрунтування способу регулювання асинхронного двигуна

Задача управління продуктивністю двигососа зводиться до регулювання частоти обертання його робочого органу. Теоретично це досягне двома шляхами: через зміну передавального відношення механічної передачі (варіатори, коробки передач) або через зміну частоти обертання самого вала двигуна. Механічне рішення потребує складних кінематичних вузлів і має обмежений діапазон. Електричне - не ускладнює кінематику, дає плавне і широке регулювання, добре піддається автоматизації. Саме тому електричний метод сьогодні є безальтернативним у переважній більшості промислових приводів.

1.3.1 Реостатне регулювання

Включення додаткових активних опорів до роторного кола двигуна з фазним ротором штучно збільшує його ковзання при тому самому навантаженні, що веде до зниження частоти обертання [4]. Практична межа регулювання у такий спосіб - відношення не більше 2...2,5 до номінальної швидкості. Реалізується виключно ступінчасто через комутацію секцій резисторів. Суттєвий недолік - весь відбір потужності на регулювальних резисторах розсіюється у вигляді тепла, що робить метод енергетично марнотратним і виключає його з розгляду для систем, де потрібна тривала робота на зниженій швидкості.

3.2 Регулювання зміною напруги статора двигуна

Зниження напруги на статорних обмотках при незмінній мережній частоті призводить до зменшення максимального моменту двигуна пропорційно до квадрата напруги [4]. Частота обертання при цьому теж знижується через збільшення ковзання при незмінному навантаженні. Метод забезпечує

плавність регулювання та широкий діапазон до 10:1 при замкненому контурі по швидкості. Принципове обмеження - знизити швидкість нижче природної характеристики можна, але підвищити - ні. Крім того, зменшення напруги погіршує коефіцієнт потужності і збільшує струм ротора при тому самому навантаженні, що підвищує нагрів двигуна.

1.3.3 Частотне регулювання

Зміна частоти живлячої напруги безпосередньо зміщує синхронну швидкість поля, від якої відлічується ковзання. Синхронна частота обертання:

$$n_0 = 60 \cdot f_1 / p \quad (1.1)$$

де n_0 - синхронна частота обертання поля, об/хв;

f_1 - частота живлячої напруги, Гц;

p - число пар полюсів.

Ковзання при цьому визначається як:

$$s = (n_0 - n) / n_0 \quad (1.2)$$

де n - фактична частота обертання ротора, об/хв.

Якщо змінювати лише f_1 без корекції напруги, то при зниженні частоти магнітний потік зростає до насичення, а при підвищенні - зменшується і падає момент. Щоб зберегти номінальний магнітний потік i , відповідно, незмінну перевантажувальну здатність у всьому діапазоні, напругу треба змінювати пропорційно частоті:

$$U_1 / f_1 = \text{const} \quad (1.3)$$

Дотримання цього закону гарантує жорсткість механічних характеристик на кожній частоті, відсутність зростання ковзання та мінімальні теплові втрати в роторі. Досяжний діапазон регулювання у сучасних перетворювачах - до 200:1. Цей метод обрано для даного проекту як такий, що повністю відповідає вимогам до точності та економічності.

1.3.4 Регулювання швидкості зміною числа пар полюсів

Перекомутація статорних обмоток між двома конфігураціями (трикутник-подвійна зірка або зірка-подвійна зірка) вдвічі змінює число пар полюсів і відповідно - синхронну швидкість [4]. Метод дає ступінчасту зміну, максимальний діапазон обмежений відношенням 8:1. Перевага - висока надійність через відсутність перетворювача. Недолік - ступінчастість і відносно малий діапазон - виключають його застосування там, де потрібне плавне прецизійне регулювання. Для системи управління димососом цей метод непридатний.

1.4 Визначення навантаження і розрахунок потужності електродвигуна

Безперервний режим роботи котла диктує такий самий режим для димососа. Відповідно до ДСТУ 2709, режим роботи класифікується як S1 - тривалий зі змінним навантаженням. Для розрахунку потужності двигуна враховуються такі вихідні параметри механізму:

- момент інерції механізму $J_{\text{мех}} = 20 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;
- статичний момент механізму $M_{\text{ст}} = 470 \text{ Н} \cdot \text{м}$;
- кутова швидкість обертання $\omega_{\text{мех}} = 155 \text{ рад/с}$;
- передаточне число редуктора $i_p = 1$.

Оскільки редуктор відсутній ($i_p = 1$), вал двигуна обертається з тією самою кутовою швидкістю, що й робочий орган:

$$\omega_d = \omega_{\text{мех}} \cdot i_p = 155 \cdot 1 = 155 \text{ рад/с} \quad (1.4)$$

Еквівалентна частота обертання в традиційних одиницях:

$$n_d = 30 \cdot \omega_d / \pi = 30 \cdot 155 / 3,14 \approx 1\,480 \text{ об/хв} \quad (1.5)$$

Навантажувальна діаграма механізму (рис. 1.2) розкладається на чотири робочих інтервали, дані яких зведено в табл. 1.3. Подальший розрахунок базується на цих даних.

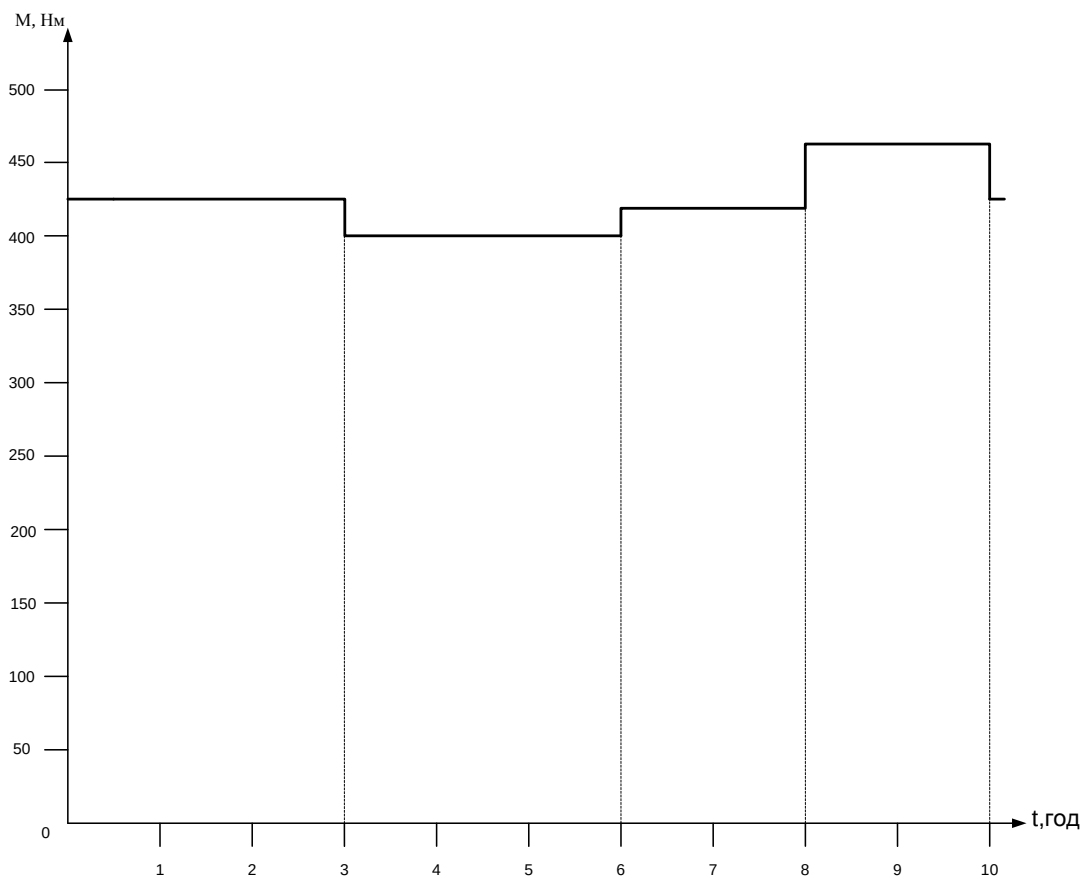


Рис. 1.2. Навантажувальна діаграма механізму димососа
(розроблено автором)

Таблиця 1.3

Характеристики робочих ділянок навантажувальної діаграми

№	Частота обертання, рад/с	Момент навантаження, Н·м	Час роботи, год
1	155	424	3
2	155	400	3
3	155	420	2
4	155	470	2

При $i_p = 1$ момент навантаження на вал двигуна дорівнює моменту механізму без перерахунку. Орієнтовна потужність двигуна за максимальним статичним моментом:

$$P_{\text{поп}} = M_{\text{ст}} \cdot \omega_d = 470 \cdot 155 \approx 73 \text{ кВт} \quad (1.6)$$

Для перевірконого розрахунку потрібен момент інерції привода в цілому. Попередньо обирається двигун ABB M2AA250SB4 (75 кВт, 1 480 об/хв, $J_d = 0,18 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$). Сумарний приведений момент інерції:

$$J_{\text{мп}} = J_{\text{мех}} + J_d = 20 + 0,18 \approx 20,18 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (1.7)$$

Еквівалентний (середньоквадратичний) момент за всіма ділянками діаграми:

$$M_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 M_{\text{см}i}^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^4 t_i}} = \sqrt{\frac{424^2 \cdot 3 + 400^2 \cdot 3 + 420^2 \cdot 2 + 470^2 \cdot 2}{3 + 3 + 2 + 2}} = 426 \text{ Нм} \quad (1.8)$$

Потужність у сталому робочому режимі:

$$P_{роб} = M_e \cdot \omega_d = 426 \cdot 155 = 66,0 \text{ кВт} \quad (1.9)$$

Умова $P_{роб} = 66 \text{ кВт} < P_n = 75 \text{ кВт}$ виконана з достатнім запасом (12,5%), що підтверджує правильність попереднього вибору двигуна. Повний перелік паспортних даних наведено в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Паспортні дані електродвигуна ABB M2AA250SB4 [5]

№	Найменування показника	Одиниця виміру	Значення
1	Виробник (країна)	—	ABB (Швейцарія/Швеція)
2	Тип	—	M2AA250SB4
3	Номінальна потужність, P_n	кВт	75
4	Номінальна напруга, U_n	В	380
5	Номінальний струм, I_n	А	142
6	Номінальна частота обертання, n_n	об/хв	1 480
7	Момент інерції, J	кг·м ²	0,18
8	Номінальне ковзання, S_n	%	1,5
9	Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$	—	0,88
10	ККД, η	%	94,0
11	Кратність максимального моменту M_m/M_n	—	2,5
12	Кратність пускового моменту M_p/M_n	—	2,2
13	Кратність пускового струму I_p/I_n	—	7,5

1.5 Обґрунтування вибору перетворювача частоти

Статичний перетворювач частоти перетворює мережеву напругу незмінної частоти і амплітуди у змінну напругу регульованої частоти та амплітуди. Завдяки цьому він відіграє роль регульованого джерела живлення для асинхронного двигуна. Сучасний перетворювач надає приводу такі властивості, яких неможливо досягти прямим підключенням до мережі: плавний пуск без кидків струму, точне регулювання швидкості в широкому діапазоні, вбудовані функції захисту та діагностики.

Порівняння трьох конкурентних пропозицій - Schneider Electric Altivar 630, Danfoss VLT 6000 HVAC та ABB ACS580 - показало, що вибір слід зробити на користь Danfoss VLT 6000 HVAC. Вирішальним аргументом стала спеціалізація цієї моделі на застосуваннях з вентиляторами і насосами: в ній реалізовано алгоритм енергоощадного управління, що автоматично знижує напругу при частковому навантаженні. Апаратна платформа побудована на IGBT-інверторі напруги з мікропроцесорним керуванням на RISC- та DSP-ядрах.

Перелік реалізованих функцій охоплює:

- плавний розгін і гальмування з програмованими часовими кривими в діапазоні 0,1...100 Гц;
- гальмування постійним струмом без гальмівного резистора (при невеликих інерційних навантаженнях);
- вбудований ПІД-регулятор для прямого замикання контуру за технологічним параметром;
- автоматичне повторне захоплення обертового двигуна після короткочасного зникнення живлення;
- дистанційне керування по RS485/RS232 або Modbus на відстань до 1 200 м;
- реєстрацію часу й коду до десяти останніх аварійних подій;

— захист від короткого замикання, перенапруги, перевантаження, обриву фази та обриву зворотного зв'язку.

Функціональну схему перетворювача наведено на рис. 1.3.

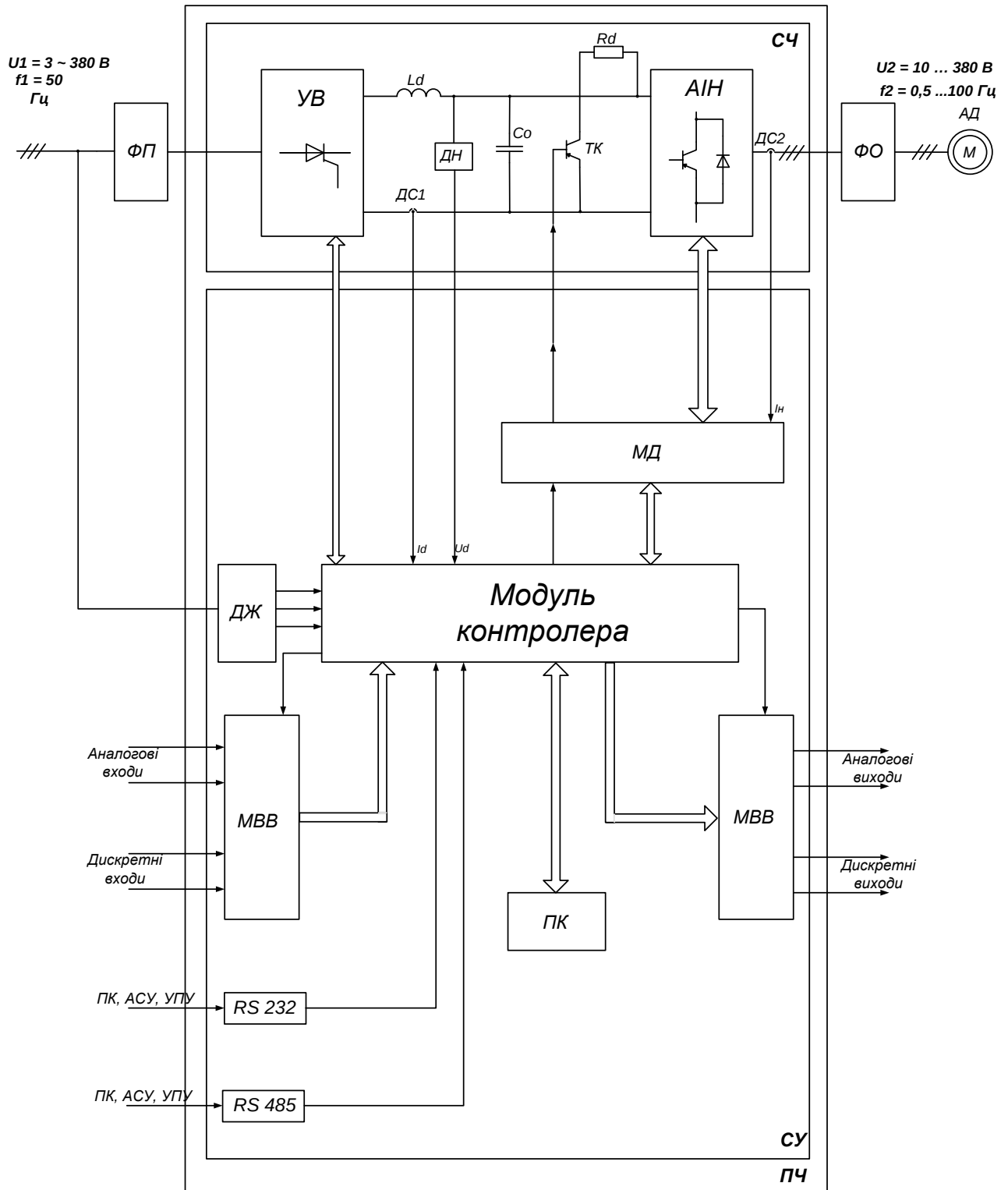


Рис. 1.3. Функціональна схема перетворювача частоти Danfoss VLT 6000

HVAC

(розроблено автором з використанням [6])

На схемі виділено чотири функціональні блоки. Силова частина складається з управляемого випрямляча (УВ), фільтрувальної ланки постійного струму з дроселем L_d і конденсаторами C_o , гальмівного ключа ГК з резистором R_d і автономного інвертора напруги (АІН) на IGBT-транзисторах. Система управління - двопроцесорна (ATMega128L + ADMC 331) - формує ШІМ-сигнали для АІН і реалізує всі захисні функції. Блок введення-виведення (МВВ) приймає 4 аналогових і 8 дискретних сигналів; 2 аналогових і 8 дискретних сигналів видає на виходах. Пульти - штатний (ПК) і виносний (ВПК) - забезпечують оперативне управління та індикацію.

З погляду інтеграції в АСУ ТП особливо важливою є підтримка протоколів Modbus RTU по RS485, що дозволяє включити привід в єдину промислову мережу без додаткових конверторів.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Аналіз існуючої системи керування приводом димососа

З технологічної точки зору об'єктом регулювання за розрідженням служить сукупність газоходів від топкового простору до всмоктувального патрубка димососа. Ця ланка характеризується малою інерційністю - стала часу не перевищує 5-10 с - і виражає самовирівнювання, тобто здатністю повертатися до рівноважного стану без зовнішнього втручання. Водночас у сигналі розрідження постійно присутні коливання з амплітудою 30-40 Па та частотою кількох Гц, зумовлені пульсаціями потоків палива й повітря, а також турбулентністю від самого процесу горіння (100-150 Гц). Ці коливання - природна «шумова» компонента, яку регулятор повинен відфільтровувати.

Нормативне значення розрідження у верхній частині топки становить 20-30 Па (2-3 мм вод. ст.). Відхилення у будь-який бік несе ризики. Перевищення - відрив факела, неповне горіння, утворення СО. Провал нижче нуля - вихід продуктів горіння у приміщення, нестабільність пальника. Таким чином, зона допустимих значень є досить вузькою, і її витримування потребує точного автоматичного регулювання.

Чинна система не має автоматичного регулятора взагалі. Оператор оцінює показання тягоміра і вручну відкриває або закриває шибер кнопками «більше»/«менше» через виконавчий механізм МЕО-250. Функціональну схему цієї системи наведено на рис. 2.1.

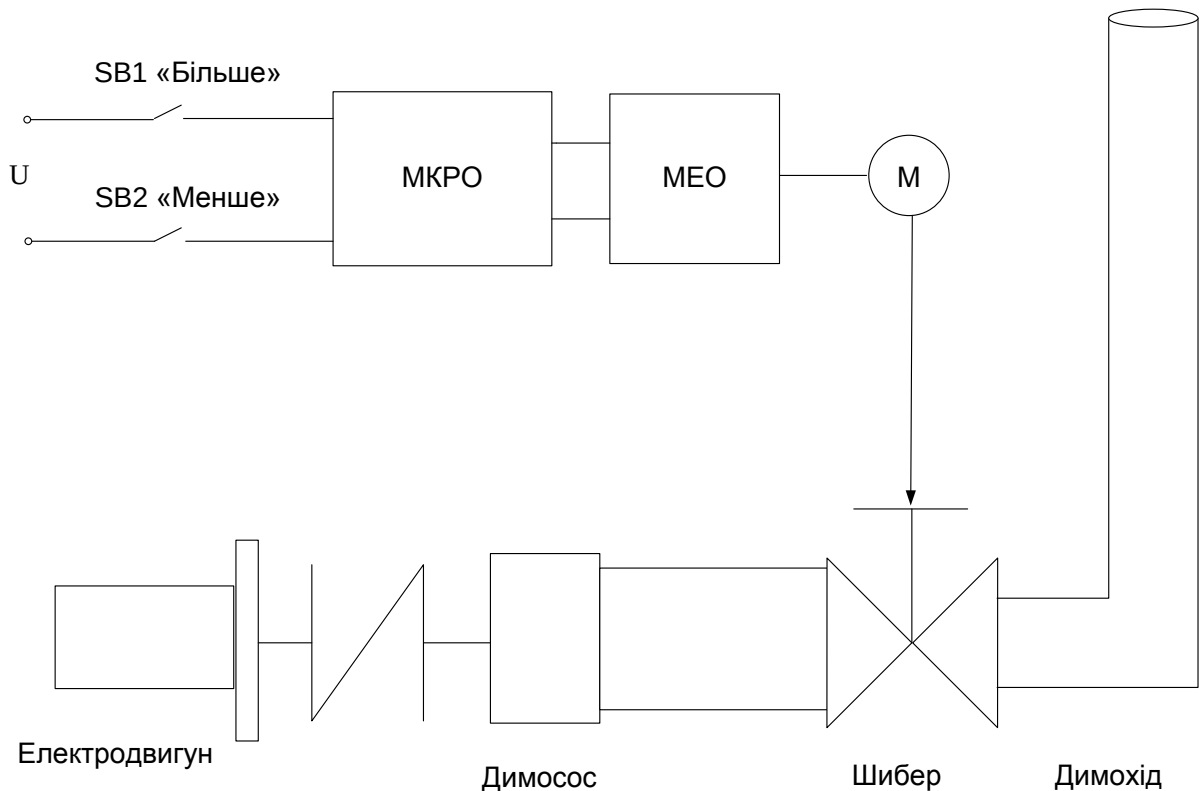


Рис. 2.1. Функціональна схема чинної системи управління тягою
(розроблено автором)

Умовні позначення: МКРО - модуль керування робочого органу; МЕО - виконавчий механізм МЕО-250; М - електродвигун виконавчого механізму.

Ручне управління шибєром має два принципових недоліки. Перший - запізнення: між зміною навантаження котла та реакцією оператора минає кілька хвилин, протягом яких розрідження виходить за допустимі межі. Другий - постійна максимальна потужність двигуна димососа: незалежно від поточного навантаження котла, двигун споживає однакову кількість електроенергії. Порівняльний розрахунок за даними гл. 2.2 показує, що при частковому навантаженні 60-80% від номінального це призводить до перевитрати електроенергії на 20-30%.

Окремої уваги заслуговує питання балансу «газ-повітря». Реакція горіння природного газу потребує приблизно десяти об'ємів повітря на один об'єм газу.

Порушення цього співвідношення в бік нестачі повітря формує неповністю згорілі продукти, порушення в бік надлишку - охолоджує топку і сприяє утворенню NO_x . Система регулювання тиску є частиною ширшої системи управління співвідношенням паливо-повітря; підтримання розрідження - необхідна умова коректної роботи всієї цієї системи.

2.2 Способи регулювання розрядження в котлах

Продуктивність димососа, а отже і рівень розрідження в топці, можна регулювати трьома різними методами. Кожен з них впливає на характеристику системи «димосос - мережа» по-своєму.

– Дросельні заслінки (крива 1 на рис. 2.2) - механічне звуження прохідного перерізу збільшує опір мережі; робоча точка зміщується по характеристиці вентилятора вгору і вліво. Частота обертання не змінюється; весь зайвий напір дроселюється, перетворюючись на тепло.

– Напрямний апарат (крива 2) - зміна кута входу газу на лопатки робочого колеса модифікує саму характеристику вентилятора. Ефективніше за дросель, але механічно складніше.

– Регулювання частоти обертання (крива 3) - зміна швидкості робочого колеса зміщує всю напірно-витратну характеристику вниз за законом подібності. Це єдиний спосіб, при якому привід споживає рівно стільки енергії, скільки потрібно процесу.

Енергетичне порівняння методів наведено на рис. 2.2. Аналіз кривих підтверджує, що регулювання швидкості є найекономічнішим при навантаженнях нижче 100%: при 70% навантаженні економія електроенергії відносно дросельного методу становить близько 3,23%.

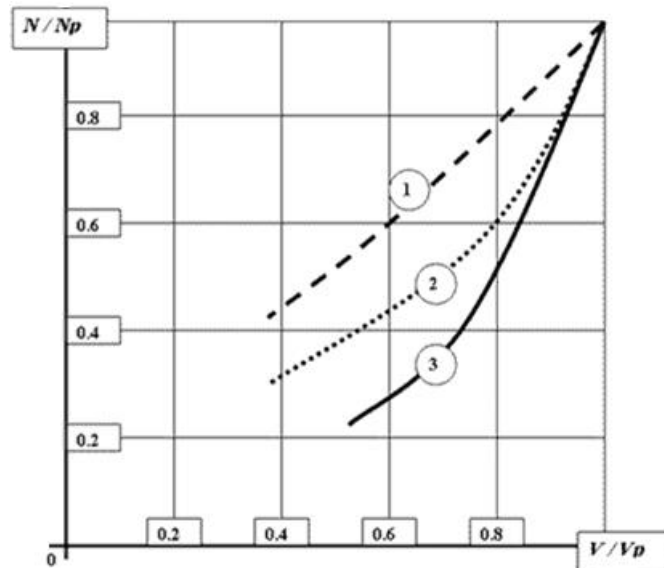


Рис. 2.2. Питоме енергоспоживання при різних методах регулювання продуктивності [7]
(розроблено автором)

Один нюанс заслуговує на окрему увагу: контури регулювання розрідження та співвідношення паливо-повітря фізично пов'язані через спільний газоповітряний тракт. Якщо регулятор повітря змінює витрату (реагуючи на зміну навантаження котла), це відразу збурює розрідження. Для компенсації цього зв'язку до вхідного сигналу регулятора розрідження додається випереджаючий сигнал від регулятора повітря - реалізація реального диференціювання вихідного сигналу.

2.3 Розробка системи автоматичного регулювання швидкості димососа

Спроектована система автоматичного регулювання (САР) будується на принципі замкненого контуру: поточне значення розрідження безперервно порівнюється із заданим, і відхилення компенсується зміною частоти обертання двигуна. Принципову схему наведено на рис. 2.3.

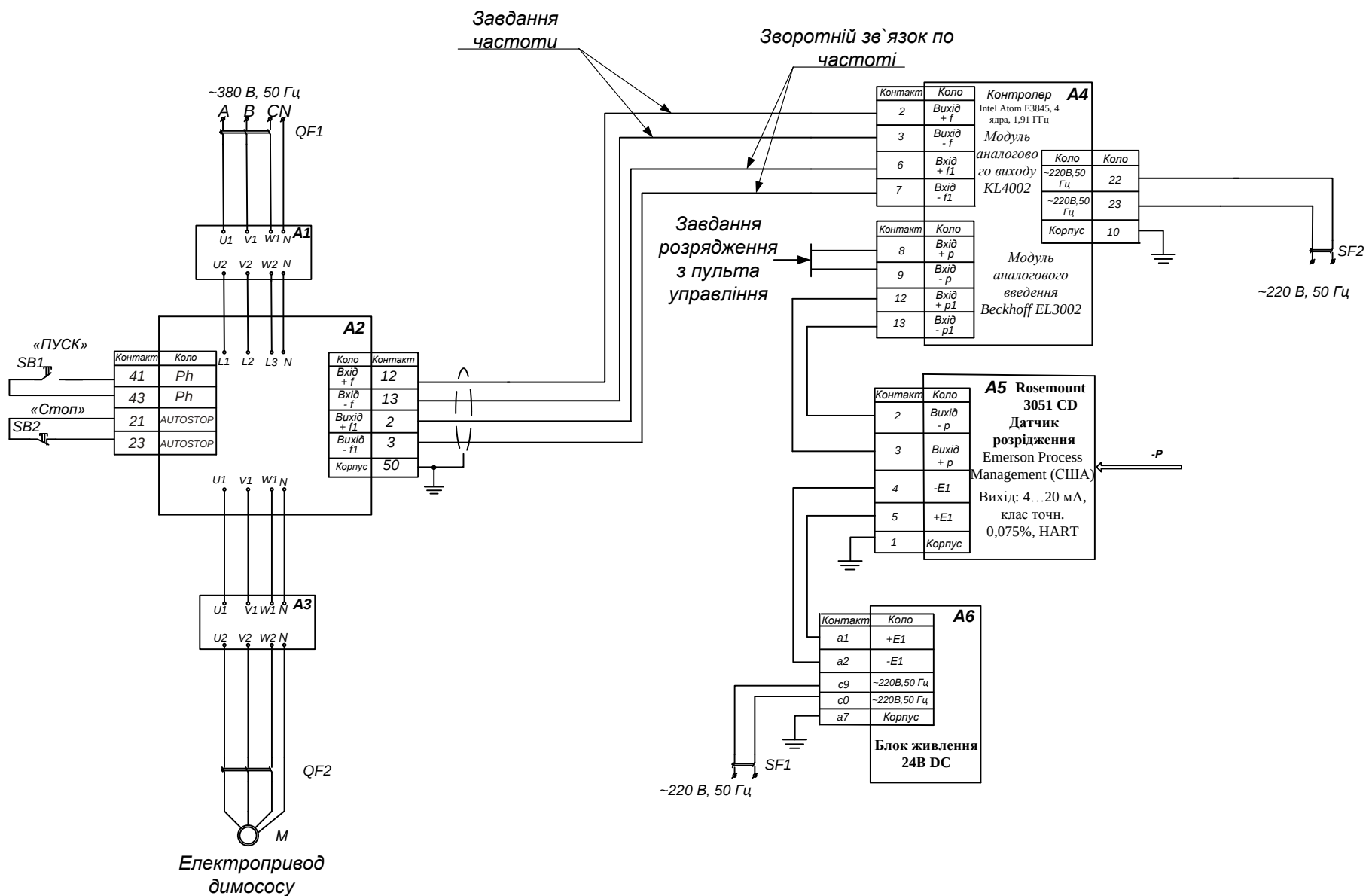


Рис. 2.3. Принципова схема САР розрядження у топці котла

(розроблено автором)

До складу системи входять:

- М - асинхронний двигун ABB M2AA250SB4;
- ПЧ - частотний перетворювач Danfoss VLT 6000 HVAC;
- ДР - датчик розрідження Rosemount 3051 CD, встановлений у верхній частині топки;
- МК - промисловий контролер Beckhoff CX5130.

Інформаційний потік у системі організовано таким чином. Датчик ДР формує аналоговий сигнал 4...20 мА, пропорційний поточному розрідженню. Контролер МК зчитує цей сигнал через модуль аналогового введення, обчислює різницю між заданим і поточним значеннями та відповідно до налаштованого алгоритму (ПІД-закон) формує завдання частоти для ПЧ по інтерфейсу RS485 (Modbus RTU). Перетворювач частоти ПЧ змінює швидкість двигуна М, що призводить до зміни витрати газів і, як наслідок, - рівня розрідження. Система є замкненою і не потребує участі оператора в нормальному режимі роботи.

2.4 Алгоритм регулювання швидкості димососа

Алгоритм функціонування системи реалізовано в контролері Beckhoff CX5130 і наведено у вигляді структурної схеми на рис. 2.4. Умовні позначення в алгоритмі: АД - асинхронний двигун; ПЧ - перетворювач частоти.

Алгоритм працює циклічно з кроком 100 мс. На кожному кроці зчитується поточне значення розрідження $P_{\text{пот}}$, обчислюється помилка регулювання $e = P_{\text{зад}} - P_{\text{пот}}$, і за рівнянням ПІД-регулятора формується вихідна величина, яку перераховують у завдання частоти для ПЧ. Передбачено обмеження вихідного сигналу: мінімальна частота - 15 Гц (щоб уникнути зупинки двигуна при малому навантаженні котла), максимальна - 50 Гц. При виникненні аварійного сигналу від ПЧ контролер переводить систему до ручного режиму управління.

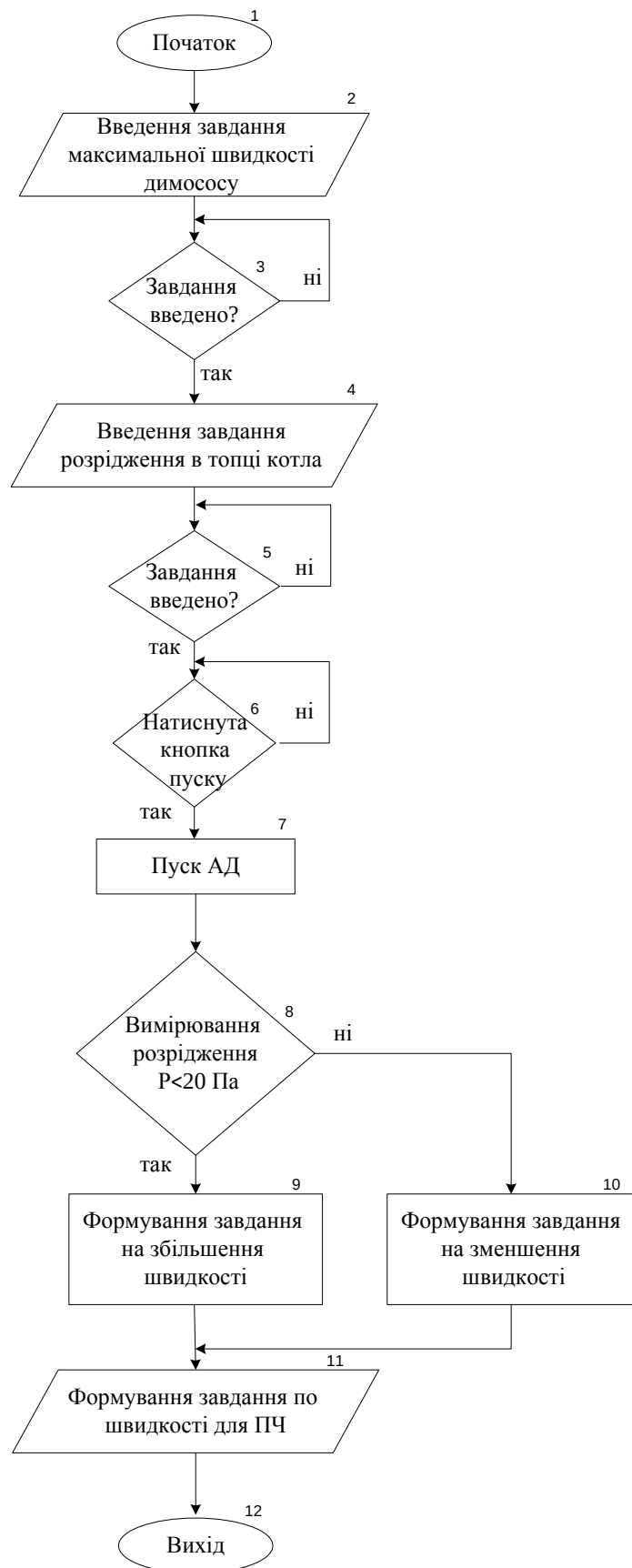


Рис. 2.4. Алгоритм керування швидкістю димососа
(розроблено автором)

2.5 Вибір технічних засобів системи автоматичного регулювання

Контролер Beckhoff CX5130 (Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, Німеччина) є вбудованим промисловим ПК на базі процесора Intel Atom E3845 (4 ядра, 1,91 ГГц). Модульна архітектура на шині EtherCAT дозволяє підібрати набір модулів введення-виведення точно під потреби конкретного завдання і наростити його пізніше без заміни центральної частини. Для виконуваного проекту використовується базовий набір: 16 DI / 16 DO та 8 AI (4...20 мА). Середній напрацювання до відмови - не менше 80 000 год за специфікацією виробника [8].

Для вимірювання розрідження в топці котла обрано датчик диференційного тиску Rosemount 3051 CD виробництва Emerson Process Management (США) - рис. 2.5.



Рис. 2.5. Датчик диференційного тиску Rosemount 3051 CD [9]

Технічні характеристики датчика наведено в табл. 2.1.

Технічні характеристики датчика Rosemount 3051 CD [9]

№	Найменування параметра	Одиниця виміру	Значення
1	Виробник (країна)	—	Emerson / Rosemount (США)
2	Тип	—	3051 CD
3	Діапазон вимірювання тиску	мм рт. ст.	-10...+10
4	Напруга живлення	В	10...55
5	Вихідний сигнал	мА	4...20
6	Клас точності	%	0,075
7	Габаритні розміри	мм	400×400

Два аспекти визначили вибір цієї моделі. По-перше, клас точності 0,075% є достатнім для відстеження відхилень розрідження у вузькому діапазоні ± 3 мм вод. ст. По-друге, підтримка протоколу HART поряд з аналоговим виходом 4...20 мА дає можливість дистанційно переналаштовувати діапазон без демонтажу датчика.

Максимально допустимий опір навантаження при живленні від зовнішнього джерела: $R_{\max} = 43,5 \cdot (U_{\text{дж}} - 10,5)$ Ом. Для сумісності з HART-комунікатором необхідне $R_{\min} = 250$ Ом при $U_{\text{дж}} \geq 16,25$ В. Діапазон робочої області датчика наведено на рис. 2.6.

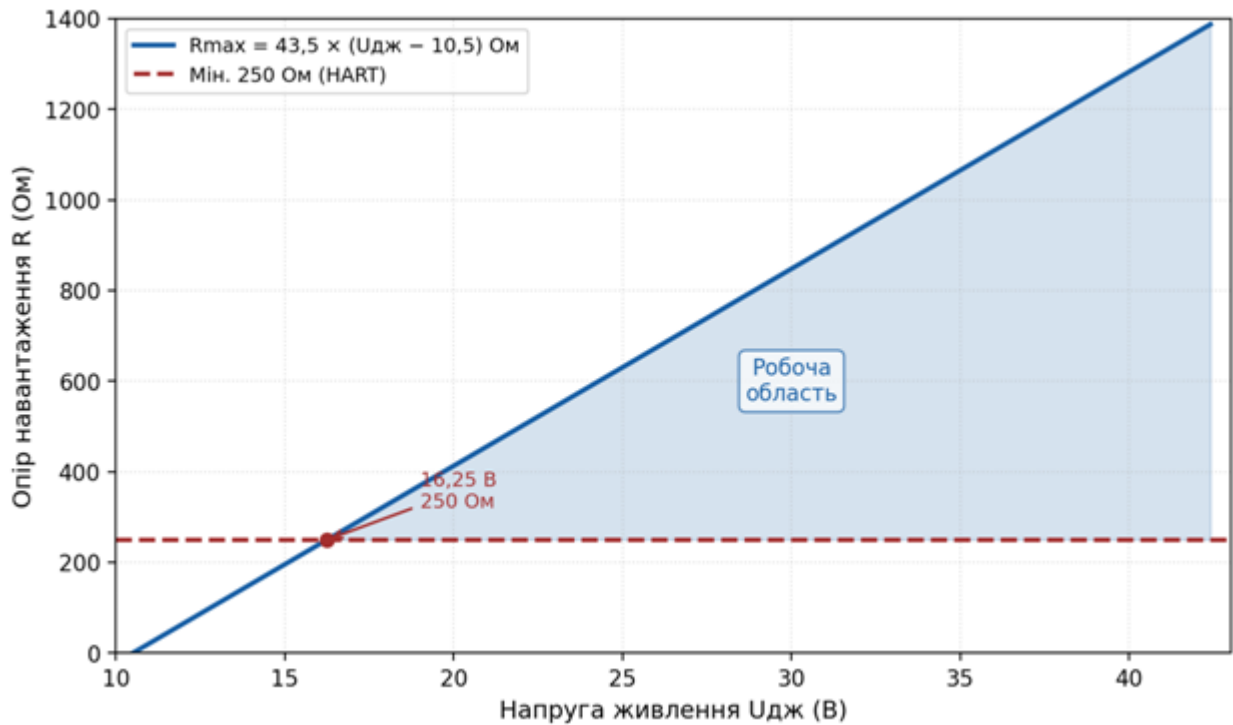


Рис. 2.6. Робоча область датчика Rosemount 3051 CD [9]

(розроблено автором)

2.6 Вибір системи автоматичного регулювання електропривода

Як принцип організації замкненої системи управління обрано каскадне (підпорядковане) регулювання (рис. 2.7). Цей підхід передбачає два вкладених контури. Внутрішній контур, охоплений від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю, відпрацьовує завдання частоти, що надходять від зовнішнього контуру. Зовнішній контур, охоплений від'ємним зворотним зв'язком за розрідженням, формує ці завдання на підставі порівняння поточного розрідження із заданим. Завдяки ієрархічній структурі внутрішній контур як значно швидший (постійна часу - частки секунди) встигає відпрацювати кожне нове завдання ще до того, як зовнішній контур перейде до наступного кроку корекції. Це суттєво покращує динамічні показники всієї системи.

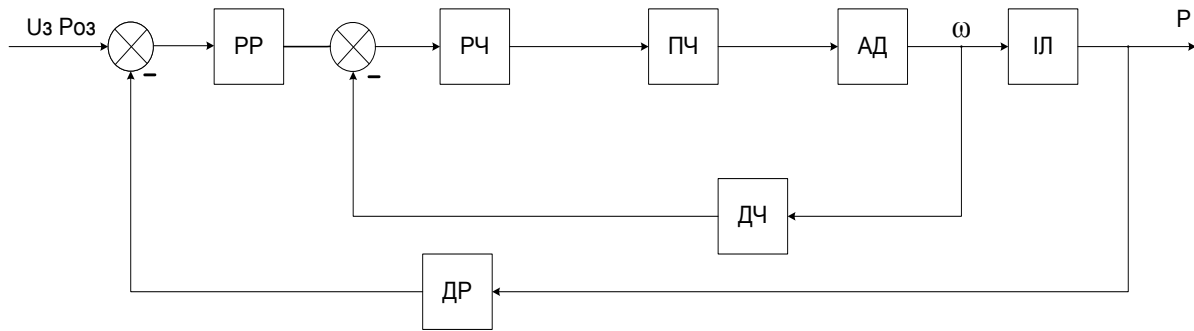


Рис. 2.7. Структурна схема системи підпорядкованого регулювання розрідження

(розроблено автором)

2.7 Розробка структурної схеми для математичного моделювання на ЕОМ

Для кількісної перевірки динамічних характеристик розробленої системи застосовано імітаційне моделювання в пакеті MatLab/Simulink [10]. Бібліотека Power System Toolbox містить готову модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, що реалізує метод просторового вектора. Цей метод перетворює тривимірну систему рівнянь трифазного двигуна на двовимірну в обертових координатах d-q, значно спрощуючи математику без втрати точності результату.

Структурна схема моделі (рис. 2.11) включає такі функціональні блоки:

- Р - задавач номінального розрідження (уставка 30 Па);
- Р controller - ПД-регулятор зовнішнього контуру (за розрідженням);
- F controller - регулятор внутрішнього контуру (за частотою/швидкістю);
- Phir - задавач потокозчеплення ротора;
- Flux controller - регулятор струму по осі d (потокоутворюючий);
- Iqs Calculation - обчислювач заданого струму по осі q (моментоутворюючий);
- Flux Calculation - обчислювач потокозчеплення;
- Teta Calculation - обчислювач кута орієнтації системи координат.

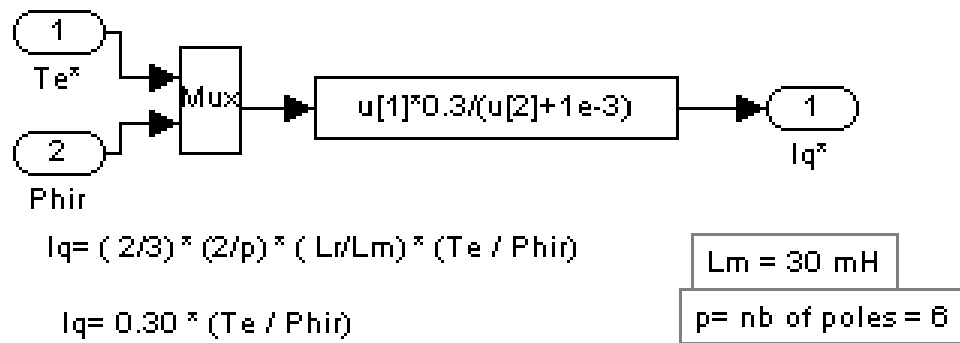


Рис. 2.8. Структурна модель блока Iqs Calculation

(розроблено автором з використанням [10])

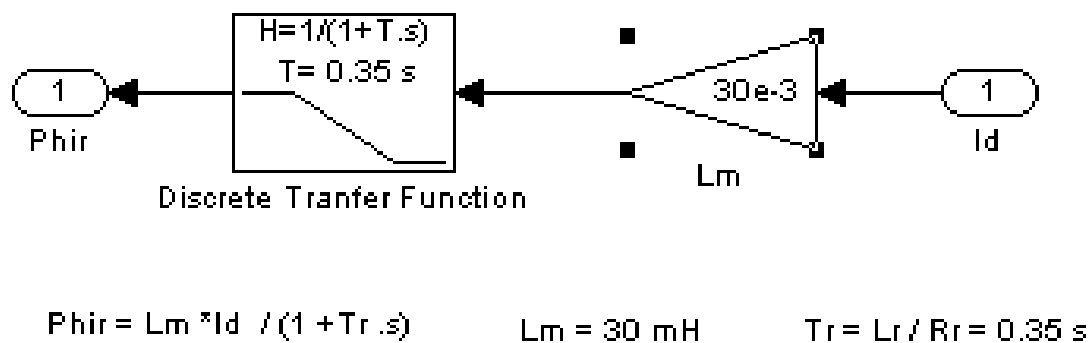
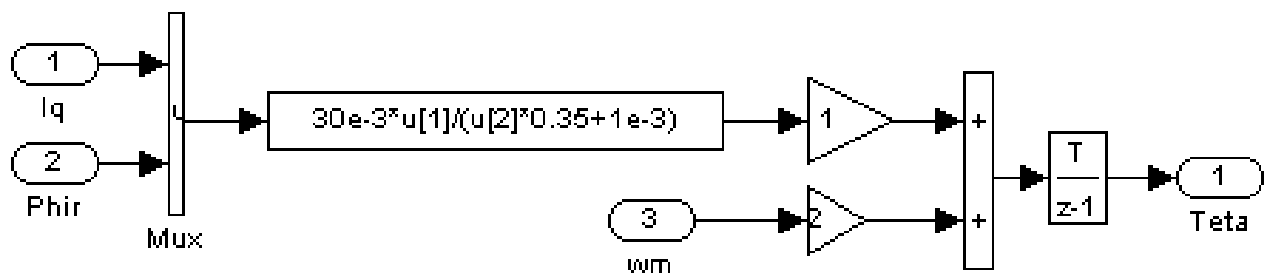


Рис. 2.9. Структурна модель блока Flux Calculation

(розроблено автором з використанням [10])



$\Theta = \text{Electrical angle} = \text{integ} (w_r + w_m)$

$L_m = 30 \text{ mH}$

$w_r = \text{Rotor frequency (rad/s)} = L_m * I_q / (T_r * \Phi_{ir})$

$T_r = L_r / R_r = 0.35 \text{ s}$

$w_m = \text{Rotor mechanical speed (rad/s)}$

Рис. 2.10. Структурна модель блока Theta Calculation

(розроблено автором з використанням [10])

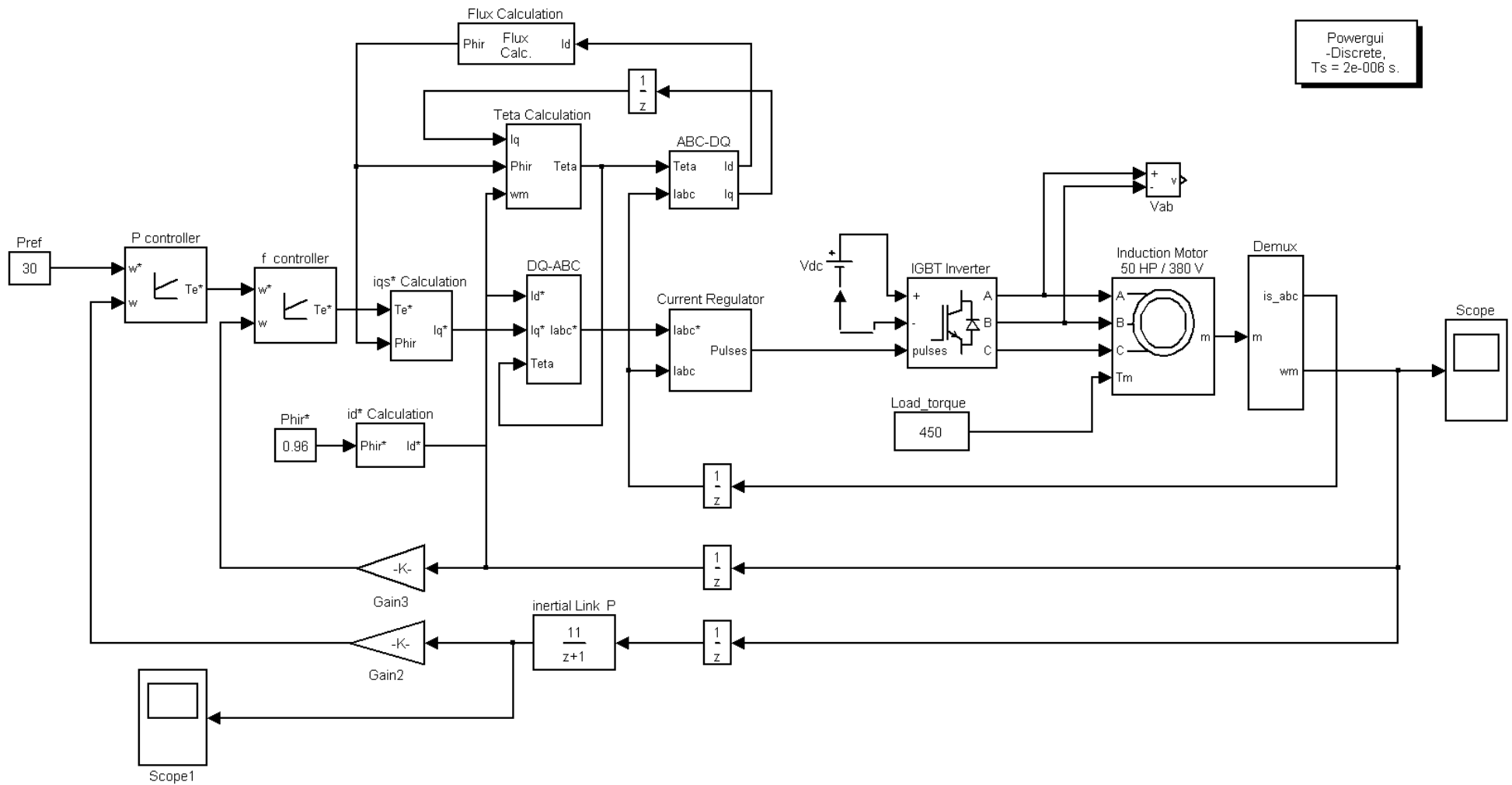


Рис. 2.11. Повна структурна схема імітаційної моделі системи
(розроблено автором з використанням [10])

Перетворення між нерухомою системою координат ABC і обертовою XY реалізовано через проекційні функції.

Для блока id:

$$u[1]*u[3]+(1.7320508*u[2]-u[1])*u[4]*0.5+(-u[1]-1.7320508*u[2])*u[5]*0.5.$$

Для блока iq:

$$-u[2]*u[3]+(u[2]+1.7320508*u[1])*u[4]*0.5+(u[2]-0.7320508*u[1])*u[5]*0.5.$$

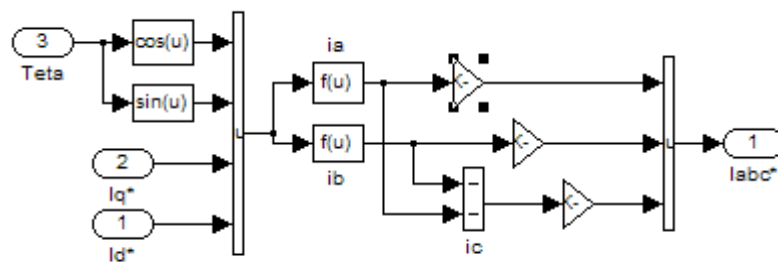


Рис. 2.12. Структурна модель перетворювача координат XY-ABC
(розроблено автором з використанням [10])

ia містить функцію:

$$-u[3]*u[2] + u[4]*u[1]$$

ic містить функцію:

$$(-u[1]+1.7320508*u[2])*u[4]*0.5+(u[2]+1.7320508*u[1])*u[3]*0.5$$

Гістерезисний регулятор струму (Current Regulator) порівнює задані й фактичні струми по осях d і q і генерує управляючі імпульси для IGBT Inverter. Джерело постійної напруги $V_{dc} = 540$ В живить інвертор. Навантаження задається блоком Load torque = 470 Н·м. Параметри блока Induction Motor відповідають розрахованим у п. 2.8: $P_H = 75$ кВт, $U_H = 380$ В, $f = 50$ Гц, $J = 0,18$ кг·м², $p = 2$.

2.8 Розрахунок параметрів електродвигуна для моделювання на ЕОМ

Розрахункові параметри двигуна необхідні для налаштування блока Induction Motor у моделі. Номінальний момент двигуна:

Номинальний момент двигуна:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{75000}{155} = 487 \text{ Нм}, \quad (2.1)$$

де P_H – номінальна потужність двигуна.

ω_H – кутова частота обертання двигуна

Номинальний приведений струм ротора:

$$\begin{aligned} I'_{2\text{ном}} &= I_{1\text{ном}} \cdot \cos \phi_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_M}{\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}}} = \\ &= 142 \cdot 0,88 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2,5}{2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1}}} = 127,65 \text{ А} \end{aligned} \quad (2.2)$$

де $I_{1\text{ном}}$ – номінальний струм двигуна;

λ_M – відношення M_m/M_H .

Номинальне значення струму, що намагнічує

$$\begin{aligned} I_{\mu\text{ном}} &= I_{1\text{ном}} \left[\sqrt{1 - (\cos \phi_{\text{ном}})^2} - \frac{\cos \phi_{\text{ном}}}{\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}} \right] = \\ &= 142 \cdot \left[\sqrt{1 - (0,88)^2} - \frac{0,88}{2,5 + \sqrt{(2,5)^2 - 1}} \right] = 41,6 \text{ А}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Визначаємо активний опір ротора:

$$R_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{\Sigma P}{(1 - S_{\text{ном}}) \cdot K_n^2 \cdot I_{\text{ном}}^2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{77311}{(1 - 0,015) \cdot 7,5^2 \cdot 142^2} = 0,05 \text{ Ом} \quad (2.4)$$

$$\text{де } \Sigma P = \sqrt{3} \cdot I_n \cdot U_n \cdot \cos \varphi \cdot \eta = \sqrt{3} \cdot 142 \cdot 380 \cdot 0,88 \cdot 0,94 = 77311 \text{ Вт};$$

$P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність двигуна;

λ_n – кратність пускового моменту;

K_n – кратність пускового струму;

$S_{\text{ном}}$ – номінальне ковзання.

Критичне ковзання:

$$S_k = S_{\text{ном}} \cdot (\lambda_n + \sqrt{\lambda_n^2 - 1}) = 0,015 \cdot (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,062 \quad (2.5)$$

Активний опір статора можна розрахувати з достатньою точністю по формулі:

$$R_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{\left(\frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot (1 - S_{\text{ном}})}{C_1 \cdot \left(1 + \frac{C_1}{S_k}\right) \cdot \lambda_n \cdot \Sigma P} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\left(\frac{380}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot (1 - 0,015)}{1,03 \cdot \left(1 + \frac{1,03}{0,062}\right) \cdot 2,2 \cdot 75750} = 0,024 \text{ Ом} \quad (2.6)$$

де $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга двигуна;

$C_1 = 1,03$ – коефіцієнт насичення магнітного ланцюга.

Індуктивний опір статора і ротора при $f_{\text{ном}}$ і при $S=1$ визначаємо з формули:

$$X_{\text{к.ном}} = \sqrt{Z_k^2 - R_2'^2} \quad (2.7)$$

$$\text{де } Z_k = \frac{U_{1\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{1\text{ном}} \cdot K_n} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 142 \cdot 7,5} = 0,206 \text{ Ом} \quad (2.8)$$

$$\text{тоді } X_{\text{к.ном}} = \sqrt{0,206^2 - 0,024^2} = 0,2 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір намагнічування асинхронного двигуна при $f_{ном}$

$$X_{\mu,ном} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{\mu,ном}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 41,6} = 5,31 \Omega \quad (2.9)$$

Індуктивність статора и ротора:

$$\begin{aligned} L_s = L_r &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n} \cdot \frac{U_n \cdot \sqrt{3}}{\left(I_n \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} - \cos \varphi \cdot \frac{S_n}{S_k} \right)} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \cdot \frac{380 \cdot \sqrt{3}}{142 \cdot \left(\sqrt{1 - 0,88^2} - 0,88 \cdot \frac{0,015}{0,062} \right)} = 0,031 \Gamma_n \end{aligned} \quad (2.10)$$

Індуктивний опір розсіювання статора:

$$\begin{aligned} L_{\sigma s} &= \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot f_n} \cdot \sqrt{\left(\frac{\frac{U_n}{\sqrt{3}}}{k_n \cdot I_n} \right)^2 - (R_1 + R_2)^2} = \\ &= \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 50} \cdot \sqrt{\left(\frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{5 \cdot 108} \right)^2 - (0,085 + 0,066)^2} = 0,001 \Gamma_n \end{aligned} \quad (2.11)$$

Взаємоіндукція:

$$L_m = L_s - L_{\sigma s} = 0,031 - 0,001 = 0,03 \Gamma_n. \quad (2.12)$$

Відносні опори:

$$\rho_{1\kappa} = \frac{R_1}{X_{\kappa,ном}} = \frac{0,024}{0,2} = 0,119 \quad (2.13)$$

$$\rho_{1\mu} = \frac{R_1}{X_{\mu,ном}} = \frac{0,024}{5,31} = 0,004 \quad (2.14)$$

Потокозчеплення:

$$\Psi = I_{mxx} \cdot L_M = 31,77 \cdot 0,03 = 0,99 \quad (2.15)$$

$$I_{mxx} = \sqrt{2} \cdot I_{xx} = 1,44 \cdot 22,45 = 31,77 A \quad (2.16)$$

$$I_{xx} = \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot L_S} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_H} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 0,031} \cdot \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 22,45 A \quad (2.17)$$

2.9 Побудова механічних характеристик асинхронного двигуна. Моделювання на ЕОМ

Для даного привода прийнято закон частотного регулювання $U_1/f_1 = \text{const}$ при $M = \text{const}$. Цей закон забезпечує незмінний магнітний потік Φ , як наслідок, незмінну перевантажувальну здатність на всіх частотах. У програмному середовищі MathCad побудовано механічні характеристики для чотирьох значень частоти (рис. 2.13).

Задаємося відносною частотою напруги (струму) статора α :

$$\alpha = f_1 / f_{ном} \quad (2.18)$$

Знаходимо γ – відносна напруга на статорі:

$$\gamma := \sqrt{\frac{\alpha \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{кном}^2 \cdot \alpha^2})}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{кном}^2}}} \quad (2.19)$$

Знаходимо критичне ковзання:

$$S_k := \left(\frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{кном}^2 \cdot \alpha^2}} \right) \quad (2.20)$$

Максимальний момент:

$$M_{\text{макс}} := \frac{3U_{\text{ном}}^2 \cdot \gamma^2}{2\alpha \cdot \omega_{\text{ном}} \cdot \left(R1 + \sqrt{R1^2 + X_{\text{кном}}^2 \cdot \alpha^2} \right)} \quad (2.21)$$

Обчислюємо момент двигуна при різних значеннях β_j від 0 до S_k :

$$M_j = \frac{2 \cdot M_{\text{макс}} \cdot \left(1 + \frac{R1 \cdot S_k}{C \cdot R2} \right)}{\frac{S_k}{\beta_j} + \frac{\beta_j}{S_k} + 2 \cdot \frac{R1 \cdot S_k}{C \cdot R2}} \quad (2.22)$$

Зв'язок між статичним моментом на валу вентилятора/димососа і продуктивністю:

$$M_c = k \cdot \rho \cdot Q^2 \quad (2.23)$$

де M_c - статичний момент навантаження, Н·м;

$k = 3$ - коефіцієнт пропорційності (залежить від геометрії робочого колеса);

$\rho = 0,7 \text{ кг/м}^3$ - середня густина газу в газоході;

Q - об'ємна витрата, $\text{м}^3/\text{с}$.

Квадратична залежність моменту від витрати є характерною ознакою «вентиляторного» навантаження і підтверджує, що зменшення швидкості на 20% знижує споживану потужність майже на 50%.

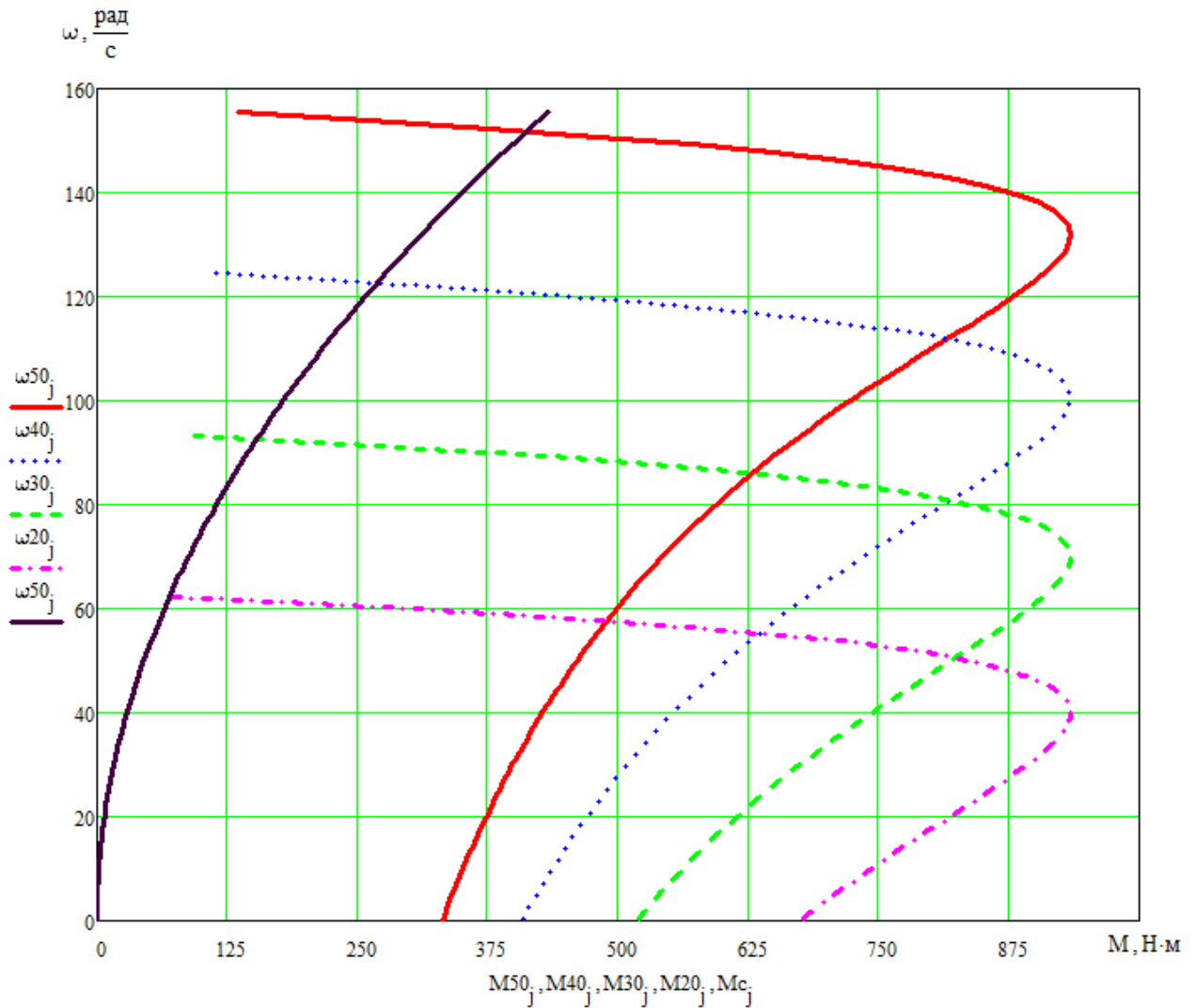
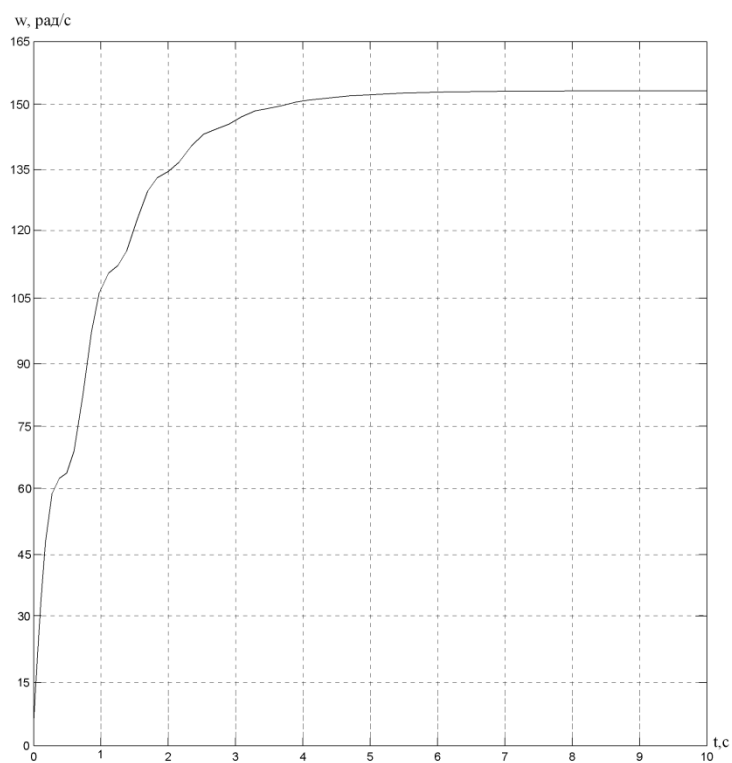
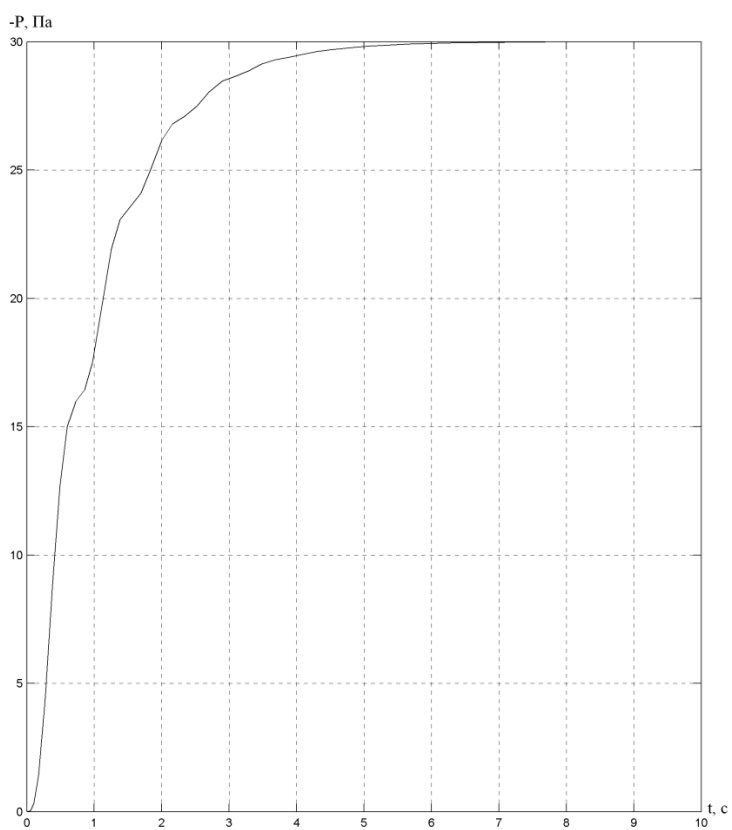


Рис. 2.13. Механічні характеристики двигуна при $f = 20, 30, 40, 50$ Гц
(розроблено автором)

Після занесення розрахованих параметрів до блока Induction Motor виконано моделювання пуску і виходу на задане розрідження. Отримані графіки перехідних процесів (рис. 2.14) показують: час виходу на задану швидкість не перевищує 4 с, перерегулювання за розрідженням - менше 8%. Обидва показники знаходяться в межах прийнятних для котельного обладнання.



а)



б)

Рис. 2.14. Перехідні процеси системи:
а) за кутовою швидкістю; б) за розрідженням
 (розроблено автором)

Порівняння розробленої частотно-регульованої системи з чинною шибберною дозволяє зробити однозначний висновок: при навантаженні котла 70% від номінального нова система забезпечує зниження споживаної потужності привода приблизно на 35% за рахунок зменшення швидкості димососа, тоді як точність підтримання розрідження покращується щонайменше вдвічі.

2.10 Заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності

2.10.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих чинників

Виробниче середовище котельні формується сукупністю фізичних та хімічних чинників, що одночасно впливають на організм працівника. Характерно, що частина з них виникає саме внаслідок нераціональних режимів роботи котельного обладнання - тих самих, які повинна усунути розроблена в цій роботі система управління.

Запиленість робочої зони - перший пріоритетний чинник. Механічна обробка руди та транспортування шихтових матеріалів вносять у повітря завислі частки розміром до 10 мкм, що проникають у легеневі альвеоли та здатні спричинити пневмоконіоз, хронічний бронхіт і емфізему [11]. Фактична концентрація пилу в котельні сягає 10 мг/м³ проти нормативних 8 мг/м³ згідно з [12] - перевищення на 25%.

Підвищений рівень шуму - другий за значущістю чинник. Аеродинамічний шум від вентиляторів, димососів і горілок у поєднанні зі структурним шумом трубопроводів формує рівень 75 дБ при нормі 60 дБ згідно з [13, 14]. Тривала дія шуму такої інтенсивності спричиняє сенсоневральну приглухуватість, підвищує артеріальний тиск і знижує концентрацію уваги.

Несприятливий мікроклімат - третій чинник. У теплий сезон температура повітря в котельні сягає 25-28 °С при нормі 20-23 °С [15, 16], а відносна вологість - 75% при нормі 40-60%. Поєднання підвищеної температури й

вологості різко знижує ефективність потовиділення як механізму терморегуляції організму.

Серед небезпечних чинників основний ризик несе ймовірність дотику до струмоведучих частин силового обладнання (двигун димососа, перетворювач частоти, розподільчий щит). Додатковим джерелом небезпеки є рухомі елементи механічних передач - муфти, шківи, вали. Характеристичні значення всіх чинників зведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

**Зіставлення нормативних і фактичних рівнів виробничих чинників
[розраховано автором]**

Фактор виробничого середовища	Одиниця виміру	Норма	Факт	Тривалість дії, %
Шум	дБ	60	75	100
Температура повітря – холодний сезон	°C	17-20	17-20	100
Температура повітря – теплий сезон	°C	20-23	25-28	100
Швидкість руху повітря	м/с	0,2-0,5	0,1-0,3	100
Відносна вологість повітря	%	40-60	75	100
Штучне освітлення	лк	75	60	100
Запиленість (концентрація пилу)	мг/м ³	8	10	100

Звертає на себе увагу, що саме рівень шуму і температура повітря мають найбільше відхилення від норми. Обидва ці параметри безпосередньо пов'язані з режимом роботи димососа: при постійній максимальній швидкості

аеродинамічний шум і тепловиділення від двигуна суттєво вищі, ніж при регульованій. Таким чином, запровадження частотного регулювання дасть позитивний ефект не лише в економії електроенергії, а й у покращенні умов праці персоналу котельні.

2.10.2 Заходи щодо зниження впливу шкідливих і небезпечних виробничих чинників

Система захисних заходів організована за чотирма напрямками, що доповнюють один одного.

Організаційний напрям [18, 19] передбачає: розробку і виконання інструкцій з охорони праці; планово-попереджувальні огляди і ремонти обладнання за затвердженим графіком; проведення первинного, повторного та позапланового інструктажів персоналу; розміщення попереджувальних знаків і плакатів у місцях з підвищеною небезпекою.

Технічний напрям [20, 21] включає: автоматизацію процесів управління котлоагрегатом, що зменшує час перебування персоналу в зоні дії шкідливих чинників; огороження рухомих частин механізмів та неізольованих струмоведучих елементів; встановлення кінцевих вимикачів і захисних реле; заміну обладнання, що відпрацювало ресурс.

Санітарно-гігієнічний напрям [16, 22] охоплює: забезпечення ефективної припливно-витяжної вентиляції та кондиціонування; підтримання нормативного рівня освітленості (не менше 75 лк); застосування звукоізоляції та звукопоглинання для зниження шуму; регулярне прибирання та зволоження для зменшення запиленості.

Медично-профілактичний напрям [23] включає обов'язковий щорічний медичний огляд з перевіркою показників слуху, функції легень і серцево-судинної системи. Засоби індивідуального захисту [24, 25]: для органів дихання - респіратори типу FFP2; для органів слуху - навушники або беруші з НПШ $\geq$

20 дБ; для рук при роботі в електроустановках - діелектричні рукавички; спецодяг і спецвзуття відповідно до умов виробництва.

2.10.3 Протипожежна безпека

Котельня з газоподачею відноситься до підвищеної категорії пожежовибухонебезпечності. Основними причинами займань у таких приміщеннях є: порушення герметичності газопроводів, несправний стан електрообладнання та недотримання заборони на відкритий вогонь. Система профілактичних заходів будується в двох рівнях.

Перший рівень - організаційний: розроблення і актуалізація інструкцій з протипожежного режиму; навчання всіх категорій персоналу з практичним відпрацюванням дій при пожежі; щоденна протипожежна перевірка приміщень після закінчення зміни; розроблення і розміщення плану евакуації на видних місцях.

Другий рівень - технічний [26]: підтримання справного стану газовимикачів і запірної арматури; регулярна перевірка ізоляції силових кабелів; технічне обслуговування автоматичної пожежної сигналізації; перевірка первинних засобів пожежогасіння в нормативні строки [29].

Перелік первинних засобів пожежогасіння згідно з [27, 28] наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Первинні засоби пожежогасіння котельні

Засіб	Тип	Призначення	Місце розташування
Вогнегасники порошкові	ВВП-9	Різні класи пожеж	По всіх ділянках
Вогнегасники вуглекислотні	ВВ-5, ВВ-8	Електроустановки	По всіх ділянках
Вогнегасники пінні	ВП-3, ВП-5	Тверді та рідкі речовини	По всіх ділянках
Пожежні крани з рукавами	—	Подача води під тиском	По всіх ділянках
Ящики з піском	0,5 м ³	Гасіння розлитих речовин	Пости керування; вентустановки
Пожежна сигналізація	Ручна + автоматична	Оповіщення	Пости керування
Протипожежні агрегати	Автоматичні	Автоматичне гасіння	—

Для гасіння електроустановок під напругою застосовують лише вогнегасники типів ВУ (вуглекислотний) і ВВП (порошковий), оскільки їх речовини не проводять електричний струм. Вогнегасники розміщуються не вище 1,5 м від рівня підлоги на видних місцях поблизу виходів. Приміщення котельні за вибухопожежною небезпекою відноситься до категорії «Б» згідно з [34]. Під'їзні шляхи для пожежних автомобілів передбачені шириною не менше 6 м з обох боків будівлі.

ВИСНОВКИ

Виконана кваліфікаційна робота довела, що заміна ручного шибєрного регулювання тяги на автоматизовану систему частотного керування електроприводом димососа вирішує одразу три взаємопов'язані проблеми котельної установки АТ «Південний ГЗК».

По-перше, задача точності: автоматичний ПД-регулятор утримує розрідження в топці в межах ± 3 Па від заданого значення без постійної участі оператора; час відновлення після збурення не перевищує 4 с, перерегулювання - менше 8%.

По-друге, задача енергозбереження: при навантаженні котла 70% від номінального частотне регулювання знижує споживану потужність привода приблизно на 35% порівняно з роботою на постійній максимальній швидкості - завдяки квадратичній залежності потужності вентилятора від частоти обертання.

По-третє, задача виробничих умов: зниження швидкості обертання при частковому навантаженні зменшує аеродинамічний шум і тепловиділення від двигуна, що частково усуває виявлені перевищення нормативних рівнів шуму і температури в робочій зоні персоналу котельні.

Вибір технічних засобів - перетворювача Danfoss VLT 6000 HVAC, контролера Beckhoff CX5130 та датчика Rosemount 3051 CD - обґрунтовано порівняльним аналізом, при якому вирішальну роль відіграли спеціалізація обладнання, клас точності та наявність промислових комунікаційних інтерфейсів.

Результати імітаційного моделювання у MatLab/Simulink підтвердили розрахункові показники і підтвердили відповідність системи вимогам технологічного процесу. Отримані дані є підставою для рекомендації щодо впровадження розробленої системи в промислову експлуатацію.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ветров О. О., Кривець А. С. Технологія та обладнання гірничо-збагачувальних комбінатів. Кривий Ріг: КТУ, 2015. 320 с.
2. Технічний паспорт парового котла ДЕ-25-14ГМО. Київ: Укренергомаш, 2010. 48 с.
3. Технічна документація на відцентровий димосос ДН-12,5У. Суми: Насосенергомаш, 2012. 32 с.
4. Онищенко Г. Б. Електричний привод: підручник. Київ: ВІЛУР, 2012. 543 с.
5. ABB M2AA Frame Motors. Product Catalogue. ABB Group, 2021. URL: <https://www.abb.com/motors-generators> (дата звернення: 20.04.2026).
6. Danfoss VLT HVAC Drive FC 102. Design Guide. Danfoss A/S, 2022. 248 p. URL: <https://www.danfoss.com> (дата звернення: 20.04.2026).
7. Рибалко О. А. Енергозберігаючі технології в котельних установках. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. 215 с.
8. Beckhoff CX5130 Embedded PC. Technical Documentation. Beckhoff Automation, 2023. URL: <https://www.beckhoff.com> (дата звернення: 20.04.2026).
9. Rosemount 3051 Pressure Transmitter. Reference Manual. Emerson Process Management, 2020. 312 p. URL: <https://www.emerson.com> (дата звернення: 20.04.2026).
10. MatLab / Simulink. Power System Blockset User's Guide. The MathWorks, 2001. 416 p.
11. Дзюндзюк Б. В., Ємченко І. В. Охорона праці в електроенергетиці. Харків: ХНУРЕ, 2019. 320 с.
12. ДСТУ 12.1.005:2006. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони. Київ: Держстандарт України, 2006. 23 с.
13. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Київ: МОЗ України, 2000. 31 с.

14. НПАОП 0.00-1.28-10. Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин. Київ: Держгірпромнагляд, 2010. 18 с.
15. ISO 1999:2013. Acoustics - Estimation of noise-induced hearing loss. ISO, 2013. 32 p.
16. ДСТУ EN ISO 7730:2016. Ергономіка теплового середовища. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 42 с.
17. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. Київ: Держнаглядохоронпраці, 2001. 97 с.
18. Наказ МОЗ України № 246 від 21.05.2007. Порядок проведення медичних оглядів працівників. Київ: МОЗ, 2007.
19. ДСТУ OHSAS 18001:2010. Системи управління гігієною та безпекою праці. Київ: Держстандарт, 2010.
20. НПАОП 0.00-1.15-07. Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті. Київ, 2007.
21. НПАОП 0.00-4.09-07. Типове положення про комісію з питань охорони праці підприємства. Київ, 2007.
22. ДСП 173-96. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів. Київ: МОЗ, 1996.
23. ДСТУ 7239:2011. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація. Київ, 2011.
24. EN 149:2001+A1:2009. Respiratory protective devices - Filtering half masks. CEN, 2009.
25. EN 374-1:2016. Protective gloves against dangerous chemicals and micro-organisms. CEN, 2016.
26. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. Київ: Мінрегіон, 2017.
27. ДСТУ 3675-98. Пожежна техніка. Вогнегасники переносні. Загальні технічні вимоги. Київ, 1999.

28. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. Київ: ДСНС, 2014.
29. ДСТУ EN 3-7:2007. Переносні вогнегасники. Частина 7. Київ, 2009.
30. ДСТУ EN 3-8:2007. Переносні вогнегасники. Частина 8. Київ, 2009.
31. ДСТУ EN 3-9:2007. Переносні вогнегасники. Частина 9. Київ, 2009.
32. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. Київ: Мінрегіон, 2015.
33. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Київ, 1998.
34. НАПБ Б.03.002-2007. Норми визначення категорій приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Київ, 2007.
35. С. Гушко. Вимоги з оформлення письмових робіт у державному університеті економіки і технологій. Кривий Ріг, 2020. - 53с.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

141-23-2026врб

Автор

141-23-2026врб

Науковий керівник / Експерт

Модло Є

ІД документу

334133542

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту

6/2/2026

Дата редагування

Обсяг знайдених подібностей

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



КП 1

6053

Кількість слів



КЦ

45204

Кількість символів

Тривога

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

Заміна букв		11
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		5

Джерела

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

10 найдовших фраз

Копію тексту

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	https://studfile.net/preview/7219795/	14 (0.23 %)

**ЗГОДА здобувачки вищої освіти
Державного університету економіки і технологій про перевірку
кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату
та розміщення в Репозитарії Університету**

Я, *Даровик Яна Олександрівна*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу.

Засвідчую, що кваліфікаційна бакалаврська робота Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електропривод димососа котла ДЕ-25-14 в умовах теплосилового цеху АТ «Південний ГЗК» виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавала і не одержувала недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

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

Також я поінформована, що відповідно до «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» зазначена робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ). З умовами такого розміщення ознайомена.

1.06.2026