

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 Денна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Шатохіна Валерія Леонідовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему: Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електро-
привод чашового гранулятора огрудкувальної фабрики

ПАТ «Центральний ГЗК»

(повна назва теми)

за матеріалами з огрудкувальної фабрики ПАТ «Центрального ГЗК»

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник

доцент, к.т.н.

(наук. ступінь, вчене звання)

(підпис)

Рожненко Ж.Г.

(прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від 12.06.2026 № 384-ст

Завідувач кафедри

(підпис)

доцент, к.п.н.

Наук. ступінь, 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 СТУДЕНТА

Шатохіна Валерія Леонідовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема випускної кваліфікаційної роботи

Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електропривод чашового гранулятора огрудкувальної фабрики ПАТ «Центральний ГЗК»

керівник випускної роботи Рожненко Жанна Георгіївна, доцент, к.т.н.

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

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

2. Строк подання студентом випускної кваліфікаційної роботи 02.06.2026

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

Об'єкт автоматизації – чашовий гранулятор типу ОЧ-7000 відділення огрудкування ПАТ «Центральний ГЗК»; діаметр чаші – 7000 мм; висота борта чаші – 800 мм; частота обертання чаші – 4–8 хв⁻¹; кут нахилу чаші – 45–60°; продуктивність – 80–90 т/год; потужність двигуна привода обертання – 132 кВт; вологість шихти – 8,3–9,6 %; вміст заліза в шихті – 56–62 %; вимоги до електропривода – діапазон регулювання $D \geq 1,5$; час перехідного процесу $t_{пп} \leq 5$ с; перерегулювання $\delta \leq 0,5$ %; аперіодичний характер перехідного процесу; забезпечення електричного гальмування.

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

4.1 Аналітична частина. Загальні відомості про ПАТ «Центральний ГЗК». Технологія виробництва залізородних окатишів. Опис об'єкта автоматизації – чашового гранулятора ОЧ-7000. Постановка задачі та вимоги до електропривода. Обґрунтування та вибір системи електропривода. 4.2 Основна частина. Розрахунок потужності та вибір

двигуна гранулятора. Режим роботи та вимоги до електропривода. Вибір системи керування. Система електропривода ПЧ-АД із частотно-струмовим керуванням. Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна. Розрахунок базисних значень. Розрахунок регуляторів струму, потоку, швидкості та продуктивності. Моделювання перехідних процесів. Розробка АСУ ТП огрудкування. Розробка АСК чашовим гранулятором. Вибір технічних засобів автоматизації. Розробка алгоритму автоматичної оптимізації огрудкування. Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих чинників у відділенні огрудкування. Засоби індивідуального захисту. Розрахунок заземлювального пристрою. Пожежна безпека та засоби пожежогасіння.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) ВРБ.141.238-ст.16.Е3 – Схема електрична принципова існуюча; ВРБ.141.238-ст.16.Е2 – Схема електрична функціональна; ВРБ.141.238-ст.16.Е1 – Схема електрична структурна; ВРБ.141.238-ст.16.Е4 – Модель векторної системи керування в Matlab; ВРБ.141.238-ст.16.Е5 – Структурна схема моделі з контуром регулювання продуктивності; ВРБ.141.238-ст.16.Е6 – Схема електрична функціональна САК огрудкуванням; ВРБ.141.238-ст.16.Е7 – Алгоритм роботи системи оптимізації отримання окатишів

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналітична частина	Рожненко Ж.Г.	10.04.2026	10.04.2026
Основна частина	Рожненко Ж.Г.	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	16.06.2026	

Студент

(підпис)

Шатохін В.Л.
(прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи

(підпис)

Рожненко Ж.Г.
(прізвище та ініціали)

№ ряд ка	Фор мат	Позначення			Назва	Кіл. листів	№ екз.	Прим.	
1	A3	ВРБ.141.238-ст.16.E3			Схема електрична	1			
2					принципова				
3					існуюча				
4	A3	ВРБ.141.238-ст.16.E2			Схема електрична	1			
5					функціональна				
6	A3	ВРБ.141.238-ст.16.E1			Схема електрична	1			
7					структурна				
8	A3	ВРБ.141.238-ст.16.E0.1			Графіки перехідних	1			
9					процесів				
10	A3	ВРБ.141.238-ст.16.E0.2			Графіки перехідних	1			
11					процесів				
12	A3	ВРБ.141.238-ст.16.E2			Схема електрична	1			
13					функціональна				
14					САК огрудкуванням				
15	A3	ВРБ.141.238-ст.16.E0.3			Алгоритм роботи системи	1			
16					оптимізації одержання				
17					окатишів				
18	A4	ВРБ.141.238-ст.16.ПЗ			Пояснювальна записка	73			
19									
20									
21									
22									
					ВРБ.141.238-ст.16.ВР				
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електропривод чашового гранулятора огрудкувальної фабрики ПАТ «Центральний ГЗК»	Літера	Аркуш	Аркушів	
Розроб.		Шатохін В.Л.							
Пров.		Рожненко Ж.Г.						4	1
Н.контр.		Рожненко Ж.Г.				ННТІ ДУЕТ Каф.ЕІА гр. ЕПА-23ск			
Затв.		Модло Є.О.							
					Відомість роботи				

РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційна робота: 73 сторінки, 15 рисунків, 19 таблиць, 33 джерела.

Об'єкт дослідження - процес огрудкування залізородного концентрату на чашовому грануляторі типу ОЧ-7000.

Предмет дослідження - автоматизована система керування електроприводом та технологічними параметрами чашового гранулятора.

Мета роботи - розробка автоматизованої системи керування чашовим гранулятором, що забезпечує підтримання оптимальних режимів огрудкування та підвищення виходу кондиційних окатишів.

В аналітичній частині розглянуто технологію виробництва залізородних окатишів, конструкцію чашового гранулятора та обґрунтовано необхідність модернізації системи керування. В основній частині виконано розрахунок потужності та вибір асинхронного двигуна Siemens 1LE1604-2DC23-4AA4 (132 кВт), обрано перетворювач частоти Mitsubishi Electric FR-A740-03610-EC, розраховано параметри системи підлеглого регулювання координат, розроблено математичну модель та алгоритм оптимального керування на основі методу статистичного градієнта. Встановлено оптимальні параметри: вологість шихти - 8,7 %, вміст заліза - 59,85 %, вихід кондиційних окатишів досягає 97,97 %. Сформовано комплекс технічних засобів на базі контролера ADAM-5510E (Advantech, Тайвань). Виконано розробку заходів з охорони праці та розрахунок заземлення.

Ключові слова: автоматизація, алгоритм оптимізації, асинхронний двигун, векторне керування, гранулятор, огрудкування, окатиші, перетворювач частоти, система автоматичного керування, чашовий гранулятор.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Загальні відомості про ПАТ «Центральний гірничозбагачувальний комбінат».....	10
1.2 Технологія виробництва окатишів	11
1.3 Опис об'єкта автоматизації.....	15
1.4 Постановка задачі та вимоги до електропривода	18
1.5 Обґрунтування та вибір системи електропривода.....	19
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	22
2.1 Розрахунок потужності та вибір двигуна чашового гранулятора.....	22
2.2 Режим роботи та вимоги до електропривода гранулятора	26
2.3 Вибір системи керування	27
2.4 Система ЕП ПЧ-АД із частотно-струмовим керуванням	28
2.5 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна	30
2.6 Розрахунок базисних значень	32
2.7 Розрахунок регуляторів	34
2.7.1 Розрахунок регулятора струму	34
2.7.2 Розрахунок регулятора потоку	36
2.7.3 Розрахунок регулятора швидкості.....	37
2.7.4 Розрахунок регулятора продуктивності.....	37
2.9 АСУ ТП огрудкування.....	45
2.10 Розробка АСК чашовим гранулятором.....	46
2.11 Вибір технічних засобів автоматизації	48

	7
2.11.1 Аналіз вхідних-вихідних сигналів системи.....	48
2.11.2 Вибір керуючого контролера	50
2.11.3 Панель оператора Weintek MT8071iE	51
2.11.4 Перетворювачі сигналів Weidmuller ACT20X	52
2.11.5 Джерело живлення MEAN WELL MDR-100-24	53
2.11.6 Вибір датчика продуктивності.....	54
2.11.7 Датчик витрати рідких середовищ	55
2.11.8 Вибір виконавчого пристрою.....	56
2.11.9 Датчик кута нахилу IFM Electronic JN2200.....	57
2.11.10 Вибір датчика вологості	58
2.11.11 Вибір гранулометра	59
2.11.12 Вибір датчика швидкості.....	59
2.12 Розробка алгоритму автоматичної оптимізації огрудкування	60
2.13 Охорона праці та безпека у відділенні огрудкування	65
ВИСНОВКИ.....	69
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	71

ВСТУП

Залізорудні окатиші є одним з основних видів металургійної сировини для доменного виробництва. Провідні металургійні держави приділяють значну увагу їх виробництву: частка окатишів у залізорудній частині доменної шихти у Швеції сягає 100 %, у США та Канаді - 70-80 % [1]. Це пояснюється однорідністю хімічного складу та фізичних властивостей окатишів, а також можливістю їх транспортування на значні відстані без суттєвих втрат металургійних характеристик [2].

Продуктивність чашового гранулятора визначається трьома основними параметрами: швидкістю обертання чаші, кутом її нахилу та висотою підйому манжети у завантажувальному пристрої [3]. Оскільки об'єктом керування є електропривод, керованою величиною є швидкість обертання чаші.

Актуальність теми обумовлена незадовільним станом системи керування огрудуванням на «Центральний ГЗК». Наявні недоліки: зниження продуктивності внаслідок перевантажень та перегріву обладнання; значна похибка вимірювання фактичної продуктивності; нерівномірний розподіл матеріалу; низький ккд через втрати у пуско-гальмівній системі на резисторах [4]. До впровадження проектних рішень гранулятор обертася від двигуна постійного струму з реостатним регулюванням швидкості, що характеризується великими втратами потужності у реостаті, ступінчастістю регулювання та зміною жорсткості характеристики при регулюванні [4].

Метою роботи є розробка автоматизованої системи керування чашовим гранулятором в умовах ПАТ «Центральний ГЗК», що дозволяє підтримувати оптимальне значення швидкості обертання чаші, підвищити продуктивність гранулятора, покращити якість окатишів та знизити питому витрату енергетичних ресурсів [4].

Завдання роботи:

- аналіз технологічного процесу виробництва залізорудних окатишів на ПАТ «Центральний ГЗК»;

- розрахунок потужності та вибір електродвигуна чашового гранулятора;
- обґрунтування та вибір системи електропривода на базі перетворювача частоти;
- розрахунок параметрів системи підлеглого регулювання координат;
- розробка математичної моделі процесу огрудкування та алгоритму оптимального керування;
- розробка АСУ ТП огрудкування та вибір технічних засобів автоматизації;
- розробка заходів з охорони праці та безпеки.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Загальні відомості про ПАТ «Центральний гірничозбагачувальний комбінат»

ПАТ «Центральний гірничозбагачувальний комбінат» (ПАТ «Центральний ГЗК») - одне з найбільших підприємств Європи з виробництва залізорудної сировини для доменного виробництва [5]. Основні види діяльності: видобуток залізної руди, її збагачення та виробництво залізорудних офлюсованих окислених окатишів. Підприємство унікальне тим, що одночасно застосовує відкритий і підземний способи видобутку руди, а також переробляє відходи збагачення. Комбінат засновано у 1958 році; з 1997 року підприємство реструктуровано в акціонерне товариство. Нині ПАТ «Центральний ГЗК» входить до складу Групи Метінвест [5].

Комбінат розташований на території Тернівського району м. Кривого Рогу, займає площу 6262,7 гектара; під промислові об'єкти та складські приміщення відведено 930,4 гектара [5]. До складу комбінату входять 8 основних та 8 допоміжних цехів, 5 управлінь; загальна чисельність персоналу - понад 9000 осіб. Сировинна база представлена трьома кар'єрами: №1 (Глеєватське родовище), №3 (Петровське родовище) та №4 (Артемівське родовище). Річна виробнича потужність: 14,2 млн. тонн сирової руди, понад 5,9 млн. тонн залізорудного концентрату та понад 2,2 млн. тонн окатишів [5]. Концентрат, вироблений на комбінаті, є одним з найякісніших в Україні - вміст заліза становить 66,0-66,3 % [5].

Виробничий процес охоплює: гірські роботи (відкрита та підземна розробка родовищ з попереднім дробленням гірської маси); дробильно-збагачувальний комплекс (чотиристадіальна схема дроблення, три стадії кульового здрібнювання та чотири стадії магнітної сепарації); огрудкування у чашових грануляторах діаметром 6,5 і 7 м. Основними споживачами є металургійні підприємства України та країн Центральної Європи [5].

1.2 Технологія виробництва окатишів

Залізорудні окатиші являють собою тверді кулясті тіла, утворені шляхом огрудкування тонкодрібних рудних матеріалів з добавкою зв'язувальних речовин з флюсами або без них із подальшим зміцненням методами випалу або цементації [2]. За основністю окатиші поділяються на офлюсовані та неофлюсовані. Якість окатишів оцінюється за чотирма групами показників [2, 6]: хіміко-мінеральний склад; механічні властивості (крупність, міцність на руйнування і стирання, пористість); фізико-хімічні властивості (відновлюваність, міцність при відновленні, газодинамічні характеристики, набрякання); стабільність якісних параметрів.

Фабрика з виробництва залізорудних окатишів складається з відділень підготовки шихти, огрудкування та випалу [3]. Концентрат, вапняк і матеріали повернення надходять у бункери, звідки живильниками видаються на конвеєр і далі у змішувальний барабан. Після змішування шихта транспортується до гранулятора, перед яким до шихти додають бентоніт. В грануляторі відбувається утворення окатишів за участі води через форсунки. Огрудкування відбувається за рахунок перекочування матеріалів у присутності поверхневого натягу води; ріст розміру гранул припиняється, коли у барабані не залишається дрібних часток (рис. 1.1) [2].

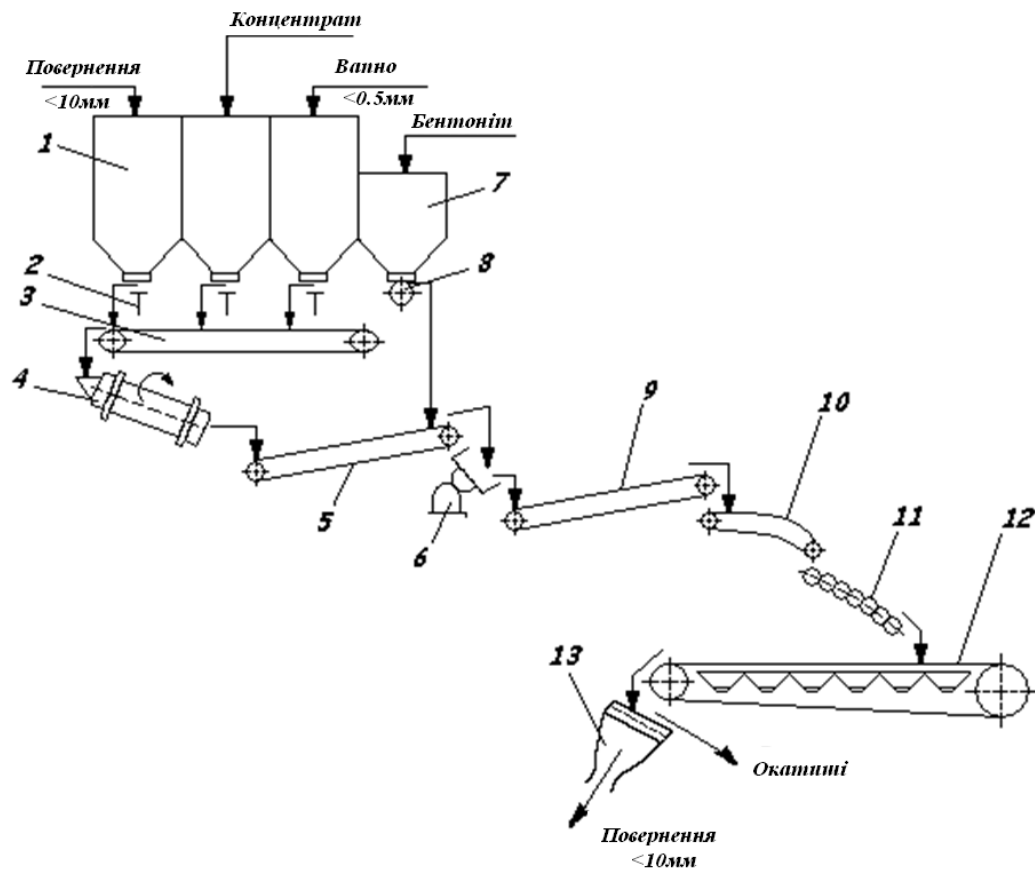


Рис. 1.1. Технологічна схема виробництва окатишів
(розроблено автором з використанням [1])

1 – бункера, 2 – живильники, 3 – конвеєр, 4 – змішувальний барабан, 5 – конвеєр, 6 – чашовий огрудкувач, 7 – бункер, 8 – живильник, 9 – конвеєр, 10 – укладальник, 11 – живильник, 12 – машина зміцнюючо-відновного випалу, 13 – гуркіт.

Після огрудкування окатиші проходять просівання на роликовому ситі з поділом на класи: менш 9,5 мм і більше 9,5 мм. Некондиційна фракція повертається до гранулятора. Кондиційні окатиші рівномірним шаром висотою близько 180 мм укладаються на колосникові ґрати конвеєрної випалювальної машини, поділеної на зони: сушіння, нагрівання, перша та друга зони випалу, охолодження [3].

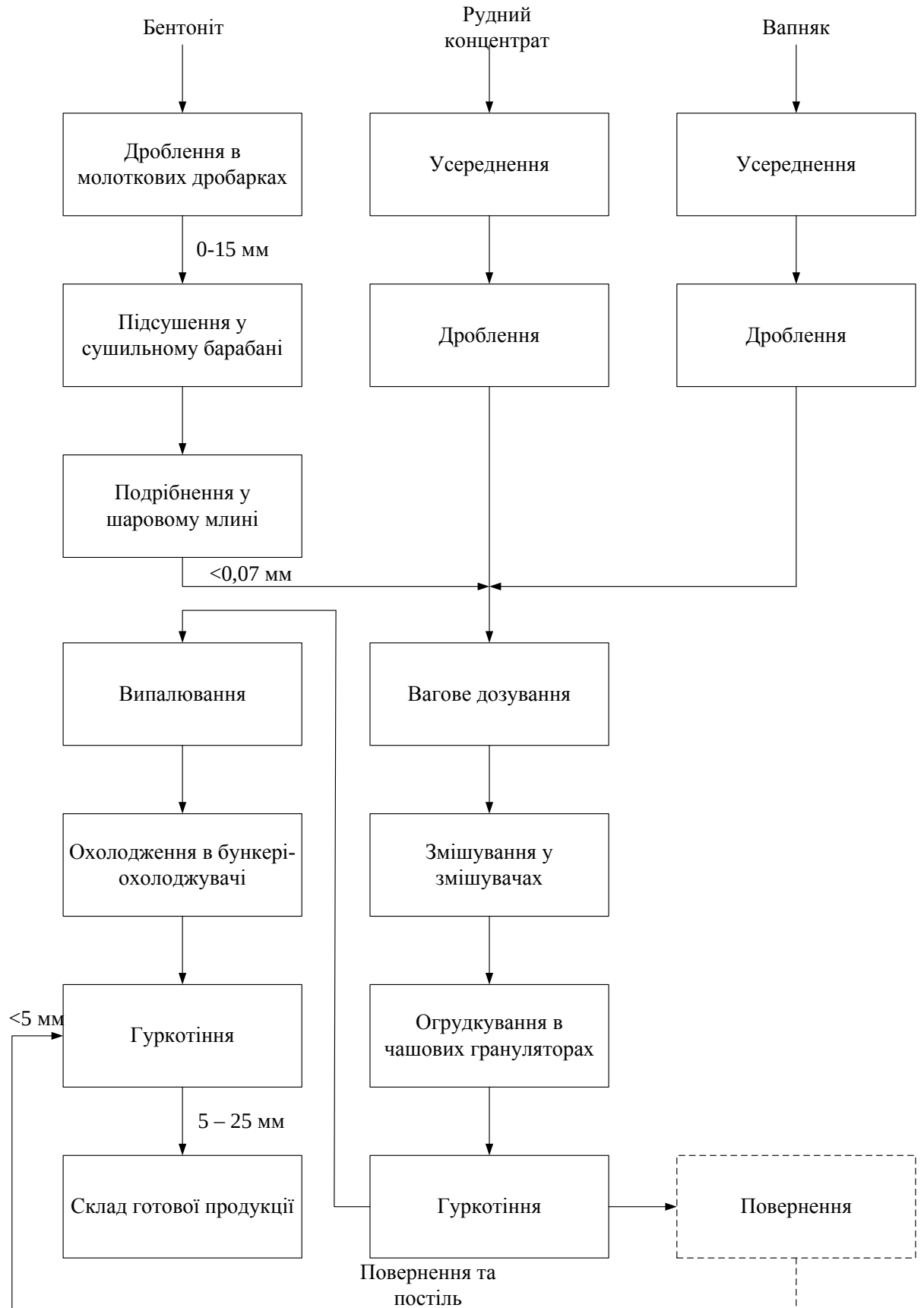


Рис. 1.2. Технологічна схема підготовки сировини й одержання окатишів

(розроблено автором з використанням [1])

Після випалу окатиші охолоджуються у кільцевому охолоджувачі продувом холодного повітря знизу вгору; температура окатишів доводиться до 120 °С. Охолоджені окатиші після сортування транспортуються на склад або відвантажуються споживачам [2].

На рис. 1.3 зображено технологічну схему випалювання окатишів на конвеєрній машині. Процес передбачає послідовне проходження матеріалом кількох робочих ділянок: спочатку зона сушіння (1), далі зона нагрівання (2), потім перший (3) та другий (4) етапи випалу, завершальна зона охолодження (5). Схема також показує рух газових потоків: відпрацьовані гази частково спрямовуються в зону нагрівання (6) та зону сушіння (8), а залишок надходить у димар (9). Для регулювання температурного режиму передбачено підсмоктування атмосферного повітря (7).

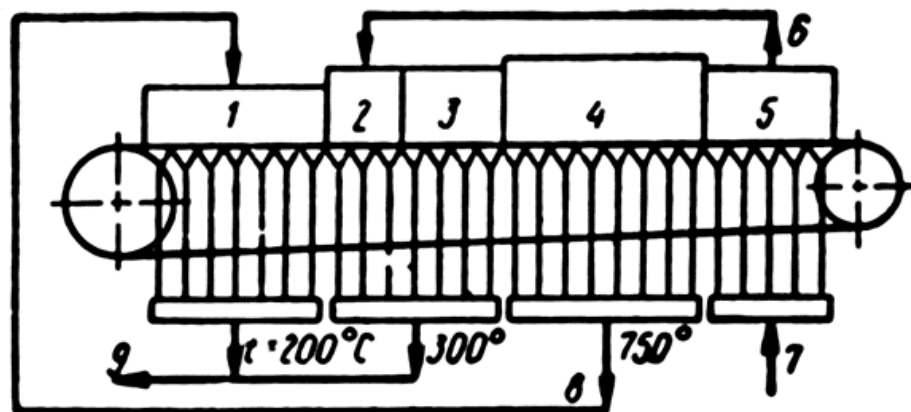


Рис. 1.3. Технологічна схема процесу випалу окатишів на конвеєрній випалювальній машині

(розроблено автором з використанням [2])

Основні технічні параметри конвеєрних випалювальних машин наведено в табл. 1.1.

Технічні характеристики конвеєрних випалювальних машин ЦГЗК [5]

№	Найменування параметра	Од. вим.	ОК-324/336	ОК-108
1	Продуктивність	т/год	259,2	90-110
2	Робоча ширина/довжина	м	4/84	2/54
3	Робоча площа	м ²	336	108
4	Висота шару окатишів	мм	500	320
5	Кількість газоповітряних камер	шт.	27	27
6	Максимальна температура над шаром у зоні випалу	°С	1300	1350
7	Потужність електродвигуна привода машини	кВт	22	20
8	Маса машини	т	2610	1230

1.3 Опис об'єкта автоматизації

Для огрудкування шихти застосовуються барабанні або чашові гранулятори. Робочим органом чашового гранулятора є нахилена до горизонту під кутом 45-55 градусів чаша з плоским днищем, що обертається навколо своєї осі [3]. В обертову чашу безперервно подається шихта, яка у присутності розпиленої води огрудковується та перетворюється на круглі тіла - окатиші. У міру переміщення в чаші окатиші збільшуються в діаметрі, перекочуються через борт у розвантажувальний лоток і надходять на стрічковий конвеєр [3]. (рис. 1.4)

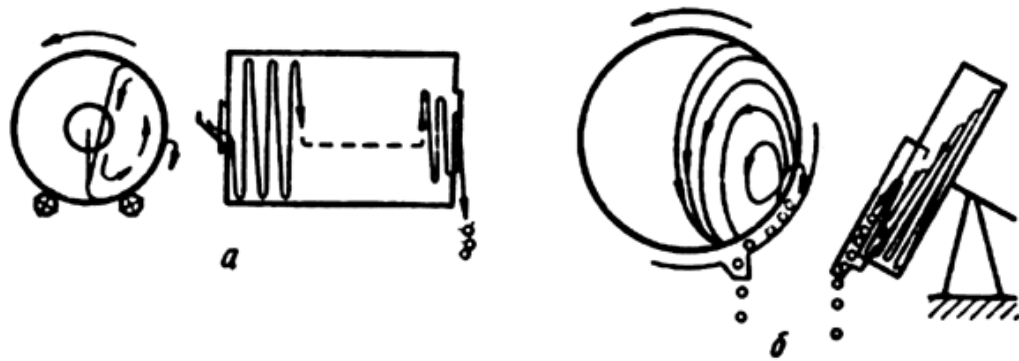


Рис. 1.4. Схеми процесів утворення окатишів у барабанному (а) та чашовому (б) грануляторах
(розроблено автором)

Конструкція чашового гранулятора (рис. 1.5) передбачає наявність чаші, опорного вузла, привода обертання, механізмів нахилу та очищення. Чаша виготовлена зварним способом із двох окремих секцій, які стягуються болтами – це полегшує транспортування. Опорний вузол є жорсткою зварною рамою, всередині якої на підшипниках кочення встановлено вісь. На верхньому хвостовику цієї осі жорстко закріплено чашу, а осьові навантаження передаються на упорні підшипники.

Обертання чаші забезпечує привод, що складається з електродвигуна, муфти, конічно-циліндричного редуктора та тахогенератора. Кут нахилу чаші можна змінювати в межах від 45° до 60° за допомогою спеціального механізму. Для очищення внутрішніх поверхонь від матеріалу, що налипає, призначено один бічний ніж і шість радіальних ножів із регулюванням. Зволоження шихти відбувається через форсунки з індивідуальними трубопроводами. Технічні характеристики гранулятора моделі ОЧ-7000 наведено в табл. 1.2.

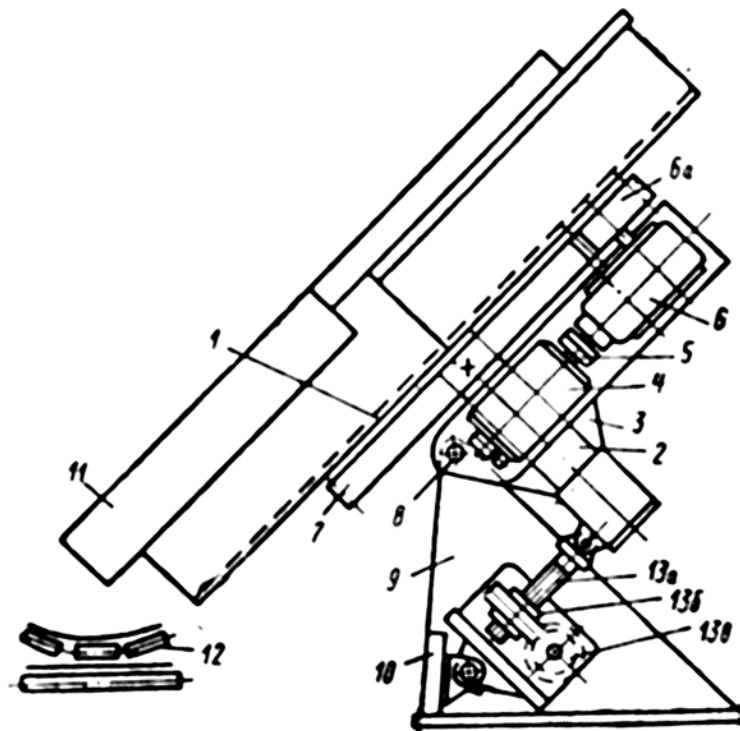


Рис. 1.5. Механізми обертання й нахилу чаші чашового гранулятора
(розроблено автором)

Технічні характеристики чашового огрудкувача ОЧ-7000 наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Технічні характеристики чашового гранулятора типу ОЧ-7000 [3]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Діаметр чаші	мм	7000
2	Висота борта чаші	мм	800
3	Частота обертання чаші	хв^{-1}	4-8
4	Передаточне число редуктора	-	125,2
5	Продуктивність	т/год	80-90
6	Кут нахилу чаші	град.	45-60
7	Потужність ел. двигуна привода обертання чаші	кВт	132
8	Потужність ел. двигуна привода нахилу чаші	кВт	2,2
9	Орієнтовна маса з електроустаткуванням	т	57,2

1.4 Постановка задачі та вимоги до електропривода

Через надмірну зволоженість залізорудних концентратів у відділеннях огрудкування доводиться додавати наднормативну кількість бентоніту для поглинання зайвої вологи, що призводить до зменшення вмісту заліза та зниження якості товарної продукції [3]. Аналіз систем автоматизації фабрик огрудкування показав, що основна увага приділялася стабілізації продуктивності відділення в цілому, тоді як питанням оптимізації гранулоутворення та росту гранул приділялося недостатньо уваги [8]. Тому розробка математичних моделей гранулоутворення та ефективних систем керування є актуальним завданням.

До електропривода чашового гранулятора висуваються такі вимоги [7]:

- мінімальний діапазон керування $D=n_{\max}/n_{\min}=1,5$;
- режим роботи – тривалий;
- час перехідного процесу $t_{\text{пн}} \leq 5\text{с}$;
- необхідність реверса – відсутня;
- характер перехідного процесу – аперіодичний;
- зміна моменту інерції $J=\text{const}$;
- перерегулювання $\delta \leq 0.5\%$
- забезпечення електричного гальмування.

1.5 Обґрунтування та вибір системи електропривода

Принципову схему керування електроприводом чашового гранулятора наведено на рис. 1.6.

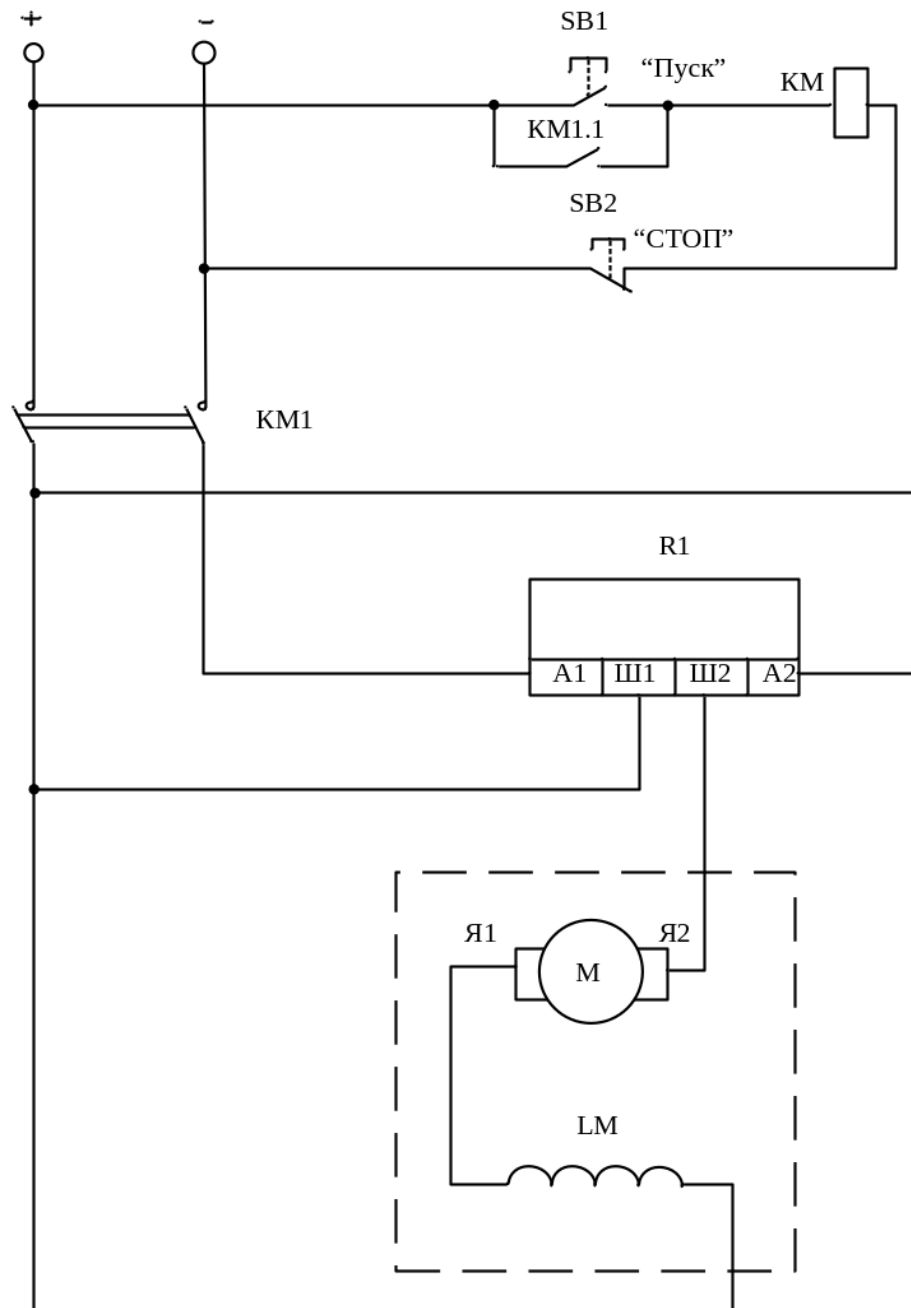


**Рис. 1.6. Принципова схема керування електроприводом чашового
гранулятора**
(розроблено автором)

Нині у зв'язку з розвитком мікропроцесорної техніки та різким здешевленням статичних перетворювачів частоти з'явилася реальна альтернатива - система перетворювач частоти - асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (ПЧ-АД) [7]. Аналіз продукції провідних світових виробників систем привода дозволяє відзначити: неухильно знижується частка систем із двигунами постійного струму й збільшується частка систем із двигунами змінного струму. Це пов'язано з низькою надійністю механічного колектора та більш високою вартістю колекторних двигунів [9].

Порівняно з двигуном постійного струму асинхронний двигун при однакових потужності та номінальній кутовій швидкості у 1,5-2 рази легший, момент інерції його ротора більш ніж у 2 рази менший, а вартість суттєво нижча - приблизно у 3 рази [9]. Відмінною особливістю сучасного регульованого привода є наявність [7]: простого і надійного асинхронного двигуна, мінімізованого за масогабаритними, вартісними та енергетичними показниками; перетворювача частоти з ланкою постійного струму на базі IGBT-модулів із ШІМ; датчиків електричних, механічних та технологічних параметрів; мікропроцесорної системи управління з функціями діагностики, захисту та взаємодії з іншими приводами.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Розрахунок потужності та вибір двигуна чашового гранулятора

Розрахунок потужності привода виконується на підставі технічних характеристик чашового гранулятора ОЧ-7000 (табл. 1.2). Момент, необхідний для обертання чаші:

$$M = M_{\text{тр}} + M_{\text{оп}} + M_{\text{м}} \quad (2.1)$$

де $M_{\text{тр}}$ - момент від тертя в опорах чаші, Н·м;

$M_{\text{оп}}$ - момент опору від зрізання гарнісажу на днищі й бортах чаші, Н·м;

$M_{\text{м}}$ - момент від зсуву матеріалу щодо вертикальної осі чаші при її обертанні, Н·м.

Сучасні чашові гранулятори встановлюються на підшипниках кочення, тому тертя в опорах зводиться до мінімуму: $M_{\text{тр}} = 0$. Момент опору від зрізання гарнісажу:

$$M_{\text{оп}} = M'_{\text{оп}} + M''_{\text{оп}} \quad (2.2)$$

де $M'_{\text{оп}}$ - момент від зрізання гарнісажу з днища чаші;

$M''_{\text{оп}}$ - момент від зрізання гарнісажу бортовим ножом.

Зусилля опору зрізанню одним різцем:

$$W = F_{\text{ср}} \times q_{\text{р}} = b_{\text{р}} \times l_{\text{р}} \times q_{\text{р}} \quad (2.3)$$

де $F_{\text{ср}} = b_{\text{р}} \times l_{\text{р}}$ - площа зрізання одним різцем, м²;

$b_{\text{р}} = 0,005$ м - глибина різання; $l_{\text{р}} = 0,3$ м - довжина крайки різця;

$q_{\text{р}} = 25 \cdot 10^4$ Н/м² - питомий опір зрізанню для дрібної руди та концентрату.

$$W = 0,005 \times 0,3 \times 25 \cdot 10^4 = 375 \text{ Н} \quad (2.4)$$

Відстані різців від осі: $z_1 = R/3 = 3,5/3 = 1,167 \text{ м}$; $z_2 = R/2 = 3,5/2 = 1,750 \text{ м}$ ($k = 2$ різці). Момент опору від зрізання гарнісажу з днища чаші:

$$M'_{\text{оп}} = k \times W \times (z_1 + z_2) = 2 \times 375 \times (1,167 + 1,750) = 2188 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.5)$$

Момент від зрізання гарнісажу бортовим ножом:

$$M''_{\text{оп}} = W \times R = 375 \times 3,5 = 1312 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.6)$$

$$M_{\text{оп}} = 2188 + 1312 = 3500 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.7)$$

Матеріал у чаші розташовується у вигляді «копита», обмеженого циліндричним бортом, плоским днищем і площиною, нахиленою під кутом природного укосу шихтового матеріалу. Маса матеріалу в чаші:

$$Q = \varphi \times \pi \times R^2 \times H \times \rho_{\text{н}} \quad (2.8)$$

де $\varphi = 0,35$ - коефіцієнт заповнення чаші (типовий для чашових грануляторів у виробництві залізорудних окатишів);

$H = 0,8 \text{ м}$ - висота борта чаші;

$\rho_{\text{н}} = 1900 \text{ кг/м}^3$ - насипна щільність вологого залізорудного концентрату (вологість 9-10 %).

$$Q = 0,35 \times 3,14 \times 3,5^2 \times 0,8 \times 1900 = 20\,474 \text{ кг} \quad (2.9)$$

Коефіцієнт, що враховує зміну кількості матеріалу в чаші залежно від швидкості обертання ($n = 8 \text{ хв}^{-1}$):

$$k = 50/n^2 = 50/8^2 = 0,781$$

Кут підйому центру ваги матеріалу ($f = 0,50$ - коефіцієнт тертя вологого концентрату об днище чаші):

$$\beta = \arctan(f) = \arctan(0,50) = 26,6^\circ \quad (2.11)$$

Зсув центру ваги матеріалу від осі обертання чаші:

$$A = (4R)/(3\pi) \times \sin\beta = (4 \times 3,5)/(3 \times 3,14) \times \sin(26,6^\circ) = 0,664 \text{ м} \quad (2.12)$$

Момент від зсуву матеріалу щодо осі обертання чаші:

$$M_m = k \times Q \times g \times A = 0,781 \times 20474 \times 9,81 \times 0,664 = 104\,150 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.13)$$

Підставивши отримані значення у формулу (2.1), визначаємо сумарний момент:

$$M = M_{оп} + M_m = 3500 + 104150 = 107\,650 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.14)$$

Кутова швидкість чаші при максимальній частоті обертання $n = 8 \text{ хв}^{-1}$:

$$\omega = \pi \times n / 30 = 3,14 \times 8 / 30 = 0,838 \text{ рад/с} \quad (2.15)$$

Потужність приводного електродвигуна ($\eta = 0,88$ - загальний ккд редуктора та муфти):

$$P = M \times \omega / \eta = 107650 \times 0,838 / 0,88 = 102\,500 \text{ Вт} = 102,5 \text{ кВт} \quad (2.16)$$

Потужність з урахуванням коефіцієнта запасу $k_{зап} = 1,2$ (для важких умов пуску під навантаженням):

$$P_{розр} = k_{зап} \times P = 1,2 \times 102500 = 123\,000 \text{ Вт} = 123,0 \text{ кВт} \quad (2.17)$$

Умова вибору двигуна: $P_n \geq P_{розр} = 123,0 \text{ кВт}$. Зі стандартного ряду потужностей асинхронних двигунів за МЕК 60072 найближча менша потужність становить 110 кВт, що не задовольняє умові ($110 \text{ кВт} < 123,0 \text{ кВт}$). Тому обирається наступна стандартна потужність - 132 кВт [26].

За результатами розрахунків обрано асинхронний електродвигун змінного струму з короткозамкненим ротором Siemens 1LE1604-2DC23-4AA4 (Siemens AG, Ерланген, Німеччина), клас енергоефективності IE3 [26]. Технічні параметри двигуна наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Параметри двигуна Siemens 1LE1604-2DC23-4AA4 [26]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	2	3	4
1	Тип	-	1LE1604-2DC23-4AA4
2	Виробник	-	Siemens AG, Ерланген, Німеччина
3	Потужність	кВт	132
4	Номінальна напруга статора	В	380
5	ККД (клас IE3)	%	95,4

1	2	3	4
6	Номінальна швидкість обертання	об/хв	1485
7	Номінальний струм статора	А	233,58
8	Момент інерції ротора	кг·м ²	1,9
9	Коефіцієнт потужності cosφ	в.о.	0,9
10	Кратність пускового моменту Мп/Мн	в.о.	2,2
11	Кратність максимального моменту Мmax/Мн	в.о.	3,4
12	Кратність пускового струму Іп/Ін	в.о.	8,0
13	Ступінь захисту	ІР	55

2.2 Режим роботи та вимоги до електропривода гранулятора

При проєктуванні системи автоматичного керування електроприводами враховуються вимоги з боку механізму за технічними та економічними критеріями [7]: ккд, cosφ, надійність, вартість, витрати на обслуговування, вартість компенсації реактивної потужності, діапазон регулювання, швидкодія, статична та динамічна похибки, перерегулювання, плавність пуску та гальмування, обмеження динамічних навантажень.

До специфічних вимог електропривода гранулятора відносять [10]: мінімальний час протікання перехідних процесів при заданих значеннях максимуму динамічного струму; регулювання швидкості залежно від фактичної продуктивності; висока перевантажувальна здатність приводного двигуна; обмеження динамічних зусиль на елементи механізму; висока надійність системи електропривода.

2.3 Вибір системи керування

Аналіз існуючих способів регулювання кутової швидкості двигуна змінного струму показав таке [11]. Зміна числа пар полюсів забезпечує лише ступінчасте регулювання. Реостатне регулювання характеризується значними втратами: при вдвічі зниженій швидкості половина споживаної потужності втрачається на резисторах. Регулювання зміною напруги знижує жорсткість механічних характеристик, ккд і $\cos\phi$. Перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму (ТПЧ) найповніше задовольняють вимогам: забезпечуються плавне регулювання швидкості у широкому діапазоні, необхідна жорсткість характеристик, вихідна частота до 400 Гц з кроком 0,01 Гц, ПД-регулятор для стабілізації технологічних параметрів [11].

Як перетворювач частоти обрано FR-A740-03610-ЕС виробництва Mitsubishi Electric (Японія). Перетворювачі серії FR-A700 оснащені програмованими контролерами; вбудований контролер веде розрахунок оптимальних параметрів магнітного потоку в режимі реального часу [7]. Технічні параметри перетворювача наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Технічні дані перетворювача частоти FR-A740-03610-ЕС [18]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	2	3	4
1	Виробник	-	Mitsubishi Electric, Японія
2	Тип перетворювача	-	FR-A740-03610-ЕС
3	Маса	кг	72
4	Діапазон вихідних частот	Гц	0,2-400

1	2	3	4
5	Максимально можлива потужність двигуна	кВт	137
6	Номінальний струм	А	361
7	Діапазон регулювання швидкості	в.о.	1:100
8	Напруга живлення	В	380-460, 3-фазна
9	Частота ШІМ	кГц	12-16

Зовнішній вигляд перетворювача FR-A740-03610-ЕС наведено на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Зовнішній вигляд перетворювача серії FR-A700 [18]

2.4 Система ЕП ПЧ-АД із частотно-струмовим керуванням

Силова частина схеми включає керований випрямляч постійного струму із СІФУ AU1 та автономний інвертор струму із СІФУ AU2, від якого живиться асинхронний двигун з КЗ-ротором [12]. Система керування виконана у вигляді

L_2 - індуктивність фазних обмоток ротора;

r_p - число пар полюсів машини;

K_p - коефіцієнт зворотного зв'язку по потоці;

K_{ω} - коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості;

K_{sx} - коефіцієнт зворотного зв'язку по проекції на вісь X струму статора (активної складової струму);

K_{sy} - коефіцієнт зворотного зв'язку по проекції на вісь Y струму статора (реактивної складової струму);

$K_{пч}$ - коефіцієнт підсилення перетворювача частоти;

T_p - постійна часу перетворювача частоти;

$W_{рсx}(p)$ - передатна функція регулятора активної складової струму статора;

$W_{рс}(p)$ - передатна функція регулятора реактивної складової струму статора;

$W_{рш}(p)$ - передатна функція регулятора швидкості.

2.5 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

На підставі каталожних даних двигуна Siemens 1LE1604-2DC23-4AA4 визначено такі розрахункові параметри [13]: номінальна частота обертання ротора $\omega_n = 155,509$ рад/с; номінальний момент $M_n = 848,83$ Н·м; пусковий момент $M_p = 1867,42$ Н·м; критичний момент $M_{кр} = 2886,01$ Н·м; номінальне ковзання $s_n = 0,01$; критичне ковзання $s_{кр} = 0,07065$; активний опір статора $R_s = 0,011243$ Ом; активний опір ротора $R_r = 0,010055$ Ом; реактивний опір статора $X_s = 0,059584$ Ом; реактивний опір ротора $X_r = 0,082283$ Ом; опір взаємоіндукції $X_m = 3,093878$ Ом; повна індуктивність статора $L_s = 0,010038$ Гн; коефіцієнт розсіювання машини $\sigma = 0,044312$ в.о.

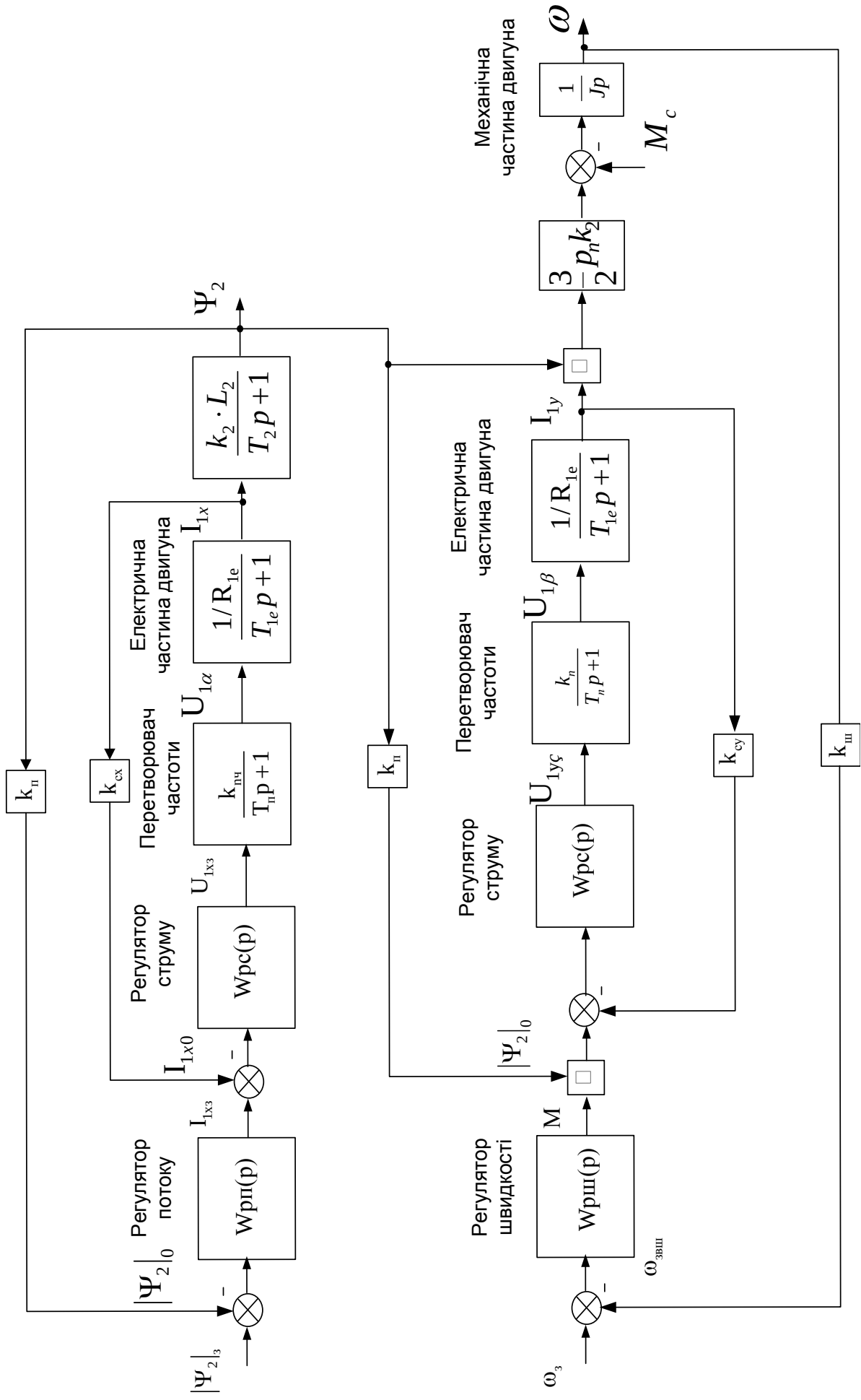


Рис. 2.3. Структурна схема системи ПЧ-АД з векторною системою керування

(розроблено автором)

Для розрахунків використовується Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна (рис. 2.4), у якій R_s і X_s - активний та реактивний опори статора; R_r і X_r - активний та реактивний опори ротора, приведені до статора; X_m - реактивний опір намагнічування.

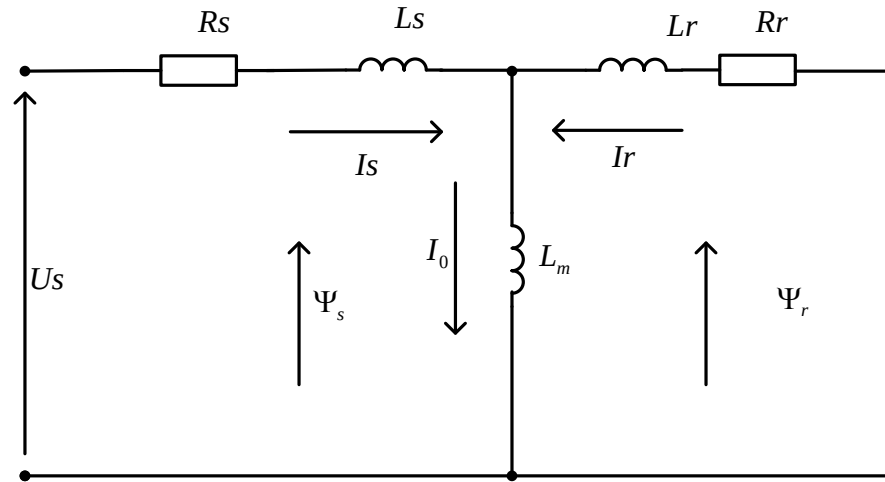


Рис. 2.4. Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна
(розроблено автором)

Для моделювання прийнято момент інерції механізму, приведений до валу двигуна, $J_{\text{мех}} = 15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Сумарний момент інерції системи:

$$J = J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}} = 1,9 + 15 = 16,9 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.18)$$

2.6 Розрахунок базисних значень

Розрахунок виконано у Mathcad Professional 14.0. Вхідні параметри двигуна: $\omega_n = 155,509 \text{ рад/с}$; $M_n = 848,83 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $I_n = 233,58 \text{ А}$; $s_n = 0,01$; $R_s = 0,011243 \text{ Ом}$; $R_r = 0,010055 \text{ Ом}$; $L_m = 0,009848 \text{ Гн}$; $L_s = 0,010038 \text{ Гн}$; $L_r = 0,010110 \text{ Гн}$; $\sigma = 0,044312$; $J_{\text{дв}} = 1,9 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $U_c = 380 \text{ В}$; $\cos\phi = 0,9$; $\sin\phi = 0,436$; $f_{\text{сн}} = 50 \text{ Гц}$; $p_n = 2$; $P_n = 132 \text{ 000 Вт}$; $U_{\text{нз}} = 10 \text{ В}$.

Базисна напруга фази (амплітудне значення):

$$U_{\delta} = \sqrt{2} \times U_c / \sqrt{3} = \sqrt{2} \times 380 / \sqrt{3} = 310,269 \text{ В} \quad (2.19)$$

Базисний струм:

$$I_{\delta} = \sqrt{2} \times I_H = \sqrt{2} \times 233,58 = 330,332 \text{ А} \quad (2.20)$$

Проекція струму статора на вісь d (намагнічуючий струм):

$$I_d = I_{\delta} \times \sqrt{((R_s \cdot \sin \varphi - X_s \cdot \cos \varphi)^2 + X_m^2)} / X_m \quad (2.21)$$

$$I_d = 330,332 \times \sqrt{((0,011243 \times 0,436 - 0,059584 \times 0,9)^2 + 3,093878^2)} / 3,093878 = 96,633 \text{ А} \quad (2.22)$$

Округлюємо намагнічуючий струм до 3 значущих цифр: $I_d = 96,6 \text{ А}$.

Струм осі q при критичному моменті:

$$I_{qkr} = I_q \times M_{kr} / M_H = 387,247 \times 2886,01 / 848,83 = 1317 \text{ А} \quad (2.23)$$

Базисна кутова швидкість:

$$\omega_{\delta} = 2\pi \times f_{сн} = 2 \times 3,14159 \times 50 = 314,159 \text{ рад/с} \quad (2.24)$$

Базисна кутова швидкість ротора:

$$\omega_{r\delta} = \omega_{\delta} / p_n = 314,159 / 2 = 157,080 \text{ рад/с} \quad (2.25)$$

Базисний момент:

$$\begin{aligned} M_{\delta} &= (M_{kr} / M_H) \times P_H / \omega_{r\delta} = \\ &= (2886,01 / 848,83) \times 132\,000 / 157,080 = 2857,1 \text{ Н}\cdot\text{м} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Номінальне потокозчеплення ротора:

$$\Psi = L_m \times I_d = 0,009848 \times 96,633 = 0,952 \text{ Вб} \quad (2.27)$$

2.7 Розрахунок регуляторів

2.7.1 Розрахунок регулятора струму

Передатна функція об'єкта керування «перетворювач - обмотка статора»:

$$W_{об}(p) = K_{пч} / (T_{п} \times p + 1) \times (1/R) / (T \times p + 1) \quad (2.28)$$

Коефіцієнт зв'язку обмоток:

$$K_r = L_m / L_r = 0,009848 / 0,010110 = 0,974 \quad (2.29)$$

Сумарний активний опір фази двигуна:

$$R = R_s + K_r^2 \times R_r = 0,011243 + 0,974^2 \times 0,010055 = 0,02078 \text{ Ом} \quad (2.30)$$

Розімкнена ПФ контуру струму (настроювання на МО, $a = 2$):

$$W_{роз}(p) = (1/K_c) / (a \times T \times p \times (T_{п} \times p + 1)) \quad (2.31)$$

Стала часу регулятора струму:

$$T_i = K_c \times 2 \times T \times K_{пч} / R \quad (2.32)$$

Передатна функція ПІ-регулятора струму:

$$W_{pc}(p) = (T_{\pi} \times p + 1) / (T_i \times p)$$

Постійна часу обмотки статора:

$$T_{\pi} = \sigma \times L_s / R = 0,044312 \times 0,010038 / 0,020784 = 0,02140 \text{ с} \quad (2.34)$$

Перевірка через постійну часу ротора:

$$T_r = L_r / R_r = 0,010110 / 0,010055 = 1,005 \text{ с} \quad (2.35)$$

Коефіцієнт датчика потокозчеплення:

$$K_{\pi} = U_{H3} / \Psi = 10 / 0,9516 = 10,508 \text{ В/Вб} \quad (2.36)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку по намагнічуючому струму (I_d):

$$K_{c1} = U_{H3} / I_d = 10 / 96,6 = 0,1035 \text{ В/А} \quad (2.37)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку по струму моменту (I_{qkr}):

$$K_{c2} = U_{H3} / I_{qkr} = 10 / 1317 = 0,007595 \text{ В/А} \quad (2.38)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості:

$$K_{\omega} = U_{H3} / \omega_{r6} = 10 / 157,080 = 0,06366 \text{ В} \cdot \text{с/рад} \quad (2.39)$$

Коефіцієнт підсилення ШІМ-перетворювача:

$$K_{пч} = U_6 / U_{H3} = 310,269 / 10 = 31,027 \quad (2.40)$$

Стала часу регулятора струму (канал d - намагнічуючий струм):

$$\begin{aligned} T_{i1} &= K_{c1} \times 2 \times T_{\Pi} \times K_{\Pi\chi} / R = \\ &= 0,1035 \times 2 \times 0,02140 \times 31,027 / 0,020784 = 0,309 \text{ с} \end{aligned} \quad (2.41)$$

Передатна функція регулятора струму (канал d):

$$W_{pc1}(p) = (T_{\Pi} \times p + 1) / (T_{i1} \times p) = (0,0214 \times p + 1) / (0,309 \times p) \quad (2.42)$$

Стала часу регулятора струму (канал q - струм моменту):

$$\begin{aligned} T_{i2} &= K_{c2} \times 2 \times T_{\Pi} \times K_{\Pi\chi} / R = \\ &= 0,007595 \times 2 \times 0,02140 \times 31,027 / 0,020784 = 0,02268 \text{ с} \end{aligned} \quad (2.43)$$

Передатна функція регулятора струму (канал q):

$$W_{pc2}(p) = (T_{\Pi} \times p + 1) / (T_{i2} \times p) = (0,0214 \times p + 1) / (0,02268 \times p) \quad (2.44)$$

2.7.2 Розрахунок регулятора потоку

Передатна функція об'єкта контуру потоку (настроювання на МО, $a = 2$, $T = 0,002 \text{ с}$):

$$W_{обп}(p) = I_d(p) \times (K_r \times L_r) / (T \times p + 1) \quad (2.45)$$

Стала часу регулятора потоку:

$$\begin{aligned} T_{i\pi} &= K_{\Pi} \times 4 \times T \times L_m / K_{c1} = \\ &= 10,508 \times 4 \times 0,001 \times 0,009848 / 0,1035 = 0,003999 \text{ с} \end{aligned} \quad (2.46)$$

Передатна функція регулятора потоку:

$$W_{rp}(p) = (T \times p + 1) / (T_{ip} \times p) = (1,01 \times p + 1) / (0,004 \times p) \quad (2.47)$$

2.7.3 Розрахунок регулятора швидкості

Коефіцієнт підсилення регулятора швидкості (П-регулятор):

$$W_{рш} = (K_{п} \times K_{с2} \times J) / (3 \times p_n \times K_r \times 2 \times T \times K_{ш}) \quad (2.48)$$

$$W_{рш} = (10,508 \times 0,007595 \times 16,9) / (3 \times 2 \times 0,974 \times 2 \times 0,001 \times 0,06366) = 1812,6 \quad (2.49)$$

Передатна функція регулятора швидкості (П-регулятор):

$$W_{рш}(p) = 1812,6 \quad (2.50)$$

2.7.4 Розрахунок регулятора продуктивності

Максимальна продуктивність гранулятора: $Q_{\max} = 90 \text{ т/год} = 25,0 \text{ кг/с}$.

Постійна часу еквівалентного контуру швидкості:

$$T_{кп} = 4 \times T = 4 \times 0,001 = 0,004 \text{ с} \quad (2.51)$$

Передатна функція замкненого контуру швидкості (другого порядку):

$$W_{кш}(p) = 1 / (2 \times T_{кп} \times p \times (2 \times T_{кп} \times p + 1)) \quad (2.52)$$

Коефіцієнт об'єкта (гранулятор):

$$K_{об} = Q_{max} / \omega_{гб} = 25,0 / 157,080 = 0,1592 \text{ кг/(с} \cdot \text{рад/с)} \quad (2.53)$$

Передатна функція регулятора продуктивності (ПІ, $T_{об} = 0,32 \text{ с}$):

$$\begin{aligned} W_{pQ}(p) &= (T_{об} \times p + 1) \times K_{ш} / (2 \times T_{кп} \times p \times K_{об}) = \\ &= (0,0204 \times p + 0,0637) / (0,00127 \times p) \end{aligned} \quad (2.54)$$

Коефіцієнт датчика продуктивності:

$$K_{дпр} = U_{zmax} / Q_{max} = 10 / 25 = 0,4 \text{ В} \cdot \text{с/кг} \quad (2.55)$$

Зведені результати розрахунку параметрів системи керування наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Результати розрахунку параметрів системи керування

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
1	2	3	4
Базисна напруга	$U_{б}$	310,269	В
Базисний струм	$I_{б}$	330,332	А
Намагнічуючий струм	I_d	96,6	А
Струм моменту	I_q	387,247	А
Струм I_q при $M_{кр}$	$I_{qкр}$	1317	А
Баз. кутова швидкість ротора	$\omega_{гб}$	157,080	рад/с
Базисний момент	$M_{б}$	2857,1	Н·м
Потокозчеплення ротора	Ψ	0,952	Вб

Коефіцієнт зв'язку	K _г	0,974	-
Сумарний опір фази	R	0,02078	Ом
Стала часу обмотки статора	T _п	0,02140	с
Коеф. 33 по I _d	K _{с1}	0,1035	В/А
Коеф. 33 по I _{qкр}	K _{с2}	0,007595	В/А
Коеф. 33 по швидкості	K _ш	0,06366	В·с/рад
Коеф. підсилення ШІМ-перетворювача	K _{пч}	31,027	-
Коеф. датчика потоку	K _п	10,508	В/Вб
Стала часу регулятора струму (канал d)	T _{i1}	0,309	с
Стала часу регулятора струму (канал q)	T _{i2}	0,02268	с
Стала часу регулятора потоку	T _{іп}	0,003999	с
Коеф. підсилення регулятора швидкості	W _{рш}	1812,6	-
Стала часу контуру швидкості	T _{кп}	0,004	с
Постійна часу об'єкта	T _{об}	0,32	с
Коеф. об'єкта продуктивності	K _{об}	0,1592	кг/(с·рад/с)
Коеф. датчика продуктивності	K _{дпр}	0,4	В·с/кг

40
Модель векторної системи керування наведено на рис. 2.5.

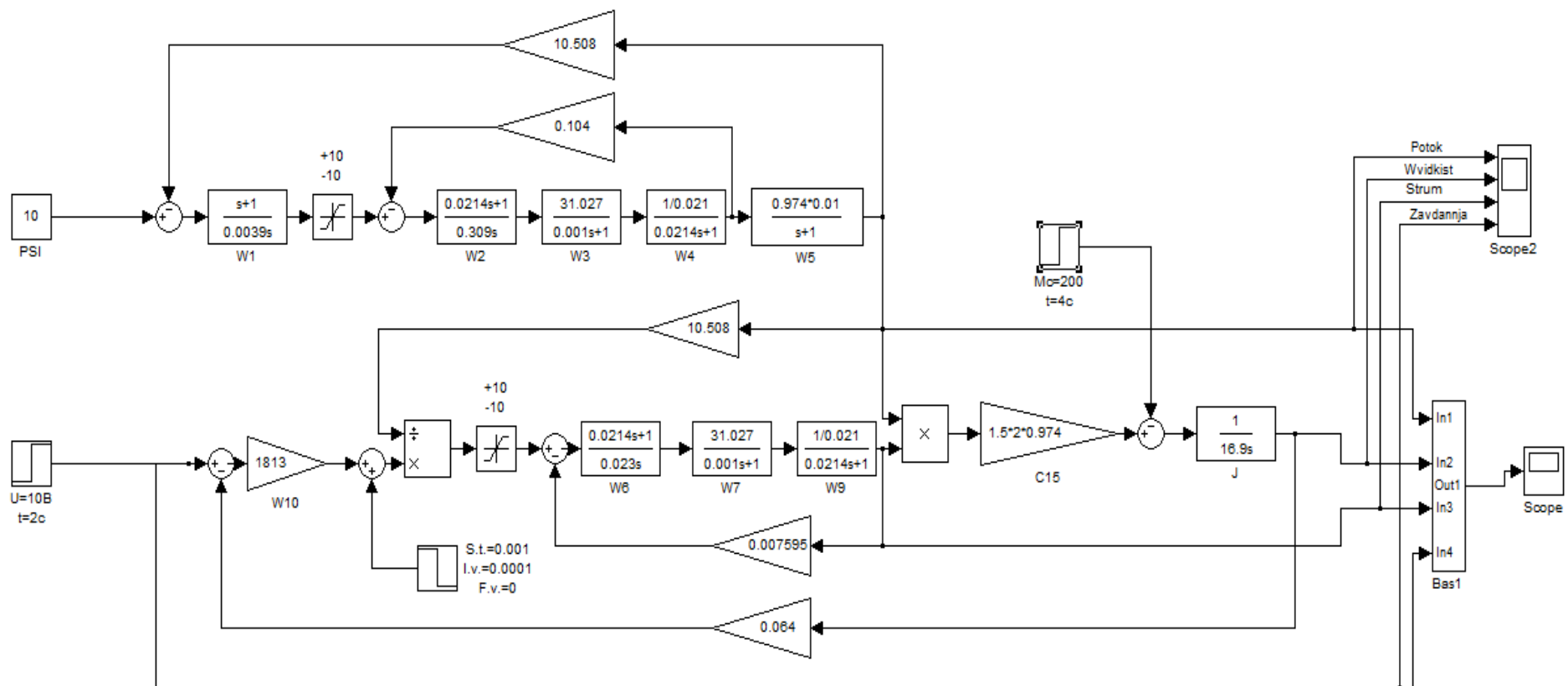


Рис. 2.5. Модель векторної системи керування
(розроблено автором)

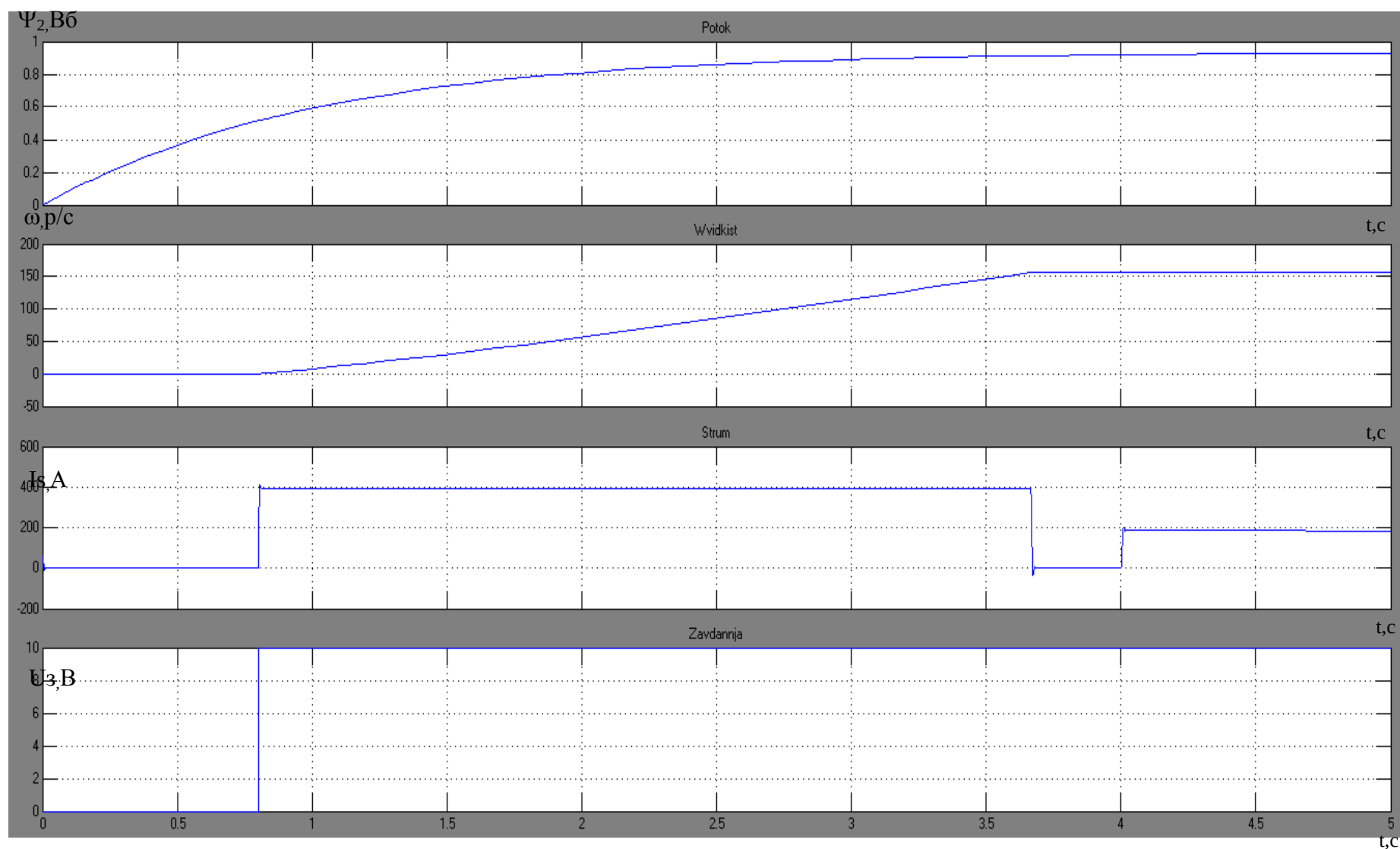


Рис. 2.6. Графіки перехідних процесів при пуску двигуна
(розроблено автором)

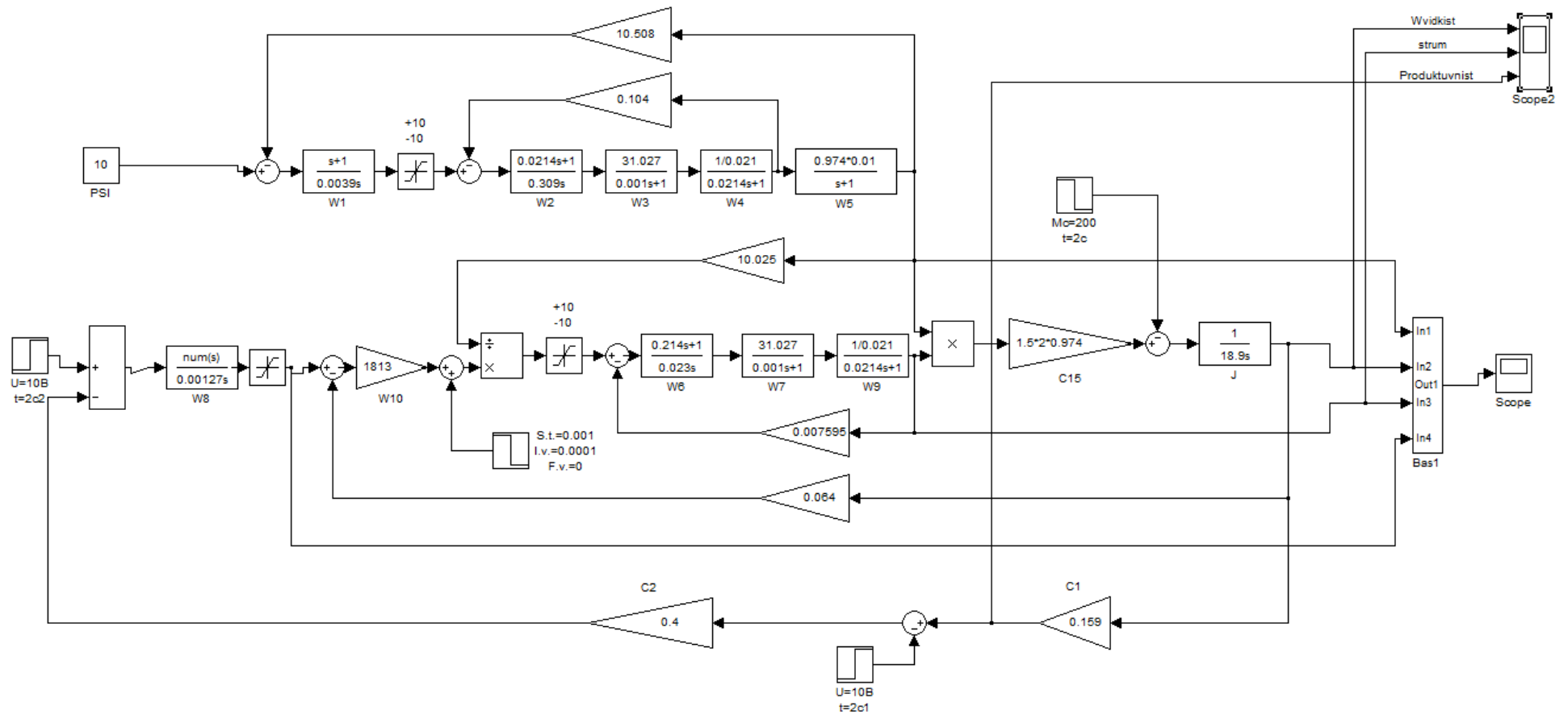


Рис. 2.7. Структурна схема моделі з урахуванням контуру продуктивності конвеєра
(розроблено автором)

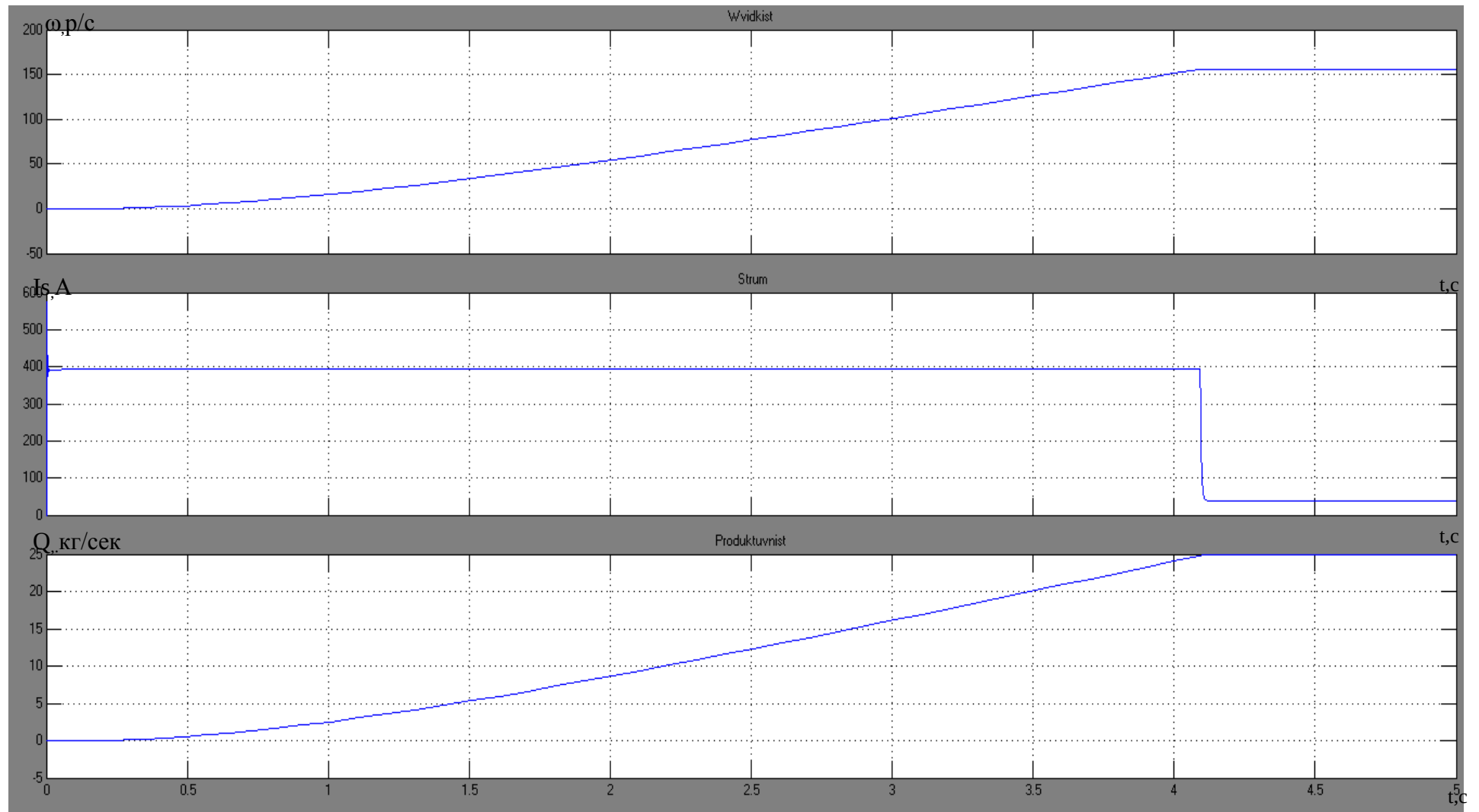


Рис. 2.8. Графіки перехідних процесів по швидкості, струму та продуктивності
(розроблено автором)

Було проведено моделювання роботи системи керування електроприводом. Отримані в результаті графіки перехідних процесів наведено на рис.2.6. У складі системи наявний перетворювач частоти з векторним алгоритмом керування. Пуск відбувається в два етапи: спершу на вхід системи надходить номінальне завдання за потокозчепленням, а після досягнення потокозчепленням необхідного рівня подається завдання за швидкістю – лише тоді механізм починає рухатися. Пусковий струм у даній системі не перевищує $2I_n$. Для порівняння: у разі прямого пуску (без перетворювача частоти) струм сягав би 5-6 I_n . Величина перерегулювання за струмом становить 4,3%, що характерно для системи, налаштованої на модульний оптимум. На час $t = 4$ с було змодельовано стрибкоподібну зміну моменту навантаження двигуна до значення $M_c = 500$ Н·м. Це призвело до зростання струму до 200 А, однак просадки швидкості не відбулося – отже, система є астатичною за моментом навантаження.

З рис. 2.8 видно: при заданні на регулятор продуктивності $U_z = 10$ В через 4 с продуктивність встановилась на рівні 25 кг/с, що відповідає максимальній (90 т/год). Таким чином, регулятор продуктивності діє згідно розрахунків.

2.9 АСУ ТП огрудкування

АСУ ТП огрудкування виконує такі основні функції [14, 17]. Інформаційні: контроль і вимір складу компонентів шихти; кількості та рівня матеріалів у бункерах; витрат компонентів шихти; вологості шихти; швидкості обертання й кута нахилу чашового гранулятора; витрати води на зволоження шихти; розмірів сирих окатишів; температури в горнах; тиску у зонах та трубопроводах; швидкості руху випалювальних візків; складу димових газів; розрахунок техніко-економічних показників. Керуючі: регулювання витрати компонентів шихти; швидкості обертання чашового гранулятора; витрати води

на зволоження; температури в горнах; співвідношення паливо/повітря; тиску у зонах; швидкості руху візків.

2.10 Розробка АСК чашовим гранулятором

Робота чашового гранулятора визначається кутом нахилу до горизонту та швидкістю обертання. При верхній критичній швидкості відцентрова сила притискає шихту до бортів чаші й огрудкування не відбувається. При нижній критичній швидкості шихта не захоплюється чашею - процес також припиняється [14]. Підтримання оптимальної вологості шихти досягається подачею води безпосередньо в зону огрудкування: на чашу подають шихту з вологістю, нижчою від оптимальної на 1-2 %, та воду, що утворює ділянки місцевого перезволоження - центри утворення окатишів [14]. Залежність між розмірами та міцністю сирих окатишів і параметрами роботи гранулятора носить екстремальний характер; тому в системі керування застосовується екстремальне регулювання. Сигнали вимірювання: вологість шихти; масова витрата шихти; витрата води на бризкалка й форсунки; крупність окатишів; швидкість та струм привода; кут нахилу гранулятора. Сигнали керування: продуктивність живильника; витрата води; швидкість гранулятора; кут нахилу гранулятора (рис. 2.9).

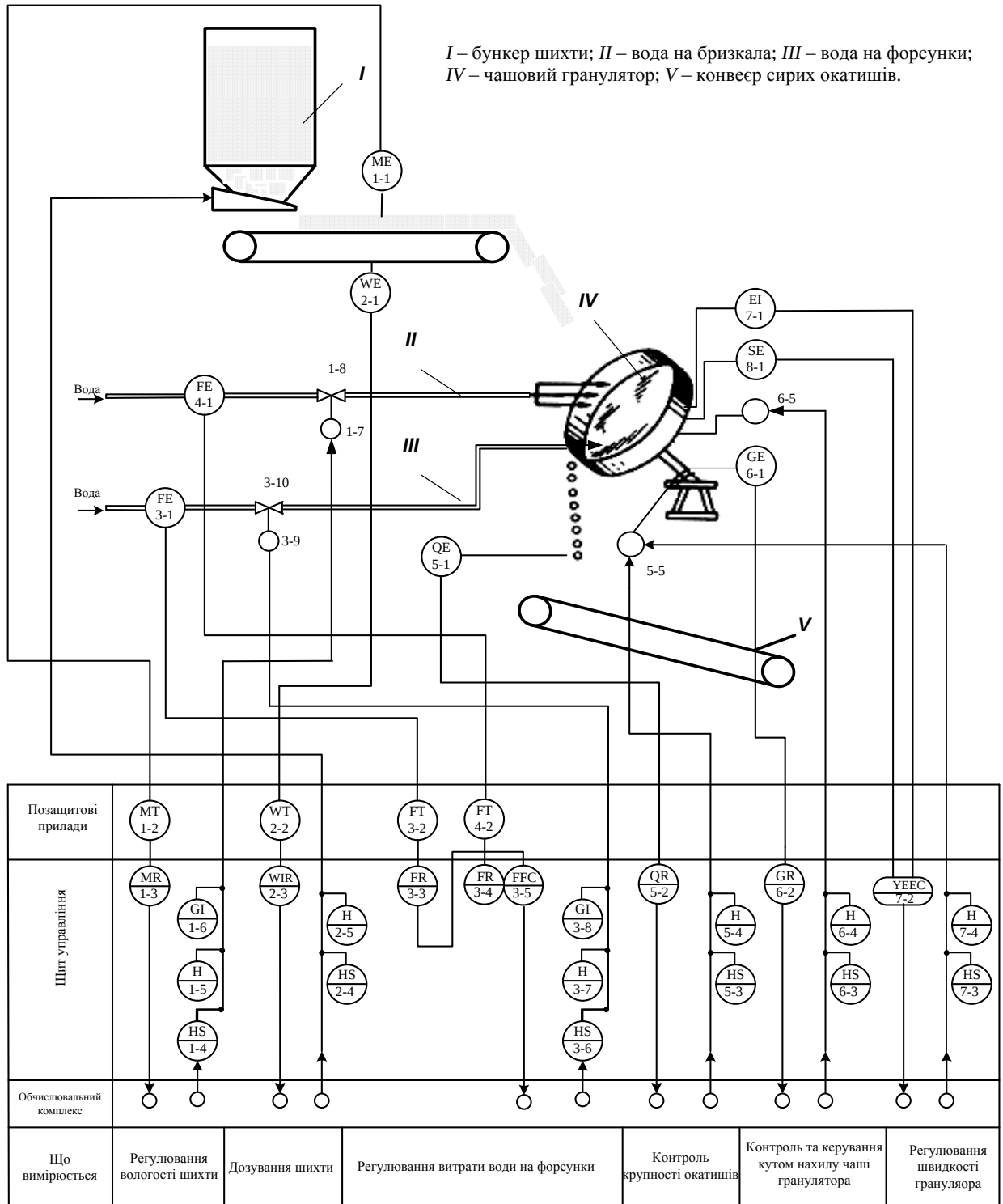


Рис. 2.9. Функціональна схема автоматичного керування гранулятором
 (розроблено автором)

2.11 Вибір технічних засобів автоматизації

Засоби вимірювальної техніки, якими оснащено гранулятор, морально й фізично застаріли та потребують заміни. В рамках даного проекту передбачається оснащення гранулятора новими приладами й засобами автоматизації від провідних українських та закордонних виробників.

2.11.1 Аналіз вхідних-вихідних сигналів системи

Необхідна кількість аналогових вхідних сигналів контролера наведена в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Необхідна кількість вхідних аналогових сигналів контролера

№	Найменування параметрів	Кіл-ть	Джерело сигналу	Діапазон	Сигнал, мА
1	2	3	4	5	6
1	Витрата шихти в гранулятор	1	Терези конвеєрні	0-90 т/год	4-20
2	Вологість шихти	2	Датчик вологості	0-10 %	4-20
3	Витрата води на бризкака	1	Витратомір	0-5 м³/год	4-20
4	Витрата води на форсунки	1	Витратомір	0-5 м³/год	4-20
5	Струм привода гранулятора	1	Перетворювач струму	$\leq I_n$	4-20
6	Швидкість привода обертання	1	Датчик швидкості	0-300 рад/с	4-20
7	Кут нахилу гранулятора	1	Датчик кута	0-60 град.	4-20
8	Крупність окатишів	1	Гранулометр	0-10 мм	4-20
9	Сигнал ВМ витрати води на бризкака	1	Виконавчий механізм	0-100 %	4-20
10	Сигнал ВМ витрати води на форсунки	1	Виконавчий механізм	0-100 %	4-20

Таблиця 2.5

Необхідна кількість вихідних аналогових сигналів контролера

№	Найменування параметрів	Кількість	Джерело сигналу	Діапазон зміни сигналу	Вид аналогового сигналу, мА
1	Керування витратою шихти	1	Контролер	0-90 т/год	4-20
2	Керування витратою води на бризкала	1	Контролер	0-5 м³/год	4-20
3	Керування витратою води на форсунки	1	Контролер	0-5 м³/год	4-20
4	Керування швидкістю привода обертання гранулятора	1	Контролер	0-300 рад/с	4-20
5	Керування кутом нахилу гранулятора	1	Контролер	0-60 град.	4-20

Таблиця 2.6

Необхідна кількість вхідних дискретних сигналів контролера

№	Найменування сигналу	Джерело сигналу	Кількість, шт.
1	Включений стан конвеєра-живильника	Блок-контакт пускача	1
2	Включений стан гранулятора	Блок-контакт пускача	1
3	Перемикання АВТ./ДИСТ. ручного керування витратою шихти	Кнопки	2
4	Перемикання АВТ./ДИСТ. ручного керування витратою води на бризкала	Кнопки	2
5	Перемикання АВТ./ДИСТ. ручного керування витратою води на форсунки	Кнопки	2

Необхідна кількість вихідних дискретних сигналів контролера

№	Найменування сигналу	Джерело сигналу	Кіл-ть, шт.
1	Вмикання-відключення конвеєра-живильника	Контролер	1
2	Вмикання-відключення гранулятора	Контролер	1
3	Вмикання-відключення аварійної сигналізації	Контролер	3

2.11.2 Вибір керуючого контролера

Для контролю й керування сигналами системи обрано контролер ADAM-5510E виробництва Advantech Co. (Тайвань) [15]. Контролер на базі процесора Intel x86 з підтримкою Datalight ROM-DOS забезпечує: аналогове та дискретне введення-виведення; первинне перетворення інформації; прийом команд від обчислювальної системи та передачу даних по інтерфейсу RS-485. Контролер складається з процесора, крос-плати та до 8 модулів вводу-виводу. Технічні характеристики: тип процесора 80186, 16-розрядний; обсяг флеш-ПЗУ 1,5 Мбайт; обсяг ОЗУ 640 Кбайт; порти COM1, COM2: RS-485; порт COM3: RS-232; споживана потужність 1,0 Вт; напруга живлення 10-30 В постійного струму; діапазон робочих температур від -10 до +70 °C [15] (рис. 2.10).



Рис. 2.10. Базовий блок ADAM-5510E [15]

Модулі введення-виведення: ADAM-5050 - 16-канальний модуль дискретного вводу-виводу (вихід «відкритий колектор» до 30 В, 100 мА); ADAM-5017 - 8-канальний модуль аналогового введення (ефективний дозвіл 16 біт; діапазони ± 150 мВ ... ± 10 В, 4-20 мА; напруга ізоляції 3000 В; похибка $\leq \pm 0,1$ %); ADAM-5080 - 4-канальний модуль лічильників-таймерів (вхідна частота до 5 кГц); ADAM-5024 - 4-канальний модуль аналогового виводу (ефективний дозвіл 12 біт; діапазон 4-20 мА або 0-10 В) [15].

2.11.3 Панель оператора Weintek MT8071iE

Панель оператора Weintek MT8071iE (Weintek Labs Inc., Тайвань) являє собою промисловий графічний сенсорний дисплей (HMI) з 7-дюймовим кольоровим TFT-екраном роздільністю 800×480 пікселів [27]. Обрана замість застарілого текстового пульта; забезпечує більш інформативне відображення параметрів процесу(табл. 2.5).

Загальні технічні характеристики панелі оператора Weintek MT8071iE [27]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник	-	Weintek Labs Inc., Тайвань
2	Тип дисплея	-	7" TFT кольоровий 800×480 пікс.
3	Процесор	МГц	600
4	Обсяг пам'яті Flash	МБ	128
5	Інтерфейси	-	RS-232, RS-485, Ethernet (RJ45)
6	Напруга живлення	В	24 постійного струму
7	Споживана потужність	Вт	≤ 10
8	Ступінь захисту передньої панелі	IP	65
9	Робоча температура	°C	від 0 до +60
10	Відносна вологість	%	10-90 (без конденсації)
11	Маса	кг	$\leq 0,55$

2.11.4 Перетворювачі сигналів Weidmuller ACT20X

Перетворювачі сигналів Weidmuller ACT20X-HDI-HAO (Weidmuller GmbH & Co. KG, Детмольд, Німеччина) призначені для гальванічної розв'язки та нормалізації аналогових сигналів від датчиків [28]. Обрані замість застарілих модулів SDI-AI з невстановленим виробником (табл. 2.6).

Основні характеристики перетворювачів сигналів Weidmuller АСТ20Х [28]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник	-	Weidmuller GmbH & Co. KG, Детмольд, Німеччина
2	Кількість каналів	шт.	4
3	Вхідний сигнал	-	0-5, 0-20, 4-20 мА; 0-10 В
4	Вихідний сигнал	мА	4-20
5	Напруга гальванічної ізоляції	В	2500
6	Похибка нелінійності	%	0,1
7	Напруга живлення	В	24 постійного струму
8	Діапазон робочих температур	°С	від -20 до +60
9	Монтаж	-	DIN-рейка 35 мм

2.11.5 Джерело живлення MEAN WELL MDR-100-24

Уніфіковане імпульсне джерело вторинного електроживлення MEAN WELL MDR-100-24 (MEAN WELL Enterprises Co. Ltd., Нью-Тайпей, Тайвань) призначено для живлення елементів автоматизації стабілізованою напругою 24 В постійного струму [29]. Обрано замість застарілого джерела з невстановленим виробником (табл. 2.7).

Загальні технічні характеристики джерела живлення MEAN WELL MDR-100-24 [29]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник	-	MEAN WELL Enterprises Co. Ltd., Тайвань
2	Вхідна напруга	В AC	85-264 (універсальний)
3	Вихідна напруга	В DC	24 (регулювання $\pm 15\%$)
4	Вихідна потужність	Вт	96
5	ККД (типовий)	%	89,5
6	Захист	-	КЗ, перевантаження, перегрів, перевищення напруги
7	Монтаж	-	DIN-рейка TS-35
8	Діапазон робочих температур	°C	від -20 до +70

2.11.6 Вибір датчика продуктивності

Конвеєрні ваги ВК-2М виробництва ТОВ «Метпривод» (Кривий Ріг, Україна) призначені для безперервного зважування сипучих матеріалів [23]. Технічні характеристики ВК-2М наведено в табл. 2.8.

Технічні характеристики конвеєрних ваг ВК-2М [23]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник	-	ТОВ «Метпривод», Кривий Ріг, Україна
2	Ширина конвеєрної стрічки	мм	650, 800, 1000, 1200
3	Найбільша продуктивність	т/год	250
4	Швидкість руху стрічки	м/с	до 5
5	Межа допустимої похибки	% згідно з [19]	±1
6	Гранулометричний склад	мм	до 200
7	Вбудований струмовий вихід	мА	4-20

2.11.7 Датчик витрати рідких середовищ

Як датчик витрати води застосовано датчик 907Е, призначений для вимірювання витрати хімічно агресивних рідин та суспензій. Принцип дії ґрунтується на перетворенні зусилля на диску, розташованому перпендикулярно потоку рідини, на стандартні електричні сигнали. Технічні характеристики датчика наведено в табл. 2.9.

Основні характеристики датчика витрати 907E

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Вимірюваний діапазон витрати	м³/год	від 2,5 до 320
2	Температура вимірюваного середовища	°C	від +5 до +90
3	Наведена похибка вимірювання	%	1,5
4	Вихідний сигнал	мА	0-5; 4-20
5	Напруга живлення	В	220 (50 Гц)
6	Матеріал, що контактує з середовищем	-	сталь 12Х18Н10Т, титан

2.11.8 Вибір виконавчого пристрою

Для регулювання витрати та тиску рідких середовищ обрано сегментний регулюючий затвор серії EBRO Z021 (EBRO Armaturen GmbH, Гаген, Німеччина) із електроприводом AUMA SA 07.5 (AUMA GmbH & Co. KG, Мюльакер, Німеччина) [30]. Обрана комбінація замінює застарілий виконавчий механізм МЕО та відповідає сучасним вимогам до трубопровідної арматури. (табл. 2.10)

Основні характеристики затвора EBRO Z021 з приводом AUMA SA 07.5**[30]**

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник затвора	-	EBRO Armaturen GmbH, Гаген, Німеччина
2	Виробник приводу	-	AUMA GmbH & Co. KG, Мюльакер, Німеччина
3	Умовний тиск середовища	МПа	до 1,6
4	Температура середовища	°C	до +150
5	Тип конструкції	-	прямоточний сегментний
6	Матеріал деталей, що контактують	-	нержавіюча сталь, PTFE
7	Діаметри Ду	мм	25, 50, 80, 100, 150, 200, 250, 300
8	Напруга живлення приводу	В	220/380 (50 Гц)
9	Командний сигнал приводу	мА	4-20

2.11.9 Датчик кута нахилу IFM Electronic JN2200

Датчик кута нахилу IFM Electronic JN2200 (IFM Electronic GmbH, Ессен, Німеччина) призначений для високоточного вимірювання кута нахилу об'єкта відносно двох осей [31]. Технічні характеристики датчика наведено в табл. 2.11.

Таблиця 2.11

Технічні характеристики датчика кута нахилу IFM Electronic JN2200 [31]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник	-	IFM Electronic GmbH, Ессен, Німеччина
2	Кількість вимірювальних осей	шт.	2
3	Точність вимірювання	°	±0,1
4	Роздільна здатність	°	0,01
5	Діапазон вимірювання	°	±75
6	Вихідний сигнал	-	4-20 мА / IO-Link
7	Напруга живлення	В	10-30 постійного струму
8	Ступінь захисту	IP	67
9	Діапазон робочих температур	°C	від -40 до +75
10	Матеріал корпусу	-	Нержавіюча сталь V4A

2.11.10 Вибір датчика вологості

Для безперервного вимірювання вологості шихти обрано нейтронний вологощільномір Berthold Technologies LB 3110 (Berthold Technologies GmbH & Co. KG, Штутгарт, Німеччина) [32]. Система LB 3110 широко застосовується у гірничодобувній промисловості для контролю вологості рудних концентратів. Основні технічні характеристики: діапазон вимірювання вологості 0-20 % при насипній щільності від 0,3 до 3,0 т/м³; похибка вимірювання ±0,1-0,2 %; час одного вимірювання не більше 60 с; вихідний сигнал 4-20 мА та RS-485 Modbus; наробіток на відмову понад 50 000 год [32].

2.11.11 Вибір гранулометра

Для визначення гранулометричного складу сирих залізорудних окатишів обрано систему онлайн-аналізу частинок HAVER Analytics (Haver & Boecker OHG, Оельде, Німеччина) [33]. Haver & Boecker - лідер у галузі аналізу сипучих матеріалів для гірничодобувної та металургійної промисловості. Система HAVER Analytics виконує безперервні вимірювання гранулометричного складу окатишів у діапазоні 1-150 мм з точністю визначення середнього діаметра $\leq 2,5$ %; час оновлення результатів 2-5 с [33].

2.11.12 Вибір датчика швидкості

Як датчик швидкості привода гранулятора застосовано датчик EN 5802 виробництва Kubler GmbH (Вільдберг, Німеччина) [24]. Технічні параметри датчика наведено в табл. 2.12.

Таблиця 2.12

Технічні параметри датчика швидкості EN 5802 (Kubler GmbH, Вільдберг, Німеччина) [24]

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Виробник	-	Kubler GmbH, Вільдберг, Німеччина
2	Діапазон номінальної напруги живлення	В	12-24 постійного струму
3	Максимальний споживаний струм	мА	± 80
4	Максимальна частота імпульсів	кГц	100
5	Максимальна швидкість обертання	об/хв	12 000
6	Герметичність (вал/корпус)	IP	65/67
7	Температурний діапазон	°C	від -20 до +70

Схему компонування керуючого обчислювального комплексу розробленої системи наведено на рис. 2.11.

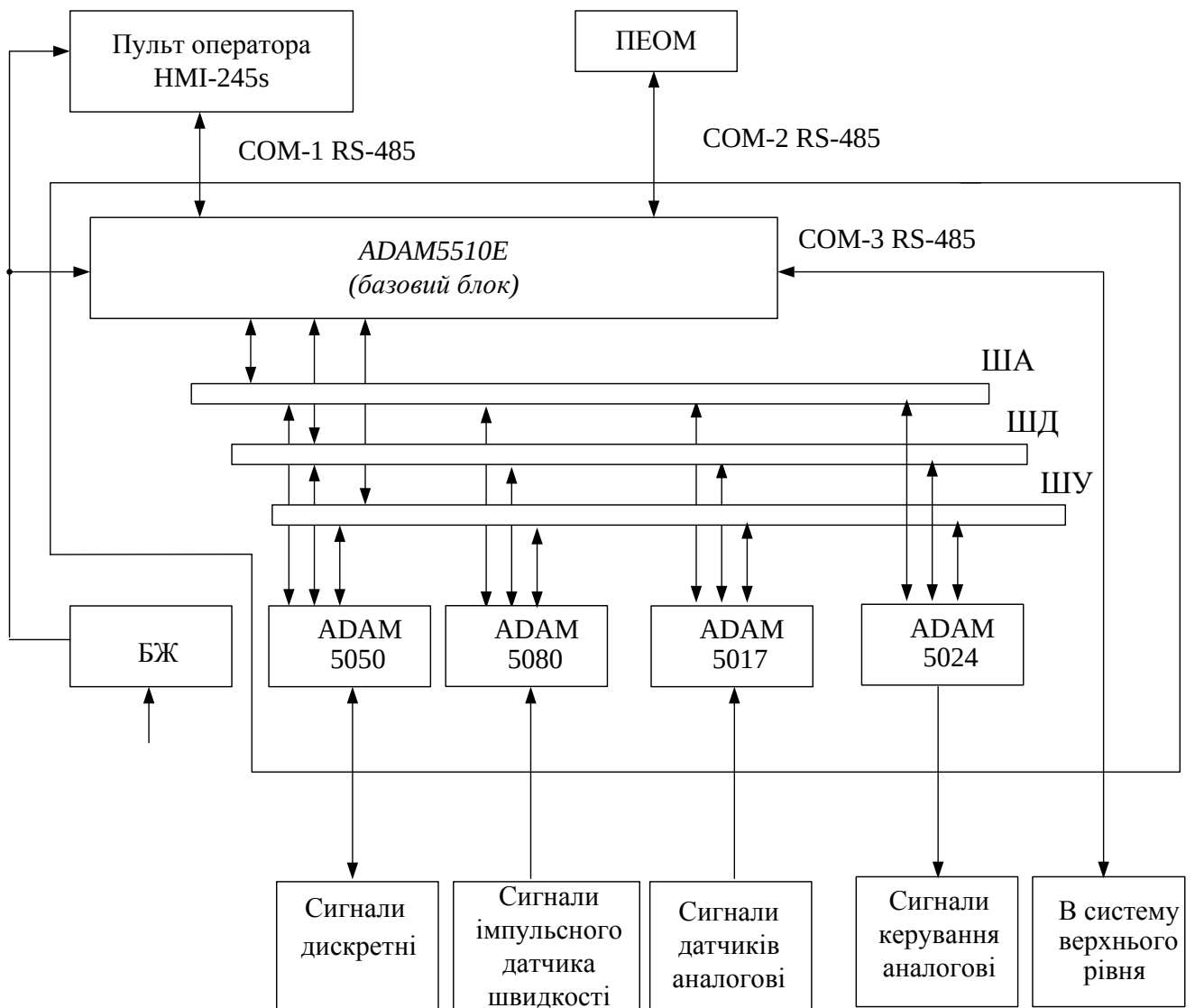


Рис. 2.11. Схема компонування керуючого обчислювального комплексу розробленої системи
(розроблено автором)

2.12 Розробка алгоритму автоматичної оптимізації огрудкування

Одним з найважливіших технологічних процесів на ПАТ «Центральний ГЗК» є процес грануляції залізородних окатишів на промисловому грануляторі

[16]. Математичний опис процесу грануляції в умовах ЦГЗК має вигляд рівнянь регресії [16]:

$$Y_1 = +159.630 - 0.4085X_1 - 16.5373X_2 - 50.324X_3 + 0.7603X_4 - 0.5670X_3^3 - 0.577X_4^2 + 10.8310X_3^2 - 0.0278X_1X_2 - 0.0201X_1X_4 - 1.3664X_2X_3 + 0.6592X_2X_4 + 0.1964X_1X_3 - 0.2309X_2^2 \quad (2.45)$$

$$Y_2 = -430.0085 - 0.4534X_1 + 23.7471X_2 + 9.1809X_3 + 10.6068X_4 - 0.6057X_2^2 - 0.0946X_4^2 - 0.0575X_1X_2 + 0.0172X_1X_4 - 0.7676X_2X_3 - 0.0575X_2X_4 \quad (2.46)$$

де X_1 - продуктивність гранулятора, т/год; X_2 - швидкість обертання чаші, об/хв; X_3 - вологість шихти, %; X_4 - вміст заліза в шихті, %; Y_1 - різниця виходів окатишів кондиційного розміру (10/20 мм) і великих шматків (+20 мм); Y_2 - міцність окатишів на скидання.

Діапазони зміни вхідних змінних: $20,0 \leq X_1 \leq 60,0$ т/год; $8,5 \leq X_2 \leq 12,0$ об/хв; $8,3 \leq X_3 \leq 9,6$ %; $56 \leq X_4 \leq 62$ %.

Перевірка моделі (2.56)-(2.57) на реальному промисловому об'єкті підтвердила її адекватність: обрані поліноми добре описують процес огрудкування й придатні для прогнозування результатів грануляції. Аналіз рівнянь регресії показує, що показник якості Y_1 є гіперповерхнею типу «пагорб» і має властивість унімодальності.

Для пошуку оптимальних значень параметрів, за яких Y_1 досягає максимуму, застосовано метод статистичного градієнта. Генерується випадкова величина ε_1 , рівномірно розподілена в інтервалі $[0,1]$, для кожної координати X_i . Перевіряється нерівність $\sqrt{1 - \varepsilon^2} > \varepsilon_2$; при виконанні умови отримано одиничний вектор, що вказує напрямок до області оптимуму.

Після визначення m одиничних випадкових векторів обчислюється їхня векторна сума (статистична оцінка градієнтного напрямку), наведено в табл. 2.13:

$$Y^m = \sum E_j \cdot [Q(X + qE_j) - Q(X)] \quad (2.58)$$

де Y^m - векторна сума, що є статистичною оцінкою градієнтного напрямку; E_j - вектор пробного кроку; $Q(X_j)$ - найбільше значення функції якості за i попередніх кроків.

Перетворення рівномірно розподіленого числа з інтервалу $[0,1]$ у задані технологічні межі (a, b) :

$$X = (b - a) \cdot I + a \quad (2.59)$$

На основі описаної методики робимо розрахунки для пошуку $Y_1 = Y_{1\max}$. Отримані результати наведено в табл. 2.13.

Таблиця 2.13

Оптимальні параметри процесу огрудкування

№	Найменування параметра	Одиниці вимірювання	Значення
1	Різниця виходів окатишів (Y_1)	%	97,9736
2	Продуктивність огрудкувача (X_1)	т/год	24,9781
3	Швидкість обертання чаші (X_2)	об/хв	11,4897
4	Вологість шихти (X_3)	%	8,67649
5	Вміст заліза в шихті (X_4)	%	59,8509
6	Міцність окатишів на скидання (Y_2)	-	12,9374

Отже, максимальна різниця між виходом придатних окатишів і великих шматків може сягати приблизно 98,0 %. При цьому вологість шихти має становити близько 8,7 %, а вміст заліза - 59,8 %. Ці результати узгоджуються з

відомими даними щодо процесу грануляції на чашових грануляторах в умовах ЦГЗК [16].

Алгоритм оптимального ведення процесу грануляції будувався на основі виразів (2.56) і (2.57). Для рівномірного перебору інтервалів зміни X_1 , X_3 , X_4 генерується випадкове число I з інтервалу $(0, 1)$, яке перераховується в заданий технологічний інтервал за формулою (2.59). Для отриманої комбінації (X_1, X_3, X_4) обчислюються значення Y_1 та Y_2 за рівняннями (2.56) і (2.57). Якщо Y_2 не лежить у межах від 10 до 22, комбінація відкидається; інакше в діапазоні $X_2 = 7,5...12,0$ шукається значення, за якого досягається максимум Y_1 .

До отриманої таблиці відібраних точок застосовано метод найменших квадратів, на основі якого отримано адекватне рівняння регресії, що відповідає умовам оптимальності процесу грануляції:

$$X_2 = -14,2738 \pm 2,4965X_3 + 0,01011X_1 + 1,093X_4 - 0,010X_3X_4 + 0,023X_3^2 - 0,008X_4^2 \quad (2.60)$$

за умов: $Y_1 = Y_{1\max}$; $Y_2 \in (10, 22)$; $20 \leq X_1 \leq 60$ т/год; $8,3 \leq X_3 \leq 9,6$ %; $56 \leq X_4 \leq 62$ %.

З рівняння (2.60) випливає: для оптимізації виходу окатишів у разі підвищення вологості вхідної шихти (фактор X_3) необхідно зменшувати швидкість обертання чаші або збільшувати продуктивність гранулятора (X_1). Зі зростанням частки добавок (зменшення вмісту заліза) умови грануляції поліпшуються, і для отримання гранул потрібного розміру слід знижувати швидкість обертання чаші. Таким чином, вираз (2.60) є алгоритмом оптимального ведення процесу грануляції: він дає змогу для заданої вхідної ситуації (X_1 , X_3 , X_4) підібрати таку швидкість обертання чаші (X_2), яка забезпечує максимально можливий вихід окатишів (рис. 2.19).

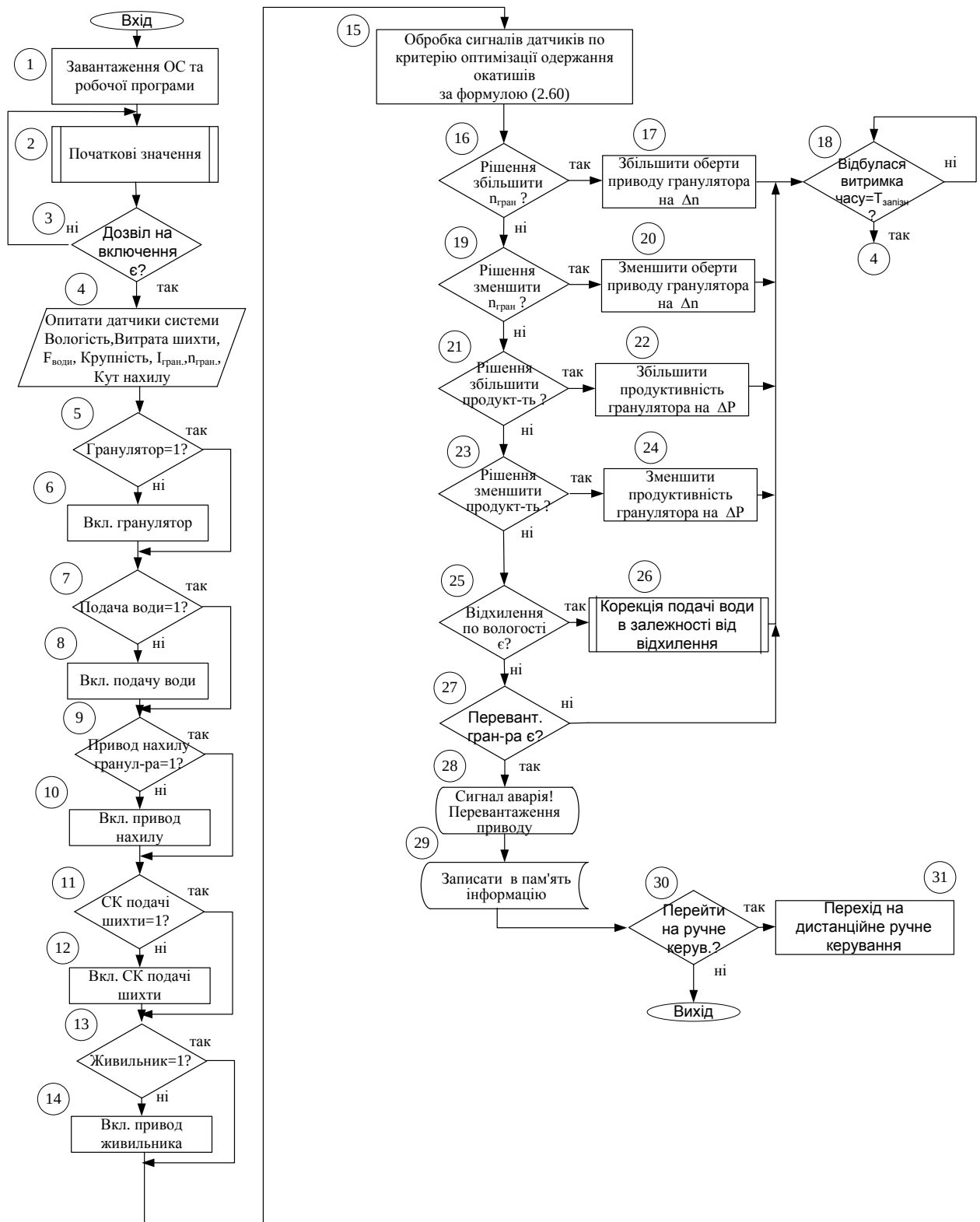


Рис. 2.19. Алгоритм роботи системи оптимізації отримання окатишів
(розроблено автором)

2.13 Охорона праці та безпека у відділенні огрудкування

Виробничий процес у цеху огрудкування характеризується наявністю комплексу шкідливих та небезпечних виробничих чинників. Аналіз відповідних чинників виконано відповідно до вимог [20]. Основними шкідливими та небезпечними виробничими чинниками є: теплові виділення; пилоутворення (компоненти шихти подрібнюються до крупності 0,1-0,15 мм); шум та вібрація; небезпека отруєння газом; вибухонебезпека газоповітряних сумішей; небезпека ураження електричним струмом (табл. 2.14).

Таблиця 2.14

Шкідливі виробничі чинники у відділенні огрудкування

№	Шкідливий чинник	Од. вим.	Джерела	ГДК, ГДР	Фактично
1	Температура повітря	°С	Електроустаткування	17/23	25
2	Швидкість руху повітря	м/с	-	0,3	0,3
3	Вологість	%	Технічна вода	75	85
4	Шум	дБ(А)	Привід гранулятора	80	96
5	Запиленість	мг/м ³	Сировина	6,0	8,6
6	Освітленість	лк	Світильники	100	85

Аналіз табл. 2.14 показує, що фактичні значення шуму та запиленості перевищують допустимі рівні, а освітленість є нижчою від нормативної. Для зниження та усунення виявлених шкідливих чинників передбачено такі заходи відповідно до вимог [20]: встановлення устаткування на фундаментах із спеціальними віброзахисними пристроями; застосування реактивних та активних глушників шуму; використання вібропоглинаючих покриттів (знижує

випромінювання шуму до 10 дБ); влаштування перерв тривалістю 5-10 хв. через кожні 1-1,5 год. роботи з вібронебезпечним устаткуванням. Для боротьби з пилом застосовуються місцева витяжна вентиляція та мокрі пиловловлювачі, рукавні фільтри, електрофільтри.

Вибір засобів індивідуального захисту виконується відповідно до вимог [21]. Засоби індивідуального захисту електромонтера та строки перевірки електрозахисних засобів наведені в табл. 2.15 та 2.16.

Таблиця 2.15

Засоби індивідуального захисту електромонтера [21]

№	Засоби індивідуального захисту	Кількість, шт.	Строк використання
1	Костюм х/б із просоченням	1	1 рік
2	Куртка ватяна	1	3 роки
3	Напівчоботи	1	1 рік
4	Каска	1	1 рік
5	Рукавиці	3	1 місяць
6	Респіратор «Пелюсток»	1	1 зміна
7	Захисні окуляри	1	1 рік
8	Мило	2	1 місяць

Строки перевірки електрозахисних засобів згідно з [20] наведено в табл. 2.16.

Строки перевірки електрозахисних засобів [20]

№	Найменування	Періодичність перевірки
1	Інструмент з ізолюючими ручками	1 раз на рік
2	Ізолюючі кліщі	1 раз на 2 роки
3	Гумові діелектричні рукавички	2 рази на рік
4	Діелектричні коврики	огляд 2 рази на рік
5	Діелектричні калоші	1 раз на рік
6	Діелектричні боти	1 раз на 3 роки
7	Індикатори напруги	1 раз на рік

Виробничий процес у цеху огрудкування за санітарно-гігієнічною характеристикою відноситься до групи Пв відповідно до [22]. Цех оснащено: гардеробними шафами - 259 шт. (2 шт. на 1 особу); душовими - 86 шт. (1 шт. на 3 особи); кранами в умивальниках - 15 шт.; оздоровчим пунктом - 1 шт.; автоматами з газованою водою - 2 шт.

Для підвищення електробезпеки обладнання виконано розрахунок заземлюючого пристрою згідно з [20]. Опір заземлюючого пристрою:

$$R_z = U_{пр} / I_{р.з.} \quad (2.61)$$

де $I_{р.з.}$ - розрахунковий струм замикання на землю, А.

Розрахунковий струм замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю:

$$I_{р.з.} = (U_{ф} / 350) \times (I_k + I_n / 10) \quad (2.62)$$

де $U_f = 6$ кВ - фазна напруга мережі; $l_k = 0,4$ км - довжина кабельних ліній; $l_p = 5$ км - довжина повітряних ліній.

Розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_{розр} = \rho \times k_c \times k = 110 \times 1,15 \times 1 = 126,5 \text{ Ом}\cdot\text{м} \quad (2.63)$$

де $k_c = 1,15$ - кліматичний коефіцієнт; $k = 1$ - коефіцієнт стану ґрунту; $\rho = 110 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ - середній питомий опір ґрунту.

Після розрахунку визначено, що для досягнення необхідного нормованого опору заземлення потрібно 14 вертикальних стрижнів-електродів діаметром 10 мм, довжиною 5 м, з'єднаних сталевую половою $20 \times 4 \text{ мм}^2$ завдовжки 95 м. Результуючий опір системи заземлення задовольняє вимогам [20].

Відділення огрудкування відноситься до приміщень категорії Г пожежо- і вибухонебезпеки. До первинних засобів пожежогасіння відносяться вогнегасники ВВ-5, ВВ-8, ВП-3, ВП-5; наявні 2 гідранти з тиском 5-6 атм. Засоби пожежогасіння наведено в табл. 2.17.

Таблиця 2.17

Засоби пожежогасіння [25]

№	Найменування	Одиниці	Кількість
1	Вогнегасник ВП-5	шт.	5
2	Вогнегасник ВВ-3, ВВ-5, ВВ-8	шт.	2
3	Цейбра пожежні	шт.	3
4	Лопати пожежні	шт.	3
5	Ящики з піском	шт.	3
6	Протигази	шт.	2
7	Пожежні стовбури	шт.	2
8	Рукави пожежні	шт.	2

ВИСНОВКИ

У ході виконання випускної кваліфікаційної роботи отримано такі результати.

1. Проаналізовано технологічний процес виробництва залізорудних окатишів на ПАТ «Центральний ГЗК». Встановлено, що продуктивність чашового гранулятора визначається швидкістю обертання чаші, кутом її нахилу та вологістю шихти. Виявлено недоліки існуючої системи керування (реостатне регулювання): значні втрати потужності, ступінчастий характер регулювання, нерівномірний розподіл матеріалу.

2. Виконано розрахунок потужності та обрано асинхронний двигун Siemens 1LE1604-2DC23-4AA4 (132 кВт, клас IE3, Siemens AG, Ерланген, Німеччина), що повністю відповідає вимогам механізму гранулятора. Двигун замінює морально застарілий двигун постійного струму з реостатним регулюванням.

3. Обґрунтовано вибір системи електропривода на базі перетворювача частоти Mitsubishi Electric FR-A740-03610-EC. Система ПЧ-АД з векторним керуванням забезпечує безступінчасте регулювання швидкості у діапазоні $D \geq 1,5$ при аперіодичному характері перехідного процесу та перерегулюванні не більше 0,5 %.

4. Виконано розрахунок параметрів системи підлеглого регулювання координат у Mathcad Professional 14.0. Розраховано: коефіцієнти зворотних зв'язків ($K_{c1} = 0,1035$ В/А; $K_{c2} = 0,007595$ В/А; $K_{ш} = 0,06366$ В·с/рад); сталі часу регуляторів струму ($T_{i1} = 0,309$ с; $T_{i2} = 0,02268$ с); стала часу регулятора потоку ($T_{ip} = 0,003999$ с); коефіцієнт підсилення регулятора швидкості ($W_{рш} = 1812,6$).

5. Розроблено математичну модель процесу грануляції та алгоритм оптимального керування на основі методу статистичного градієнта. Визначено оптимальні параметри: продуктивність близько 25 т/год, вологість шихти 8,7 %,

вміст заліза 59,85 %, при яких вихід кондиційних окатишів досягає 97,97 %. Впровадження алгоритму дозволяє збільшити вихід окатишів на 2,5-3,0 %.

6. Розроблено АСУ ТП огрудкування та сформовано комплекс технічних засобів автоматизації на базі контролера ADAM-5510E (Advantech, Тайвань). Усі засоби автоматизації обрано від виробників ЄС, Японії, Тайваню та України.

7. Запропоновано заходи з охорони праці та безпеки відповідно до [20, 21]. Розрахунком заземлення встановлено необхідність 14 вертикальних стрижнів-електродів довжиною 5 м для досягнення нормованого опору заземлення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кузін В. С., Буцкий В. М., Гребенюк С. М. Виробництво залізорудних окатишів: сучасний стан та перспективи. *Металургія і гірнича справа*. 2019. № 3. С. 41-47.
2. Пелевін Л. Є. Теорія, технологія та розрахунки агрегатів для виробництва залізорудних окатишів: монографія. Кривий Ріг: Видавничий дім, 2007. 280 с.
3. Дорогобид В. Г., Бурлов Ю. В., Понамарьов П. П. Автоматизація технологічних процесів у металургії: навч. посіб. Дніпро: НМетАУ, 2014. 217 с.
4. Голінко І. М., Коваль В. С. Системи автоматичного керування електроприводами: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 192 с.
5. ПАТ «Центральний гірничозбагачувальний комбінат»: офіційний сайт. URL: <https://www.metinvestholding.com/ua/business/mining/cgok> (дата звернення: 10.03.2026).
6. Коломієць Л. В., Жовтяк Г. А. Технологія виробництва залізорудних матеріалів: навч. посіб. Кривий Ріг: КНУ, 2019. 156 с.
7. Чорний О. П., Дем'яненко М. М., Родькін Д. Й. Системи керування електроприводами: підручник. Кременчук: КДПУ, 2009. 448 с.
8. Білецький В. С. (ред.) Гірнича енциклопедія: у 5 т. Т. 2. Донецьк: Сх. видавничий дім, 2007. 652 с.
9. Коцегуб П. Х., Ладієва Л. Р. Асинхронний електропривод: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. 164 с.
10. Шевченко В. В., Лисиця В. Д. Проектування систем електропривода промислових установок: навч. посіб. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. 210 с.
11. Перетворювачі частоти для промислових електроприводів: технічна довідка / за ред. Бойка В. І. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 138 с.
12. Коцегуб П. Х., Михайленко В. В. Векторне керування асинхронним двигуном: монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 198 с.

13. Сенько В. І., Панасенко М. В. Розрахунок параметрів асинхронних двигунів за довідковими даними: навч. посіб. Кременчук: КДПУ, 2014. 96 с.
14. Ємельянов В. В., Кравець О. Г. АСУ ТП збагачувальних фабрик: підручник. Кривий Ріг: КНУ, 2018. 243 с.
15. Advantech Co. Технічна документація контролера ADAM-5510E. URL: <https://www.advantech.com/products/adam-5510e> (дата звернення: 05.03.2026).
16. Кондратець В. О., Мацуй А. М. Оптимізація процесів грануляції залізородних концентратів: монографія. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. 176 с.
17. Вовк О. Б., Стасюк В. Б. Системи автоматизованого керування технологічними процесами: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 234 с.
18. Mitsubishi Electric. Технічна документація частотного перетворювача FR-A740. URL: https://www.mitsubishielectric.com/fa/products/drv/inv/slinv/fr_a700/ (дата звернення: 07.03.2026).
19. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ: УкрНДНЦ, 2015. 16 с.
20. НПАОП 0.00-1.49-01 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів». Київ, 2001. 79 с.
21. НПАОП 0.00-3.07-14 «Норми безплатної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту». Київ, 2014. 45 с.
22. ДБН В.2.2-28:2010. Будинки адміністративного та побутового призначення. Київ: Мінрегіонбуд, 2011. 26 с.
23. Технічна документація конвеєрних ваг ВК-2М. Кривий Ріг: ТОВ «Метпривод», 2018.
24. Kubler GmbH. Технічна документація датчика EN 5802. URL: <https://www.kuebler.com/en/products/encoders> (дата звернення: 08.03.2026).
25. ДСТУ 3675-98. Пожежна техніка. Вогнегасники переносні. Загальні технічні вимоги. Київ: Держстандарт України, 1999. 28 с.

26. Siemens AG. Каталог двигунів серії SIMOTICS GP/SD. URL: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/10029877> (дата звернення: 12.03.2026).

27. Weintek Labs Inc. Технічна документація MT8071iE. URL: https://www.weintek.com/globalw/Product/Product_MT8071iE.aspx (дата звернення: 11.03.2026).

28. Weidmuller GmbH. Технічна документація ACT20X. URL: <https://www.weidmueller.com/en/products/electronic-components-and-interfaces/signal-conditioners/> (дата звернення: 11.03.2026).

29. MEAN WELL Enterprises Co. Ltd. Технічна документація MDR-100-24. URL: <https://www.meanwell.com/webapp/product/search.aspx?prod=MDR-100> (дата звернення: 11.03.2026).

30. EBRO Armaturen GmbH; AUMA GmbH. Технічна документація на арматуру та електроприводи. URL: <https://www.ebro-armaturen.com>; <https://www.auma.com> (дата звернення: 12.03.2026).

31. IFM Electronic GmbH. Технічна документація датчика кута JN2200. URL: <https://www.ifm.com/us/en/product/JN2200.html> (дата звернення: 12.03.2026).

32. Berthold Technologies GmbH & Co. KG. Neutron moisture measurement LB 3110. URL: <https://www.berthold.com/en/process-measurement/moisture-measurement> (дата звернення: 13.03.2026).

33. Haver & Boecker OHG. HAVER Analytics system for online particle size measurement. URL: <https://www.haverboecker.com/en/haver-analytics> (дата звернення: 13.03.2026).



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

141-7д-2026врб

Автор

141-7д-2026врб

Науковий керівник / Експерт

Модло Є

ІД документу

334133400

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

8695

Кількість слів



КЦ

58993

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		22
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		40

Джерела

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

10 найдовших фразКопіювати текст

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	--	--

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

Я, *Шатохін Валерій Леонідович*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу.

Засвідчую, що кваліфікаційна бакалаврська робота Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Електропривод чашового гранулятора огрудкувальної фабрики ПАТ «Центральний ГЗК» 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