

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)

Кравчини Станіслава Віталійовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему: Електромеханічне обладнання металургійного виробництва.
Електропривод компресорного агрегата 2А 350 7-2в умовах цеху
водопостачання ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг"

(повна назва теми)

за матеріалами ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг"

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник доцент, к.т.н. Пироженко А.В.
(наук. ступінь, вчене звання) (підпис) (прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від 16.06.2026 № 405-ст

Завідувач кафедри

(підпис)

доцент, к.п.н.
Наук. ступінь, вчене звання

Є.О. Модло
Ініціали, прізвище

Кривий Ріг – 2026

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

З А В Д А Н Н Я

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТКИ

Кравчини Станіслава Віталійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема випускної кваліфікаційної роботи

Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електропривод компресорного агрегата 2А 350 7-2в умовах цеху водопостачання ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг"

керівник випускної роботи Пироженко Андрій Володимирович, доцент, к.т.н.

(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 02.06.2026

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи: Об'єкт автоматизації - електропривод компресорного агрегату 2А 350-7-2 льодозаводу цеху водопостачання ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»; марка гвинтового компресора - ВХ 350-2-1; холодоагент - аміак марки А; холодопродуктивність - 423,5 кВт; температура кипіння - від +5 до -15°C; температура конденсації (макс.) - +40°C; тип електродвигуна компресора - 4АН280S2У3; потужність двигуна - 160 кВт; частота обертання - 3000 об/хв; номінальне ковзання - 1,4%; ККД - 92%; cosφ - 0,91; кратність пускового струму - 7,0; кратність пускового моменту - 1,4; кратність максимального моменту - 2,7; момент інерції ротора - 0,43 кг·м²; напруга головного кола - 380 В; напруга кіл керування - 220 В; частота струму - 50 Гц; існуюча система керування - пристрій А-80 (понад 20 років в експлуатації);

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити. 4.1 Аналітична частина: призначення й технічна характеристика

холодильної установки; технологія виготовлення технічного льоду; аналіз існуючої системи керування компресорним агрегатом (пристрій А-80); огляд методів регулювання продуктивності компресорного обладнання та методів регулювання швидкості асинхронного двигуна; технічна реалізація перетворювачів частоти. 4.2 Основна частина: вибір двигуна та перетворювача частоти; частотне керування асинхронним двигуном, схема заміщення та механічні характеристики; розрахунок спожитої електроенергії за рік; математичний опис двигуна та системи керування; моделювання системи привода; розробка автоматичної системи регулювання продуктивності компресора; аналіз вхідно-вихідних сигналів контролера та вибір технічних засобів; розробка алгоритму роботи програми системи автоматизації. Заходи з охорони праці: аналіз шкідливих та небезпечних виробничих чинників; заходи з усунення шкідливих чинників; розрахунок захисного заземлення; засоби індивідуального захисту та медичні огляди; пожежна безпека.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) ВРБ.141.237-ст.03.Е0 - Схема апаратів холодильної установки; ВРБ.141.237-ст.03.Е2 - Схема електрична функціональна; ВРБ.141.237-ст.03.Е0.1 - Графіки перехідних процесів; ВРБ.141.237-ст.03.Е0.2 - Блок-схема алгоритму керування системи автоматизації; ВРБ.141.237-ст.03.Е3 - Схема електрична принципова.

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналітична частина	Пироженко А.В.	10.04.2026	10.04.2026
Основна частина	Пироженко А.В.	10.04.2026	10.04.2026

7. Дата видачі завдання 10.04.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної роботи	Строк виконання етапів випускної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	01.05.2026	
2.	Основна частина	22.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	28.05.2026	
4.	Виконання графічної частини	29.05.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	02.06.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	18.06.2026	

Студент

(підпис)

Кравчина С.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи

(підпис)

Пироженко А.В.
(прізвище та ініціали)

№ ряд ка	Фор мат	Позначення			Назва	Кіл. листів	№ екз.	Прим.
1	A3	ВРБ.141.237-ст.03.Е0			Схема апаратів	1		
2					холодильної установки			
3								
4	A3	ВРБ.141.237-ст.03.Е2			Схема електрична	1		
5					функціональна			
6								
7	A3	ВРБ.141.237-ст.03.Е0.1			Графіки перехідних	1		
8					процесів			
9								
10	A3	ВРБ.141.237-ст.03.Е0.2			Блок-схема алгоритму	1		
11					керування			
12					системи автоматизації			
13								
14	A3	ВРБ.141.237-ст.03.Е3			Схема електрична	1		
15					принципова			
16								
17	A4	ВРБ.141.237-ст.16.ПЗ			Пояснювальна записка	71		
18								
19								
20								
					ВРБ.141.237-ст.03.ВР			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розроб.		Кравчина С.В.			Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електропривод компресорного агрегата 2А 350 7-2в умовах цеху водопостачання ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг" Відомість роботи	Літера	Аркуш	Аркушів
Пров.		Пироженко А.В.					4	1
						ННТІ ДУЕТ Каф.ЕІА гр. ЗЕПА-23ск		
Н.контр.		Пироженко А.В.						
Затв.		Модло Є.О.						

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 71 с., 31 рис., 12 табл., 13 джерел.

Об'єкт розробки - компресорний агрегат 2А 350 7-2 в умовах цеху водопостачання ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг".

Мета роботи - розробка автоматизованої системи керування компресорною установкою із застосуванням сучасного мікропроцесорного обладнання, що забезпечує ефективне регулювання продуктивності.

Метод дослідження та апаратура - аналіз існуючих методів регулювання продуктивності компресорних агрегатів, математичне моделювання системи електропривода, розробка алгоритму керування.

Проаналізовано технологічний процес та основні характеристики компресорної установки. Розроблено функціональну схему автоматичної системи регулювання. Обґрунтовано вибір перетворювача частоти та мікроконтролера.

Встановлено, що впроваджена автоматизована система забезпечує плавне регулювання запуску та зупинки компресора, а також керування продуктивністю шляхом зміни швидкості обертання приводу. Досягається необхідна продуктивність при зниженні питомих втрат електроенергії.

Ключові слова: алгоритм, компресор, мікропроцесор, моделювання, перетворювач частоти, продуктивність, регулювання, система автоматизації.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Призначення й технічна характеристика холодильної установки	10
1.2 Електроживлення льодозавода	12
1.3 Технологія виготовлення технічного льоду	13
1.4 Система керування компресорним агрегатом	13
1.5 Методи регулювання продуктивності компресорного обладнання	14
1.6 Методи регулювання швидкості асинхронного двигуна	15
1.6.1 Перемикання числа пар полюсів	16
1.6.2 Реостатне регулювання кола ротора	17
1.6.3 Регулювання зміною напруги статора	17
1.6.4 Частотне регулювання швидкості	19
1.7 Технічна реалізація перетворювачів частоти	20
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	25
2.1 Вибір двигуна	25
2.2 Вибір перетворювача частоти	26
2.3 Частотне керування асинхронним двигуном	28
2.3.1 Схема заміщення асинхронного двигуна.....	28
2.3.2 Побудова механічних характеристик.....	30
2.4 Розрахунок спожитої електроенергії системою ПЧ-АД за рік.....	33
2.5 Математичний опис двигуна та системи керування	34
2.7 Моделювання системи привода.....	44
2.8 Розробка автоматичної системи регулювання продуктивності компресора	50

2.8.1 Функції автоматичної системи керування.....	50
2.9 Аналіз вхідно-вихідних сигналів контролера та вибір технічних засобів	51
2.9.1 Перетворювачі сигналів та датчики тиску	55
2.9.2 Джерело живлення	56
2.9.3 Давач вібрації та осьового зсуву	56
2.9.4 Вибір давача швидкості.....	57
2.10 Розрахунок похибки вимірювання	57
2.11 Розробка алгоритму роботи програми системи автоматизації компресора	58
2.12 Охорона праці	60
2.12.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих чинників.....	60
2.12.2 Заходи з усунення шкідливих чинників	61
2.12.3 Розрахунок захисного заземлення.....	62
2.12.4 Засоби індивідуального захисту та медичні огляди	65
2.12.5 Пожежна безпека.....	67
ВИСНОВКИ.....	69
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	70

ВСТУП

Металургійний комплекс ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг" є одним із найбільших інтегрованих підприємств повного гірничо-металургійного циклу в Україні. Безперервне вдосконалення виробничих процесів та забезпечення конкурентоспроможності продукції вимагають систематичного впровадження енергозберігаючих технологій.

Актуальність питань ресурсозбереження посилилася після входження комбінату до складу компанії Mittal Steel, що зобов'язує відповідати міжнародним стандартам виробничої ефективності. Вирішення цих завдань нерозривно пов'язане із застосуванням сучасних досягнень науки й техніки, впровадженням прогресивного обладнання, а також комплексною механізацією та автоматизацією технологічних процесів.

Суттєвий резерв зниження енергоспоживання зосереджений у сфері модернізації електроприводів виробничих механізмів. Електропривод є головним засобом автоматизації машин у промисловості; питома частка споживання ним електроенергії сягає близько 60% від загального обсягу.

Необхідність модернізації приводів особливо очевидна там, де застосовуються застарілі системи з низьким ККД: нерегульований привод насосів, системи типу "генератор - двигун", реостатне регулювання. В інших випадках доцільність оновлення повинна підтверджуватися техніко-економічними розрахунками.

Льодозавод цеху водопостачання (ЦВП) складається з компресорного відділення, відділення холодогенератора та системи водопостачання. Компресорне відділення забезпечує подачу стисненого аміаку у випарну систему холодогенератора. Агрегат функціонує за замкненим циклом з поповненням холодоагенту в міру потреби.

Система керування компресорним агрегатом побудована на серійному спеціалізованому пристрої А-80, який знаходиться в експлуатації більше двадцяти років і вичерпав свій ресурс: фізичний та моральний знос обумовлює відмови та збої в роботі. Заміна застарілого блоку на сучасну мікропроцесорну

систему дозволить підвищити надійність і запровадити автоматичне регулювання продуктивності установки.

У роботі розглянуто можливість заміни існуючої системи керування та контролю технологічних параметрів на сучасний мікропроцесорний комплекс з функцією автоматичного регулювання продуктивності компресорної установки.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Призначення й технічна характеристика холодильної установки

Об'єктом розробки є холодильна установка льодозаводу ЦВП, призначена для виробництва технічного льоду та охолодження харчових продуктів. До її складу входять два компресорних агрегати 2А 350-7-2, масловіддільник ОММ-150, маслозбірник СМ-150, вертикальний конденсатор КВ-250, лінійний ресивер 1,5 РВ, охолоджувачі рідини ОЖГ-125, секції випарників, регулювальна і заправна станції аміаку, льодогенератор з мішалками.

Холодильна установка являє собою систему взаємопов'язаного трубопроводами обладнання, що реалізує замкнутий цикл циркуляції холодильного агента - аміаку, забезпечуючи відведення теплоти від охолоджуваного середовища та передачу її до охолоджувального середовища (рис. 1.2).



Рис. 1.1. Зовнішній вигляд компресорного агрегату

(розроблено автором)

Компресорний агрегат включає гвинтову компресорну машину з маслосистемою (для змащення підшипників), системою водяного охолодження маслоохолоджувача та системою циркуляції холодоагенту із запірною й регулювальною арматурою. Головний привод - асинхронний трифазний електродвигун; привод маслонасоса - також асинхронний трифазний двигун. Обидва приводи захищені від короткого замикання та перевантаження, забезпечені апаратурою пуску та зупинки.

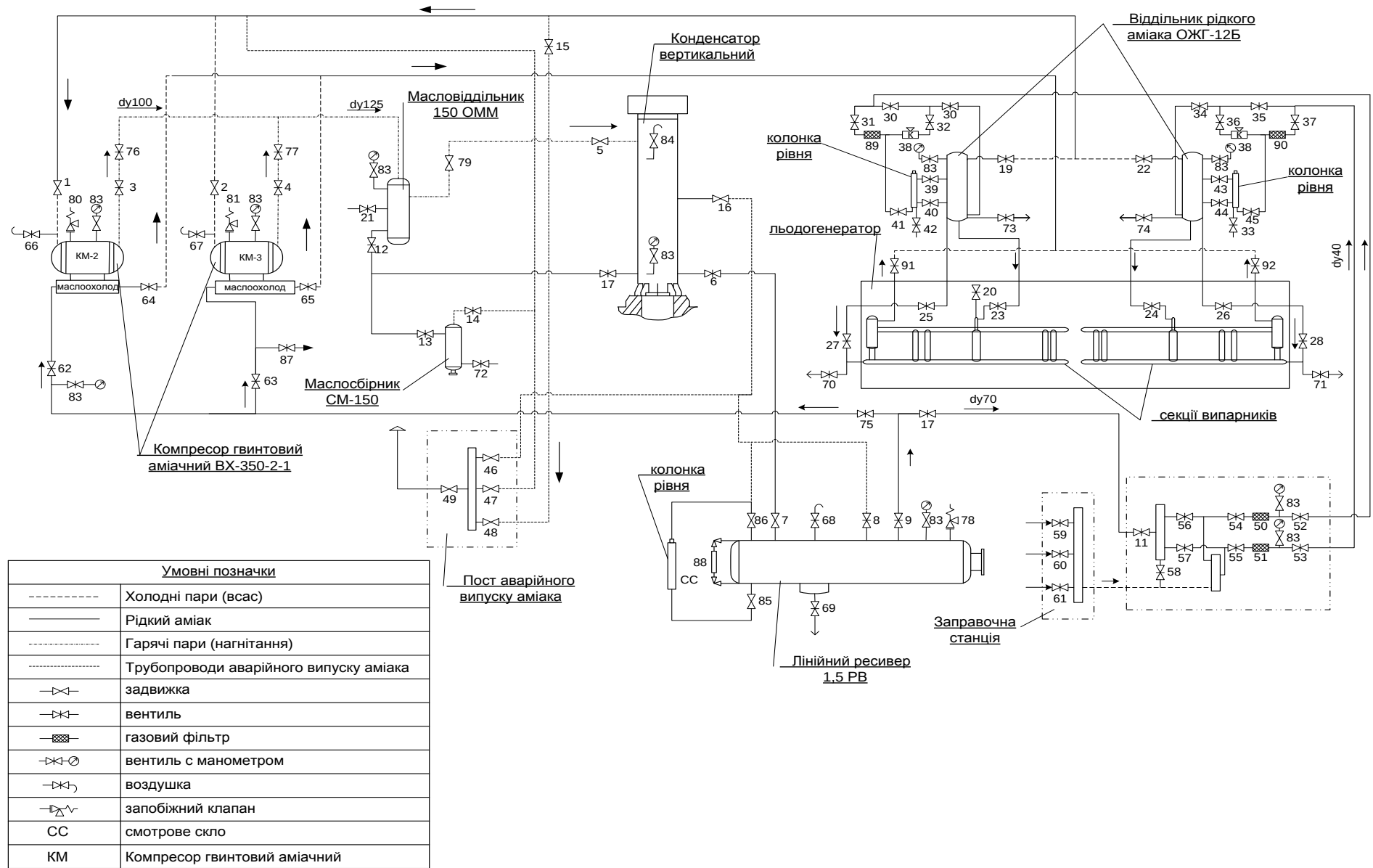


Рис. 1.2. Функціональна схема холодильної установки
(розроблено автором)

Таблиця 1.1

Технічна характеристика компресорного агрегату 2А 350-7-2 [1]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Марка гвинтового компресора	-	BX 350-2-1
2	Холодильний агент	-	аміак марки А
3	Холодопродуктивність	кВт	423,5
4	Температура кипіння (діапазон)	°С	+5 до -15
5	Температура конденсації (макс.)	°С	+40
6	Номінальна температура кипіння	°С	+5
7	Температура усмоктування	°С	+15
8	Напруга головного кола	В	380
9	Напруга кіл керування	В	220
10	Частота струму	Гц	50
11	Тип ел. двигуна компресора	-	4АН280S2УЗ
12	Потужність ел. двигуна	кВт	160
13	Частота обертання	об/хв	3000
14	Масова витрата масла	г/год	100

1.2 Електроживлення льодозавода

Живлення льодозаводу здійснюється від закритої розподільної установки (ЗРУ) 0,4 кВ трансформаторної підстанції за такою схемою: компресорний агрегат №2 - від осередку №6; компресорний агрегат №3 - від осередку №5; розподільні панелі ЗШР, 4ШР - від автомата А2 осередок №1; розподільні

панелі 1ШР, 2ШР - від автомата А4 осередок №1; розподільна панель 5ШР - від автомата А3 осередок №2; освітлення - від автомата А1 осередок №3.

1.3 Технологія виготовлення технічного льоду

Технічний лід виробляється з води, яка не відповідає вимогам до харчового льоду. Блочний лід отримують у льодогенераторах із ропним охолодженням на основі кипіння аміаку. Для приготування розсолу застосовується кам'яна кухонна сіль (хлорид натрію) NaCl. Щільність розсолу становить 1,0-1,17 кг/л.

Компресорний агрегат 2А 350-7-2 реалізує одноступеневе стиснення за таким циклом: пари аміаку з випарної системи через газовий фільтр надходять до гвинтового компресора, де разом з маслом стискаються до тиску конденсації. Масло виконує функції охолодження стисненого газу, змащення та ущільнення зазорів між корпусом і роторами. Маслоаміачна суміш спрямовується до триступеневого масловіддільника-сепаратора, звідки очищені пари аміаку надходять до конденсатора. Після зрідження та дроселювання рідкий аміак повертається у випарну систему, завершуючи цикл.

Форми з водою опускають у бак з розсолом, вздовж якого розміщені секції випарників. Температура розсолу (-10 °C) підтримується роботою холодильної машини. Застосування мішалок для циркуляції розсолу між формами прискорює заморожування. Після формування блоків льоду (тривалість 12-16 годин) форми занурюють у бак із теплою водою (~40 °C) на 2-3 хвилини для відтавання, після чого лід вивантажують, а форми знову заповнюють водою.

1.4 Система керування компресорним агрегатом

Чинна система керування компресорним агрегатом побудована на серійному спеціалізованому пристрої А-80, який забезпечує три режими роботи: автоматичний (А), напівавтоматичний (НА) та місцевий (М). Крім того,

пристрій здійснює аварійне відключення при несправностях приводів і мережі, а також при відхиленнях робочих параметрів гідро- та маслосистем.

Пристрій А-80 перебуває в експлуатації понад двадцять років. Його фізичний та моральний знос стали причиною систематичних відмов і збоїв. Обмежені функціональні можливості застарілої елементної бази унеможливають реалізацію сучасних алгоритмів оптимального керування продуктивністю. Наведені обставини обумовлюють необхідність заміни системи керування на сучасний мікропроцесорний комплекс.

1.5 Методи регулювання продуктивності компресорного обладнання

Регульовальні пристрої класифікують за характером їх впливу на параметри мережі або нагнітача. Виокремлюють три основних підходи до регулювання. Перший передбачає дроселювання мережі за допомогою клапанів, шиберів, засувок або діафрагм: характеристика нагнітача залишається незмінною, натомість змінюється характеристика мережі. Другий підхід полягає у зміні швидкості обертання робочого колеса нагнітача. Третій базується на структурній зміні параметрів нагнітача (наприклад, регульований напрямний апарат).

Ступінь регулювання характеризується відношенням зміни подачі або тиску до їх вихідного значення. Дроселювання (при постійній частоті обертання) є найпростішим, але найменш економічним методом, оскільки надлишкова енергія розсіюється на дроселі. Регулювання зміною частоти обертання приводу є енергетично ефективнішим, оскільки потужність, що споживається нагнітачем, змінюється пропорційно кубу частоти обертання відповідно до законів подібності (рис. 1.3).

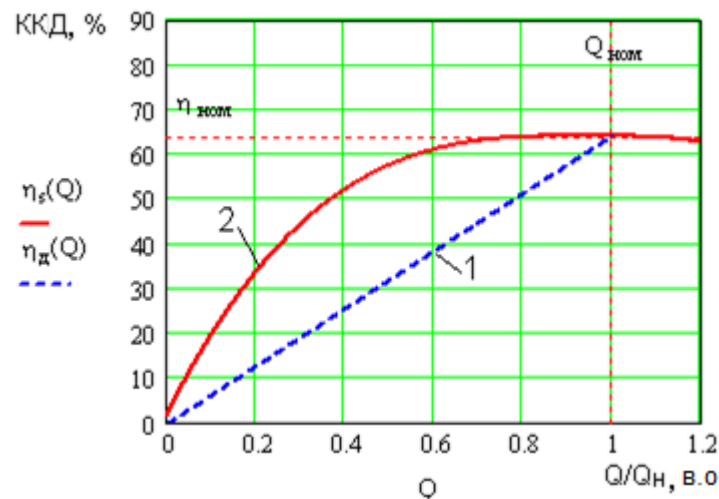


Рис. 1.3. Залежність ККД компресора від відносної подачі при різних методах регулювання [2]:

1 - засувка; 2 - зміна частоти обертання
(розроблено автором)

1.6 Методи регулювання швидкості асинхронного двигуна

Аналіз рівняння механічної характеристики асинхронного двигуна дозволяє визначити такі електричні методи регулювання швидкості: перемикання числа пар полюсів p ; введення резистора в коло ротора R_{p2} ; зміна напруги на статорній обмотці U_ϕ ; зміна частоти живлячої напруги f_1 .

$$M = \frac{3U_\phi^2 \cdot R_{2\Sigma}'}{\omega_0 \cdot S \cdot (R_1 + R_{2\Sigma}' \cdot S)^2 + X_k^2} \quad (1.1)$$

де:

U_ϕ – фазна напруга мережі;

$R_{2\Sigma}'$ – наведене до статора опір роторного кола;

$R_{2\Sigma}' = R_2' + R_{p2}'$ – опору обмотки ротора R_2' й реостата R_{p2}' ;

R_1 – опір обмотки статора;

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} - \text{кутова швидкість поля статора};$$

f_1 – частота мережі;

p – число пар полюсів;

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} - \text{ковзання};$$

ω – кутова швидкість ротора;

x_k – реактивний опір короткого замикання.

1.6.1 Перемикання числа пар полюсів

Даний метод забезпечує ступінчасте регулювання синхронної швидкості ω_0 . Кратність зміни швидкості залежить від співвідношення чисел пар полюсів. При застосуванні незалежних обмоток діапазон регулювання досягає 6:1. Суттєвий недолік - відсутність плавності, оскільки перемикання завжди супроводжується стрибком швидкості (рис. 1.4).

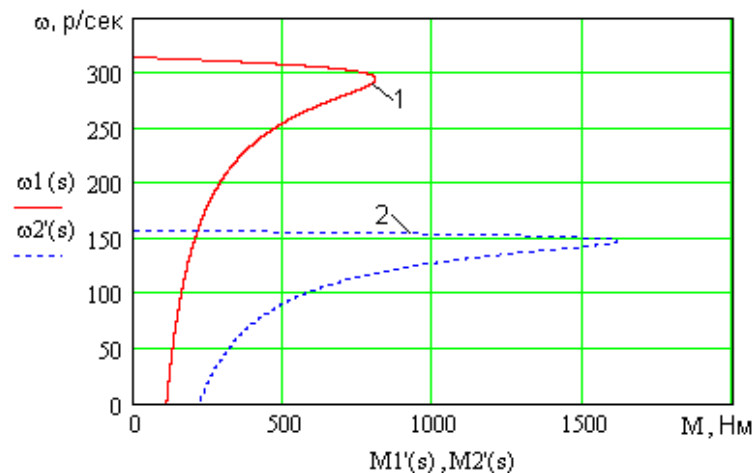


Рис. 1.4. Механічні характеристики асинхронного двигуна при перемиканні числа пар полюсів [3]

(розроблено автором)

1.6.2 Реостатне регулювання кола ротора

При введенні резистора R_r в коло ротора вся енергія ковзання розсіюється у вигляді теплоти: $\Delta P = P_e \cdot S$, де P_e - електромагнітна потужність. Втрати пропорційні відносному зниженню кутової швидкості. Метод застосовний лише для двигунів з фазним ротором, діапазон регулювання не перевищує 2:1, жорсткість характеристики знижується зі зменшенням швидкості, що погіршує стабільність. 1 відповідає $R_{я}=1 \cdot R_{я}$ (природня); 2 відповідає $R_{я}=3 \cdot R_{я}$; 3 відповідає $R_{я}=5 \cdot R_{я}$; 4 відповідає $R_{я}=7 \cdot R_{я}$.

Метод неекономічний через великі втрати та позбавлений перспектив (рис. 1.5).

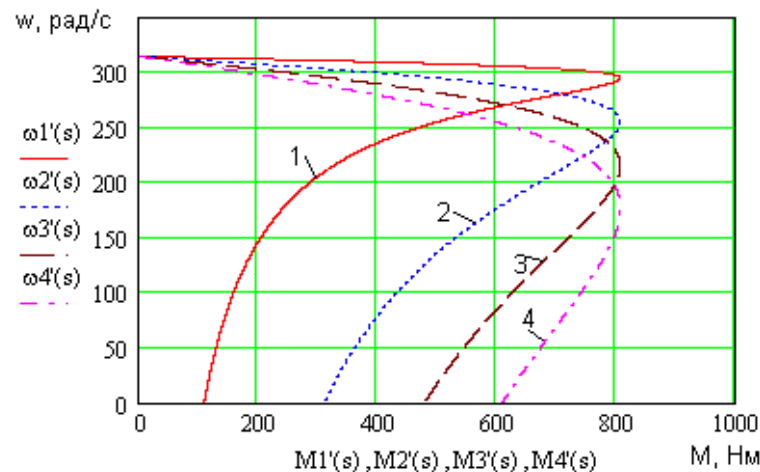


Рис. 1.5. Механічні характеристики АД при реостатному регулюванні ротора [3]

(розроблено автором)

1.6.3 Регулювання зміною напруги статора

Між мережею та статором включається перетворювач напруги. Відповідно до рівняння механічної характеристики зміна фазної напруги U_f впливає на критичний момент M_k , тоді як синхронна швидкість ω_0 та критичне ковзання S_k від напруги не залежать. Зменшення напруги призводить до значного падіння M_k та перевантажувальної здатності двигуна. Це суттєво звужує практичний діапазон регулювання швидкості в розімкненій

системі (рис. 1.7). 1 відповідає U_n – номінальна напруга; 2 відповідає – $0,75 \cdot U_n$; 3 відповідає $0,5 \cdot U_n$; 4- відповідає $0,25 \cdot U_n$.

Метод придатний переважно для регулювання моменту та струму статора в замкнених системах.

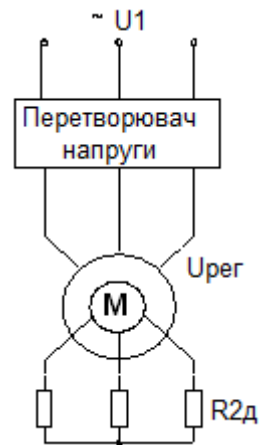


Рис. 1.6. Принципова схема регулювання швидкості АД зміною напруги [4]
(розроблено автором)

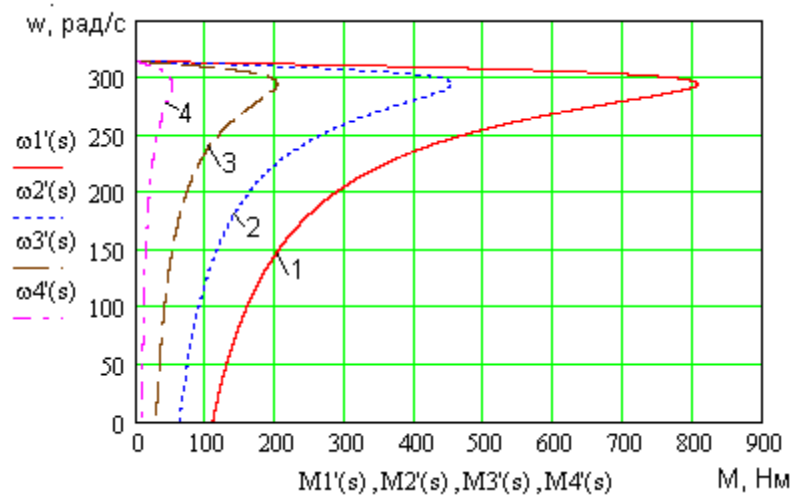


Рис. 1.7. Механічні характеристики АД при різних значеннях напруги статора [4]
(розроблено автором)

1.6.4 Частотне регулювання швидкості

Частотний спосіб регулювання є найбільш перспективним та широко розповсюдженим у промисловій практиці. Зміна частоти живлячої напруги f_1 дозволяє відповідно до виразу $\omega_0 = 2\pi f_1/p$ плавно змінювати синхронну швидкість двигуна в широкому діапазоні при жорстких механічних характеристиках. При цьому ковзання двигуна не зростає, а втрати в роторному колі залишаються мінімальними, що принципово відрізняє метод від реостатного регулювання.

Для збереження перевантажувальної здатності $\lambda = M_k/M_c = \text{const}$ одночасно з частотою необхідно змінювати й напругу статора. На рис. 1.8 наведено механічні характеристики при частотному регулюванні з дотриманням закону регулювання, що визначається характером навантаження. Для постійного моменту навантаження: $U\phi/f_1 = \text{const}$. Для вентиляторного навантаження: $U\phi/f_1^2 = \text{const}$.

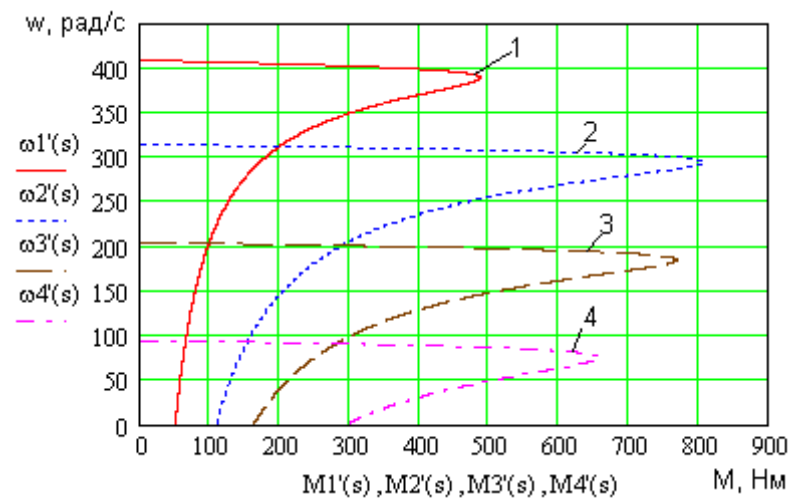


Рис. 1.8. Механічні характеристики АД при частотному регулюванні швидкості [4]

(розроблено автором)

1 – $U=U_N$, $f=1.3f_N$; 2 – $U=U_N$, $f=f_N$; 3 – $U=0.65U_N$, $f=0.65f_N$; 4 – $U=0.3U_N$, $f=0.3f_N$.

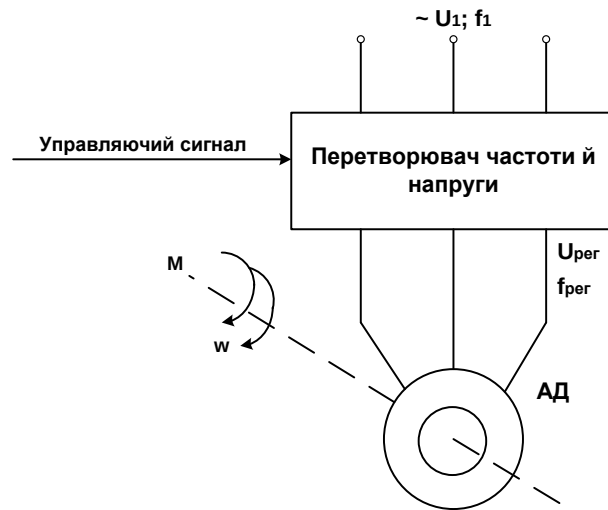


Рис. 1.9. Структурна схема частотно-регульованого електропривода [4]
(розроблено автором)

Перетворювач частоти (ПЧ) є необхідним елементом частотно-регульованого привода. На вхід ПЧ подається стандартна напруга мережі (380 В, 50 Гц), а з виходу знімається напруга $U_{рег}$ регульованої частоти $f_{рег}$. Зміна вихідної частоти та напруги здійснюється керуючим сигналом, що визначає в кінцевому рахунку швидкість двигуна.

1.7 Технічна реалізація перетворювачів частоти

За конструктивним принципом ПЧ поділяються на дві групи: електромашинні (обертові) та статичні. Електромашинні перетворювачі (рис. 1.10) використовують для отримання змінної частоти спеціальні електричні машини. Вони забезпечують широкий діапазон регулювання, проте потребують чотирьох електричних машин на повну потужність навантаження, що робить установку громіздкою та дорогою. Подвійне перетворення енергії з проміжною стадією постійного струму знижує ККД системи. Сфера застосування таких перетворювачів поступово звужується.

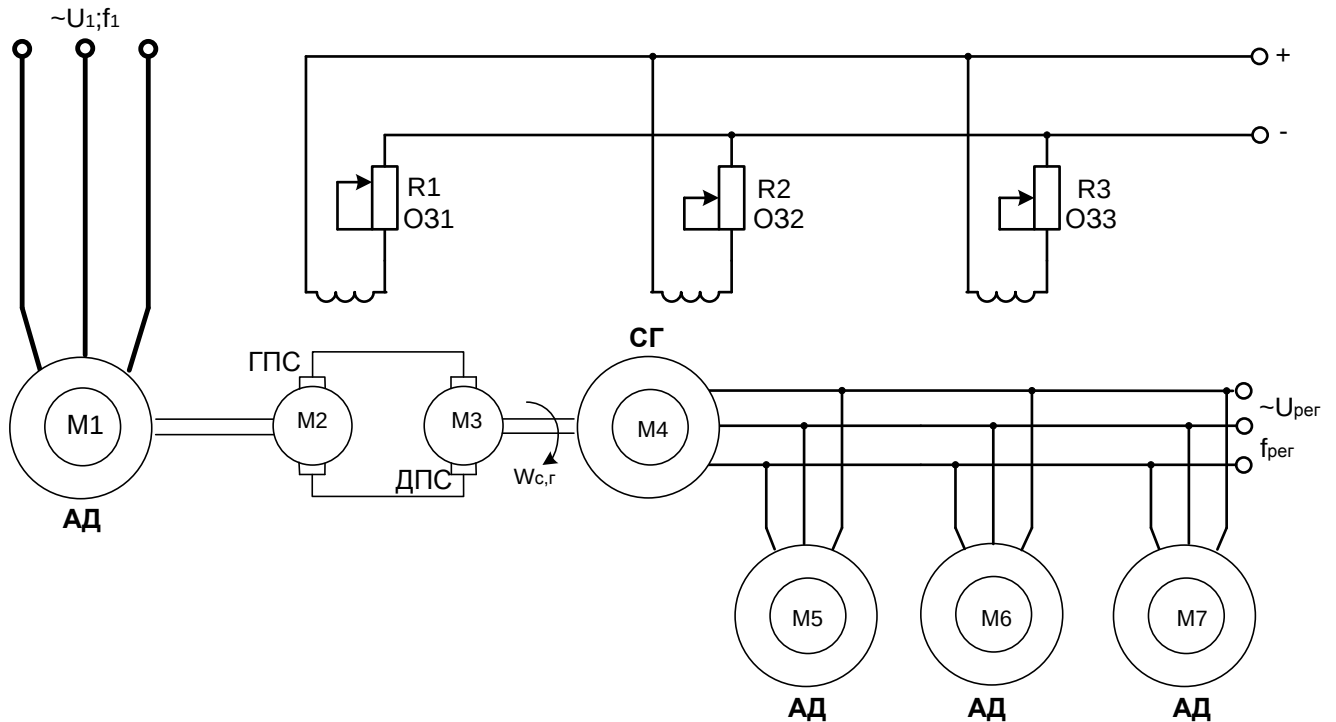


Рис. 1.10. Електромашинний перетворювач частоти із синхронним генератором [4]

(розроблено автором)

Статичні ПЧ набули значного поширення завдяки появі потужних силових напівпровідникових приладів - тиристорів і транзисторів. Вони забезпечують ККД 0,85-0,9 і відрізняються від електромашинних меншим шумом та вищою швидкодією. Статичні ПЧ поділяють на дві підгрупи: ПЧ з безпосереднім зв'язком (без ланки постійного струму) та дволанкові ПЧ з проміжною ланкою постійного струму.

ПЧ з безпосереднім зв'язком (рис. 1.11) перетворює вхідну напругу U_1 частоти f_1 безпосередньо у вихідну U_{per} частоти f_{per} за допомогою силової частини (СЧ) на тиристорах та схеми управління (СУ). Перевага - проста силова схема. Недолік - максимальна вихідна частота не перевищує 40% від частоти мережі, що суттєво обмежує область застосування.

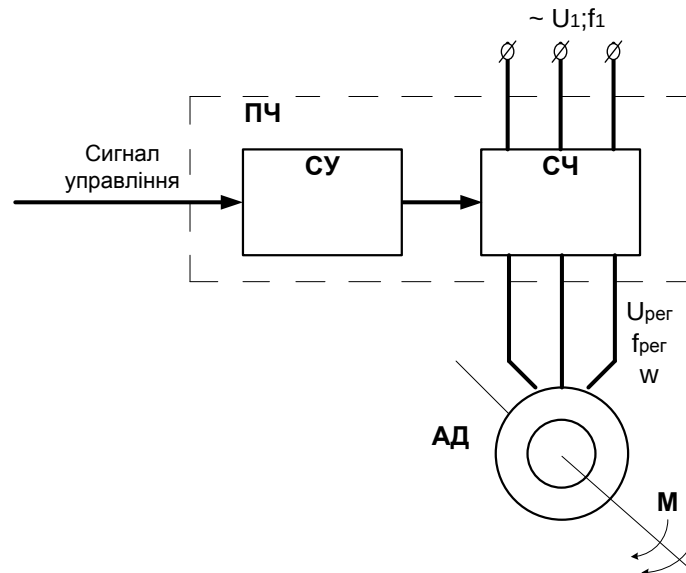


Рис. 1.11. Схема ПЧ без ланки постійного струму [4]
(розроблено автором)

Дволанковий ПЧ (рис. 1.12) містить керований випрямляч (УВ) та автономний інвертор (АІ). Випрямляч перетворює мережеву напругу U_1 у постійну E_0 , яка регулюється в широкому діапазоні. Автономний інвертор перетворює E_0 у трифазну змінну напругу $U_{\text{рег}}$ регульованої частоти $f_{\text{рег}}$. Частота задається схемою управління інвертора СУУІ відповідно до керуючого сигналу. Цей тип ПЧ позбавлений обмеження вихідної частоти, притаманного ПЧ з безпосереднім зв'язком, і тому є основою сучасних частотних перетворювачів промислового класу.

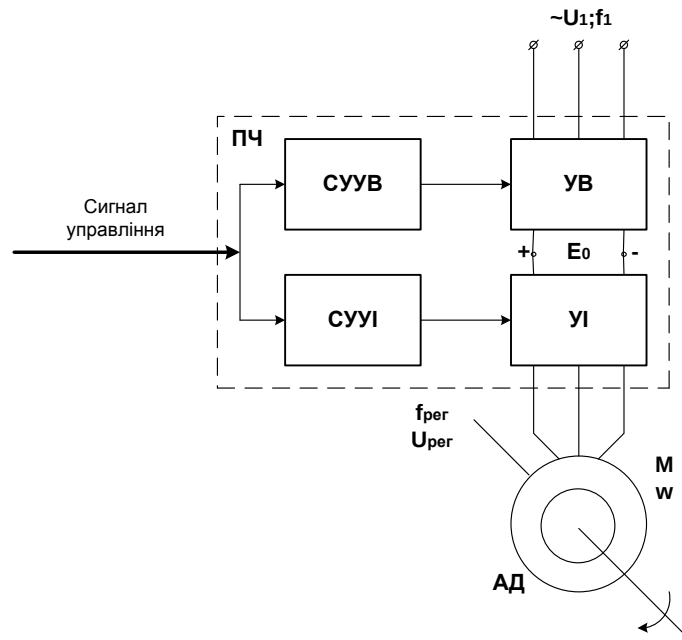


Рис. 1.12. Схема дволанкового ПЧ з проміжною ланкою постійного струму [4]

(розроблено автором)

Автономні інвертори поділяють на інвертори напруги (АІН) та інвертори струму (АІС). АІН живиться від джерела напруги; конденсатор на виході випрямляча забезпечує жорстку зовнішню характеристику. Керуючими впливами на двигун у системі з АІН є частота та напруга. Перевага АІН - незалежність вихідної напруги від частоти та навантаження, що спрощує реалізацію законів частотного регулювання. АІС живиться від джерела струму; на виході випрямляча встановлюється згладжуючий дросель. У системі з АІС керуючими впливами є частота та струм статора.

Порівняльний аналіз двох типів статичних ПЧ свідчить про суттєву перевагу дволанкового перетворювача - відсутність обмеження вихідної частоти, що дозволяє регулювати швидкість в широкому діапазоні як нижче, так і вище номінальної. Тому для даної роботи обрано систему "дволанковий перетворювач частоти - асинхронний двигун" (ПЧ-АД).

Порівняльні показники системи ПЧ-АД з векторним керуванням [4]

Показник	Значення
Точність підтримки швидкості (розімкнений контур)	$\pm 0,5\%$
Точність підтримки швидкості (замкнений контур)	$\pm 0,02\%$
Точність підтримки моменту	$\pm 0,5\%$
Діапазон регулювання (розімкнений контур)	1:100
Діапазон регулювання (замкнений контур)	1:1000
Час реакції системи	$< 0,1 \text{ с}$

Широке впровадження мікропроцесорної техніки та зниження вартості статичних перетворювачів частоти роблять систему ПЧ-АД найбільш доцільним технічним рішенням для регулювання продуктивності компресорної установки.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Вибір двигуна

Компресорну установку ВХ-350-2-1 введено в експлуатацію понад 20 років тому; за весь час роботи у номінальному режимі струм навантаження не перевищував 200 А і випадків перевантаження не зафіксовано. З урахуванням цього залишено існуючий асинхронний двигун 4АН280S2У3 з незалежною вентиляцією для покращення тепловідводу при роботі на знижених обертах. Основні паспортні дані двигуна наведено нижче.

Таблиця 2.1

Технічна характеристика електродвигуна 4АН280S2У3 [1]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Номінальна потужність P_n	кВт	160
2	Синхронна частота обертання n_0	об/хв	3000
3	Номінальне ковзання S_n	%	1,4
4	Номінальний ККД η_n	%	92
5	Номінальний $\cos \varphi_n$	-	0,91
6	Кратність пускового струму I_p/I_n	-	7,0
7	Кратність пускового моменту M_p/M_n	-	1,4
8	Кратність максимального моменту $M_{\max}/M_n$	-	2,7
9	Момент інерції ротора J	кг·м ²	0,43

Номінальна швидкість вала двигуна розраховується за формулою:

$$n_n = (1 - s_n) \cdot n_1 = (1 - 0.014) \cdot 3000 = 2958 \text{ об/хв} \quad (2.1)$$

Номінальна кутова швидкість вала двигуна:

$$\omega_n = \frac{n_n \cdot \pi}{30} = \frac{2958 \cdot 3,14}{30} = 309.76 \text{ рад/с} \quad (2.2)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\omega_n} = \frac{160 \cdot 10^3}{309.76} = 516.53 \text{ Нм} \quad (2.3)$$

2.2 Вибір перетворювача частоти

Для керування двигуном обрано перетворювач частоти SINAMICS G120 (Siemens AG, Німеччина) серії CU240E-2. Перетворювач забезпечує векторне керування без датчика швидкості та з ним, широкий набір вбудованих захистів, а також підтримує протоколи PROFIBUS та PROFINET для інтеграції в систему автоматизації вищого рівня (рис. 2.1).

Технічні характеристики перетворювача частоти Siemens SINAMICS G120
[6]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник (країна)	-	Siemens AG (Німеччина)
2	Номінальна напруга живлення	В	3 × 380-480
3	Потужність підключаемого двигуна	кВт	до 200
4	Вихідна частота	Гц	0-650
5	Точність підтримки швидкості (розімкн. контур)	%	±0,5
6	Точність підтримки швидкості (замкн. контур)	%	±0,02
7	Точність підтримки моменту	%	±0,5
8	Захист від перенапруги/недонапруги	-	наявний
9	Захист від перегріву ПЧ та двигуна	-	наявний
10	Протоколи зв'язку	-	PROFIBUS, PROFINET
11	Вхідний струм	А	296
12	Максимальний вихідний струм	А	302

Для реалізації технічних вимог замовляється наступне обладнання:
 перетворювач SINAMICS G120 (артикул 6SL3224-0BE34-5UA0); мережевий

дросель; роз'єм PROFIBUS (артикул 6GK1500-0FC00); комплект запобіжників; панель оператора BOP-2 (входить у поставку); монтажний комплект.

2.3 Частотне керування асинхронним двигуном

2.3.1 Схема заміщення асинхронного двигуна

Для дослідження асинхронного двигуна застосовується класична Т-подібна схема заміщення (рис. 2.2) з урахуванням впливу зміни частоти.

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \frac{x_1}{x_0} = \frac{0.11}{4.5} = 0.024, \quad \tau_2 = \frac{x_2'}{x_0} = \frac{0.13}{4.5} = 0.029, \quad b = r_1 \cdot (1 + \tau_2) = 0.0022 \cdot (1 + 0.029) = 0.0023 \\ \tau &= \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2 = 0.024 + 0.029 + 0.024 \cdot 0.029 = 0.054, \quad c = x_0 \cdot \tau = 4.5 \cdot 0.054 = 0.243 \\ d &= \frac{r_1}{x_0} = \frac{0.0022}{4.5} = 0.0005, \quad e = 1 + \tau_1 = 1 + 0.024 = 1.024\end{aligned}\quad (2.4)$$

Для спрощення запису формул вводяться відносні параметри: відносна частота статора $\alpha = \frac{f_1}{f_n}$, відносна напруга статора $\gamma = \frac{U_1}{U_n}$, абсолютне ковзання $\beta = \frac{\Delta\omega}{\omega 1n}$ параметр β використовується замість ковзання й пов'язаний з ним співвідношенням $s = \frac{\beta}{\alpha}$.



Рис. 2.1. Зовнішній вигляд перетворювача частоти Siemens SINAMICS G120 [6]

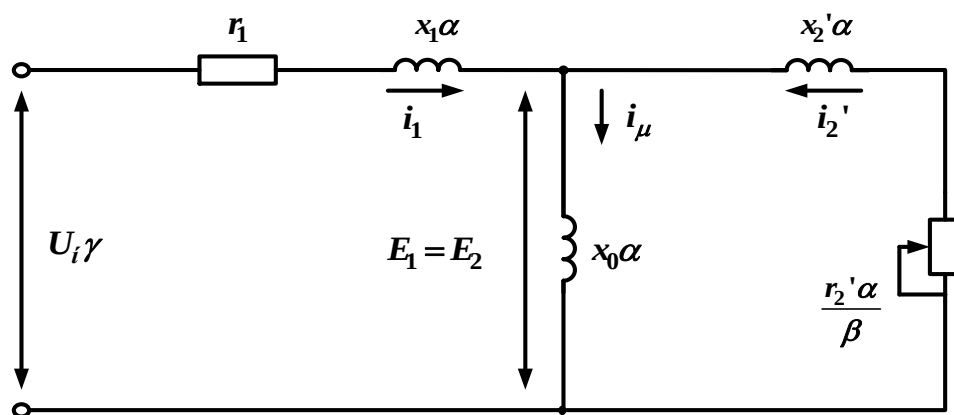


Рис. 2.2. Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна з к.з. ротором [4]

(розроблено автором)

Максимальний момент двигуна відповідно до схеми заміщення:

$$M_{\max} = \frac{3 \cdot \gamma^2 \cdot U_n^2}{\omega_{n1} \cdot 2\pi \cdot \sqrt{(b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) \cdot (d^2 + e^2 \cdot \alpha^2) + r_1 \cdot \alpha}} \quad (2.5)$$

Момент двигуна при відносній частоті γ та абсолютному ковзанні β :

$$M = \frac{3 \cdot \gamma^2 \cdot U_n^2}{\omega_{n1} \cdot \pi \cdot \left((b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{\beta}{r_2'} + (d^2 + e^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{r_2'}{\beta} + 2 \cdot r_1 \cdot \alpha \right)} \quad (2.6)$$

Кутова швидкість вала двигуна:

$$\omega = \omega_{n1} \cdot \alpha - \omega_{n1} \cdot \beta \quad (2.7)$$

2.3.2 Побудова механічних характеристик

Задаючись різними значеннями відносної частоти γ та ковзання s за виразами (2.5)-(2.7), будуються механічні характеристики двигуна (рис. 2.3). При побудові характеристик напруга статора змінюється за законом збереження постійного критичного моменту з урахуванням компенсації спадання напруги на активному опорі статора R_1 :

$$\gamma = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \left(r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \cdot a \right)}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}} \quad (2.8)$$

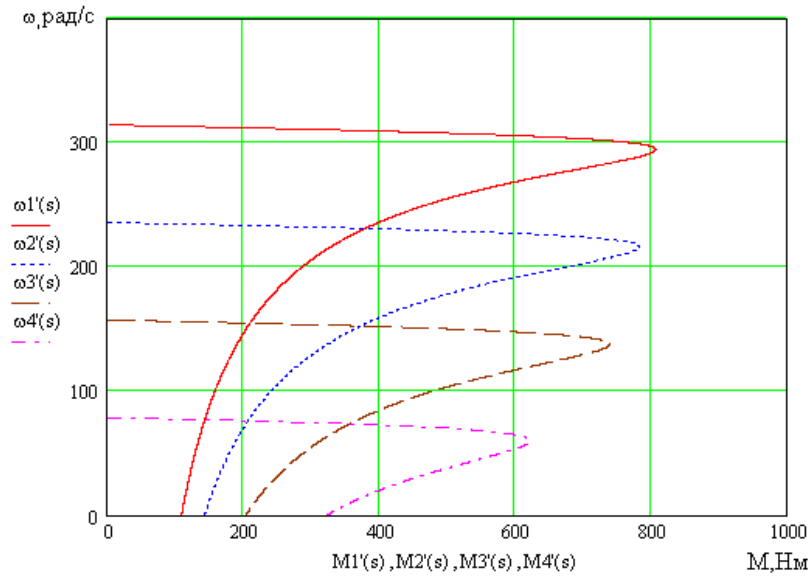


Рис. 2.3. Механічні характеристики двигуна при частотному регулюванні
(розроблено автором)

Розрахунок енергетичних параметрів привода для номінального режиму виконується за такими формулами (струм статора (2.9), наведений струм ротора (2.10), струм намагнічування (2.11), коефіцієнт потужності (2.12), втрати в міді (2.15), механічні втрати (2.17), втрати в сталі (2.18)).

Струм статора:

$$I_1 = \frac{U_n \cdot \gamma \cdot \sqrt{b^2 \cdot \frac{\beta}{r_2'} + d^2 \cdot \frac{r_2'}{\beta}}}{r_1 \cdot \sqrt{(b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{\beta}{r_2'} + (d^2 + e^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{r_2'}{\beta}} + 2 \cdot r_1 \cdot \alpha} \quad (2.9)$$

Наведений струм ротора:

$$I_2' = \frac{U_n \cdot \gamma \cdot \sqrt{\frac{\beta}{r_2'}}}{\sqrt{(b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{\beta}{r_2'} + (d^2 + e^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{r_2'}{\beta}} + 2 \cdot r_1 \cdot \alpha} \quad (2.10)$$

Струм намагнічування:

$$I_0 = \frac{U_n \cdot \gamma \cdot \sqrt{x_2'^2 \cdot \frac{\beta}{r_2'} + \frac{r_2'}{\beta}}}{x_0 \cdot \sqrt{(b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{\beta}{r_2'} + (d^2 + e^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{r_2'}{\beta}} + 2 \cdot r_1 \cdot \alpha} \quad (2.11)$$

Коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi = \frac{b^2 \cdot \frac{\beta}{r_2'} + d^2 \cdot \frac{r_2'}{\beta} + r_1 \cdot \alpha}{\left((b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{\beta}{r_2'} + (d^2 + e^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{r_2'}{\beta} + 2 \cdot r_1 \cdot \alpha \right) \cdot \left(b^2 \cdot \frac{\beta}{r_2'} + d^2 \cdot \frac{r_2'}{\beta} \right)} \quad (2.12)$$

Розрахунок енергетичних параметрів асинхронного електропривода для номінального режиму.

У номінальному режимі $\alpha = 1, \gamma = 1, \beta = s_n, \beta_k = s_k$.

Номінальна фазна напруга:

$$U_n = \frac{U_{nl}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220V \quad (2.13)$$

Для Т-образної схеми заміщення.

Струм статора номінальний відповідно до формули (2.9):

$$I_n = \frac{220 \cdot \sqrt{0.0023^2 \cdot \frac{0.014}{0.015} + 0.005^2 \cdot \frac{0.015}{0.014}}}{0.0022 \cdot \sqrt{(0.0023^2 + 0.243^2) \cdot \frac{0.014}{0.015} + (0.0005^2 + 1.024^2) \cdot \frac{0.015}{0.014} + 2 \cdot 0.0022}} = 202.87A$$

Максимальний момент відповідно до формули (2.5):

$$M_{\max} = \frac{3 \cdot 220^2}{314.159 \cdot 2 \cdot \sqrt{(0.0023^2 + 0.243^2) \cdot (0.023^2 + 1.024^2) + 0.0022}} = 754.22Hm$$

$$m_{\max} = \frac{M_{\max}}{M_{en}} = \frac{754.22}{516.53} \approx 1.5 \quad (2.14)$$

Струм намагнічування відповідно до формули (2.11):

$$I_0 = \frac{220 \cdot \sqrt{0.13^2 \cdot \frac{0.014}{0.015} + \frac{0.015}{0.014}}}{4.5 \cdot \sqrt{(0.0023^2 + 0.243^2) \cdot \frac{0.014}{0.015} + (0.0005^2 + 1.024^2) \cdot \frac{0.015}{0.014} + 2 \cdot 0.0022}} = 46.07A$$

Наведений струм ротора відповідно до формули (2.10):

$$I_{2n}' = \frac{220 \cdot \sqrt{\frac{0.014}{0.015}}}{\sqrt{(0.0023^2 + 0.243^2) \cdot \frac{0.014}{0.015} + (0.0005^2 + 1.024^2) \cdot \frac{0.015}{0.014} + 2 \cdot 0.0022}} = 192.1A$$

Визначаю складові втрат номінального режиму.

Втрати в міді:

$$\begin{aligned}\Delta P_{e1} &= 3 \cdot I_n^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 202.87^2 \cdot 0.0022 = 371.631 \text{ Вт}, \\ \Delta P_{e2} &= 3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' = 3 \cdot 192.1^2 \cdot 0.015 = 1660.608 \text{ Вт} \\ \Delta P_{en} &= \Delta P_{e1} + \Delta P_{e2} = 536.962 + 2732 = 2032.239 \text{ Вт}\end{aligned}\quad (2.15)$$

Повні номінальні втрати:

$$\Delta P_n = \frac{P_n \cdot (1 - \eta_n)}{\eta_n} = \frac{160000 \cdot (1 - 0.94)}{0.94} = 10212.765 \text{ Вт} \quad (2.16)$$

Механічні втрати:

$$\Delta P_{mn} = (0.09 \div 0.06) \cdot \Delta P_n = 0.09 \cdot 10212.765 = 919.148 \text{ Вт} \quad (2.17)$$

Втрати в сталі:

$$\Delta P_{stin} = \Delta P_n - \Delta P_{mn} - \Delta P_{en} = 10212.765 - 919.148 - 2032.239 = 4847 \text{ Вт} \quad (2.18)$$

2.4 Розрахунок спожитої електроенергії системою ПЧ-АД за рік

Річне споживання електроенергії системою ПЧ-АД розраховується за формулою:

$$W = T_{роб} \cdot P_{випр} = 3600 \cdot 261.866 = 922717.6 \text{ кВт} \quad (2.19)$$

де W - електроенергія, спожита системою за рік, кВт·год; $T_{рік}$ - річний фонд роботи установки, год; P_n - номінальна потужність двигуна, кВт; η_n , η_k - ККД двигуна та компресора відповідно.

Застосування регульованого електропривода дозволяє знизити споживання електроенергії до 50% залежно від режиму роботи насосних і компресорних установок [4]. Розрахунок річної економії електроенергії:

$$W_{екон} = W \cdot k_{екон} = 922717.6 \cdot 0.25 = 230679.4 \text{ кВт} \quad (2.20)$$

де η - коефіцієнт економії електроенергії. З графіка (рис. 1.3) видно, що різниця ККД при регулюванні засувкою та зміною швидкості при зниженні продуктивності на 50% становить 30%, що підтверджує економічну доцільність застосування ПЧ.

2.5 Математичний опис двигуна та системи керування

Системи електропривода на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором набули широкого розповсюдження завдяки простоті конструкції та надійності. Відсутність ковзних контактів і мінімальна кількість вузлів, що потребують обслуговування (підшипники), є беззаперечними перевагами.

Використання принципу векторного керування дозволяє роздільно управляти потокозчепленням ротора та моментоутворювальною складовою вектора струму статора, що по суті аналогічно управлінню двигуном постійного струму незалежного збудження. Дослідження системи ПЧ-АД проводиться за допомогою математичної моделі з метою отримання енергетичних і динамічних характеристик при різних режимах роботи [5].

При складанні математичної моделі прийнято такі допущення: магнітне коло не насичується, втрати в сталі відсутні, розподіл поля в повітряному зазорі є синусоїдальним, машина симетрична, ємність між обмотками не враховується, явища витиснення струму відсутні.

Математичний опис АД у системі координат, що обертається синхронно з вектором потокозчеплення ротора (d, q), є основою для розробки алгоритму векторного керування. Рівняння для цієї системи координат:

Рівняння напруг статора та ротора у системі координат (d, q):

$$\begin{aligned}
 X_{dq} &= e^{-j\gamma k} \cdot X_{\alpha\beta} \\
 X_{\alpha\beta} &= e^{j\gamma k} \cdot X_{dq} \\
 e^{-j\gamma k} &= \begin{bmatrix} \cos \gamma k & \sin \gamma k \\ -\sin \gamma k & \cos \gamma k \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

де X – будь-який двомірний вектор змінних електричного двигуна.

Перетворення між системами координат реалізується перетворювачем фаз 3/2 (для перетворення $i_a, i_b, i_c \rightarrow i_\alpha, i_\beta$) та функціональним перетворювачем $\alpha, \beta \rightarrow d, q$, що забезпечує орієнтацію осі d по вектору потокозчеплення ротора (рис. 2.4).

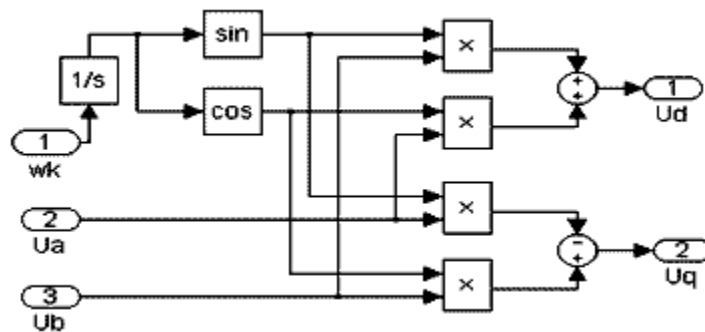


Рис. 2.4. Структурна схема функціонального перетворювача $\alpha, \beta \rightarrow d, q$
(розроблено автором)

Перетворення струмів i_α, i_β у фазні струми i_a, i_b, i_c відповідно до виражень.

$$i_A = i_\alpha, \quad i_B = -\frac{1}{2} \cdot i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_\beta, \quad i_C = -\frac{1}{2} \cdot i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_\beta \tag{2.22}$$

Перетворення фазних струмів i_a, i_b, i_c у проекції i_α, i_β у відповідності й з вираженнями:

$$i_\alpha = i_A, \quad i_\beta = \frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}} \tag{2.23}$$

Для створення глибоко регульованого високо-динамічного електропривода (ЕП) найбільш доцільним методом керування є векторне керування з орієнтацією по векторі потокозчеплення ротора [13].

Функціональна схема такого ЕП у цьому випадку має найменше число перехресних зв'язків, а вираження моменту асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором (АД) і швидкості порівняно прості. При цьому найбільше просто здійснюється регулювання швидкості при стабілізації потокозчеплення ротора.

Вимір потокозчеплення не завжди можливо або бажано, тому що вимагає установки в АД відповідних датчиків й, крім того при зниженні частоти обертання відношення корисного сигналу до шуму на виході датчиків знижується настільки, що їхнє використання стає неможливим.

Потокозчеплення можна визначити не прибігаючи до виміру магнітного потоку. Досить виміряти струми статора й кутову частоту обертання ротора. Обчислення модуля вектора потокозчеплення ротора і його поточного значення його аргументу виробляється в блоці вектора-аналізатора. Вхідними величинами є струми статора в нерухомій системі координат i_α і i_β і кутова частота обертання ротора ω . Вихідними - модуль вектора потокозчеплення ротора $|\psi_2| = \psi_{2d}$ й, якщо потрібно, поточного значення його аргументу. Для обертової системи їхній зв'язок з потокозчепленням ротора визначається вираженнями (2.24), а відповідна їй структурна схема наведена на рисунку 2.5.

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{2\alpha} = \frac{i_{1\alpha} \cdot L_m - \psi_{2\beta} \cdot \omega \cdot T_2}{1 + pT_2} \\ \psi_{2\beta} = \frac{i_{1\beta} \cdot L_m + \psi_{2\alpha} \cdot \omega \cdot T_2}{1 + pT_2} \\ |\psi_2| = \psi_{2d}^{(dq)} = \sqrt{\psi_{2\alpha}^2 + \psi_{2\beta}^2} \\ \cos \vartheta_1 = \frac{\psi_{2\alpha}}{|\psi_2|}; \sin \vartheta_1 = \frac{\psi_{2\beta}}{|\psi_2|} \end{array} \right. \quad (2.24)$$

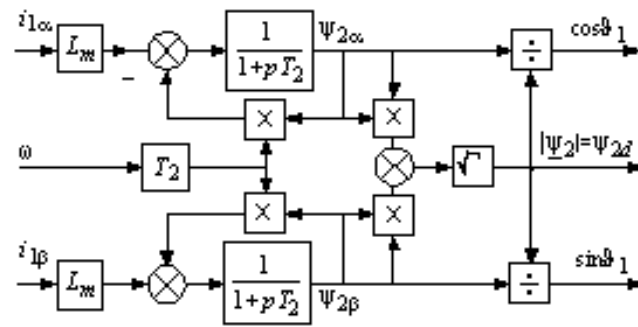


Рис.2.5. Структурна схема обчислення потокозчеплення ротора по струмах статора й кутовій частоті обертання ротора
(розроблено автором)

Функціональна схема привода з регулятором моменту в якій реалізовані дані перетворення представлена на рис.2.6.

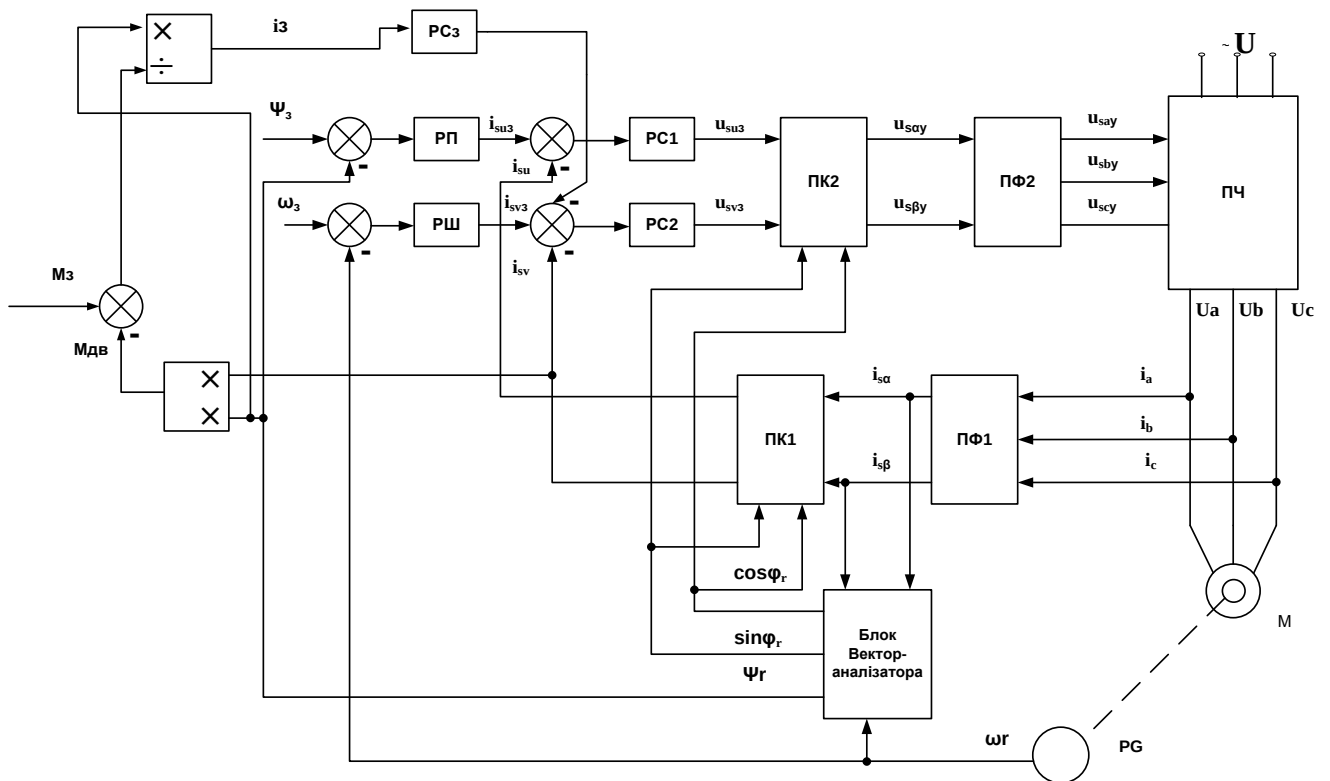


Рис. 2.6. Функціональна схема системи привода
(розроблено автором)

2.5.1 Модель АД в системі координат, орієнтована по вектору потокозчеплення ротора (d, q)

Для того щоб напрямок дійсної осі ортогональної системи координат у будь-який час збігалось з напрямком узагальненого вектора потокозчеплення ротора, система координат повинна обертатися синхронно із цим вектором. Вектор потокозчеплення ротора в ній буде мати тільки дійсну складову. Позначимо дійсну вісь цієї системи координат d , а мниму - q . Тоді математичний опис АД в цих координатах буде мати вигляд

$$\omega_k = \omega_{\psi_2}, \psi_{2q} = 0, \psi_{2d} = |\tilde{\psi}_2| = \psi_2 = \psi_{2m} \quad (2.25)$$

Модель у системі координат (d, q) стала основною для розробки системи векторного керування короткозамкненим АД [13]. Тому на додаток до передумов (2.25) додамо:

$$U_{2d} = U_{2q} = 0 \quad (2.26)$$

При живленні обмоток статора АД від джерела напруги система векторного керування має зворотні зв'язки по складовим струму статора й по потокозчепленням ротора. Тому ще однією умовою для розробки цієї моделі буде наявність у ній перелічених сигналів.

Запишемо рівняння в узагальнених векторах з урахуванням рівнянь (2.25) і (2.26):

$$\begin{cases} \tilde{U}_1 = \tilde{i}_1 \cdot r_1 + \frac{d\tilde{\psi}_1}{dt} + j\omega_k \cdot \tilde{\psi}_1, \\ 0 = \tilde{i}_2 \cdot R_2 + \frac{d\tilde{\psi}_2}{dt} + j \cdot (\omega_k - z_p \cdot \omega) \cdot \tilde{\psi}_2; \end{cases} \quad (2.27)$$

Для того щоб забезпечити обговорений раніше склад сигналів моделі, знайдемо узагальнений вектор струму ротора:

$$\tilde{i}_2 = \frac{1}{L_2} \cdot \tilde{\psi}_2 - \frac{L_m}{L_2} \cdot \tilde{i}_1 = \frac{1}{L_2} \cdot \tilde{\psi}_2 - k_2 \cdot \tilde{i}_1 \quad (2.28)$$

$$\tilde{\psi}_1 = L_1 \cdot \tilde{i}_1 + \frac{L_m}{L_2} \cdot \tilde{\psi}_2 - \frac{L_m^2}{L_2} \cdot \tilde{i}_1 = L_1' \cdot \tilde{i}_1 + k_2 \cdot \tilde{\psi}_2 \quad (2.29)$$

Після підстановки рівнянь (2.28), (2.29) у систему (2.27) одержимо:

$$\begin{cases} \tilde{U}_1 = \tilde{i}_1 \cdot r_1 + L_1' \cdot \frac{d\tilde{i}_1}{dt} + k_2 \cdot \frac{d\tilde{\psi}_2}{dt} + j\omega_k \cdot (L_1' \cdot \tilde{i}_1 + k_2 \cdot \tilde{\psi}_2), \\ 0 = \frac{1}{T_2} \cdot \tilde{\psi}_2 - \frac{L_m}{T_2} \cdot \tilde{i}_1 + \frac{d\tilde{\psi}_2}{dt} + j \cdot (\omega_k - z_p \cdot \omega) \cdot \tilde{\psi}_2. \end{cases} \quad (2.30)$$

В останньому рівнянні позначено:

$$T_2 = \frac{L_2}{r_2} \quad (2.31)$$

Для того щоб перше рівняння останньої системи втримувало похідну тільки від одного сигналу, виразимо похідну від потокозчеплення ротора із другого рівняння цієї ж системи й підставимо отримане вираження в перше:

$$\frac{d\tilde{\psi}_2}{dt} = \frac{L_m}{T_2} \cdot \tilde{i}_1 - \frac{1}{T_2} \cdot \tilde{\psi}_2 - j \cdot (\omega_k - z_p \cdot \omega) \cdot \tilde{\psi}_2 = k_2 \cdot r_2 \tilde{i}_1 - \frac{1}{T_2} \cdot \tilde{\psi}_2 - j \cdot (\omega_k - z_p \cdot \omega) \cdot \tilde{\psi}_2 \quad (2.32)$$

$$\tilde{U}_1 = (r_1 + k^2 \cdot r_2) \cdot \tilde{i}_1 + L_1' \cdot \frac{d\tilde{i}_1}{dt} - \frac{k_2}{T_2} \cdot \tilde{\psi}_2 + j \cdot \omega_k \cdot L_1' \cdot \tilde{i}_1 - j z_p \cdot \omega \cdot k_2 \cdot \tilde{\psi}_2 \quad (2.33)$$

Перетворимо (2.32) і (2.33) з урахуванням (2.25) у систему

$$\begin{cases} U_{1d} = (r_1 + k^2 \cdot r_2) \cdot i_{1d} + L_1' \cdot \frac{di_{1d}}{dt} - \frac{k_2}{T_2} \cdot \psi_2 - \omega_{\psi 2} \cdot L_1' \cdot i_{1q}, \\ U_{1q} = (r_1 + k^2 \cdot r_2) \cdot i_{1q} + L_1' \cdot \frac{di_{1q}}{dt} + \omega_{\psi 2} \cdot L_1' \cdot i_{1d} - z_p \cdot \omega \cdot k_2 \cdot \psi_2, \\ \frac{d\psi_2}{dt} = \frac{L_m}{T_2} \cdot i_{1d} - \frac{1}{T_2} \cdot \psi_2, \\ 0 = k_2 \cdot r_2 \cdot i_{1q} - (\omega_{\psi 2} - z_p \cdot \omega) \cdot \psi_2. \end{cases} \quad (2.34)$$

Позначимо:

$$r_1' = r_1 + k^2 \cdot r_2, T_1' = L_1' / r_1', \quad (2.35)$$

(розроблено автором)

2.6 Розрахунок параметрів моделі

Індуктивність статора:

$$L1 = \frac{x_0}{\omega_c} + \frac{x_1}{\omega_c} = \frac{4.5}{314} + \frac{0.11}{314} = 0.0147 \text{ Гн} \quad (2.38)$$

Індуктивність ротора:

$$L2 = \frac{x_0}{\omega_c} + \frac{x_2'}{\omega_c} = \frac{4.5}{314} + \frac{0.13}{314} = 0.0147 \text{ Гн} \quad (2.39)$$

Коефіцієнт зв'язку статора й ротора:

$$K2 = \frac{Lm}{L2} = \frac{0.0143}{0.0147} = 0.9957 \quad (2.40)$$

Індуктивність розсіювання двигуна:

$$L1' = Ls + Lr \cdot K2^2 = 0.0004 + 0.0004 \cdot 0.9957^2 = 0.0008 \text{ Гн} \quad (2.41)$$

Наведений опір двигуна:

$$R1' = r1 + r2 \cdot K2^2 = 0.0022 + 0.015 \cdot 0.9957^2 = 0.0369 \text{ Ом} \quad (2.42)$$

Електромагнітна постійна часу:

$$T2 = \frac{L2}{R2} = \frac{0.0147}{0.015} = 0.9825 \text{ с} \quad (2.43)$$

Постійна часу статора:

$$T1' = \frac{L1'}{R1'} = \frac{0.0008}{0.0369} = 0.0206 \text{ с} \quad (2.44)$$

Коефіцієнт підсилення зворотного зв'язку по струму:

$$Km = \frac{U_{з. \max}}{I_n \cdot 2} = \frac{10}{202.87 \cdot 2} = 0.0246 \quad (2.45)$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку по швидкості:

$$K\omega = \frac{U_{з. \max}}{\omega_{0. \max}} = \frac{10}{309.761} = 0.0318 \quad (2.46)$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку по потокозчепленню:

$$\psi_m = \frac{M_n}{1.5 \cdot I_n \cdot pn \cdot K2} = \frac{516.5272}{2 \cdot 202.87 \cdot 1 \cdot 0.9957} = 1.2786 \quad (2.47)$$

$$K\psi = \frac{U_{з. \max}}{\psi_m} = \frac{10}{1.2786} = 7.8212 \quad (2.48)$$

Коефіцієнт підсилення перетворювача частоти:

$$Kn = \frac{U_{n. \max}}{U_{з. \max}} = \frac{380}{10} = 38 \quad (2.49)$$

Коефіцієнт передачі кола завдання моменту:

$$K_M = \frac{U_{з. \max}}{M_{с. \max} \cdot K\psi \cdot K_m} = \frac{10}{516.5272 \cdot 7.8212 \cdot 0.0246} = 0.1004 \quad (2.50)$$

Некомпенсуюча постійна часу дорівнює $T\mu = 0.0025c$

Перетворювач частоти реалізований як інерційна ланка з коефіцієнтом підсилення K_n і постійної часу T_μ . Передатна функція перетворювача має вигляд:

$$W_{n(p)} = \frac{Kn}{T\mu p + 1} = \frac{38}{0.0025p + 1} \quad (2.51)$$

Настроювання системи проводиться послідовно від внутрішнього контуру до зовнішнього.

Передатна функція розімкнутого контуру струму з урахуванням перетворювача має вигляд згідно (2.52) ; тоді передатна функція регулятора струму для замкнутого по негативному зворотному зв'язку контуру з настроюванням по модульному оптимумі повинна мати вигляд (2.53)

$$W_{pm(p)} = \frac{1}{Rl'(1 + pTl')} \cdot \frac{Kn}{T\mu p + 1} \quad (2.52)$$

$$W_{pm(p)} = \frac{Rl'(Tl' p + 1)}{2T\mu Kn Kmp} = \frac{0.0369(0.0206p + 1)}{2 \cdot 0.0025 \cdot 38 \cdot 0.0246 \cdot p} = \frac{0.0008p + 0.0369}{0.0047p} \quad (2.53)$$

Передатна функція розімкнутого контуру потокозчеплення з урахуванням перетворювача й регулятора струму має вигляд (2.54), тоді передатна функція регулятора струму для замкнутого по негативному зворотному зв'язку контуру з настроюванням по модульному оптимуму повинна мати вигляд (2.55).

$$W_{pn.p(p)} = \frac{R1'(T1' p + 1)}{2T\mu Kn Kmp} \cdot \frac{Kn}{T\mu p + 1} \cdot Lm \cdot \frac{1}{T2 p + 1} \quad (2.54)$$

$$W_{pn(p)} = \frac{Km(T2 p + 1)}{4T\mu K\psi Lmp} = \frac{0.0246(0.9825 p + 1)}{4 \cdot 0.0025 \cdot 7.8212 \cdot 0.0143 p} = \frac{0.0242 p + 0.0246}{0.0011 p} \quad (2.55)$$

Передатна функція розімкнутого контуру швидкості з урахуванням перетворювача й регулятора струму має вигляд (2.56), тоді передатна функція регулятора струму для замкнутого по негативному зворотному зв'язку контуру з настроюванням по модульному оптимуму повинна мати вигляд (2.57).

$$W_{pc.p(p)} = \frac{R1'(T1' p + 1)}{2T\mu Kn Kmp} \cdot \frac{Kn}{T\mu p + 1} \cdot 3PnK2 \cdot \frac{1}{Jp} \quad (2.56)$$

$$W_{pc(p)} = \frac{Km \cdot Jp}{4T\mu 3PnK2K\omega p} = \frac{0.0246 \cdot 4.6 p}{4 \cdot 0.0025 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 0.9957 \cdot 0.0318 p} = 119.2391 \quad (2.57)$$

Передатна функція регулятора струму завдання з урахуванням коефіцієнтів передачі зворотних зв'язків по струму й потокозчеплення й кола завдання моменту має вигляд (2.58).

$$W_{pc.z(p)} = \frac{R1'(T1' p + 1)}{2T\mu Kn Km^2 K_M K\psi p} = \frac{0.0369(0.0206 p + 1)}{2 \cdot 0.0025 \cdot 38 \cdot 0.0246^2 \cdot 7.8212 \cdot p} = \frac{0.0008 p + 0.0369}{0.0001 p} \quad (2.58)$$

Структурна схема моделі системи керування показана на рис.2.8.

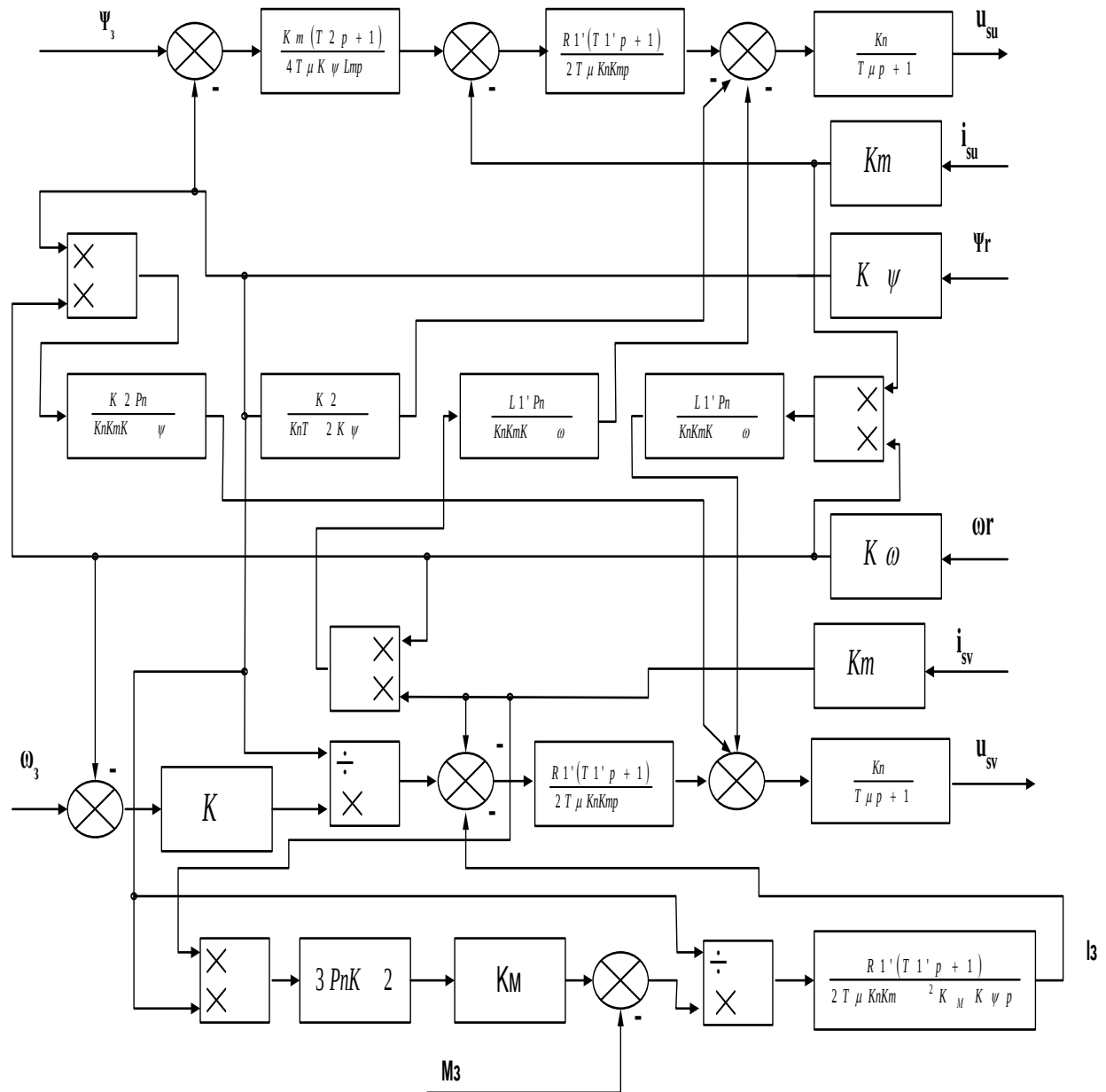


Рис. 2.8. Структурна схема моделювання системи керування
(розроблено автором)

2.7 Моделювання системи привода

На основі структурних схем (рис. 2.7-2.8) побудовано математичну модель системи привода: модель системи привода (рис. 2.9), модель системи керування (рис. 2.10), модель двигуна (рис. 2.11), модель обчислення енергетичних параметрів (рис. 2.12), модель обчислення струму завдання моменту (рис. 2.13), модель завдання моменту навантаження (рис. 2.14), задатчик інтенсивності (рис. 2.15).

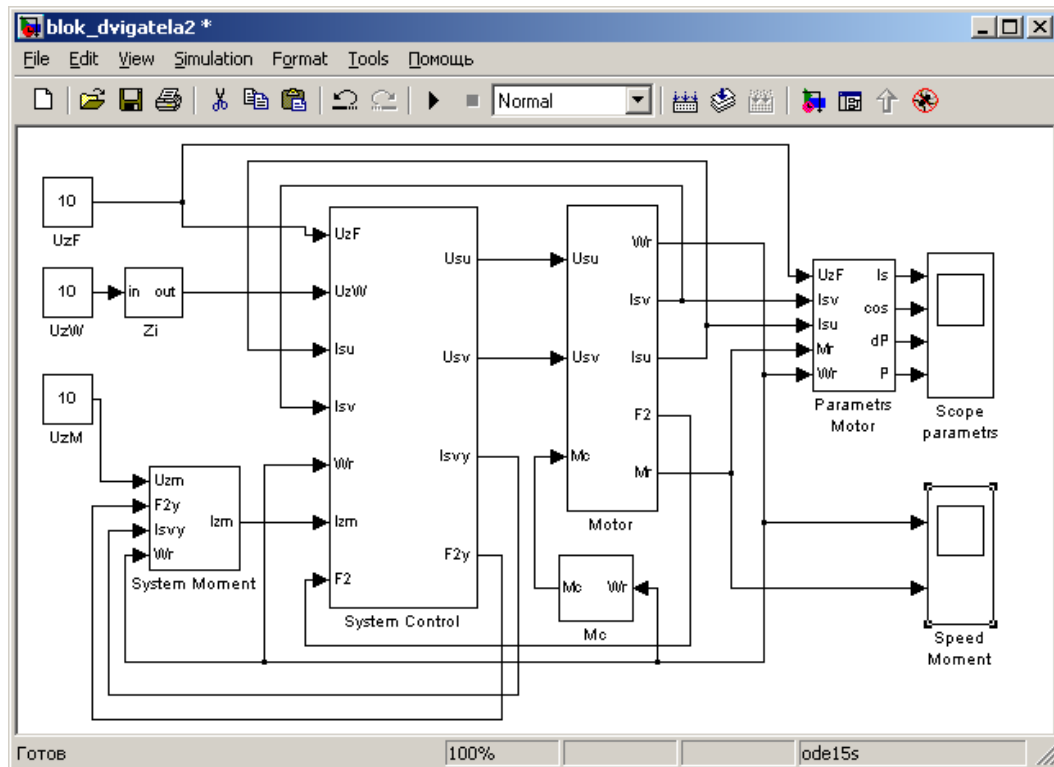


Рис. 2.9. Структурна схема системи привода
(розроблено автором)

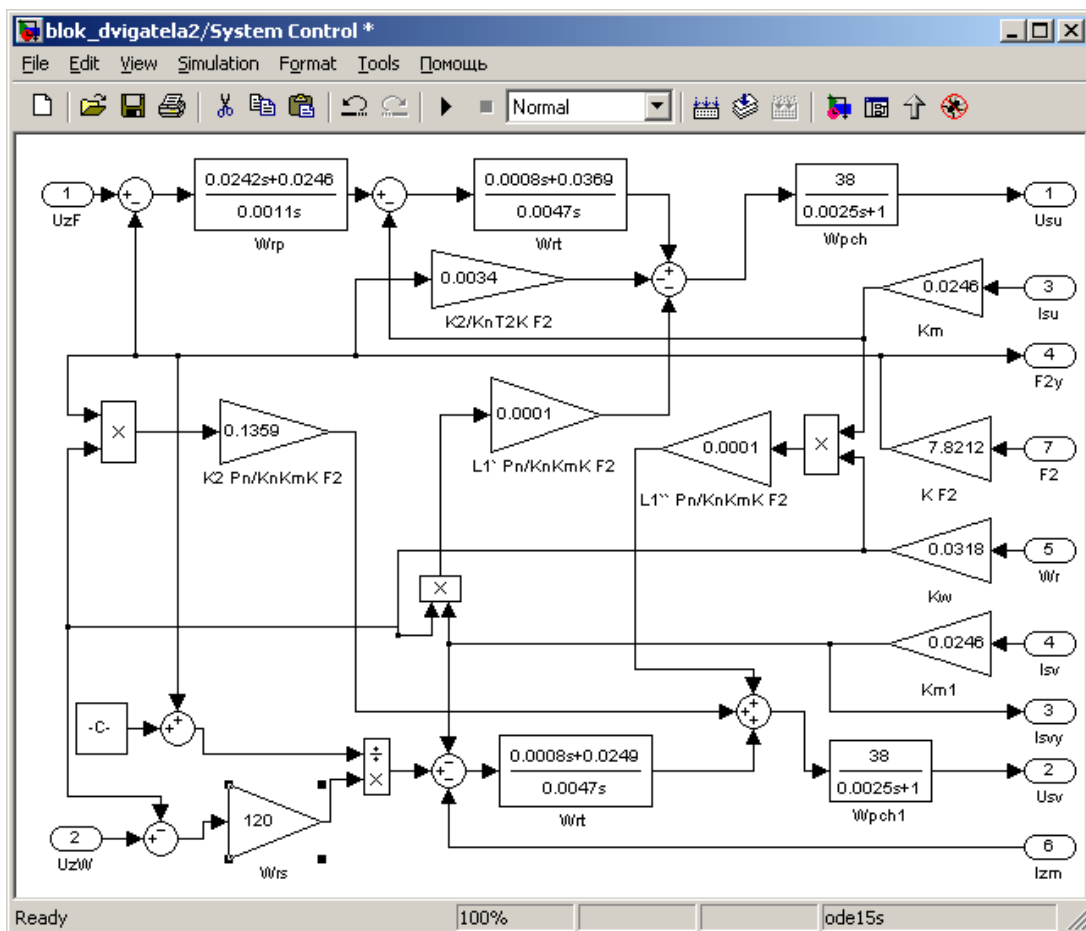


Рис. 2.10. Структурна схема системи керування
(розроблено автором)

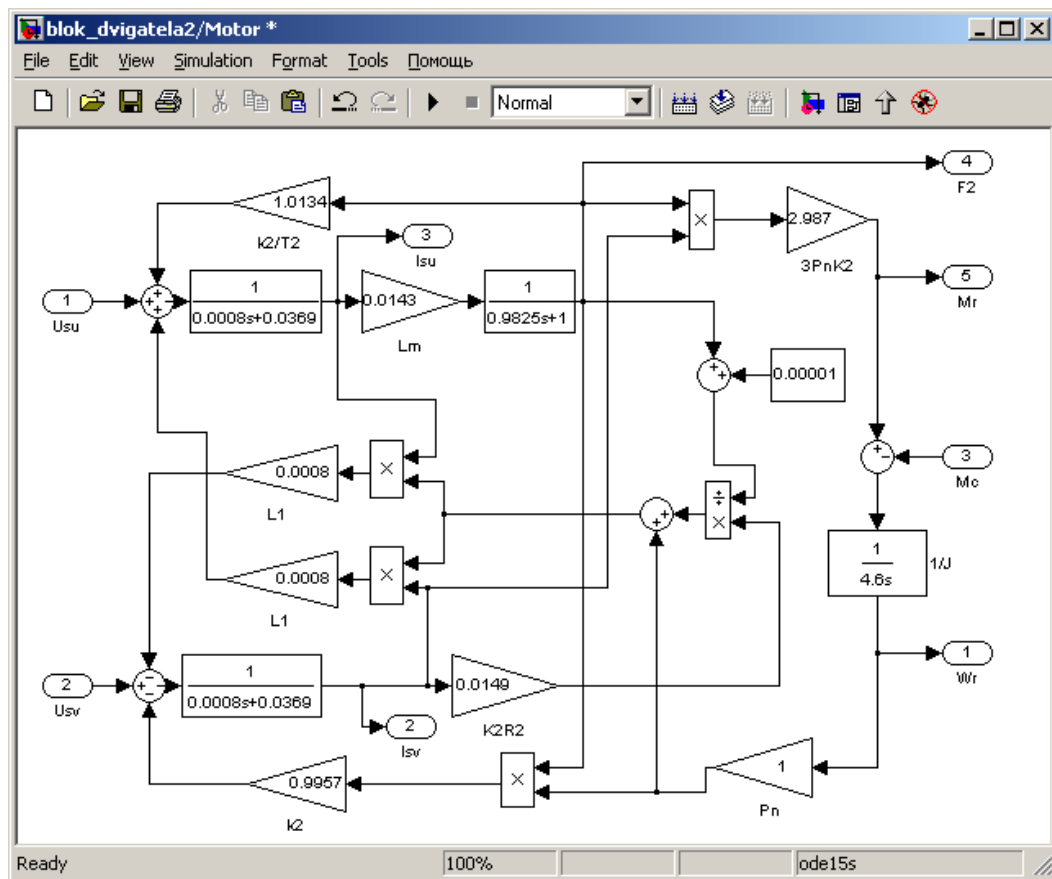


Рис. 2.11. Структурна схема двигуна
(розроблено автором)

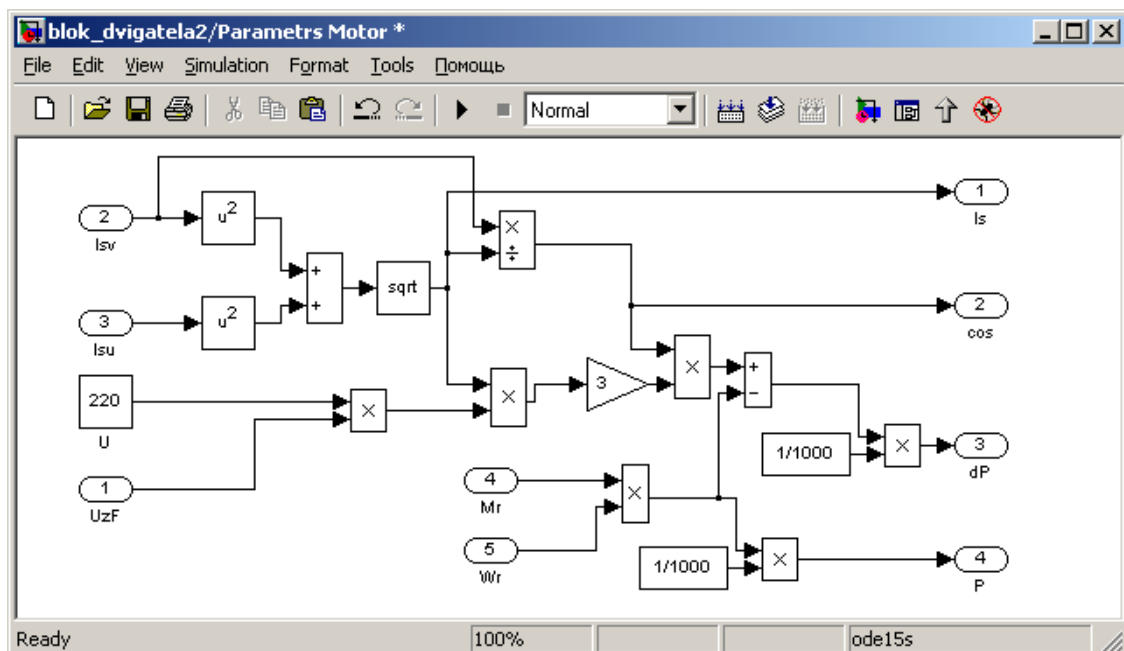


Рис. 2.12. Структурна схема обчислення енергетичних параметрів привода
(розроблено автором)

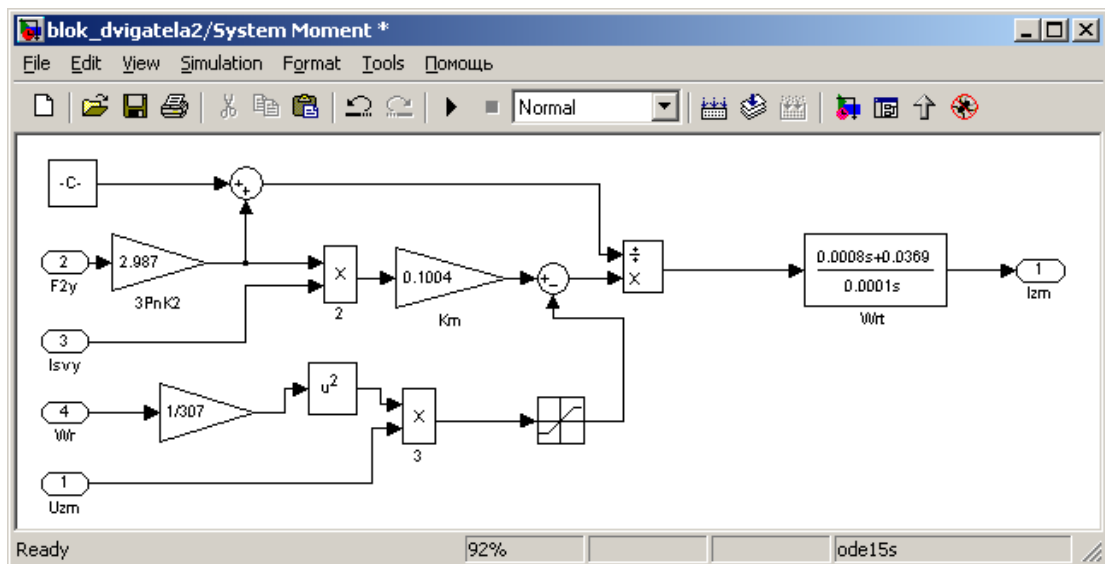


Рис. 2.13. Структурна схема обчислення струму завдання моменту
(розроблено автором)

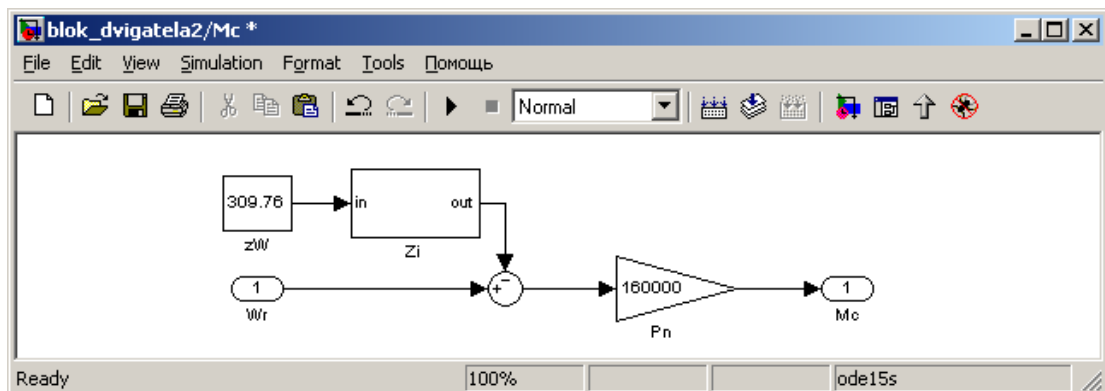


Рис. 2.14. Структурна схема завдання моменту навантаження
(розроблено автором)

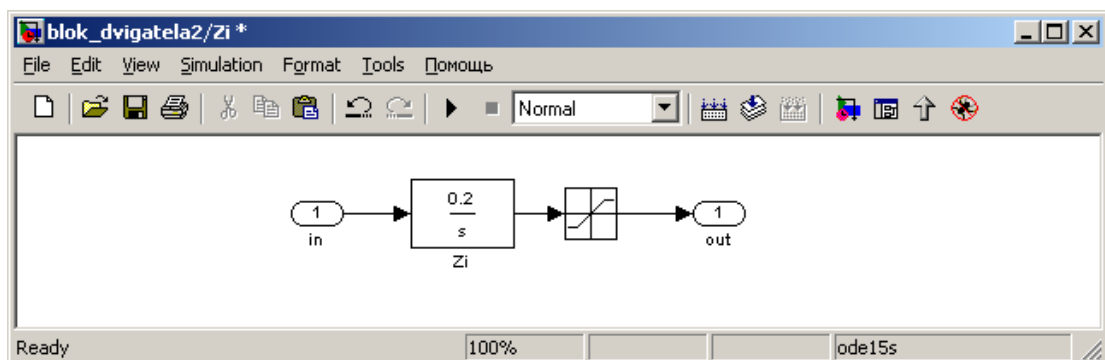


Рис. 2.15. Структурна схема задатчика інтенсивності
(розроблено автором)

2.7.1 Одержання динамічних характеристик привода

На рис. 2.16-2.17 наведено графіки зміни параметрів асинхронного привода при плавному пуску. Час розгону - 5 с.

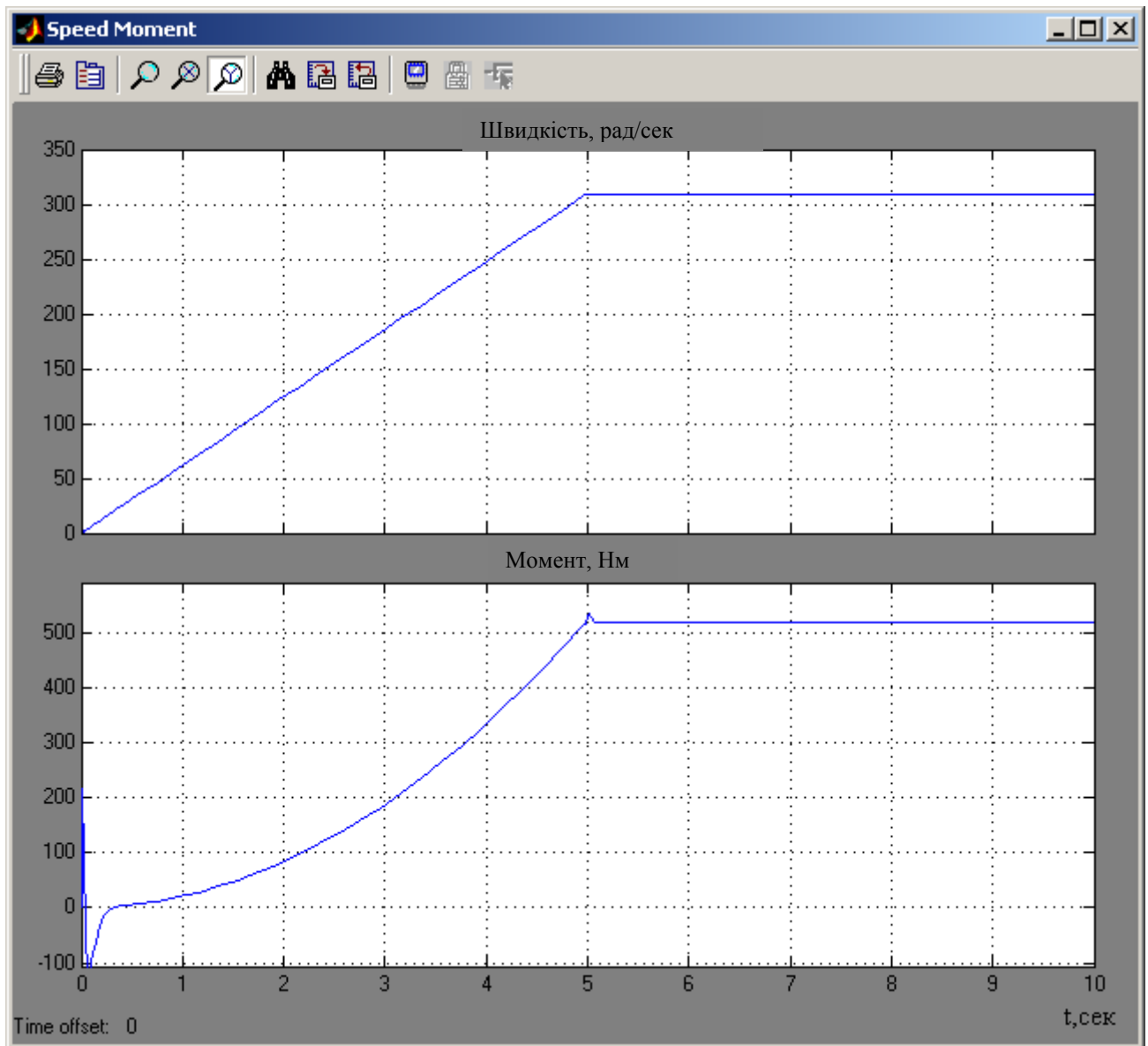


Рис. 2.16. Графіки зміни швидкості та моменту двигуна при плавному пуску

(розроблено автором)

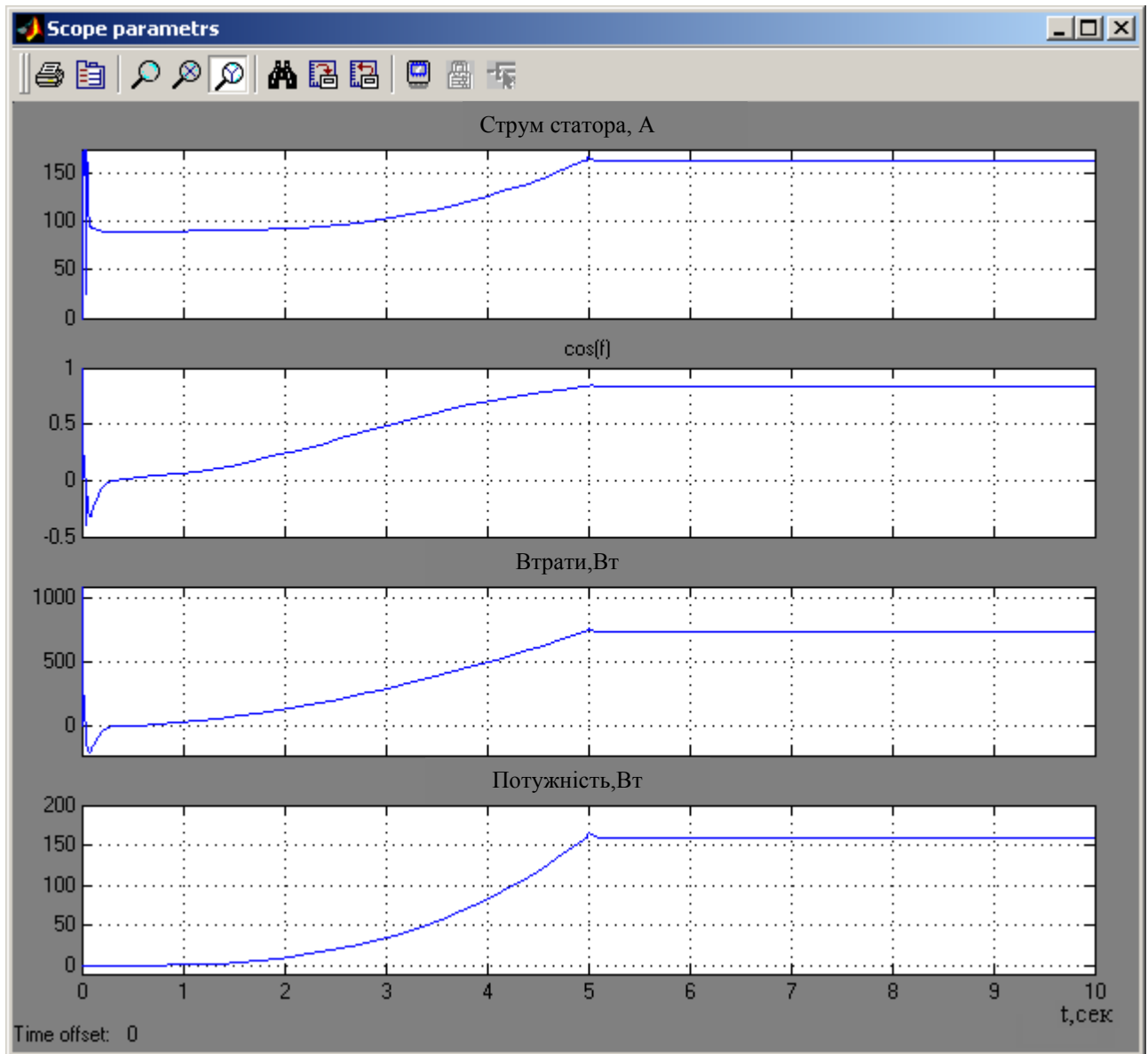


Рис. 2.17. Графіки зміни струму статора, $\cos\varphi$, втрат та потужності при пуску
(розроблено автором)

Аналіз результатів моделювання підтверджує ефективну роботу системи векторного керування: кидок моменту при пуску не перевищує допустимого значення, швидкість наростає плавно без коливань.

2.8 Розробка автоматичної системи регулювання продуктивності компресора

Централізоване управління компресорними установками передбачає застосування інтелектуальних систем керування з функцією підтримання заданого тиску у вузьких межах та максимально економічної роботи всієї установки. Система повинна прогнозувати зміни навантаження та відслідковувати поточне завантаження компресора. При коректному налаштуванні тиск підтримується з точністю $\pm 0,2$ бар.

Для забезпечення економічної ефективності система вибирає оптимальну комбінацію компресорів при об'єднанні декількох агрегатів різної продуктивності. Компресори мають безперервно працювати під навантаженням для мінімізації холостого ходу та підвищення надійності. Система контролю архівує події за минулі 24 години, забезпечуючи аналіз тенденцій відхилення параметрів.

2.8.1 Функції автоматичної системи керування

Контролерна система керування призначена для заміни морально та фізично застарілого пристрою А-80 та забезпечує: ручний і автоматичний режими роботи компресорного агрегату 2А350-7-2; аварійне відключення за 6 параметрами (температура масла, тиск конденсату, рівень масла, наявність охолоджувальної води та ін.); дистанційне керування; збір та архівування технологічних даних; регулювання холодопродуктивності від температурного датчика випарної системи.

Аварійна зупинка компресора в автоматичному режимі виконується при: температурі масла вище $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ або нижче $25\text{ }^{\circ}\text{C}$; температурі аміачно-масляної суміші поза межами $45\text{--}85\text{ }^{\circ}\text{C}$; перепаді тиску масла менше 4 кгс/см^2 ; тиску конденсату вище 15 кгс/см^2 ; відсутності охолоджувальної води.

2.9 Аналіз вхідно-вихідних сигналів контролера та вибір технічних засобів

Для реалізації розробленої системи обрано контролер серії ICP DAS I-8000 (виробник ICP DAS Co., Ltd., Тайвань) з підтримкою протоколу Modbus TCP та доступом через Ethernet. Контролери поставляються з середовищем програмування Modbus SDK. Перелік вихідних і вхідних сигналів контролера наведено в табл. 2.3 та 2.4 відповідно.

Таблиця 2.3

Необхідна кількість і тип вихідних сигналів контролера

Найменування	Тип	К-ть	Місце встановлення	Параметр сигналу
Пусковий маслonaсос	Пускач	1	Силовая панель	Контакт реле
Аварійний маслonaсос	Пускач	1	Силовая панель	Контакт реле
Засувка нагнітання	Електропривод	1	Маш. зал	Контакт реле
Дросельна заслінка	Електропривод	1	Маш. зал	Контакт реле
Засувка протипомп. клапана	Електрозасувка	1	Маш. зал	Контакт реле
Водяний насос	Пускач	1	Маш. зал	Контакт реле

Необхідна кількість і тип входних сигналів контролера

Найменування	Тип давача	К- ть	Місце встановлення	Параме тр сигналу	Примітка
1	2	3	4	5	6
Температура повітря до й після повітроохолоджувачів	Endress+Hauser iTEMP TMT82 (Pt100, 4-20 мА)	6	Повітроохолоджувачі	4-20 мА	До 200 °С
Температура масла до й після маслоохолоджувачів	Endress+Hauser iTEMP TMT82 (Pt100, 4-20 мА)	5	Маслоохолоджувачі	4-20 мА	До 100 °С
Температура підшипників	Endress+Hauser iTEMP TMT82 (Pt100, 4-20 мА)	9	Двигун, редуктор	4-20 мА	До 100 °С
Температура обмоток двигуна	Endress+Hauser iTEMP TMT82 (Pt100, 4-20 мА)	6	Двигун	4-20 мА	До 150 °С

Продовження табл.2.4

1	2	3	4	5	6
Температура повітря до й після калорифера	Endress+Hau ser iTEMP TMT82 (Pt100, 4-20 мА)	2	Калорифер	4-20 мА	До 100 °С
Температура води до й після ел. двигуна	Endress+Hau ser iTEMP TMT82 (Pt100, 4-20 мА)	2	Система охолодження	4-20 мА	До 100 °С
Температура охолодної води	Endress+Hau ser iTEMP TMT82 (Pt100, 4-20 мА)	7	Система водопостачання	4-20 мА	До 100 °С
Тиск масла	Endress+Hau ser PMC51 (4-20 мА, HART)	4	Панель КВП	4-20 мА	Аналоговий сигнал
Тиск води	Endress+Hau ser PMC51 (4-20 мА, HART)	1	Панель КВП	4-20 мА	Аналоговий сигнал

Продовження табл.2.4

1	2	3	4	5	6
Тиск повітря	Endress+Hauser PMC51 (4-20 мА, HART)	3	Панель КВП	4-20 мА	Аналоговий сигнал
Контроль продуктивності	Endress+Hauser Promass F300 (витратомір, 4-20 мА)	1	Панель КВП	4-20 мА	Аналоговий сигнал
Струм статора	Phoenix Contact MCR-T-UI-UI (0-5 А / 4-20 мА)	1	Силова панель	4-20 мА	Аналоговий сигнал
Кінцеві вимикачі	Schmersal AZ 15 (Німеччина)	8	По місцю встановлення	Контакт	Дискретний сигнал
Контроль осьового зсуву та вібрації	IFM Electronic VSP001 (Німеччина, 4-20 мА)	1	Компресор	4-20 мА	Аналоговий сигнал

Технічні дані контролера I-8811 (ICP DAS, Тайвань) [7]

Параметр	Значення
Процесор	80188-40 МГц
ОЗП	до 512 кБ
Flash-диск	до 512 кБ
COM1	RS-485
COM2	RS-485 Auto (гальванорозв'язка)
EEPROM	2 кБ
Температура навколишнього середовища	від -25 до +75 °C
Напруга живлення	10-30 В постійного струму
Споживана потужність (не більше)	3 Вт
Слоти розширення	8

Для введення аналогових сигналів встановлюються 7 модулів I-8017 (8-канальний аналоговий ввід, 14-розрядний АЦП, діапазони ± 150 мВ - ± 10 В та 4-20 мА, погрішність не гірше $\pm 0,1\%$). Дискретні сигнали опрацьовує модуль I-8054 (16 каналів вводу-виводу).

2.9.1 Перетворювачі сигналів та датчики тиску

Для перетворення вхідних сигналів з гальванічною ізоляцією застосовуються нормуючі перетворювачі серії Phoenix Contact MCR-T-UI-UI (виробник Phoenix Contact GmbH, Німеччина). Вихідний сигнал 4-20 мА, ізоляція 3000 В, лінійна залежність виходу від входу.

Для вимірювання тиску обрано давачі тиску Endress+Hauser PMC51 (виробник Endress+Hauser, Швейцарія) з такими характеристиками (табл. 2.6).

Таблиця 2.6

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник (країна)	-	Endress+Hauser (Швейцарія)
2	Діапазон вимірювання тиску	кПа - МПа	0...100 кПа до 0...40 МПа
3	Вихідний сигнал	мА	4-20 (HART)
4	Основна похибка	%	±0,1
5	Протокол зв'язку	-	HART / 4-20 мА
6	Ступінь захисту	-	IP67
7	Діапазон робочих температур	°C	від -40 до +85

2.9.2 Джерело живлення

Для живлення апаратури контролера обрано джерело живлення MEAN WELL MDR-60-24 (виробник MEAN WELL Enterprises Co., Ltd., Тайвань): вихідна потужність 60 Вт; вихідна напруга 24 В постійного струму; вхідна напруга 85-264 В змінного струму; ККД не менше 86%; захист від перенапруги, перевантаження та короткого замикання.

2.9.3 Давач вібрації та осьового зсуву

Для вимірювання вібрації підшипників та осьового зсуву ротора застосовано давач IFM Electronic VSP001 (виробник IFM Electronic GmbH, Німеччина): діапазон вимірювання вібропереміщення 10-125 мкм; частотний діапазон 10-1500 Гц; вихідний сигнал 4-20 мА; ступінь захисту IP67; діапазон робочих температур від -25 до +70 °C.

2.9.4 Вибір давача швидкості

Для забезпечення інтервалу обчислень менше 0,01 с обрано інкрементальний енкодер Kubler 8.5820.1222.1000 (виробник Fritz Kubler GmbH, Німеччина) з такими параметрами: число імпульсів за оберт - 1000; напруга живлення - 10-30 В. За 0,01 с при мінімальній швидкості 300 об/хв кількість імпульсів складає 50, що достатньо для достовірного вимірювання швидкості двигуна.

$$N = \frac{n_{\text{им}} \cdot n_{\text{мин}}}{60} \cdot t_{\text{роз}} = \frac{1000 \cdot 300}{60} \cdot 0,01 = 50 \text{ імпульсів.} \quad (2.59)$$

2.10 Розрахунок похибки вимірювання

Будь-яке реальне вимірювання супроводжується похибкою, зумовленою конструктивними, виробничими та експлуатаційними чинниками. Сумарна похибка системи вимірювання тиску визначається за формулою:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_{\text{ин}} + \delta_{\text{пр}} + \delta_{\text{цан}} + \delta_{\text{мет}} + \delta_{\text{роз}} = 0.2 + 0.04 + 0.03 + 0 = 0.26\% \quad (2.60)$$

де:

$\delta_{\text{и}}$ — інструментальна похибка;

$\delta_{\text{пр}}$ — похибка перетворення сигналу тиску в струм;

$\delta_{\text{цан}}$ — похибка цифро-аналогового перетворювача контролера;

$\delta_{\text{мет}}$ — методична похибка;

$\delta_{\text{роз}}$ — розрахункова похибка.

Інструментальна похибка $\delta_{\text{и}}$ й похибка перетворення сигналу тиску в струм $\delta_{\text{пр}}$ рівні 0,2% (паспортні дані), похибка цифро-аналогового перетворювача контролера $\delta_{\text{цан}}$ дорівнює 0,04% (паспортні дані), розрахункова

похибка $\delta_{\text{дiс}}$ дорівнює 0%, методична похибка $\delta_{\text{мет}}$ залежить від частоти зняття сигналу з вимірювального приладу й від максимальної швидкості зміни тиску $\partial H / \partial t$ в системі.

Максимальна швидкість зміни тиску $\partial H / \partial t = 2 \text{ атм} / \text{с}$, максимальне значення тиску дорівнює 4Атм методична похибка $\delta_{\text{мет}}$ повинна бути не більше 0,03%, що дорівнює 0,12Атм. Щоб виконати цю умову частота вимірів повинна бути не менше ніж:

$$\Delta \tau = \frac{0,12 \cdot 2}{4} = 0,06 \text{сек} \quad (2.61)$$

2.11 Розробка алгоритму роботи програми системи автоматизації компресора

Програма мікропроцесорної системи автоматики виконується циклічно. Логіка роботи у автоматичному режимі: спочатку перевіряється готовність системи охолодження масла (DI 126.1); потім зчитуються аналогові сигнали датчиків температури масла (A2), тиску масла (A1), тиску нагнітання (A0), температури нагнітання (A5), тиску всмоктування (A3), температури всмоктування (A4) та температури у випарниках (A7). Кожен параметр порівнюється з уставкою; при виході за межу формується відповідний сигнал аварійного відключення з виведенням повідомлення на дисплей. При зниженні температури у випарниках нижче -15°C зменшується продуктивність компресора. Блок-схема алгоритму наведена на рис. 2.18.

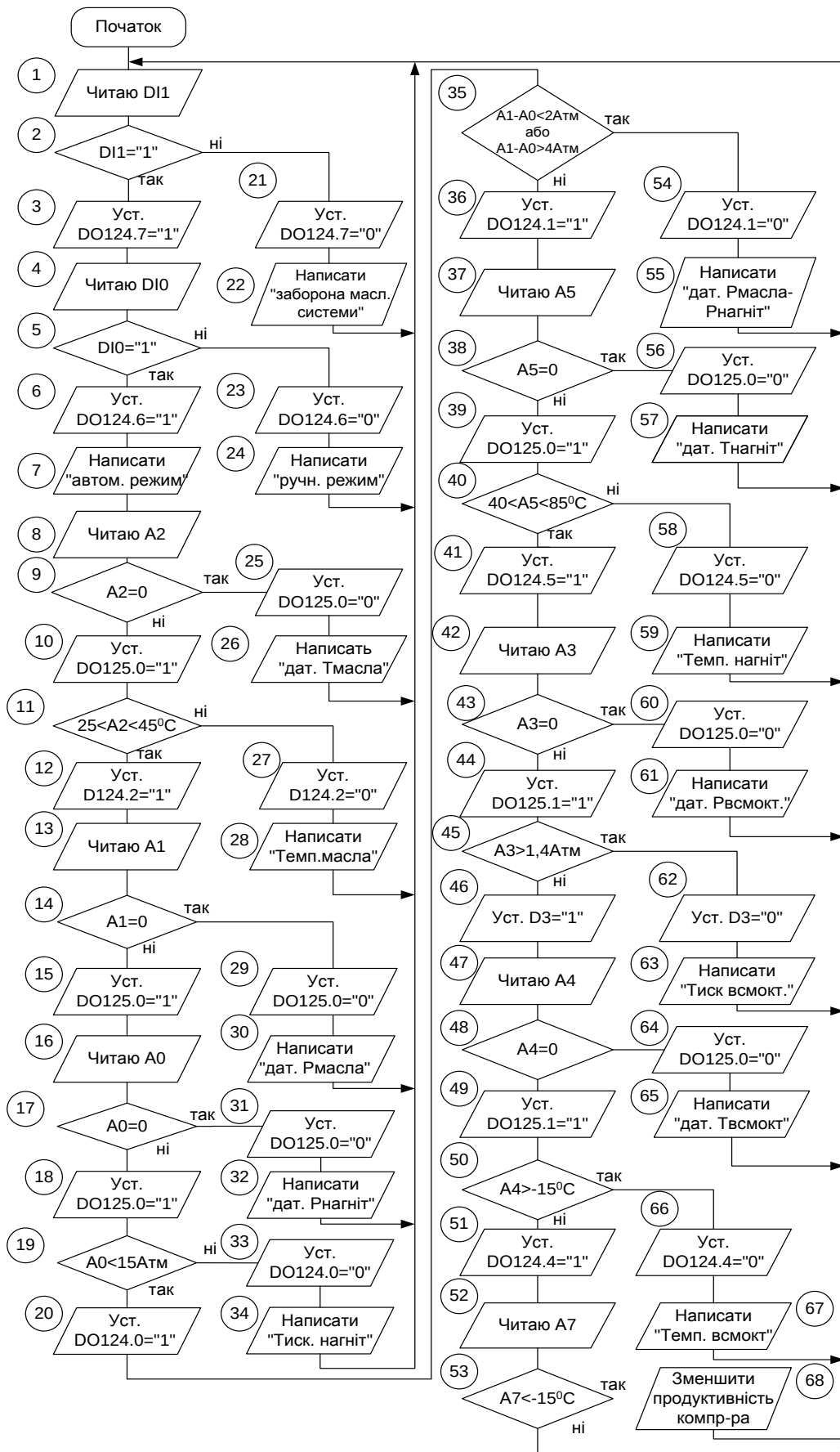


Рис. 2.18. Блок-схема алгоритму керування системою автоматизації
(розроблено автором)

2.12 Охорона праці

Аналіз умов праці виконано для робочого місця машиніста компресорної установки на ділянці льодозаводу цеху водопостачання ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Оскільки роботою передбачено лише модернізацію системи керування без зміни технологічного процесу та класу шкідливості виробництва, загальна характеристика виробничого майданчика не змінюється.

2.12.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих чинників

Відповідно до [9] шкідливі та небезпечні виробничі чинники поділяють за природою дії на фізичні, хімічні та психофізіологічні. На ділянці льодозаводу наявні чинники всіх трьох груп.

Фізичні чинники: рухомі частини компресорів та електроприводів, підвищений рівень шуму, вібрація вузлів агрегату, небезпечна напруга в електричних колах (380 В), недостатня природна освітленість машинного залу. До хімічних чинників відноситься вплив аміаку - холодильного агента 3-го класу небезпеки (ГДК 20 мг/м³). Основні значення виробничих чинників наведено в табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Шкідливі та небезпечні виробничі чинники на ділянці льодозаводу [9]

№	Фактори виробничого середовища	Од. вим.	Норм. значення (ГДК/ГДР)	Фактичне	Клас
1	2	3	4	5	6
1	Аміак (3 кл. небезпеки)	мг/м ³	20,0	17,2	III (1 ст.)
2	Пил фіброгенної дії	мг/м ³	6,0	1,5	II
3	Шум	дБА	80	88	III (1 ст.)

Продовження табл.2.7

4	Мікроклімат (темпер. °C / швидк. м/с / вол. %)	-	18-27 / 0,2-0,4 / 65	23,6 / 0,2 / 48	II
5	Робоча поза (нахили, переміщення)	%	25	40-50	III (1 ст.)
6	Напруженість праці (зосередження)	%	51-75	51-60	III (1 ст.)

Аналіз табл. 2.7 свідчить, що найнебезпечнішим виробничим чинником є шум (88 дБА при нормі 80 дБА за [9]). Джерела шуму - рухомі частини компресорів та їх електроприводи. Тривале перебування в таких умовах спричиняє захворювання органів слуху.

2.12.2 Заходи з усунення шкідливих чинників

На підставі аналізу шкідливих та небезпечних чинників для кожного з виявлених перевищень норм передбачено технічні та організаційні рішення. Для зниження рівня шуму до норми (80 дБА за [9]) застосовано: засоби індивідуального захисту органів слуху (вушні вкладиші «Беруші»); раціональний режим праці та відпочинку; огороження рухомих частин обладнання звукоізолюючими кожухами. Для запобігання отруєнню аміаком передбачено: систему автоматичного контролю концентрації аміаку в приміщенні; примусову вентиляцію машинного залу; наявність ізолювальних протигазів на кожному робочому місці.

Захист від ураження електричним струмом забезпечується захисним заземленням усього електрообладнання (розрахунок виконано в п. 2.12.3). Додаткові засоби електрозахисту: ізолювальні килимки, діелектричні рукавички та боти, живлення переносних ламп напругою 12 В.

2.12.3 Розрахунок захисного заземлення

Заземлення виконано відповідно до [10]. Розрахунок проведено для мережі 380/220 В з глухозаземленою нейтраллю. Схема замикання фази на корпус наведена на рис. 2.19. Розрахункові параметри: номінальний струм запобіжника $I_m = 450$ А; питомий опір ґрунту (глина) $\rho = 100$ Ом·м; кліматичний коефіцієнт $k_{сез} = 1,5$; заземлювачі - сталеві труби $D = 0,03$ м, $L = 3$ м, глибина закладення верхнього кінця $h_0 = 0,8$ м.

$$I_h = \frac{U_o}{\sqrt{3}R_h} = 380 \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 1000} \approx 0,22 \text{ А} \quad (2.62)$$

Крок 1. Струм через тіло людини при торканні корпусу без захисного заземлення:

$$R_3 = 3,5 \text{ Ом} \quad I_3 = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot R_3} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 3,5} = 63 \text{ А} \quad (2.63)$$

де $U_{\text{допуст}} = 40$ В - допустима напруга дотику; $I_{3.\text{розр}}$ - розрахунковий струм замикання на корпус. Крок 2. Допустимий опір заземлюючого пристрою $R_{\text{доп}} = U_{\text{допуст}} / I_{3.\text{розр}}$:

Крок 3. Перевірка спрацювання захисного апарата (запобіжника $I_m = 450$ А):

$$I_3 \geq I_m = 450 \text{ А} \quad (2.64)$$

Крок 4. Розрахунковий питомий опір ґрунту з урахуванням кліматичного коефіцієнта $k_{сез} = 1,5$:

$$\rho = 0,11 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см} \quad (2.65)$$

Крок 5. Опір одиночного вертикального заземлювача (сталева труба $D = 0,03$ м, $L = 3$ м, $t = h_0 + L/2 = 0,8 + 1,5 = 2,3$ м):

$$R_{ct} = \frac{0,366 \cdot \rho}{l} \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right) \text{ Ом} \quad (2.66)$$

де $t = h_0 + L/2 = 0,8 + 1,5 = 2,3$ м - відстань від поверхні ґрунту до середини труби.

$$t = \frac{l}{2} + t_n = \frac{30}{2} + 80 = 95 \text{ см} \quad (2.67)$$

Крок 6. Попередня кількість вертикальних заземлювачів з урахуванням коефіцієнта використання $\eta_v = 1,5$ та $R_{\text{доп}} = 4$ Ом:

$$R_{ct} = \frac{0,366 \cdot 1100}{30} \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot 30}{3} + \lg \frac{4 \cdot 95 + 30}{4 \cdot 95 - 30} \right) = 19,3 \text{ Ом} \quad (2.68)$$

Крок 7. Визначаємо наближену кількість одиночних заземлювачів з огляду на коефіцієнт використання $\eta = 1,5$;

$$n = \frac{R_{ct}}{\eta \cdot R_{tp}} = \frac{19,3}{1,5 \cdot 3,5} \approx 4,1 \text{ шт} \quad (2.69)$$

Крок 8. Визначаємо довжини сполучних смуг й їх опори розтікання:

$$R_{cn} = \frac{0,366 \cdot \rho}{l} \lg \frac{2 \cdot l^2}{b \cdot t} = \frac{0,366 \cdot 1100}{500} \lg \frac{2 \cdot 500}{4 \cdot 70} = 2,6 \text{ Ом} \quad (2.70)$$

де $l = 500$ см – довжина смуги,

$b = 4$ см – ширина смуги,

$t = 70$ см – глибина закладення.

Крок 9. Визначаємо загальний опір смуг з урахуванням коефіцієнта використання $\eta = 0,52$ для використання сполучної смуги в ряді заземлювачів із труб:

$$R_n = \frac{R_{cn}}{\eta} = \frac{2,6}{0,5} = 5,2 \text{ Ом} \quad (2.71)$$

Крок 10. Уточнюємо необхідний загальний опір одиночних заземлювачів із труб:

$$R_y = R_{tp} = \frac{R_n \cdot R_3}{R_n - R_3} = \frac{5,2 \cdot 3,5}{5,2 - 3,5} = 10,7 \text{ Ом} \quad (2.72)$$

Крок 11. Уточнюємо необхідну кількість одиночних заземлювачів із труб:

$$n = \frac{R_{ct}}{\eta \cdot R_{tp}} = \frac{19,3}{0,8 \cdot 10,7} \approx 3 \text{ шт} \quad (2.73)$$

Загальний опір заземлюючого контуру:

$$R_{загал} = \frac{R_{ct} \cdot R_n}{n \cdot R_{ct} \cdot \eta_m + R_n \cdot \eta_n} = \frac{19,3 \cdot 5,2}{19,3 \cdot 0,8 \cdot 3 + 5,2 \cdot 0,52} = 2,05 \text{ Ом} \quad (2.74)$$

Яке задовольняє нормам [10], тобто менше 4 Ом, умова виконана.

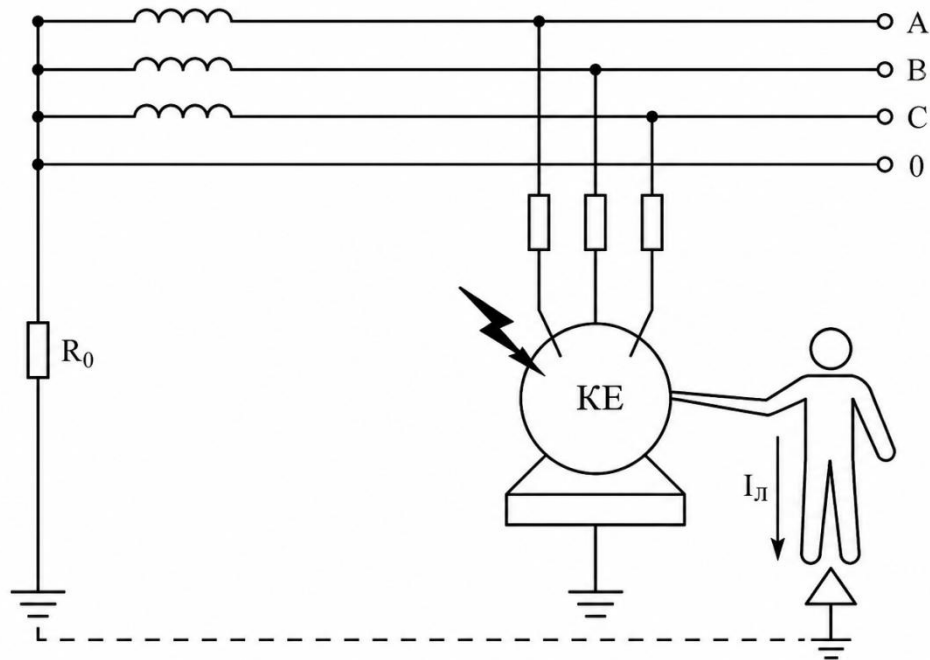


Рис. 2.19. Схема замикання фази на корпус у мережі із заземленою нейтраллю

(розроблено автором)

Фазні дроти А, В, С, 0. Три індуктори на фазних проводах (котушки). КЕ - корпус електроустановки. R_0 – резистор заземлення нейтралі

2.12.4 Засоби індивідуального захисту та медичні огляди

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) забезпечуються відповідно до [11]. Перелік ЗІЗ для машиніста холодильної установки наведено в табл. 2.8. Попередні та періодичні медичні огляди персоналу проводяться згідно з [12].

Перелік засобів індивідуального захисту машиніста холодильної установки
[11]

№	Засіб індивідуального захисту	К-ть на рік	Строк носки, міс.
1	Черевики шкіряні	1	12
2	Костюм бавовняний	1	12
3	Куртка на теплій підкладці	0,3	36
4	Рукавиці комбіновані	4	3
5	Вушні заглушки (беруші)	1	22
6	Рукавички гумові промислові	1	до зношення
7	Протигаз марки КД або М	1	до зношення
8	Захисний костюм від хімічних речовин	1	до зношення
9	Гумові чоботи	1	до зношення

Відповідно до [12] для персоналу, що зазнає впливу шкідливих виробничих чинників (аміак 3-го класу небезпеки, шум понад 80 дБА), проводяться попередній (при прийнятті на роботу) та щорічний періодичний медичні огляди. Перелік обов'язкових лікарів-спеціалістів і досліджень наведено в табл. 2.9.

Таблиця 2.9

Обов'язкові медичні огляди машиніста холодильної установки [12]

№	Шкідливий чинник	Лікарі-спеціалісти	Лабораторні та функціональні дослідження
1	Шум (88 дБА, понад норму 80 дБА)	Отоларинголог, невропатолог	Аудіометрія, ЕЕГ
2	Аміак (хімічний чинник, 3 кл. небезпеки)	Терапевт, невропатолог, офтальмолог	Спірографія, клінічний аналіз крові, гострота зору
3	Напруга в електроустановках (380/220 В)	Кардіолог, невропатолог	ЕКГ, ЕЕГ

Санітарно-побутові приміщення (гардеробні, умивальні, душові) розташовані суміжно з робочою зоною. Кількість душових сіток - 10 (з розрахунку 1 на 3 особи у найбільшій зміні). Для запобігання потраплянню аміаку підведення води та каналізації до санітарних приміщень виконано самостійними трубопроводами.

2.12.5 Пожежна безпека

Виробничий процес за вибухо- та пожежонебезпечністю відноситься до категорії Д відповідно до [13]. Будівля льодозаводу за ступенем вогнестійкості - II (цегла, залізобетон, скло та інші незгоряні матеріали).

Пожежна безпека забезпечується системою запобігання пожежі, системою пожежного захисту та організаційними заходами [13]. Основні джерела займання: аварійний стан електропроводки; перегрів або коротке замикання в електрообладнанні; промаслені відходи; розряди блискавки та статичного електрики.

Для виключення та зниження ймовірності виникнення пожежі передбачено: захист ланцюгів електрообладнання тепловими реле і автоматичними вимикачами; примусову вентиляцію двигунів; усунення витоків у системах масло-гідравліки; зберігання промасленого ганчір'я у металевих ящиках із кришками; застосування блискавковідводів.

Таблиця 2.10

Засоби пожежогасіння на ділянці льодозаводу [13]

№	Найменування	Одиниці виміру	Кількість
1	Вогнегасник вуглекислотний ВВ-5	шт.	2
2	Пісок	м ³	0,5
3	Лопата	шт.	2
4	Лом	шт.	2
5	Відро	шт.	2

Пожежні крани розташовані таким чином, що до будь-якого місця ймовірної пожежі можна подати воду одночасно з двох кранів. На стінах будівлі закріплено пожежні сходи. Система блискавкозахисту включає три струмовідводи та заземлювальний контур з опором не більше 10 Ом (III категорія захисту).

ВИСНОВКИ

В ході виконання роботи досліджено технологічний процес льодозаводу цеху водопостачання ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг", визначено призначення та основні технічні характеристики компресорного агрегату 2А 350-7-2, обладнання та засобів автоматизації.

Проведено аналіз існуючих методів регулювання продуктивності компресорних установок. Обґрунтовано, що регулювання засувкою є неекономічним через низький ККД при частковому навантаженні. Доведено переваги частотного регулювання за сукупністю критеріїв: економічність, плавність, широкий діапазон, висока надійність та можливість інтеграції у систему автоматизації вищого рівня.

Обрано двигун компресорної установки 4АН280S2У3 потужністю 160 кВт, 2958 об/хв із незалежною вентиляцією. Вибрано перетворювач частоти Siemens SINAMICS G120 (Німеччина) з векторним керуванням та мікроконтролер I-8811 (ICP DAS, Тайвань). Встановлено, що перетворювач задовольняє усі технічні вимоги до точності регулювання та захисту.

Визначено параметри регуляторів струму та швидкості на основі настроювання по модульному оптимуму. Виконано математичне моделювання розробленої системи. Результати моделювання підтверджують ефективну роботу системи векторного керування при плавному пуску та динамічному навантаженні.

Встановлено, що реалізована система автоматизації забезпечує роботу компресорної установки в автоматичному та ручному режимах, аварійне відключення при відхиленні технологічних параметрів, а також регулювання холодопродуктивності.

У підрозділі 2.12 виконано аналіз шкідливих та небезпечних виробничих чинників на ділянці льодозаводу, визначено заходи з їх усунення, сформовано перелік ЗІЗ та медичних оглядів. Розраховано контур захисного заземлення електроустаткування компресорного агрегату: загальний опір контуру не перевищує 4 Ом, що відповідає вимогам [10].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Інструкція з експлуатації холодильної установки ділянки виробництва льоду та безалкогольних напоїв цеху водопостачання : HE228-Э.148-07-2003. - Кривий Ріг : ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг", 2003. - 54 с.
2. Чорний А. П. Автоматизовані електроприводи насосних і компресорних установок : навч. посіб. / А. П. Черний, І. В. Піддубняк. - Кременчук : КрНУ, 2010. - 260 с.
3. Шестопал Ю. О. Системи керування асинхронними двигунами : монографія / Ю. О. Шестопал. - Київ : НТУ України "КПІ", 2008. - 310 с.
4. Чиженко І. М. Перетворювачі частоти в системах регульованого електропривода / І. М. Чиженко, В. С. Руденко, В. І. Сенько. - Київ : Техніка, 1998. - 432 с.
5. Довгань С. М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання : навч. посіб. / С. М. Довгань. - Дніпропетровськ : НГА України, 2001. - 137 с.
6. Siemens AG. SINAMICS G120 Frequency Converter : Operating Instructions. - Erlangen : Siemens AG, 2021. - 398 p.
7. ICP DAS. I-8000 Series Controller User Manual. - Чжунлі : ICP DAS Co., Ltd., 2020. - 152 p.
8. Endress+Hauser. Cerabar M PMC51 - Давач надлишкового тиску : технічна документація. - Рейнах : Endress+Hauser AG, 2022. - Режим доступу: <https://www.endress.com/PMC51>.
9. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - Київ : МОЗ України, 1999.
10. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. - Київ : Держнаглядохоронпраці України, 2001.
11. Наказ Держгірпромнагляду № 62 від 16.04.2009. Норми безплатної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів

індивідуального захисту працівникам металургійної промисловості. - Київ, 2009.

12. Наказ МОЗ України № 246 від 21.05.2007. Порядок проведення медичних оглядів працівників певних категорій. - Київ : МОЗ України, 2007.

13. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. - Київ : Мінрегіон України, 2017.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

141-43-2026вр6

Автор

141-43-2026вр6

Науковий керівник / Експерт

Модло Є

ІД документа

334133552

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту

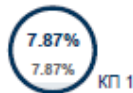
6/2/2026

Дата редагування

—

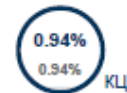
Обсяг знайдених подібностей

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.



8417

Кількість слів



59902

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		35
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		63

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	http://4ua.co.ua/physics/tb2bc69b4c53a89521216c27_0.html	57 (0.68 %)

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

Я, *Кравчина Станіслав Віталійович*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу.

Засвідчую, що кваліфікаційна бакалаврська робота Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електропривод компресорного агрегата 2А 350 7-2в умовах цеху водопостачання ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг" виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав і не одержував 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 ознайомлений. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформований, що відповідно до «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 ознайомлений.

1.06.2026