

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр
за освітньо-професійною програмою.

«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
зі спеціальністю

174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

тема роботи:

**«Система автоматизованого керування процесом класифікації на основі
гідроциклона першої стадії подрібнення»**

Виконав студент гр. АКІТР-23ск

Нормоконтролер

Керівник

Завідувач кафедри

Савостяненко В.Ю

Маринич І.А.

Савицький О.І.

Рубан С.А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизація, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Спеціальність: 174 Автоматизація, комп'ютерних наук і технологій

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

«26» січня 2026

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТР-23ск Савостяненко Валентин Юрійович

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Система автоматизованого керування процесом класифікації на основі гідроциклону першої стадії подрібнення»
затверджено наказом по університету № 172с від 30.03.2026 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 10.06.2026

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка, презентація у Microsoft PowerPoint в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

доц. Савицький О.І.

Нормоконтроль

доц. Маринич І.А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Вступ	03.03.26
2	Розділ 1	07.04.26
3	Розділ 2	03.05.26
4	Висновки	27.05.26
5	Оформлення кваліфікаційної роботи	29.05.26
6	Підготовка доповіді до захисту	06.06.26

6. Дата видачі завдання: 28.01.2026

Керівник _____/Савицький О.І./

7. Запевнення: Я, Савостяненко Валентин Юрійович, запевняю, що дана кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить плагіату, фабрикації та фальсифікації. Використання схем, ілюстрацій, результатів та діаграм інших авторів мають посилання на відповідні джерела.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Завідомо проінформований, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту.

Студент _____/Савостяненко В.Ю./

АНОТАЦІЯ

Савостяненко В.Ю. Система автоматизованого керування процесом класифікації на основі гідроциклона першої стадії подрібнення : кваліфікаційна робота бакалавра : 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2026. 71с

Об'єктом проектування є система автоматизованого керування живильним насосом “Насос відцентровий ґрунтовий 1ГрК-400/40”, що подає пульпу до гідроциклона ГЦ-710.

Метою роботи є розроблення замкненої системи автоматичного керування двигуном насоса через перетворювач частоти залежно від щільності пульпи на виході гідроциклона для забезпечення стабільного технологічного режиму збагачення.

У першому розділі проведено аналіз технологічного процесу подачі пульпи, обґрунтовано вибір гідроциклонної установки ГЦ-710 як об'єкта автоматизації, розглянуто особливості роботи обладнання в абразивному середовищі та сформовано вимоги до системи керування.

У другому розділі розроблено структуру та функціональну схему автоматизованої системи, виконано вибір і математичну перевірку комплексу технічного забезпечення (ПЛК SIMATIC S7-1500, SINAMICS G120X, датчики Rhosonics SDM, SITRANS, двигун SIMOTICS GP), проведено розрахунки потужності та струмових навантажень, а також створено повний комплект графічних матеріалів у середовищі EPLAN Electric P8 2026.

Ключові слова: АВТОМАТИЗАЦІЯ ЗБАГАЧЕННЯ, ГЦ-710, ЧАСТОТНЕ РЕГУЛЮВАННЯ, ЩІЛЬНІСТЬ ПУЛЬПИ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ НАСОСОМ, EPLAN, SIMATIC S7-1500.

					КНУ КРБ.174.26.12.00.ПЗ		
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата	АНОТАЦІЯ		
Разробив	Савостяненко В.						
Перевірив	Савицький О.І.						
Н.конт. роль	Маринич ІА.						
Затвердив	Маринич ІА.				КНУ АКІПР – 23ск		
					Літера	Аркуш	Аркушів
						3	1

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	9
1.1 Характеристика підприємства та технологічної ділянки.....	9
1.2 Система живлення гідроциклона пульпою: обладнання, схема та особливості роботи.....	10
1.3 Опис гідроциклонної установки ГЦ-710, як об'єкта автоматизації.	13
1.4 Аналіз існуючої системи автоматизації об'єкта.....	16
2 СХЕМОТЕХНІЧНА ТА АЛГОРИТМІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	19
2.1 Проектування системи автоматичного керування.....	19
2.2 Структурно-функціональна організація автоматичної системи регулювання.....	21
2.3 Функціональна реалізація контуру керування в ПО MatLab.....	23
2.4 Аналітичне визначення параметрів передавальних функцій.....	24
2.5 Побудова та аналіз імітаційної моделі стабілізації щільності пульпи.....	28
2.6 Інформаційна складова та алгоритмічне забезпечення системи.....	31
2.7 Розроблення структури системи керування об'єктом автоматизації.....	34
2.8 Обґрунтування вибору апаратного забезпечення системи керування.....	35
2.9 Аналіз та вибір польових пристроїв.....	36

					КНУ КРБ.174.26.12.00.ПЗ					
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата						
Разробив	Савостяненко В.				ЗМІСТ		Літера	Аркуш	Аркушів	
Перевірів	Савицький О І.								4	2
							КНУ АКІТР – 23ск			
Н контроль	Маринич І А.									
Затвердив	Маринич І А.									

2.10 Виконавчі пристрої: аналіз, вибір та обґрунтування вибору обладнання.....	41
2.11 Перевірка відповідності технічних засобів автоматизації розрахунковим вимогам.....	45
2.12 Склад і структура системи автоматизованого керування.....	48
2.13 Створення проекту і налаштування вузлів автоматизації в інженерній утиліті TIA Portal V20.....	59
ВИСНОВОК.....	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	67

					КНУ КРБ .174.26.12.00 ЛЗ	Арк.
						5
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АІ – аналоговий вхід

АО – аналоговий вихід

АСК – автоматизована система керування

АСР – автоматизована система регулювання

АСУТП – автоматизована система управління технологічним процесом

ГЦ – гідроциклон

ГЦ-710 – гідроциклонна установка з діаметром патрубку 710 мм

ДІ – дискретний вхід

ДО – дискретний вихід

ПЛК – промисловий логічний контролер

ПЧ – перетворювач частоти

СКАДА – система диспетчерського керування та збору даних

ВМ – виконавчий механізм

АСУТП – автоматизована система управління технологічним процесом

ЛАЧХ – логарифмічна амплітудно-частотна характеристика

ЛФЧХ – логарифмічна фазо-частотна характеристика

					КНУ КРБ.174.26.12.00.ПЗ							
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата								
Разробив		Савостяненко В.			Перелік скорочень та умовних позначень			Літера	Аркуш	Аркушів		
Перевірів		Савицький О І.								6	1	
								КНУ АКІТР – 23ск				
Н контроль		Маринич І А.										
Затвердив		Маринич І А.										

ВСТУП

Сучасне збагачення корисних копалин на гірничозбагачувальних комбінатах Криворізького басейну характеризується високими вимогами до стабільності технологічних параметрів. Одним із ключових процесів є гідроциклонна класифікація пульпи, ефективність якої безпосередньо залежить від постійності щільності живильної суспензії. Коливання щільності пульпи на вході в гідроциклон призводить до нестабільності гранулометричного складу зливу, зниження показників збагачення, перевитрати енергії та прискореного зносу обладнання. У зв'язку з цим актуальним є завдання створення надійної автоматизованої системи, яка забезпечить динамічне підтримання заданої щільності пульпи шляхом частотного регулювання двигуна живильного насоса.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в розробленні та обґрунтуванні системи автоматичного керування двигуном відцентрового насоса через перетворювач частоти в функції щільності пульпи на виході гідроциклона для забезпечення стабільного режиму роботи збагачувальної секції.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

- Проаналізувати технологічний процес подачі пульпи до гідроциклона та особливості його роботи як об'єкта автоматизації;
- Описати гідроциклонну установку як об'єкта автоматизації та комплекту технічного забезпечення системи;
- Розробити структурну та функціональну схеми автоматизованої системи керування;
- Виконати вибір і математичну перевірку польових пристроїв, перетворювача частоти, двигун та програмно-технічних засобів;
- Створити повний комплект проектної документації в середовищі Eplan Education P8 2026.

					КНУ КРБ.174.26.12.00.ПЗ			
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата				
Разробив	Савостяненко В.				ВСТУП	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірів	Савицький О.І.						7	2
Н контроль	Маринич І.А.					КНУ АКІТР – 23ск		
Затвердив	Маринич І.А.							

Об'єктом дослідження є процес подачі пульпи до гідроциклону у технологічній лінії збагачення.

Предметом дослідження виступає система автоматичного керування двигуном насоса через перетворювач частоти в замкненому контурі за щільністю пульпи.

У роботі використані методи системного аналізу технологічного процесу, методи вибору та розрахунку технічних засобів автоматизації, методи проектування електричних схем у програмному середовищі EPLAN Electric P8 2026.

Новизна роботи полягає в комплексному підході до реалізації замкненого контуру регулювання щільності пульпи за допомогою ультразвукового неконтактного датчика щільності та сучасного перетворювача частоти в поєднанні з програмованим логічним контролером, що дозволяє підвищити точність підтримання технологічного режиму в умовах агресивного абразивного середовища.

Практична значимість розробки полягає в можливості впровадження запропонованої системи на діючих збагачувальних фабриках, що забезпечить стабілізацію щільності пульпи, зниження питомих енергозатрат, зменшення зносу насосного обладнання та підвищення загальної ефективності процесу гідроциклонної класифікації.

					КНУ КРБ .174.26.12.00 ЛЗ	Арк .
						8
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

1.1 Характеристика підприємства та технологічної ділянки

Гірничозбагачувальні комбінати Криворізького залізрудного басейну є провідними підприємствами України з виробництва залізрудного концентрату. Технологічний процес збагачення на цих комбінатах складається з послідовних стадій дроблення, подрібнення, класифікації та гравітаційного або магнітного збагачення. Однією з найвідповідальніших операцій є гідроциклонна класифікація пульпи, яка забезпечує розділення твердої фази руди за крупністю частинок.

Технологічна ділянка, що розглядається в роботі, входить до складу цеху (секції) збагачення ГЗК. Вона призначена для класифікації пульпи після стадії подрібнення. Основним обладнанням ділянки є гідроциклонна установка, живильний насосний агрегат і зумпф пульпи. Ділянка працює в умовах високої абразивності середовища, що висуває особливі вимоги до надійності обладнання та стабільності технологічних параметрів.

Технологічна схема ділянки сепарації (збагачення) наведена на рис. 1.1.

На схемі чітко видно місце досліджуваної ділянки в загальному технологічному ланцюзі: вихідна руда з бункера надходить через живильник у дробарку (або млин), далі утворена пульпа збирається у зумпфі. Звідти насос подає її до гідроциклона. Злив гідроциклона (тонкий клас) направляється у наступну стадію збагачення, а підрешітний продукт (піски) повертається на повторне подрібнення або класифікацію

					КНУ КРБ.174.26.12.01.ПЗ		
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата			
Разробив	Савостяненко В.				РОЗДІЛ 1	Літера	Аркуш
Перевірів	Савицький О.І.						9
							10
Н контроль	Маринич І.А.					КНУ АКІТР – 23ск	
Затвердив	Маринич І.А.						

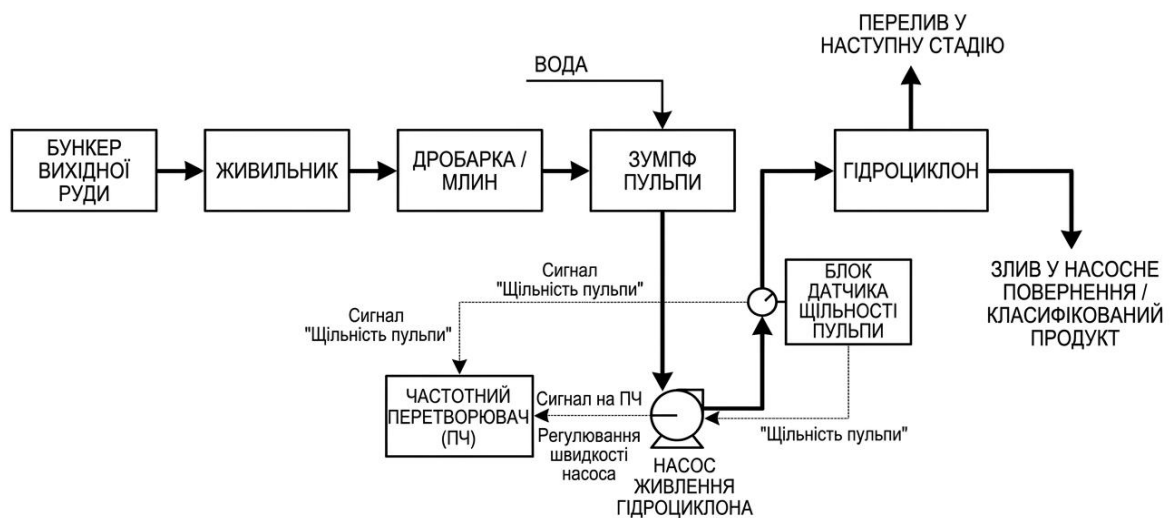


Рисунок 1.1 – Схема технологічного процесу гірничозбагачувального комбінату при сепарації пульпи

1.2 Система живлення гідроциклона пульпою: обладнання, схема та особливості роботи

Система живлення гідроциклона пульпою є одним із ключових елементів технологічної схеми, оскільки саме вона забезпечує надходження вихідного матеріалу до апарата в заданому режимі. Від її роботи залежить стабільність тиску на вході в гідроциклон, рівномірність подачі пульпи та, як наслідок, ефективність процесу сепарації. Якщо подача здійснюється нерівномірно або з відхиленням від установлених параметрів, це призводить до зміни гідродинамічного режиму в апараті та погіршення якості розділення матеріалу.

Розглянемо детальніше структуру технологічного процесу сепарації, виходячи з даних джерела [9] (рис. 1.2), для подальшої подачі класифікованого матеріалу в лінію обробки.

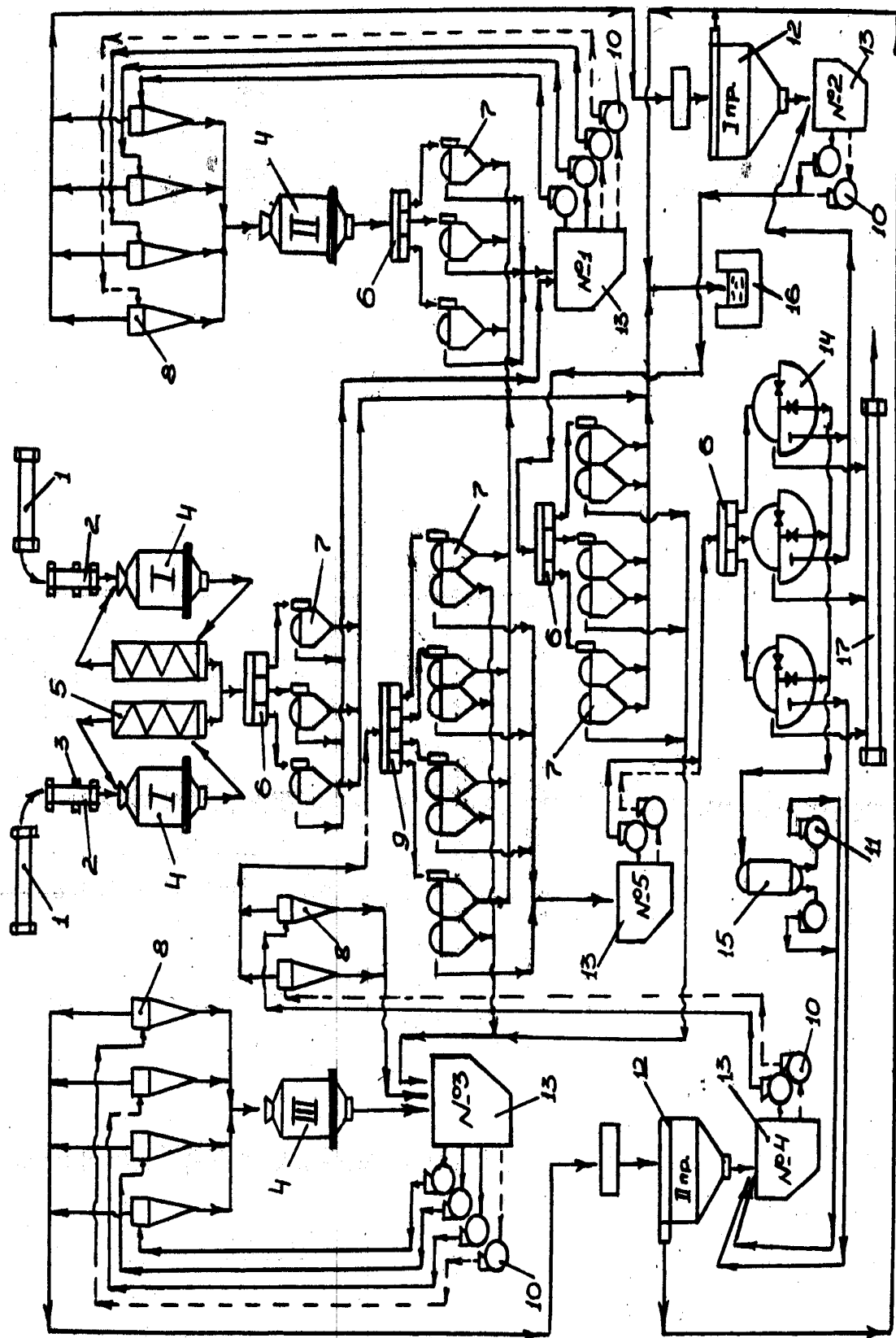


Рисунок 1.2 – Схема ланцюга апаратів 11 і 12 секції РЗФ-2

Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата

КНУ КРБ .174.26.12.01 ЛЗ

Арк.

11

Технологічна лінія переробки залізорудної сировини на секціях 11 та 12 РЗФ-2 побудована за принципом тристадійного подрібнення з послідовною магнітною сепарацією та замкненими циклами класифікації. Згідно умовного позначення зон технологічного процесу, опишемо кожну зону окремо від подачі матеріалу до виходу продукту:

- Стадія підготовки та первинного подрібнення:

Вихідна руда транспортується системою горизонтальних та похилих стрічкових конвеєрів (поз. 1, 2). Облік витрати сировини здійснюється за допомогою електронних конвеєрних ваг «Єрмак» (поз. 3). Первинне подрібнення виконується у кульових барабанних млинах МШЦ-3600*5500 (поз. 4), що працюють у замкненому циклі з механічними односпіральними класифікаторами КС-24*125 (поз. 5). Злив класифікаторів спрямовується на першу стадію магнітної сепарації.

- Процес магнітної сепарації та дешламації:

Сепарація пульпи проводиться на барабанних магнітних сепараторах ПБМ-120/300 ПП (поз. 7). Розподіл потоків між сепараторами забезпечується трьох- та чотирьохструминними пульпоподілювачами (поз. 6, 9). Для додаткового збагачення та зневоднення промпродукту використовуються магнітні дешламатори МД-9А (поз. 12) діаметром 9000 мм.

- Вузол тонкої класифікації та гідроциклонування:

Основним вузлом розділення тонких фракцій є батареї циліндроконічних гідроциклонів ГЦ-710 (поз. 8). Технологічний цикл класифікації організований наступним чином:

- Буферна ємність: Пульпа надходить у технологічний зумпф (поз. 13), який виконує роль приймального бака (поз. 12 на рис. 1.2). Для підтримання гомогенності суспензії та запобігання осадженню твердої фази у зумпфі встановлено мішалку (поз. 13 на рис. 1.2).
- Нагнітання та живлення: Відкачування пульпи із зумпфа здійснюється відцентровим ґрунтовим насосом 1ГрК-400/40 (поз. 10), що приводиться в дію асинхронним електродвигуном потужністю 132 кВт

					КНУ КРБ 174.26.12.01 ЛЗ	Арк .
						12
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

- (поз. 15 на рис. 1.2). Насос створює стабільний напір (до 40 м), необхідний для подачі пульпи напірним трубопроводом у гідроциклон через тангенціальний патрубок.
- Розподіл вихідних мас: У гідроциклоні ГЦ-710 (поз. 4 на рис. 1.2) під дією відцентрових сил відбувається розділення: злив (легка фаза) виводиться через верхній патрубок, а піски (важка фаза) — через нижню насадку до згущувача (поз. 7 на рис. 1.2).
- Далі збагачений продукт (концентрат) після серії сепарацій надходить на зневоднення до дискових вакуум-фільтрів ДОО-100-2.5 (поз. 14). Система вакууму забезпечується ресиверами об'ємом 11 м³ (поз. 15) та відповідним насосним обладнанням (поз. 11). Відходи виробництва (хвости) видаляються через збірні канали (поз. 16).

Об'єктом автоматичного регулювання є контур «зумпф — насос — гідроциклон». Система стабілізує густину зливу шляхом коригування частоти обертів двигуна насоса 1ГрК-400/40 та подачі технічної води у зумпф, що дозволяє підтримувати робочу густину пульпи у діапазоні до 2200 кг/м³ при вмісті твердих часток до 30%.

1.3 Опис гідроциклонної установки ГЦ-710, як об'єкта автоматизації

У нашій роботі в якості об'єкту автоматизації обрано гідроциклонну установку на базі ГЦ-710 (діаметр циліндричної частини 710 мм, рис. 1.2).

Гідроциклонна установка ГЦ-710, з огляду технічних даних джерела [15], обрана як об'єкт автоматизації з огляду на її широке застосування в технологічних процесах збагачення та класифікації пульпи, а також на достатньо виражену залежність режиму роботи від стабільності подачі вихідного матеріалу. Для даного апарата характерне поєднання високої інтенсивності сепарації з відносною простотою конструкції, що робить його зручним як для промислової експлуатації, так і для розроблення автоматизованої системи керування в рамках даного проєкту.

					КНУ КРБ .174.26.12.01 ЛЗ	Арк.
						13
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Цей вибір зумовлений кількома важливими технологічними та практичними факторами:

- ГЦ-710 належить до апаратів великого типорозміру, призначених для обробки значних об'ємів пульпи (номінальною продуктивністю до 400 м³/год відповідно до характеристик живильного насоса 1ГрК-400/40). Такі установки зазвичай застосовуються на стадіях перемісної класифікації або дешламації, де критично важливо підтримувати точну межу розділення фракцій.

У порівнянні з моделями меншого діаметра (ГЦ-150 чи ГЦ-250), ГЦ-710 має вищу гідравлічну інерційність через більший об'єм заповнення пульпою. Це забезпечує певне згладжування короткочасних пульсацій тиску, проте вимагає прецизійного налаштування ПІД-регулятора для компенсації транспортного запізнення в напірному трубопроводі.

Апарат оптимально працює в системі «зумпф — частотно-регульований насос — гідроциклон». Завдяки значним геометричним розмірам, зміна частоти обертів двигуна насоса Warman або 1ГрК-400/40 призводить до плавної зміни тиску на вході, що дозволяє стабілізувати щільність зливу та пісків у вузькому технологічному діапазоні.

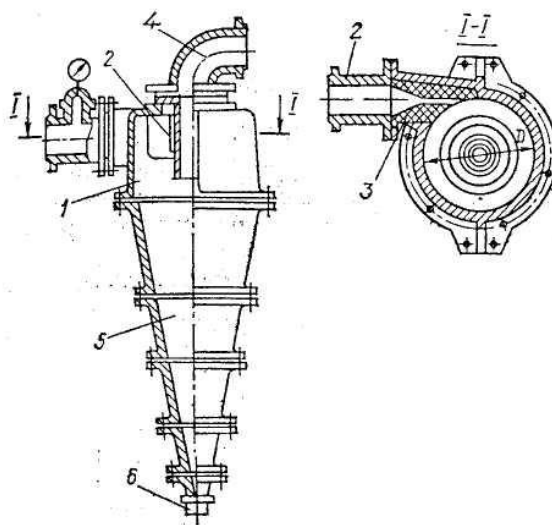


Рисунок 1.2 – Конструкція гідроциклонної установки ГЦ-710

					КНУ КРБ .174.26.12.01 ЛЗ	Арк .
						14
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

У загальному вигляді гідроциклонна установка ГЦУ-710 включає:

1 – корпус у формі циліндра; 2 – отвір живлення; 3 – змінні вкладки живлячого отвору; 4 – зливний патрубок; 5 – конус; 6 – змінна насадка для випуску осаду.

Також на загальноприйнятих схемах ГЦ зображується насосний агрегат з електродвигуном, ПЧ, вимірювальні та допоміжні пристрої.

Технічні характеристики ГЦ-710 подано в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики ГЦ-710

№	Параметр	Значення
1	Діаметр циліндричної частини, D, мм	710
2	Кут конусності, °	10\20
3	Діаметр живильного патрубка, d ₁ ,мм	150 ± 5%
4	Діаметр зливного патрубка, d ₂ ,мм	200
5	Діаметр піскової насадки, d ₃ , мм	48,75,96,150
6	Робочий тиск на вході, p, МПа	0,03 – 0,25
8	Габаритні розміри, мм	1400×1200×3500
9	Маса установки, m, кг	630

Якщо розглядати установку як єдиний об'єкт управління, то її робота визначається взаємодією всіх перелічених компонентів. Насос створює необхідний напір і подає пульпу в гідроциклон, а сам апарат виконує розділення потоку на фракції за рахунок відцентрової сили. Більш важкі частинки рухаються біля стінок, а більш легкі переміщується біля вісі конуса ГЦ. В результаті очищена вода або інша рідина виходить з зливного патрубка, а осад виходить з сопла (зі змінними насадками в залежності від режиму роботи).

Керування процесом сепарації в ГЦ-710 можливо через:

- Зміну частоти двигуна насоса;
- Зміну робочого тиску в межах 0,05 – 0,25 МПа;
- Відбору очищеної рідини та осаду після сепарації.

					КНУ КРБ .174.26.12.01 ЛЗ	Арк .
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		15

1.4 Аналіз існуючої системи автоматизації об'єкта

На більшості діючих збагачувальних фабрик Криворізького басейну керування живильними насосами гідроциклонів, відповідно до [16], здійснюється в ручному або напівавтоматичному режимі. Оператор періодично контролює щільність пульпи за допомогою переносних або контактних датчиків і вручну коригує частоту обертання двигуна або ступінь відкриття засувки.

В результаті такого контролю в даній системі автоматизації з'являються значні недоліки: відсутність замкненого контуру регулювання за щільністю пульпи; значні коливання щільності ($150 - 200 \text{ кг/м}^3$); затримки в реакції оператора; підвищення енергоспоживання через безперервну роботу насоса; підвищений знос насосного обладнання через гідроудари та кавітацію.

Існуюча система не забезпечує стабільності технологічного режиму і потребує модернізації шляхом впровадження автоматичного частотного регулювання в функції щільності пульпи.

На теперішній час існують такі варіанти керування: 1) напівавтоматичне регулювання за непрямыми параметрами; 2) замкнені системи регулювання за щільністю пульпи; 3) інтегровані рішення вищого рівня.

У випадку напівавтоматичного регулювання найчастіше використовують ПІД-регулятори, які налаштовуються для вимірювання тиску на вході в ГЦ, витрати пульпи, рівня в зумпфі.

Керування здійснюється через ПЧ або частотний регулятор, але без прямого вимірювання щільності. Широке застосування знайшла через відносну простоту реалізації.

Як альтернативний спосіб регулювання є використання неконтактних ультразвукових або радіоізотопних щільномірів. Сигнал з датчика надходить на ПЛК, який через ПЧ змінює швидкість насоса. Вони дозволяють тримати щільність у діапазоні $\pm 30 - 50 \text{ кг/м}^3$ і дають економію електроенергії до 15–20 % порівняно з дроселюванням.

					КНУ КРБ .174.26.12.01 ЛЗ	Арк .
						16
Зм .	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Інтегровані рішення вищого рівня, виходячи з робіт [26], передбачають вихід за межі локального автоматичного регулювання окремого контуру та побудову багаторівневої системи керування технологічним процесом (АСУТП). Інтегровані рішення вищого рівня базуються на впровадженні розподілених систем керування DCS або SCADA-систем, які об'єднують підсистеми збагачувальної фабрики в єдиний інформаційний простір.

Дані системи характеризують такі ознаки:

- “Глобальна оптимізація”: система вищого рівня динамічно коригує завдання для локальних ПЛК, враховуючі дані з інших етапів процесу;
- Використання інтелектуальних алгоритмів: впровадження адаптивних алгоритмів керування, заснованих на методах нечіткої логіки або нейронних мережах, що дозволяє прогнозувати зміну щільності до моменту настання критичного відхилення;
- Діагностика та предиктивне обслуговування: система збирає та аналізує дані про стан насосного обладнання, що дозволяє виявляти кавітаційні процеси;
- Стандартизація обміну даних: використання промислових протоколів “OPC UA”, “PROFINET”, “MODBUS”, забезпечує сумісність між обладнанням різних виробників.

Для процесу розділення в гідроциклонах це означає, що система не просто підтримує швидкість насоса, а виступає «експертною системою», яка мінімізує енерговитрати, одночасно забезпечуючи стабільну фракційну ефективність розділення, адаптуючись до змінного гранулометричного складу вхідного живлення.

В ході виконання кваліфікаційної роботи оптимальним є комбінований підхід керування: використання локального замкненого контуру регулювання з можливістю подальшої інтеграції в SCADA.

					КНУ КРБ .174.26.12.01 ЛЗ	Арк .
Зм .	Лист	№ документа	Підпис	Дата		17

Висновки за розділом:

Проведений аналіз стану автоматизації процесу подачі пульпи до гідроциклона підтверджує, що сучасний гідроциклон є динамічно нестабільним об'єктом, де класичне напівавтоматичне керування вже не здатне забезпечити необхідну якість розділення фракцій. Виявлено, що основним «вузьким місцем» існуючих систем є відсутність прямого зворотного зв'язку за щільністю, що призводить до інерційності регулювання та підвищеного зносу механічних вузлів насосного агрегату.

Технічний огляд сучасних рішень доводить, що перехід до частотно-керованого електропривода в комбінації з інтелектуальним ПЛК-керуванням є не просто модернізацією, а технологічною необхідністю. Це дозволяє перетворити насосну установку з пасивного виконавчого механізму на активний елемент стабілізації технологічного режиму. Обраний шлях реалізації на базі перетворювача частоти та контролера серії S7-1500 відкриває можливості для впровадження предиктивної діагностики та повної інтеграції вузла в цифрову структуру підприємства (рівні MES/ERP) за протоколами Profinet та OPC UA.

Таким чином, розробка системи автоматичного керування за функцією щільності пульпи є технічно обґрунтованою відповіддю на виклики енергоефективності та стабільності якості кінцевого продукту збагачення.

					КНУ КРБ .174.26.12.01 ЛЗ	Арк .
						18
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2 СХЕМОТЕХНІЧНА ТА АЛГОРИТМІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1 Проектування системи автоматичного керування

Щоб побудувати дієву систему автоматизації подачі пульпи до гідроциклона, спочатку потрібно зрозуміти, як саме має бути організована взаємодія між технологічним обладнанням, засобами вимірювання та пристроями керування. У межах даної роботи об'єктом автоматизації є насосна установка, яка подає пульпу на вхід гідроциклона ГЦ-710. Саме режим роботи насоса визначає тиск і витрату пульпи, а отже впливає на щільність продукту на виході з апарата. Через це електродвигун насоса доцільно розглядати як основний виконавчий елемент, на який буде здійснюватися керуючий вплив.

На основі даних джерела [11] структура системи керування приймається у вигляді декількох логічно пов'язаних рівнів. На верхньому рівні розміщується комп'ютер оператора з SCADA-системою. Його призначення полягає у відображенні стану установки, контролі поточних параметрів, подачі команд оператором і фіксації аварійних повідомлень.

Основну обробку сигналів і реалізацію алгоритму автоматичного регулювання виконує програмований логічний контролер. Саме ПЛК приймає дані від датчиків, порівнює їх із заданими значеннями, формує керуючі сигнали та передає їх на частотний перетворювач. Крім того, контролер забезпечує логіку роботи установки, зокрема пуск, зупинку, захист від аварійних режимів і блокування при виході параметрів за допустимі межі.

Нижній рівень схеми становлять технічні засоби, що безпосередньо працюють із технологічним процесом. До них належать датчик щільності пульпи, частотний перетворювач, електродвигун насоса, сам насос і гідроциклон ГЦ-710.

					КНУ КРБ.174.26.12.02.ПЗ						
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 2			Літера	Аркуш	Аркушів	
Разробив	Савостяненко В.									19	40
Перевірів	Савицький О І.										
Н контроль	Маринич І А.										
Затвердив	Маринич І А.				КНУ АКІТР – 23ск						

Датчик щільності постійно контролює параметр, за яким оцінюється стан процесу. Отриманий сигнал надходить до ПЛК, де використовується для формування коригувального впливу. Частотний перетворювач у цій схемі відіграє роль посередника між керуючою частиною та силовим електроприводом, оскільки саме він змінює частоту живлення двигуна і тим самим впливає на продуктивність насоса.

Згідно технічних даних джерела [7] у якості виконавчого пристрою використовується перетворювач частоти, а автоматизованого робочого місця оператора — промисловий комп'ютер з SCADA-системою SIMATIC WinCC V8 компанії Siemens

На основі аналізу структури об'єкта, його параметрів та вимог до системи керування створено структурну схему системи автоматизації, що показана на рисунку 2.1

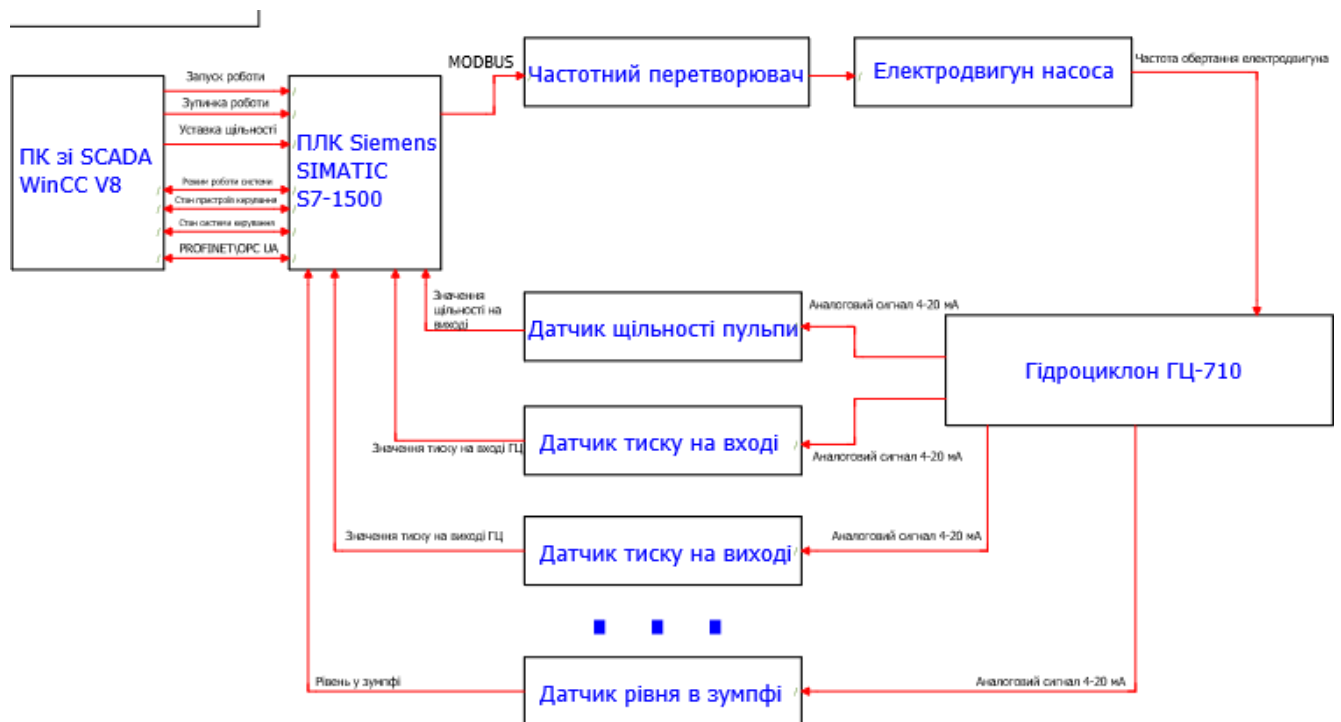


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи керування об'єктом автоматизації

Обрано контролер сімейства Siemens SIMATIC S7-1500, як універсальну платформу для реалізації логіки керування, обміну даними з WinCC та підключення польових пристроїв. Від контролера до SCADA-системи передається інформація про режим роботи системи керування, поточне значення щільності

пульпи, значення тиску на вході та виході гідроциклона, рівень у зумпфі, частоту обертання двигуна насоса, стан виконавчих пристроїв, а від SCADA-системи до контролера — команди на запуск/зупинку, задані уставки щільності та режими роботи.

2.2 Структурно-функціональна організація автоматичної системи регулювання

Для забезпечення стабільної роботи гідроциклона та досягнення заданих показників якості дешламації була розроблена замкнена структура автоматичного регулювання (АСР, рис. 2.2) згідно роботи [8]. Вона базується на принципі від'ємного зворотного зв'язку, що дозволяє системі динамічно реагувати на будь-які відхилення вихідного параметра від заданої норми.

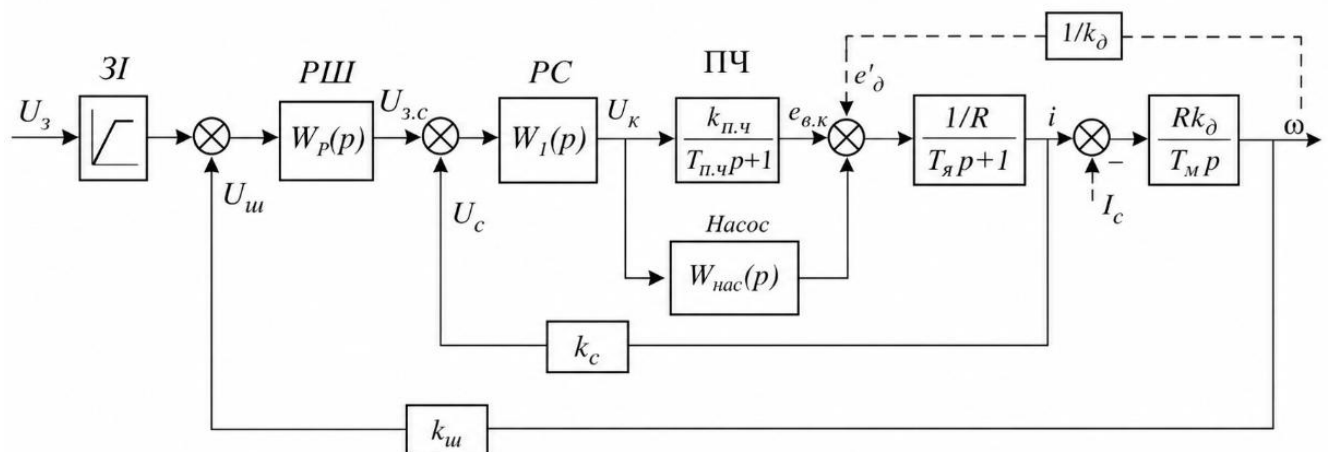


Рисунок 2.2 – Функціональна схема контуру керування швидкості двигуна

Дана схема складається з таких елементів:

- Блок задання (ЗІ): даний вузол ініціює роботу контуру, формуючи сигнал уставки. Його роль зводиться до визначення значення щільності пульпи. Стріпкоподібна зміна сигналу в цьому блоці дозволяє перевірити стійкість та якість перехідних процесів у системі.
- Елемент порівняння: він безперервно зіставляє цільове значення з фактичним показником від датчика. Результатом роботи блока є коригування роботи насосного агрегату.

- ПІД-регулятор: логічний блок системи. ПІД-регулятор формує керуючий вплив, який забезпечує швидке повернення щільності до заданого рівня. Пропорційна складова відповідає за миттєву реакцію, інтегральна – за усунення статичної похибки, диференціальна – за демпфування коливань.
- ПЧ: виконує роль підсилювально-перетворювального елемента. Він приймає керуючий сигнал від внутрішнього регулятора (регулятора струму РС) і формує відповідний силовий вплив на двигун. З позиції динаміки САР, ПЧ розглядається як аперіодична ланка з дуже малою сталою часу, що відображає чисте транспортне та інформаційне запізнення в роботі мікропроцесора.
- Насос виступає в ролі каналу збурення. Він відображає вплив змінного моменту опору на валу двигуна, який виникає внаслідок гідравлічного опору магістралі та коливань параметрів середовища.
- Блок трубопроводу (транспортне запізнення): даний блок моделює реальний процес транспортування пульпи трубопроводом. Оскільки датчик щільності встановлений на певній відстані від насоса, система отримує інформацію про результати свого впливу з певним запізненням. В результаті через даний параметр обмежується швидкодія системи.
- Блок об'єкта керування: візуалізація гідроциклона із зміною концентрації твердої фази під впливом зміни об'єму подачі пульпи.

Зворотній зв'язок забезпечує ультразвуковий датчик щільності, встановлений на зливному патрубку гідроциклона.

					КНУ КРБ .174.26.12.02.ЛЗ	Арк.
						22
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

2.3 Функціональна реалізація контуру керування в середовищі MatLab

Для реалізації імітаційних досліджень у дипломному проєкті обрано середовище графічного моделювання Simulink (пакет розширення MATLAB), оскільки воно дозволяє перейти від абстрактних структурних схем до динамічних розрахунків у реальному часі.

Функціональна модель системи автоматизації (рис. 2.3), представлена у вигляді візуальної схеми, реалізує повний цикл обробки інформації — від формування завдання до моделювання фізичного запізнення в трубопроводі. На основі програмних рішень джерела [19] кожен вузол у Simulink сконфігурований як окремий об'єкт із відповідними математичними параметрами.

Модель є спрощеною та базується на апроксимації об'єкта інерційною ланкою, що є стандартним підходом для синтезу систем автоматичного керування і дозволяє отримати адекватні результати.

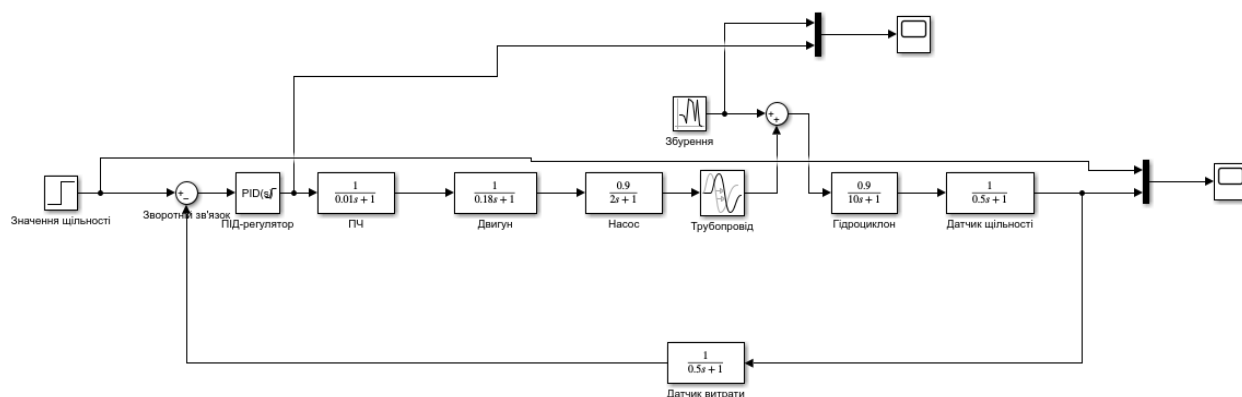


Рисунок 2.3 – Математична модель контуру керування

Вхідний вплив реалізован у вигляді блоку Step, який генерує номінальний сигнал, що відповідає технологічній уставці щільності. Його роль зводиться до імітації моменту подачі пульпи або зміни режиму роботи на ходу.

Операційний вузол представлений у вигляді замкнутого контуру із суматором для порівняння вхідного значення із цільовим. Цей вузол відповідає за формування динамічної похибки.

ПІД-регулятор виконує апроксимацію безперервного закону регулювання. В даному випадку він використовується для умовної заміни ПЛК.

					КНУ КРБ .174 26.12.02 ЛЗ	Арк .
Зм .	Лист	№ документа	Підпис	Дата		23

Модель привода реалізована як передавальна функція першого порядку. Він трансформує вихідний сигнал регулятора у відповідну зміну швидкості насоса. Для подальших розрахунків цей блок враховує часову сталу двигуна, що виключає миттєву зміну обертів.

Трубопровід реалізован у вигляді блоку Transport Delay. Роль блоку зводиться до імітування чистого запізнення потоку пульпи в магістралі, як для датчика щільності.

Технологічний об'єкт являє собою динамічну ланку. Даний блок просто інтегрує всі вищевказані впливи, формуючи фінальний графік перехідного процесу подачі пульпи.

В ході аналізу системи функціональна реалізація завершується замиканням контуру через лінію зворотного зв'язку, що з'єднує вихід гідроциклона з від'ємним входом суматора. В результаті це дає можливість будувати і аналізувати частотні характеристики (ЛАЧХ\ЛФЧХ) прямо з simulink-моделі.

2.4 Аналітичне визначення параметрів передавальних функцій

Для переходу від структурної моделі до динамічного аналізу визначено чисельні значення параметрів кожної ланки. Оскільки математичне обґрунтування передуює остаточному вибору специфікації обладнання, для розрахунків використовуються типові значення параметрів для промислових систем перекачування пульпи на збагачувальних фабриках з джерела [10].

На даному етапі буде розраховано коефіцієнт передачі (K) та сталих часу (T) для кожної ланки АСР на основі математичних алгоритмів джерела [8].

1) Виконавча ланка складається з перетворювача частоти та центробіжного насоса, що приводить у дію насосний агрегат. У межах даної роботи цей блок розглядається як аперіодична ланка першого порядку.

$$W_{\text{ПЧ}}(s) = \frac{K_{\text{ПЧ}}}{T_{\text{ПЧ}}s + 1} \quad (2.1)$$

					КНУ КРБ .174.26.12.02 ЛЗ	Арк .
						24
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

де, $K_{ПЧ}$ – коефіцієнт передачі, який приймається рівним 1. Таке значення обрано з урахуванням необхідності плавного розгону насоса для запобігання гідроударам при перекачуванні абразивної пульпи.

Виходячи з технічних характеристик сучасних промислових перетворювачів частоти, що застосовуються для керування приводами шламових насосів (1ГрК-400/40), дана величина відображає власну інерційність силового інвертора та системи мікропроцесорного керування. Згідно з паспортними даними обладнання, значення $T_{ПЧ}$ лежить у межах одиниць мілісекунд. Для розрахунку САР прийнято значення:

$$T_{ПЧ} = 0,01 [с]$$

Дане значення стане критерієм для налаштування рампи розгону в обраному ПЧ.

В результаті отримано передавальну функцію ПЧ:

$$W_{ПЧ}(s) = \frac{1}{0,01s+1}$$

2) Динаміку зміни продуктивності відцентрового насоса 1ГрК400/40 при зміні частоти обертання двигуна доцільно апроксимувати аперіодичною ланкою першого порядку. При ступінчастій зміні частоти ротора насоса відбувається поступове розкручування ротора, заповнення трубопроводу пульпою та розгін гідравлічного стовпа. Ці явища мають яскраво виражений інерційний характер без суттєвих коливань, що добре описується передаточною функцією першого порядку.

Прийнято наступну математичну модель насосного агрегату:

$$W_H = \frac{K_H}{T_H s + 1} \quad (2.2)$$

де, K_H – коефіцієнт підсилення насоса;

T_H – постійна часу, с.

Вибір коефіцієнта підсилення $K_H = 0,9$ пояснюється залежністю продуктивності насоса від частоти обертання, яка є близькою до лінійної, однак не ідеальною через гідравлічні втрати та особливості характеристики насоса при

					КНУ КРБ .174.26.12.02 ЛЗ	Арк .
						25
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

роботі на пульпі. Значення підтверджується як паспортними даними насоса, так і результатами моделювання аналогічних агрегатів у збагачувальній галузі.

Постійна часу $T_H = 2$ [с] прийнята на основі аналізу технічної літератури [15] та досвіду моделювання насосних установок подібної потужності (130–160 кВт). Для насосів типу ГрК при довжині нагнітального трубопроводу 40–80 м і роботі на пульпі густиною 1,4–1,8 г/см³ постійна часу зазвичай знаходиться в межах 1,6–2,6 с.

На основі даних коефіцієнтів отримано передавальну функцію насоса:

$$W_H = \frac{0,9}{2s+1}$$

3) Для відтворення динаміки роботи насосного агрегату в САК, електродвигун представлено у вигляді аперіодичної ланки 1-го порядку. Модель ланки враховує інерційність двигуна під час розгону та зміни режиму навантаження:

$$W_{ДВ} = \frac{K_{ДВ}}{T_{ДВ}s+1} \quad (2.3)$$

Оскільки керуючий сигнал від ПЧ та швидкість обертання валу розглядаються в САК у нормованих одиницях, коефіцієнт підсилення приймається рівним одиниці.

Стала часу сформована на основі технічних характеристик двигуна згідно джерела [25]. Стала часу приймається рівною 1,18 через співвідношення власного моменту інерції ротора до номінального обертального моменту.

В результаті отримана наступна передавальна функція:

$$W_{ДВ} = \frac{1}{1,18s+1}$$

4) Ланка транспортного запізнення (трубопровід) визначається передавальною функцією S-області:

$$W_{зп}(s) = e^{-\tau s} \quad (2.4)$$

Час запізнення $\tau=4$ с визначено розрахунково: відстань від нагнітального патрубку насоса до місця встановлення датчика щільності становить близько 10 м, а середня швидкість потоку пульпи прийнята 2,5 м/с. Згідно з цим розраховано час запізнення як відношення довжини до швидкості:

					КНУ КРБ .174.26.12.02.ЛЗ	Арк .
Зм .	Лист	№ документа	Підпис	Дата		26

$$\tau = \frac{10}{2,5} = 4 \text{ [с]}$$

5) Динаміка процесу зміни щільності описує інерційність накопичення твердої фази (осаду) в об'ємі гідроциклона:

$$W_{ГЦ}(s) = \frac{K_{ГЦ}}{T_{ГЦ}s+1} \quad (2.5)$$

Коефіцієнт підсилення $K_{ГЦ} = 0,9$ отриманий емпірично: зміна продуктивності насоса на 10 % призводить до зміни щільності зливу приблизно на 8–10 %, що підтверджується даними експлуатації гідроциклонів середнього типорозміру. Стала часу $T_{ГЦ} = 10$ с відповідає характерному часу оновлення об'єму пульпи в апараті ГЦ-710 згідно літератури [12].

Отримано наступну передавальну функцію ГЦ:

$$W_{ГЦ}(s) = \frac{0.9}{10s+1}$$

Останньою ланкою системи йде датчик щільності. Сучасні датчики щільності використовують ультразвукові або радіоізотопні технології вимірювання. Незважаючи на високу швидкість поширення ультразвукових хвиль, реальний датчик щільності не є безінерційною ланкою. Його динамічні властивості описуються аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_d(s) = \frac{K_d}{T_d s+1} \quad (2.6)$$

Оскільки вихідний сигнал датчика лінійно масштабується в контролері у відповідний діапазон технологічної шкали, для нормалізованих розрахунків коефіцієнт підсилення приймається рівним 1,0.

Стала часу датчика відображає сумарну інерційність вимірювального каналу. Вона складається з часу апаратної обробки відбитого акустичного сигналу мікропроцесором приладу. Стала часу приймається на основі характеристик і вимог сучасних ультразвукових густиномірів з джерела [14]:

$$T_d = 0,5 \text{ [с]}.$$

Виходячи з цього отримано наступну передавальну функцію датчика:

$$W_d(s) = \frac{1,0}{0,5s+1}$$

					КНУ КРБ .174.26.12.02.ЛЗ	Арк .
						27
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Формування головної передавальної функції:

Згідно структурної схеми 2.3 та функціональної схеми 2.2, повна передавальна функція розімкненого контуру керування дорівнює добутку передавальних функцій усіх послідовно з'єднаних ланок:

$$W_{\text{пов}}(s) = W_{\text{ПЧ}}(s) \cdot W_{\text{ДВ}}(s) \cdot W_{\text{Н}}(s) \cdot W_{\text{ГЦ}}(s) \cdot W_{\text{Д}}(s) \cdot W_{\text{ЗП}}(s) \quad (2.7)$$

Використовуючи всі вищевказані числові значення отримано наступну передавальну функцію:

$$W_{\text{пов}}(s) = \left(\frac{1}{0,01s + 1}\right) \cdot \left(\frac{1}{0,18s + 1}\right) \cdot \left(\frac{0,9}{2s + 1}\right) \cdot \left(\frac{0,9}{10s + 1}\right) \cdot \left(\frac{1}{0,5s + 1}\right) \cdot e^{-4s}$$

$$W_{\text{пов}}(s) = \frac{0,81}{0,18s^5 + 2s^4 + 15s^3 + 28,4s^2 + 12,7s + 1} \cdot e^{-4s}$$

2.5 Побудова та аналіз імітаційної моделі стабілізації щільності пульпи

Для перевірки розрахованої математичної моделі та синтезу параметрів ПІД-регулятора використано пакет MatLab із розширенням Control System Toolbox.

Процес моделювання розділений на наступні логічні етапи: ініціалізація передавальних функцій та аналіз перехідних процесів у замкненому контурі.

На першому етапі до середовища MatLab→Script Window перенесено аналітичну модель з можливістю модифікації входних параметрів з попередніх пунктів. На рис. 2.4 зображено лістинг коду моделі.

```
>> % Математична модель САР
>> s = tf('s');
>> % Передавальні ланки пристроїв
>> W_PCH = 1/(0.01*s + 1); % Передавальна функція ПЧ
>> W_nasos = 0.9 / (2*s + 1); % Передавальна функція насоса 1ГРК400\40
>> W_trub = 1; % Запізнення трубопроводу
>> W_GC = 0.9 / (10*s + 1); % Передавальна функція ГЦ
>> W_DV = 1 / (0.18*s + 1); % Передавальна функція двигуна
>> W_dat = 1 / (0.5*s + 1); % Передавальна функція датчика
>> % Повна передавальна функція САР
>> W_obj = W_PCH * W_nasos * W_trub * W_GC * W_DV * W_dat;
>> % Додавання транспортного запізнення до функції
>> W_obj.InputDelay = 4;
>> % Візуалізація моделі
>> disp ("Передаточна функція об'єкта:");
Передаточна функція об'єкта:
>> W_obj

W_obj =

exp(-4*s) * -----
0.018 s^5 + 1.947 s^4 + 14.96 s^3 + 28.38 s^2 + 12.69 s + 1
```

Рисунок 2.4 – Лістинг коду ініціалізації поліноміальної функції

					КНУ КРБ .174.26.12.02 ЛЗ	Арк .
						28
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Налаштування ПІД-регулятора виконано через функцію PID для отримання оптимальних коефіцієнтів регулювання. Також побудову замкнутого контуру і візуалізацію моделі зображено рис. 2.5.

```
>> % Задання ПІД-регулятора
>> % Коефіцієнти задані початкові із подальшим редагуванням
>> Kp = 1.8;
>> Ki = 0.35;
>> Kd = 0.9;
>> W_PID = pid(Kp, Ki, Kd);
>>
>> % Побудова замкнутого контуру
>> W_closed = feedback(W_PID * W_obj, 1);
>> % Візуалізація результатів
>> figure (1);
>> step(W_closed, 120); grid on;
>> title('Перехідний процес регулювання щільності пульпи');
>> xlabel('Час, с');
>> ylabel('Щільність, відн. од. ');
>> figure (2);
>> margin(W_obj); grid on; % Аналіз стійкості системи
>> title('Частотні характеристики об'єкта');
>> % Полюси замкненої системи
>> figure (3);
>> pzmap(W_closed); grid on;
```

Рисунок 2.5 – Лістинг коду побудови діаграм Баде

Перхідна функція зображена на рис. 2.6.

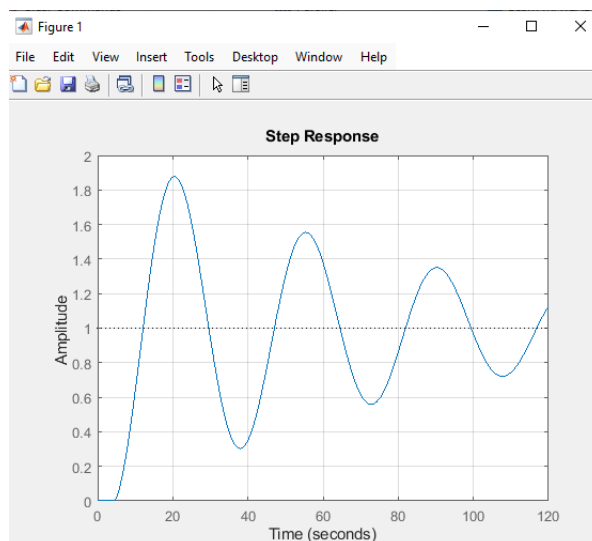


Рисунок 2.6 – Графік перехідного процесу щільності пульпи

Перехідний процес, отриманий у результаті моделювання (рис. 2.6), характеризується значним перерегулюванням 88 %, наявністю затухаючого коливання та часом регулювання близько 35 секунд. Незважаючи на те, що система

виходить на задане значення щільності без статичної помилки, якість регулювання потребує покращення шляхом коригування параметрів ПД-регулятора.

На основі вихідних діаграм буде отримано запас стійкості за амплітудою (Gain Margin) та запас стійкості за фазою (Phase Margin).

Вихідні діаграми Бодє зображено на рисунку 2.7.

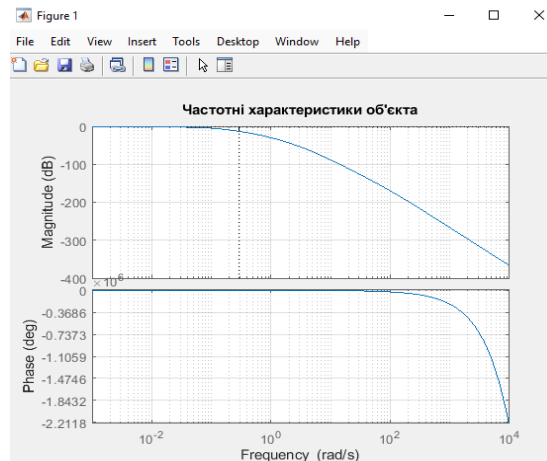


Рисунок 2.7 – ЛАЧХ та ЛФЧХ замкненого контуру керування

Частотні характеристики об'єкта регулювання (рис. 2.6) вказують на монотонне спадання амплітудно-частотної характеристики та значне відставання фази на високих частотах. Наявність транспортного запізнення в чотири секунди суттєво зменшує фазовий запас, що ускладнює синтез регулятора. Об'єкт характеризується як інерційна система з великим запізненням, що потребує консервативних налаштувань ПД-регулятора для забезпечення стійкої роботи.

Завершальним етапом дослідження системи САР щільності пульпи є моделювання карти полюсів. Побудована карта полюсів зображена на рисунку 2.8.

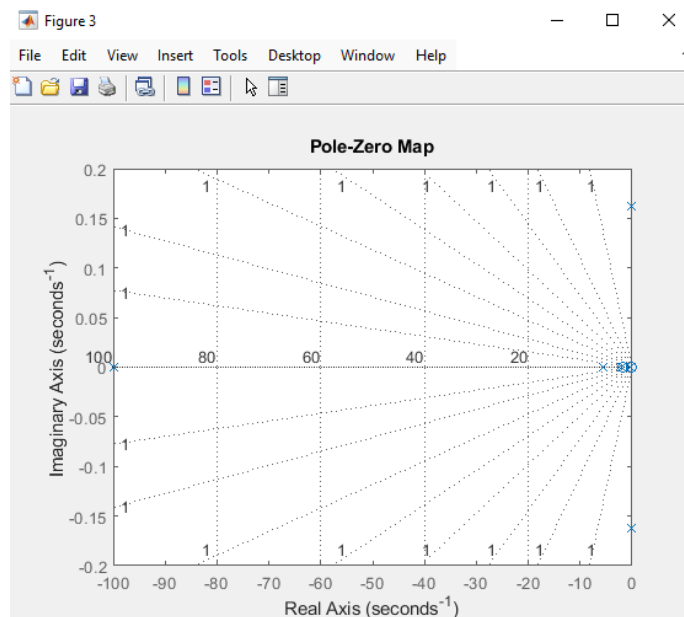


Рисунок 2.8 – Карта полюсів

Карта полюсів замкненої системи (рис. 2.8) демонструє, що всі полюси розташовані у лівій півплощині, що свідчить про стійку роботу системи. Відсутність комплексних полюсів з малою негативною реальною частиною вказує на відсутність інтенсивних коливань. Наявність полюсів, близьких до початку координат, пояснює інерційність і певну повільність перехідних процесів, що характерно для об'єкта з великим транспортним запізненням.

2.6 Інформаційна складова та алгоритмічне забезпечення системи

На основі даних джерела [22] створено інформаційне забезпечення автоматизованої системи, яка автоматизує ділянку керування технологічним процесом сепарації. Для цього побудовано таблицю 2.1 із наведенням цифрових входів\виходів для всіх параметрів процесу сепарації.

Таблиця 2.1 – Інформаційна складова системи

№	Назва сигналу	Тип сигналу
1	Густина пульпи на виході	AI
2	Витрата пульпи	AI
3	Стан ПЧ	DI

4	Сигнал керування на ПЧ	АО
5	Аварійна зупинка	DI

Алгоритмічне забезпечення визначає послідовність обробки інформації в контролері для реалізації обраного закону керування та забезпечення стабільної роботи гідроциклону в умовах випадкових збурень. Також на основі змісту даного параметру буде обрано виконавчі та польові пристрої.

На рис. 2.9 представлена блок-схема алгоритмічного забезпечення системи подачі пульпи до ГЦ. Кожна логічна операція в представленій схемі безпосередньо детермінує вибір польового обладнання та засобів автоматизації.

Алгоритм базується на детермінованому зчитуванні аналогового сигналу зворотного зв'язку. Виконання блоку 2 вимагає вибору датчика густини з високою часовою стабільністю та уніфікованим вихідним сигналом. Висока частота опитування вказує на необхідність використання контролера із вбудованими аналогово-цифровими перетворювачами розрядністю не менше 12 біт для мінімізації похибки квантування при розрахунку неузгодженості в блоці 3.

Оскільки густина пульпи є інерційним параметром, обчислювальна потужність процесора повинна забезпечувати стабільний цикл виконання алгоритму без тремтіння\стрибків.

Логіка обмеження безпосередньо корелює з технічними характеристиками виконавчого механізму. Встановлений верхній поріг у 1500 одиниць визначає діапазон масштабування для вихідного ЦАП контролера та вхідного каскаду перетворювача частоти. Це обґрунтовує вибір ПЧ із підтримкою функції векторного керування або скалярного регулювання з чітко заданою вольт-частотною характеристикою, де 1500 одиниць алгоритму будуть лінійно відображені на максимальну частоту двигуна.

Блок виведення сигналу визначає вимоги до комунікаційного каналу між

контролером та виконавчим механізмом. Це визначає вибір між аналоговим керуванням або використанням промислових мереж (Profinet, Modbus TCP, OPC UA).

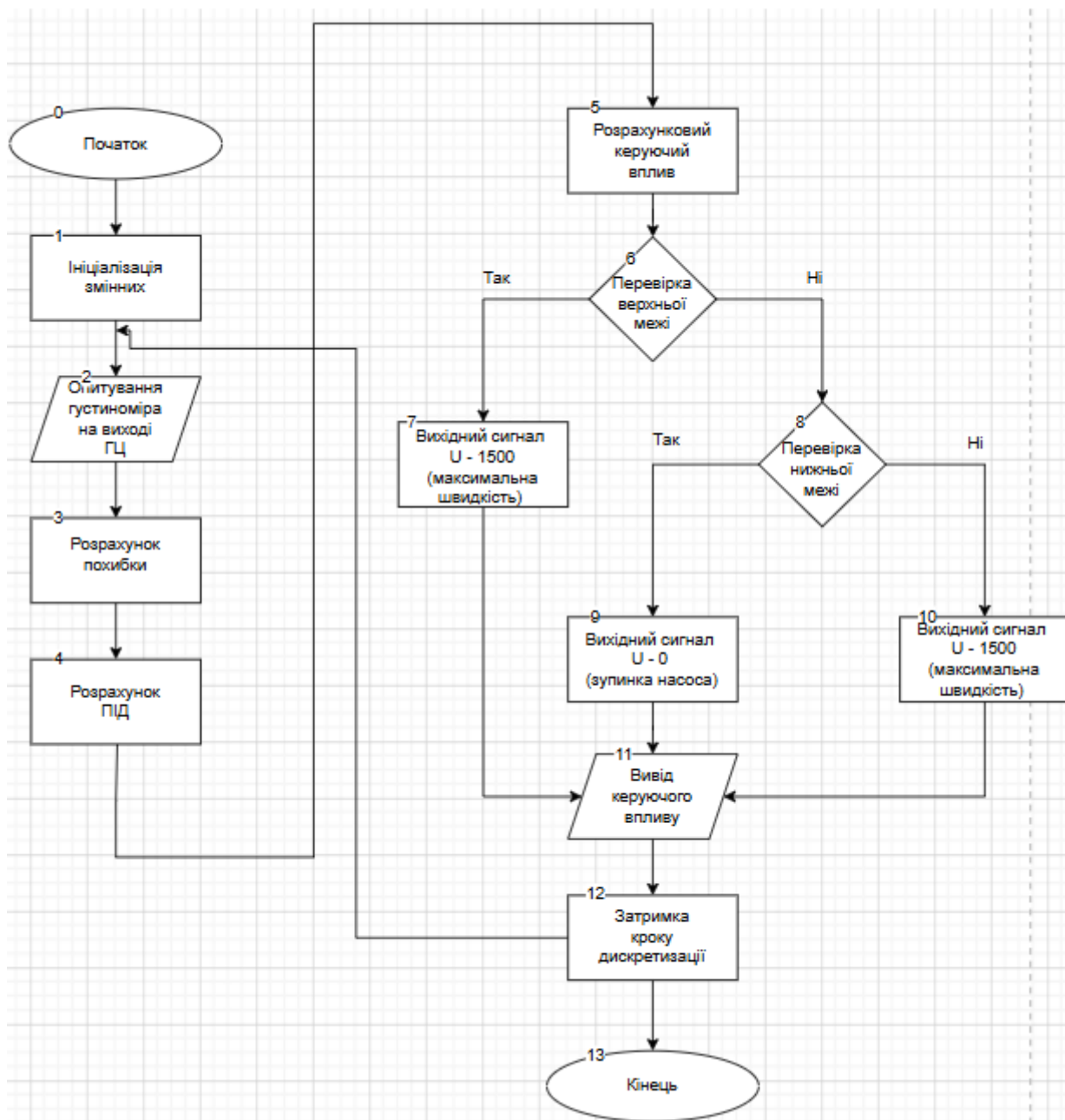


Рисунок 2.9 – Блок-схема алгоритмічного забезпечення системи подачі пульпи до ГЦ

2.7 Розроблення структури системи керування об'єктом автоматизації

Щоб побудувати дієву систему автоматизації подачі пульпи до гідроциклона, спочатку потрібно зрозуміти, як саме має бути організована взаємодія між технологічним обладнанням, засобами вимірювання та пристроями керування. У межах даної роботи об'єктом автоматизації є насосна установка, яка подає пульпу на вхід гідроциклона ГЦ-710. Саме режим роботи насоса визначає тиск і витрату пульпи, а отже впливає на щільність продукту на виході з апарата. Через це електродвигун насоса доцільно розглядати як основний виконавчий елемент, на який буде здійснюватися керуючий вплив.

Структура системи керування приймається у вигляді декількох логічно пов'язаних рівнів. На верхньому рівні розміщується комп'ютер оператора з SCADA-системою. Його призначення полягає у відображенні стану установки, контролі поточних параметрів, подачі команд оператором і фіксації аварійних повідомлень.

Основну обробку сигналів і реалізацію алгоритму автоматичного регулювання виконує програмований логічний контролер. Саме ПЛК приймає дані від датчиків, порівнює їх із заданими значеннями, формує керуючі сигнали та передає їх на частотний перетворювач. Крім того, контролер забезпечує логіку роботи установки, зокрема пуск, зупинку, захист від аварійних режимів і блокування при виході параметрів за допустимі межі.

Нижній рівень схеми становлять технічні засоби, що безпосередньо працюють із технологічним процесом. До них належать датчик щільності пульпи, частотний перетворювач, електродвигун насоса, сам насос і гідроциклон ГЦ-710. Датчик щільності постійно контролює параметр, за яким оцінюється стан процесу. Отриманий сигнал надходить до ПЛК, де використовується для формування коригувального впливу. Частотний перетворювач у цій схемі відіграє роль посередника між керуючою частиною та силовим електроприводом, оскільки саме він змінює частоту живлення двигуна і тим самим впливає на продуктивність насоса.

					КНУ КРБ .174.26.12.02 ЛЗ	Арк.
						34
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Відповідно до вимог у якості виконавчого пристрою використовується перетворювач частоти, а автоматизованого робочого місця оператора — промисловий комп'ютер з SCADA-системою SIMATIC WinCC V8 компанії Siemens

2.8 Обґрунтування вибору апаратного забезпечення системи керування

Відповідно до вимог технологічного процесу та структурної схеми системи керування необхідно забезпечити надійний обмін даними між програмованим логічним контролером та SCADA-системою, яка працює на промисловому комп'ютері. Для підключення комп'ютера до контролера найбільш поширеним і надійним інтерфейсом є промислові мережі PROFINET та OPC UA.

Аналіз серії контролерів Siemens SIMATIC S7-1500 показав, що вони повністю підтримують ці протоколи і забезпечують швидкий обмін даними з SCADA-системою SIMATIC WinCC V8. Контролери мають модульну архітектуру: центральний процесорний модуль не містить вбудованих модулів вводу/виводу, а розширення функціональності виконується за рахунок установки додаткових модулів (до 32 шт.). До складу системи можуть бути включені модулі аналогового вводу, дискретного вводу/виводу, комунікаційні процесори та інтерфейсні модулі PROFINET. Вибір S7-1500 обумовлений не лише надійністю, а й здатністю процесора підтримувати стабільний цикл обробки для реалізації ПІД-алгоритму з кроком дискретизації $T_s = 0,1$ с, що було прийнято під час моделювання в Simulink.

Для реалізації розробленого алгоритму автоматичного керування та забезпечення інтеграції об'єкта в загальну інформаційну мережу підприємства обрано ПЛК серії SIMATIC S7-1500 із модулем CPU 1511-1 PN (рис. 2.10, табл. 2.2).

Конструкція контролера дозволяє гнучко розширювати систему за допомогою додаткових модулів (до 32 одиниць на одній стійці). Наявність інтегрованого інтерфейсу PROFINET та підтримка протоколу OPC UA дозволяють організувати надійний високошвидкісний обмін даними зі SCADA-системою.

					КНУ КРБ .174.26.12.02 ЛЗ	Арк.
						35
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Центральний процесор CPU 1511-1 PN має середню продуктивність та оснащений пам'яттю програми та даних середнього обсягу. Він призначений для побудови систем управління, що використовують для своєї роботи системи локального та розподіленого введення-виводу.



Рисунок 2.10 – ПЛК S7-1500 CPU 1511-1 PN

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики ПЛК S7-1500

№	Характеристика	Значення
1	Номінальна напруга	12 В
2	Номінальний струм	0,7 А
3	Вихідна потужність	10 Вт
4	Вбудована пам'ять для програм	150 КБ
5	Вбудована пам'ять для даних	1 Мбайт
6	Час виконання операцій із бітами	60 нс
7	Рейтинг захисту	IP65

2.9 Аналіз та вибір польових пристроїв

Особливістю об'єкта керування є висока абразивність і агресивність мінеральної пульпи (вміст твердої фази 30–60 %, наявність гострих частинок кварцу, руди тощо). Це суттєво ускладнює вимірювання щільності: більшість контактних датчиків швидко зношуються, а радіоізотопні щільноміри вимагають

спеціальних дозволів і підвищених заходів безпеки. Тому для вимірювання щільності пульпи на виході з гідроциклона ГЦ-710 обрано ультразвуковий щільномір компанії Rhosonics SDM (рис. 2.11, табл. 2.3).

Прилад працює за принципом ультразвукового вимірювання швидкості звуку в пульпі, має керамічний контактний елемент високої зносостійкості та широко застосовується на збагачувальних фабриках та металургії. Висока роздільна здатність датчика Rhosonics SDM дозволяє мінімізувати шум у каналі зворотного зв'язку, що позитивно впливає на стійкість системи, підтверджену частотними характеристиками (діаграмами Бодє).



Рисунок 2.11 – Ультразвуковий щільномір Rhosonics RDM

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики Rhosonics RDM

№	Характеристика	Значення
Основне	Номер моделі	SDM ECO
	Метод роботи	Акустичний опір
	Точність вимірювання	+/-0,5%
	Рейтинг захисту	IP68
Сенсор	Метод роботи	Акустичний
	Допустимий тиск процесу	Від 1 до 16 бар при температурі 110°C; До 40 бар при температурі 20°C
	Матеріал стрижня	Кераміка (абразивостійка)

					КНУ КРБ .174 26.12.02 ЛЗ	Арк.
						37
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Блок НМІ	Джерело живлення	18...32 В постійного струму
	Аналоговий вихід	2×4-20 Ма
	Цифрові інтерфейси	ModBus RS-485, Ethernet
	Рейтинг захисту	IP65
	Дисплей	7"

Для контролю рівня в приймальній ємності подачі пульпи доцільно застосовувати ультразвуковий датчик рівня SIEMENS SITRANS Probe LU240 (рис. 2.12, табл. 2.4). Принцип роботи – ультразвукове вимірювання опору сумішей, що важливо при роботі в абразивному середовищі. Датчик має вихід 4-20 Ма, підтримує HART-зв'язок, має високу точність та функцію подавлення хибних ехо-сигналів.



Рисунок 2.12 – Датчик рівня SITRANS PROBE LU240

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики SITRANS PROBE LU240

№	Характеристика	Значення
1	Принцип вимірювання	Ультразвуковий, pulse-echo
2	Контрольований параметр	Рівень рідини\суміші
3	Діапазон вимірювання	3\6\12 м
4	Точність	+/-0,15%

					КНУ КРБ .174.26.12.02 ЛЗ	Арк .
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		38

5	Вихідний сигнал	4-20Ма, HART
6	Монтаж	Для резервуарів або простих ємностей
7	Рейтинг захисту	IP68

Для вимірювання та контролю тиску на вході та виході гідроциклона обрано перетворювач тиску SIEMENS SITRANS P220 (рис. 2.13, табл. 2.5). Датчик має корпус з нержавіючої сталі та стійку мембрану до агресивного середовища, здатен витримувати високе перевантаження. Діапазон вимірювання від 2,5 до 1000 бар.



Рисунок 2.13 – Датчик тиску SITRANS P220

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики SITRANS P220

№	Характеристика	Значення
1	Принцип вимірювання	П'єзорезистивний
2	Контрольований параметр	Надлишковий тиск рідин, парів та газів
3	Діапазон вимірювання	2,5...1000 бар
4	Точність	+/-0,25%
5	Вихідний сигнал	4-20Ма
6	Рейтинг захисту	IP65
7	Робоча температура	-20...+85°C

					КНУ КРБ .174.26.12.02 ЛЗ	Арк.
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		39

У системі подачі робочого середовища до гідроциклона витрата є ще одним з головних параметрів, контроль якої забезпечує плавну роботу всього процесу.

Для контролю витрати пульпи в системі доцільно застосувати електромагнітний датчик витрати SIEMENS SITRANS F M MAG 3100 (рис. 2.14, табл. 2.6).

SITRANS F M – це лінійка датчиків, які використовують технологію електромагнітного випромінювання для визначення рівня витрати в системах подачі густих середовищ із наявністю твердих домішок. Вибір датчика також зумовлений відсутністю рухомих частин, що підвищує його надійність роботи, зменшує знос і виключає додаткові втрати тиску в трубопроводі.



Рисунок 2.14 – Електромагнітний датчик витрати SITRANS F M MAG3100

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики SITRANS F M MAG3100

№	Характеристика	Значення
1	Метод вимірювання	Електромагнітне випромінювання
2	Швидкість потоку	0-10 м\с
3	Монтаж	Фланцеве
4	Температура середовища	До 180°C
5	Рейтинг захисту	IP68

2.10 Виконавчі пристрої: аналіз, вибір та обґрунтування вибору обладнання

Враховуючи потужність насосного агрегату 1ГрК-400/40 (132 кВт) та важкі умови експлуатації на збагачувальній фабриці (висока запиленість та вологість), замість серії General Purpose обрано електродвигун серії SIMOTICS SD 1LE1503 (рис. 2.15, табл. 2.7) у чавунному корпусі. Це забезпечує необхідну механічну міцність привода та високий показник енергоефективності рівня IE3, що інтегрується в загальну систему керування через перетворювач частоти.

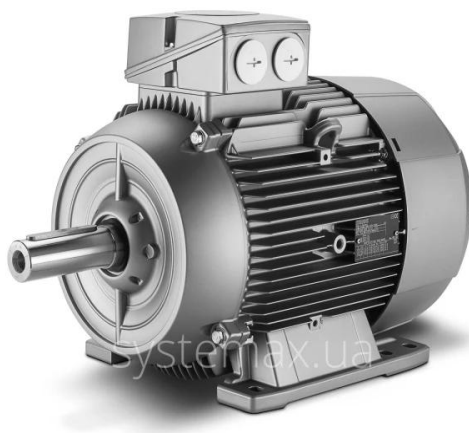


Рисунок 2.15 – Асинхронний електродвигун SIEMENS SD 1LE1503-3AA23

Таблиця 2.7 – Технічні характеристики SIMOTICS GP 1LE1503-3AA23 [25]

№	Характеристика	Значення
1	Номінальна потужність	132 кВт
2	Номінальна напруга	3×400 В
3	Частота	50\60 Гц
4	Кількість полюсів	4
5	Швидкість обертання	1500\3000 об\хв
6	Клас енергоефективності	IE3
7	Рейтинг захисту	IP55\65
8	Клас ізоляції	F
9	Коефіцієнт потужності	0,88
10	ККД	90,5%

Для регулювання швидкості обертання насосного агрегату 1ГрК-400/40 потужністю 132 кВт на ділянці збагачення ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» використовується перетворювач частоти серії SINAMICS G120X (рис. 2.16, табл. 2.8). Даний пристрій інтегрований у загальну цифрову мережу підприємства через інтерфейс PROFINET, що забезпечує прямий циклічний обмін даними з програмованим логічним контролером SIMATIC S7-1500 без використання проміжних аналогових модулів. У межах системи автоматизації перетворювач реалізує закон частотного регулювання для підтримки заданих параметрів на вході в гідроциклон ГЦ-710.

Враховуючи потужність електродвигуна (132 кВт) обрано типорозмір ПЧ FSG – з двома вентиляторами та діапазоном потужності 160-250 кВт.



Рисунок 2.16 – Перетворювач частоти SIEMENS SIMANICS G120X

Таблиця 2.8 – Технічні характеристики SIMANICS G120X [26]

№	Характеристика	Значення
1	Номінальна вихідна потужність	160 кВт
2	Номінальний струм	250 А
5	Інтерфейси	PROFINET, MODBUS RTU
6	Рейтинг захисту	IP20\21

7	Напруга живлення	380\480 В
8	Кількість дискретних входів	2
9	Кількість аналогових входів	1
10	Кількість дискретних виходів	1
11	Кількість аналогових виходів	1

Діапазон керуючого сигналу в ПЛК, розрахований у моделі, лінійно масштабується в ПЧ на вихідну частоту 0...50 Гц. Обраний ПЧ SINAMICS G120X має динамічні характеристики, що дозволяють відпрацьовувати зміни частоти обертання двигуна насоса в темпі, необхідному для компенсації збурень, виявлених під час статистичного аналізу пульпи.

В системі подачі пульпи, де важлива висока зносостійкість, стабільність напору та здатність витримувати змінний режим роботи потрібен насос з конструкцією для важкого режиму. В якості такого насоса обран 1ГрК400/40 (рис. 2.17, табл. 2.9).

Центробіжні насоси 1ГрК400/40 призначені для перекачування високоабразивних шламів в технологічних процесах: від подачі до гідроциклонів до повторної флотації.

Обґрунтуванням вибору даного насосу є наступні переваги:

- Продуктивність і напір відповідають ГЦ-710 в робочому та змінному режимі;
- Наявність гумового футерування забезпечує високий ресурс у абразивному середовищі;
- Сумісність з двигуном 132 кВт при частоті обертання 1500-3000 об/хв;
- Узгоджується з частотним регулюванням.



Рисунок 2.17 – Центробіжний насос 1ГрК400/40

Таблиця 2.9 – Технічні характеристики 1ГрК400/40 [27]

№	Характеристика	Значення
1	Діаметр напорного патрубка	515 мм
2	Маса	1147 кг
3	Продуктивність	400 м³/ч
4	Напор	40 м
5	Частота обертання	100-1000 об/хв
6	Максимальна потужність	132 кВт
7	ККД	56%

Згідно обраних виконавчих пристроїв створено загальну таблицю 2.10

Таблиця 2.10 – Виконавчі пристрої

№	Назва параметра керування	Назва виконавчого пристрою	Тип входу	Діапазон зміни	Вхідні інтерфейси	Період оновлення	Напруга живлення	Споживана потужність
1	Частота обертання двигуна	ПЧ SIEMENS SIMANICS G120X	MODBUS	0-590 Гц	MODBUS RTU	0,1 с	~380 В	132 кВт
2	Привід живильного насоса	Електродвигун SIEMENS SIMOTICS GP 1LE1503-3AA23	-	1500\3000 об/хв	-	-	~380 В	132 кВт
3	Напор	1ГрК400/40	-	100-1000 об/хв	-	-	~380 В	132 кВт

2.11 Перевірка відповідності технічних засобів автоматизації розрахунковим вимогам

Густина пульпи в розрахунках прийнята рівною 1600 кг/м³. Таке значення відповідає типовим умовам роботи гідроциклона ГЦ-710 на збагачувальних фабриках, де вміст твердої фази становить 40–60 %. Воно є загальноприйнятим у технічній літературі та проектній практиці при виконанні гідравлічних розрахунків живильних насосів.

Після того, як вибрали шламовий насос 1ГрК400/40 у комплекті з електродвигуном потужністю 132 кВт, необхідно математично перевірити, наскільки цей вибір відповідає реальним вимогам технологічного процесу.

На першому етапі визначається гідравлічна потужність насоса, яка залежить від подачі, напору та густини пульпи. Далі з урахуванням ККД насоса обчислюється потужність на валу, після чого вибір електродвигуна перевіряється за умови забезпечення необхідного запасу потужності.

Гідравлічна потужність, яку повинен розвивати насос, визначається за формулою:

$$P_{\text{гідр}} = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H}{3600 \cdot \eta_{\text{насоса}}} \quad (2.6)$$

де, Q – об’ємна продуктивність насоса, [м³/год];

ρ – густина пульпи, [кг/м³];

g – прискорення вільного падіння, [м/с²];

H – напір, створюваний насосом, [м];

$\eta_{\text{насоса}}$ – ККД насоса.

Для нормальної роботи великогабаритної гідроциклонної установки ГЦ-710 номінальна робоча продуктивність відповідає параметрам живильного насоса. Згідно з характеристиками насосного агрегата 1ГрК-400/40, розрахункове значення об’ємної продуктивності становить $Q = 400$ м³/год. Густина перекачуваної залізорудної пульпи приймається на рівні $\rho = 1600$ кг/м³.

Підставивши дані у формулу отримано:

					КНУ КРБ .174.26.12.02 ЛЗ	Арк .
						45
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

$$P_{\text{гидр}} = \frac{400 \cdot 1600 \cdot 9,81 \cdot 40}{3600 \cdot 0,56 \cdot 1000} \approx 124,6 \text{ [кВт]}$$

Отримана гідравлічна потужність складає 124,6 кВт. Оскільки в системі автоматичного керування застосовується частотний перетворювач, який забезпечує плавний розгін агрегату, обмежує пускові струми та має активні алгоритми захисту від перевантажень, необхідність у закладанні класичного великого запасу потужності (15–20%) відпадає. Для надійної роботи регульованого привода достатньо технологічного запасу в межах 5–10%. Враховуючи це, а також регламентовані паспортні дані насоса 1ГрК-400/40, обрано електродвигун із номінальною потужністю 132 кВт.

Також важливо переконатися, що обраний перетворювач частоти Siemens SINAMICS G120X фізично зможе «потягнути» цей двигун у реальних умовах роботи. Недостатній запас по струму може призвести до перегріву ПЧ, спрацювання захисту або навіть аварійного відключення системи під час пуску чи при короткочасному підвищенні навантаження.

Для перевірки ПЧ математичним шляхом достатньо визначити номінальний струм двигуна і порівняти його з номінальним струмом ПЧ.

Номінальний струм двигуна визначено через формулу для трифазного асинхронного двигуна:

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{\text{д}}} \quad (2.7)$$

де, $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність двигуна, кВт;

U – номінальна напруга живлення, В;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності;

$\eta_{\text{д}}$ – ККД двигуна.

Підставлено значення:

$$I_{\text{н}} = \frac{132000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,88 \cdot 0,95} \approx 239,5 \text{ [А]}$$

В результаті отримано, що двигун в номінальному режимі споживає приблизно 239,5 А.

					КНУ КРБ .174.26.12.02 ЛЗ	Арк .
						46
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Тепер необхідно визначити запас по струму для ПЧ. Запас по струму для ПЧ визначається через порівняння номінального струму двигуна з номінальним вихідним струмом перетворювача. Умова має наступний вигляд:

$$k_3 = \frac{I_{ПЧ}}{I_{дв}} \quad (2.8)$$

Тоді:

- якщо $k_3 \geq 1$ – ПЧ технічно підходить;
- якщо $k_3 > 1$ – є запас;
- якщо $k_3 < 1$ – ПЧ замалий, можлива аварійна ситуація.

Підставлено значення:

$$k_3 = \frac{250}{239,5} = 1,043$$

В результаті розрахунку запас по струму ПЧ становить 4,4 %. Враховуючи, що перетворювач частоти серії SINAMICS G120X забезпечує керований плавний пуск без виникнення значних пускових струмів (на відміну від прямого пуску від мережі), даного запасу цілком достатньо для стабільної роботи привода в номінальному режимі. Вибір комплекту «ПЧ — Асинхронний електродвигун» є технічно доцільним, теоретично обґрунтованим та дозволяє уникнути спрацювання теплового захисту силових модулів при тривалій експлуатації насосного агрегату.

Наступним кроком являється обґрунтування вибору датчиків на основі їх сумісності з виконавчими пристроями.

Усі три основні датчики (ультразвуковий щільномір Rhosonics SDM, перетворювач тиску SITRANS P220 та датчик рівня SITRANS PROBE LU240 мають один і той самий стандартний промисловий вихід — 4–20 Ма з можливістю передачі додаткових даних по протоколу HART. Протокол HART стійкий до перешкод та сумісний з сучасними модулями вводу ПЛК.

Для прийому цих сигналів використано модуль аналогового вводу AI 8×I (серія 6ES7531-7KF00-0AB0). Цей модуль повністю підтримує діапазон 4–20 Ма, має вбудовану підтримку HART і забезпечує високу розрядність (16 біт). Оскільки в нашій системі всього три аналогових сигнали, а модуль має вісім каналів, то

					КНУ КРБ .174.26.12.02.ЛЗ	Арк.
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		47

отримуємо приблизно двократний запас. В результаті є можливість у майбутньому додати ще кілька датчиків без зміни апаратної частини.

Дискретні сигнали (аварії ПЧ, стани двигуна, кінцеві вимикачі тощо) підключаються до модуля дискретного вводу DI 16×24 В. Їх загальна кількість складає 6-8 шт.

Виходячи з технічних характеристик датчиків та їх інтеграцію з модулями вводу\виводу ПЛК отримуємо повну апаратну сумісність, що спрощує монтаж, знижує загальну вартість проекту.

2.12 Склад і структура системи автоматизованого керування

Розроблена система автоматизації базується на чіткій чотирирівневій структурі, що забезпечує стабільне функціонування замкненого контуру регулювання густини пульпи. Структура об'єднує польовий рівень, рівень керування, операторський та силовий рівні, кожен з яких виконує специфічні функції в межах єдиного технологічного процесу.

На польовому рівні зосереджені первинні засоби вимірювання та виконавчі пристрої, що безпосередньо взаємодіють із технологічним середовищем:

- Датчик витрати та рівня SITRANS F M MAG 3100, встановлений у зумпфі;
- Перетворювачі тиску SITRANS P220, що здійснюють контроль тиску на вході і виході ГЦ-710;
- Ультразвуковий датчик щільності RHOSONICS SDM, що розташовується на зливі гідроциклона;
- ПЧ SIEMENS G120X.

Рівень керування реалізований на базі програмованого логічного контролера SIMATIC S7-1500. ПЛК виступає центральним вузлом обробки даних: він здійснює збір аналогових сигналів, виконує обчислення за ПІ-алгоритмом, порівнює поточні значення з уставками та формує керуючі впливи для ПЧ.

					КНУ КРБ .174.26.12.02 ЛЗ	Арк .
						48
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Операторський рівень представлений сучасною SCADA-системою SIMATIC WinCC V8, розгорнутою на базі промислового комп'ютера. Система забезпечує візуалізацію параметрів у реальному часі, ведення архівів трендів, реєстрацію аварійних подій та надає можливість дистанційної корекції уставок густини.

Силовий рівень включає асинхронний двигун насоса SIMOTICS GP 1LE1 потужністю 132 кВт та відповідний перетворювач частоти SINAMICS G120C. Даний рівень відповідає за динамічну зміну частоти обертання насосного агрегату, що забезпечує плавне регулювання витрати та тиску пульпи перед подачею на сепарацію в ГЦ-710.

В межах виконання дипломного проєкту обрана структура є оптимальною, оскільки вона гарантує високу динамічну точність регулювання, надійність енергоємного обладнання та масштабованість системи без необхідності заміни базових контролерних потужностей.

Для проектування технічної документації використано спеціалізоване середовище Eplan Education 2026. Усі графічні елементи реалізовані у вигляді інтелектуальних макросів, адаптованих під специфіку розробленої системи.

На рисунку 2.18 представлена структурна схема, що відображає архітектуру технологічної лінії сепарації.

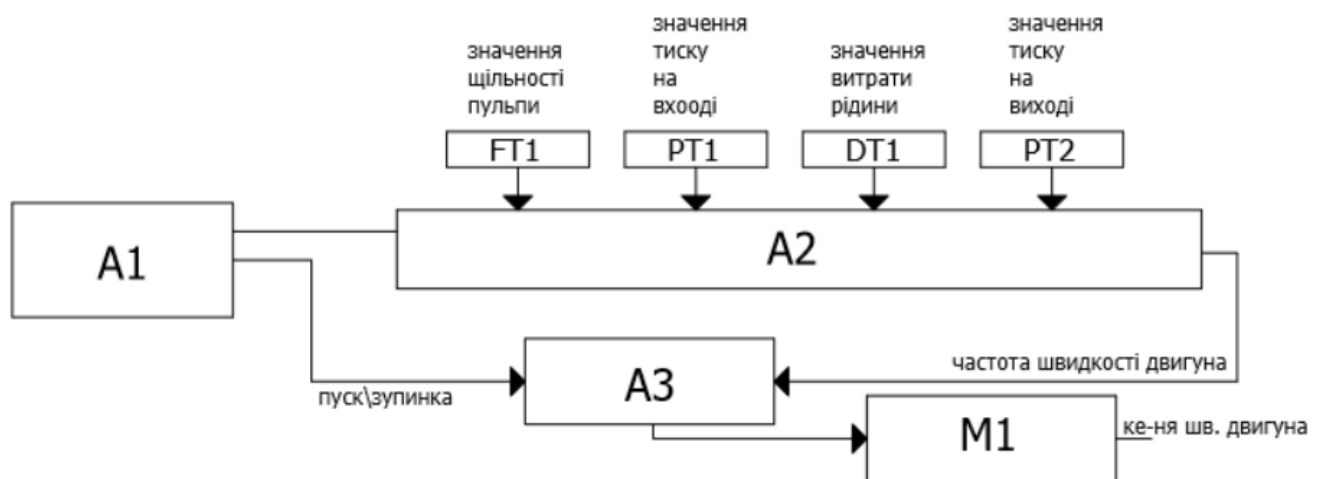


Рисунок 2.18 – Структурна схема системи керування

Схема розділена на три рівні керування:

- Блок А1 – центральний процесорний модуль, що відповідає за формування керуючого впливу;
- Блок А2 – модулі вводу\виводу ПЛК S7 – 1500 до яких підключені датчики тиску, витрати та густини;
- Блок А3 – перетворювач частоти G120X, який отримує від контролера керуючі сигнали завдання швидкості та керування приводом насоса М1.

Завдяки даній структурі забезпечується безперервна корекція подачі пульпи.

Відповідно до розробленої функціональної схеми автоматизації та специфікації обраного обладнання, розроблено принципову електричну схему живлення та керування приводним двигуном насоса. Керування здійснюється через перетворювач частоти в функції густини пульпи на виході гідроциклону ГЦ-710 (рис. 2.19).

					КНУ КРБ .174.26.12.02 ЛЗ	Арк .
						50
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

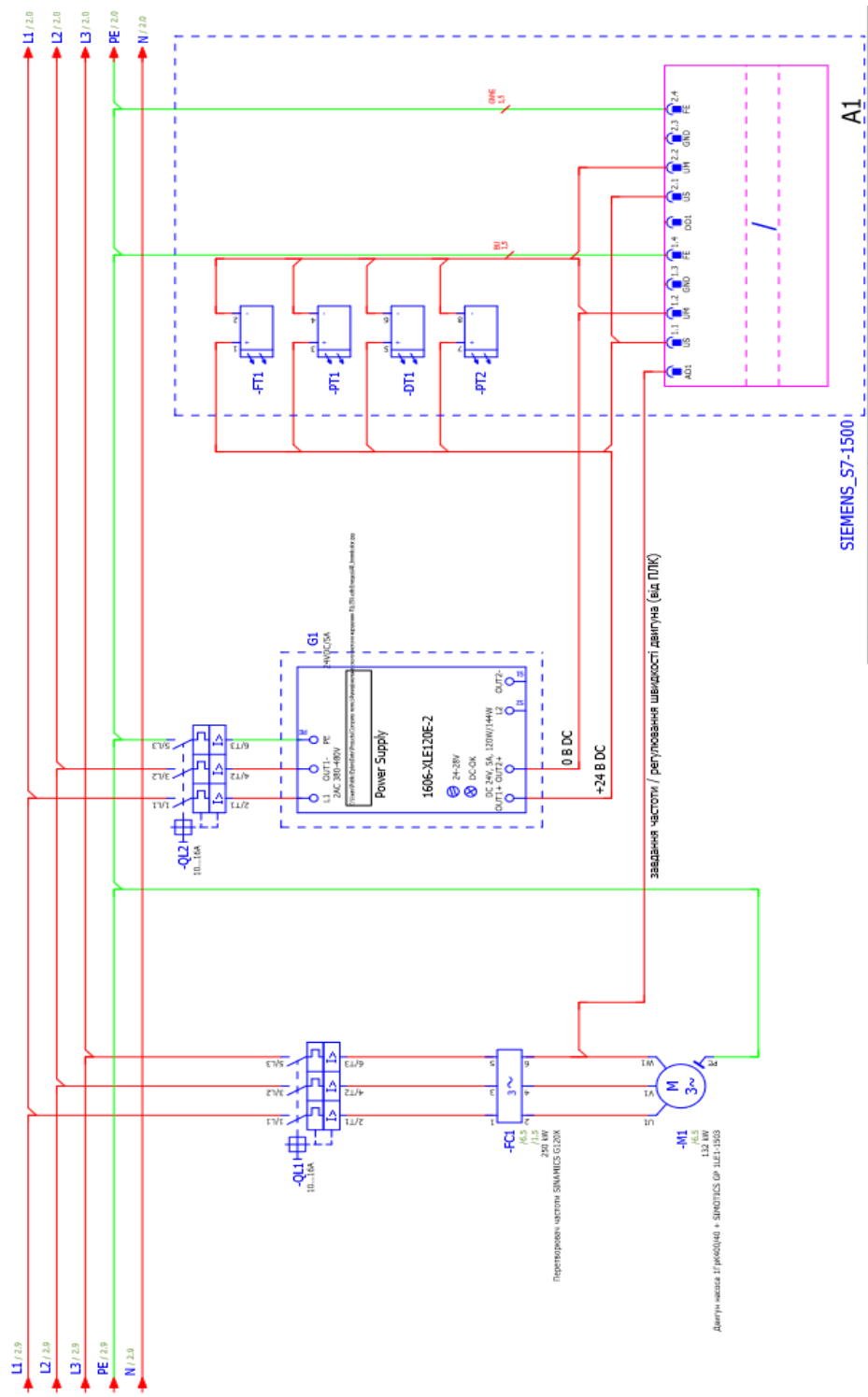


Рисунок 2.19 – Принципова електрична схема живлення приводним двигуном насоса

Схемотехнічне рішення розділене на дві функціонально пов'язані частини. У лівій частині відображено силовий ланцюг напругою 380 В. Трифазна мережа змінного струму через відповідні автоматичні вимикачі (QL1 для захисту силового кола та QL2 для кола живлення керування) подається на вхід перетворювача частоти FC1 типу SINAMICS G120C. З виходу ПЧ сформована трифазна напруга

змінної частоти та амплітуди живить асинхронний двигун SIMOTICS GP потужністю 132 кВт (M1), який приводить у дію насосний агрегат.

Захисне заземлення (PE) виконано суцільною лінією по всій схемі для забезпечення вимог електробезпеки.

У правій частині схеми згруповані ланцюги живлення постійного струму 24 В та кола керування. Промисловий блок живлення Allen-Bradley 1606-XLE120E-2 (G1) здійснює перетворення міжфазної напруги 380 В на стабілізовану напругу +24 В DC, яка забезпечує безперебійне живлення центрального контролера SIMATIC S7-1500 (A1) та контрольно-вимірювальних приладів польового рівня.

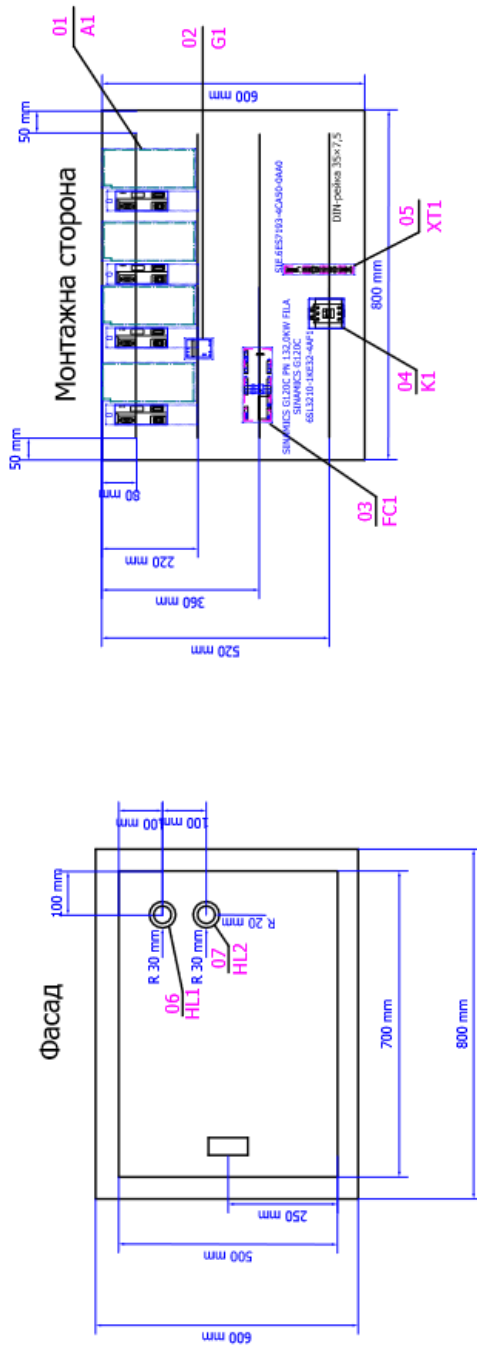
Первинні перетворювачі — датчик витрати та рівня (FT1), датчики тиску (PT1, PT2) та ультразвуковий датчик густини (DT1) — генерують аналогові уніфіковані сигнали, що надходять на відповідні модулі вводу контролера. На основі оброблених даних за закладеним ПІ-алгоритмом, ПЛК формує безперервний керуючий сигнал на аналоговому виході AO1. Цей сигнал надходить на вхід завдання частоти перетворювача FC1.

Логіка пуску, зупинки та моніторингу аварійних станів приводу реалізується через дискретні канали зв'язку між ПЛК та ПЧ. Система функціонує не як дискретний механізм вмикання/вимикання, а як повноцінна замкнена система автоматичного регулювання продуктивності насоса в режимі реального часу.

Запропонована структура принципової схеми гарантує надійну гальванічну розв'язку силових кіл і кіл керування, комплексний апаратний захист дороговартісного обладнання (двигуна великої потужності та ПЧ) і безпосереднє виконання технологічного завдання — стабілізацію густини пульпи перед сепарацією в гідроциклоні ГЦ-710 шляхом точної зміни частоти обертання робочого колеса насоса.

Для розміщення апаратури системи керування розроблено компоувальне креслення шафи автоматизації (рис. 2.20).

					КНУ КРБ .174.26.12.02.ЛЗ	Арк.
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		52



Позначення за схемою	Назва	Кільк.	Примітка
01	А1	1	
02	G1	1	
03	FC1	1	
04	K1	1	
05	XT1	1	
06	HL1	1	
07	HL2	1	

Рисунок 2.20 — Компонувальне креслення шафи автоматизації

У шафі локалізовано контролерне та силове обладнання, за винятком електродвигуна насоса та польових контрольно-вимірювальних приладів, які монтуються безпосередньо на технологічному об'єкті поблизу гідроциклону ГЦ-710 та зумпфа.

На лівій частині креслення зображено фасад підлогової шафи керування. На дверцятах розташована арматура світлової сигналізації: зелена лампа «HL1» (індикація нормальної роботи) та червона «HL2» (сигналізація аварійної зупинки). У зручній для оператора зоні на дверцятах передбачено місце для монтажу винесеної інтелектуальної панелі оператора (наприклад, ІОР-2) перетворювача частоти для забезпечення можливості локального моніторингу та ручного керування приводом.

Права частина рисунка демонструє компоновання апаратури на внутрішній монтажній панелі шафи. Зважаючи на значну потужність (132 кВт), габарити та високе тепловідділення перетворювача частоти SINAMICS G120C (FC1), його закріплено безпосередньо на монтажній плиті в нижній силовій секції шафи.

При його розміщенні суворо дотримано рекомендацій виробника щодо обов'язкових вентиляційних зазорів зверху та знизу пристрою для забезпечення ефективного примусового охолодження.

Апаратура рівня керування та слабкострумові кола розташовані у верхній частині шафи на стандартних DIN-рейках 35×7,5 мм:

- на першій рейці — центральний процесор ПЛК SIMATIC S7-1500 разом із комунікаційними модулями та модулями аналогового/дискретного вводу-виводу;
- на другій рейці — промисловий блок живлення 24 В DC Allen-Bradley 1606-XLE120E (G1);
- на третій рейці — проміжні реле (K1), комутаційна захисна автоматика кіл керування та клемний ряд зовнішніх з'єднань (XT1) для підключення польових датчиків.

					КНУ КРБ .174.26.12.02 ЛЗ	Арк .
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		54

Відповідно до вимог оформлення конструкторської документації дипломних проєктів, креслення супроводжується специфікацією у вигляді таблиці з повним переліком використаного обладнання.

Проектування схеми підключення зовнішніх проводок (рис. 2.21) — це той етап, де віртуальна архітектура системи перетворюється на реальне керівництво для монтажників. Під час розробки цього аркуша в середовищі Eplan застосовано класичну інженерну оптимізацію: через специфіку масштабування креслення деталізовані макроси польових приладів перевантажували схему та відображалися некоректно. Тому для збереження чистоти та читабельності документації замість них використані стандартизовані графічні примітиви (кола, прямокутники тощо), що цілком відповідає нормам оформлення ЕСКД.

Схема логічно розбита на кілька зон для зручності читання. Зліва організовано підведення силового трифазного живлення 380 В (L1, L2, L3, PE, N), для живлення 132-кіловатного приводу. Праворуч розведена слабкострумова шина 24 В DC, від якої живиться «мозок» системи — контролер S7-1500 — та всі польові датчики. Центральним вузлом комутації виступає клемний ряд XT1, на який зводяться всі сигнали з технологічного об'єкта.

Польовий рівень підключений за класичною завадостійкою двопровідною схемою з підтримкою протоколу HART:

- FT1 - контролює витрату та рівень безпосередньо у зумпфі;
- PT1 та PT2 – здійснюють моніторинг перепаду тиску на вході та зливі ГЦ-710;
- DT1 – ультразвуковий датчик, який фіксує густину пульпи при проходженні по трубопроводу.

Для кожного з цих сигналів передбачена своя чітко промаркована пара клем на XT1.

Окремим, ізольованим контуром йдуть кола керування приводом насоса. Аналоговий вихід AO1 контролера формує безперервний сигнал та передає його прямо на вхід завдання частоти перетворювача SINAMICS G120C (FC1).

					КНУ КРБ .174.26.12.02 ЛЗ	Арк .
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		55

Дискретні команди пуску та зупинки ПЧ реалізуються через надійну гальванічну розв'язку — проміжне реле К1, контакти якого також виведені на загальний клемник. Оскільки здійснюється комутація двигуна потужністю 132 кВт, силові лінії від ПЧ до насоса прокладаються спеціальним екранованим кабелем, щоб мінімізувати вплив електромагнітних завад на чутливі сигнали датчиків.

Дана структурована розводка зовнішніх ланцюгів максимально спрощує життя електромонтерам під час збирання шафи та значно прискорює пошук несправностей при пусконаладжувальних роботах на ЗРФ-2.

Останнім кроком є побудова специфікації виробів, яка наведена на рис. 2.22. У ній зібрано повний перелік усього обладнання, що входить до складу системи керування. Таблиця включає силові елементи (автоматичні вимикачі Q1–Q2, перетворювач частоти FC1, двигун M1), джерело живлення (G1), контролер SIMATIC S7-1500 (A1), усі польові датчики (FT1, PT1–PT2, DT1), проміжне реле К1, клемник зовнішніх з'єднань XT1, а також сигнальні лампи HL1 і HL2 на фасаді шафи.

					КНУ КРБ .174 26.12.02 ЛЗ	Арк.
						57
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

2.13 Створення проекту та налаштування вузлів автоматизації в інженерній утиліті TIA Portal V20

Метою розроблення програми є забезпечення автоматичного підтримання заданої щільності пульпи на виході ГЦ-710 шляхом частотного регулювання живильного насоса в замкненому контурі керування.

Для конфігурування апаратного забезпечення використано програмне середовище TIA Portal V20. На даному етапі передбачено створення базової архітектури проекту у вікні Devices&networks.

В дереві проекту через каталог обладнання додано центральний процесор CPU 1511-1 PN (S7-1500).

Додано цифрові входи\виходи – AI 8xUI HF_1, AQ 4xUI ST_1, DI/DQ 16x24 VDC. Всі модулі розміщені на загальній шині Rail_0.

На рис. 2.23 зображено структуру апаратного забезпечення проекту.



Рисунок 2.23 – Структура апаратного забезпечення проекту

Моделювання системи регулювання живильним насосом є детермінованим процесом і потребує використання відповідних функціональних блоків.

У дереві проекту створено організаційний блок типу CyclicInterrupt із заданим інтервалом виклику в 100 мс.

До організаційного блоку додані наступні функціональні блоки відповідно по рівнях обробки вхідного сигналу:

- Network 1: NORM_X та SCALE_X – обробка вхідного сигналу від щільноміра (імітація);
- Network 2: PID_Compact Calculate – формування керуючого впливу та врахування коефіцієнту підсилення повної передавальної функції;
- Network 3: MOVE та Filter_PT1 – імітація транспортного запізнення та інерційності системи (насос\гідроциклон).

Використання блоку MOVE обумовлено записом сталої запізнення 4 с, бо внутрішні параметри фільтрів захищені від стороннього впливу.

На рис. 2.24 зображено функціональну структуру проекту.

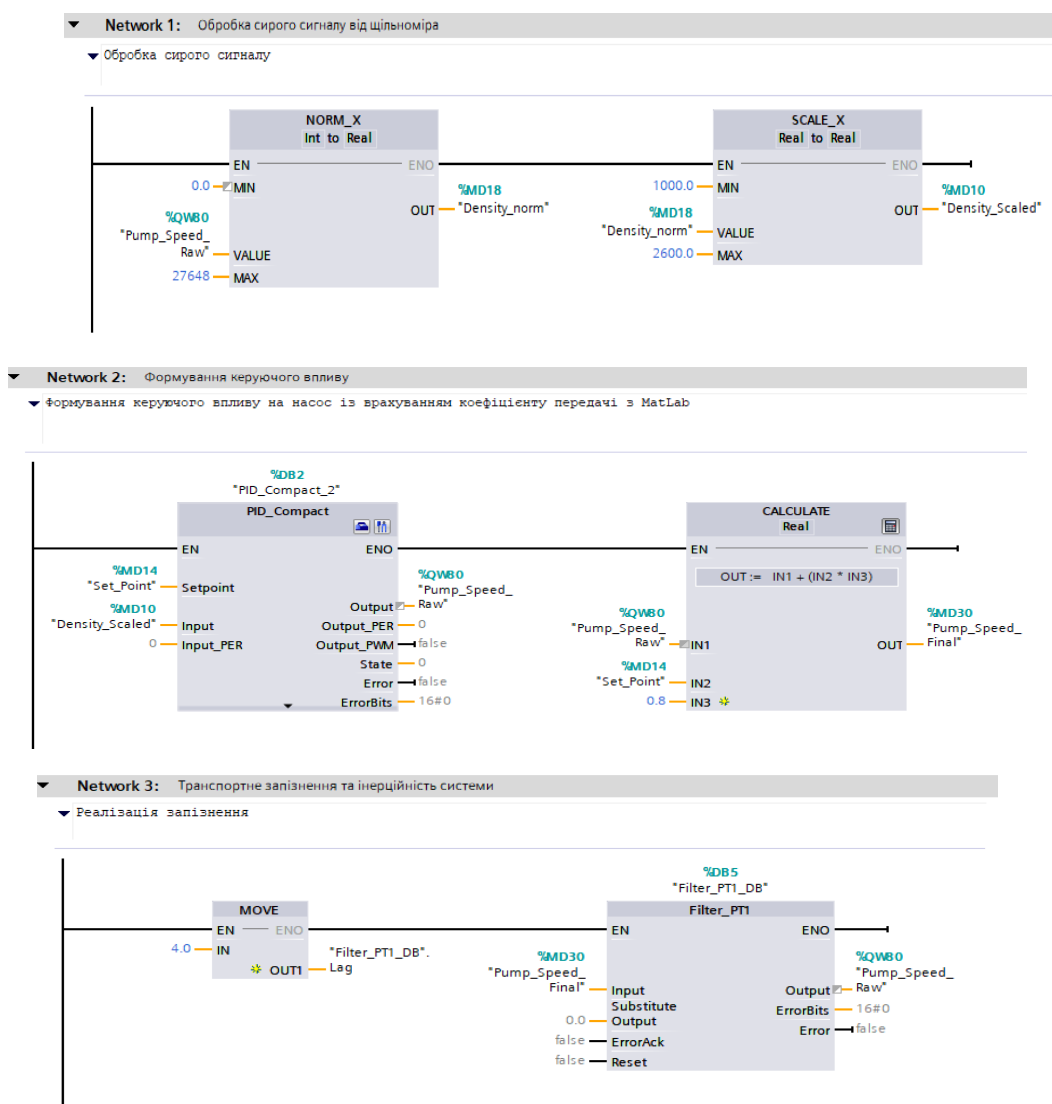


Рисунок 2.24 – Функціональна структура проекту

					КНУ КРБ .174.26.12.02 ЛЗ	Арк .
Зм .	Лист	№ документа	Підпис	Дата		60

Таблиця тегів є адресним простором контролера, де здійснюється символічна прив'язка технологічних параметрів до конкретних комірок пам'яті ПЛК. В проекті конфігурується внутрішня пам'ять для симуляції процесу без використання фізичних модулів вводу-виводу.

В дереві проекту в каталозі PLC Tags→Default tag table створено таблицю тегів (табл. 2.11) для підключення на входи і виходи функціональних блоків.

Таблиця 2.11 – таблиця тегів функціональних блоків

Назва	Тип даних	Адреса в пам'яті	Коментарій
Pump_Speed Raw	Int	%QW80	Керуючий сигнал
Density_norm	Real	%MD18	Нормалізація сигналу
Density_Scaled	Real	%MD10	Масштабування сигналу під ПЧ
Set_Point	Real	%MD14	Уставка щільності
Pump_Speed_Final	Real	%MD30	Проміжна зміна для фільтра

На рис. 2.25 зображено таблицю тегів проекту із додатковими параметрами.

Default tag table								
	Name	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...	Supervision
1	Density_Raw	Int	%MW30	☐	☒	☒	☒	
2	Pump_Speed_Raw	Int	%QW80	☐	☒	☒	☒	
3	Density_Scaled	Real	%MD10	☐	☒	☒	☒	
4	Set_Point	Real	%MD14	☐	☒	☒	☒	
5	Density_norm	Real	%MD18	☐	☒	☒	☒	
6	Input	Real	%MD22	☐	☒	☒	☒	
7	Output	Real	%MD26	☐	☒	☒	☒	
8	Always_false	Bool	%I0.7	☐	☒	☒	☒	
9	Pump_Speed_Final	Real	%MD30	☐	☒	☒	☒	
10	Pump_Speed_Limited	Real	%MD34	☐	☒	☒	☒	
11	<Add new>			☐	☒	☒	☒	

Рисунок 2.25 – Таблиця тегів

Для ручного вводу значень тегів використана таблиця спостереження, загальна структура якої аналогічна до таблиці тегів. Watch table наведена на рис. 2.26.

					КНУ КРБ .174.26.12.02 ЛЗ	Арк .
						61
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

	i	Name	Address	Display format	Monitor value	Modify value	
1		"Set_Point"	%MD14	Floating-poin...		1300.0	
2		"Density_Raw"	%MW30	DEC+/-		13874	
3		"Density_Scaled"	%MD10	Floating-point nu...		700.0	
4		"Output"	%MD26	Floating-point nu...			
5		"Pump_Speed_Final"	%MD30	Floating-point nu...			
6		"Pump_Speed_Raw"	%QW80	DEC+/-			
7			<Add new>				

Рисунок 2.26 – Таблиця спостереження

Для правильної роботи програми в налаштуваннях регулятора виставлені значення пропорційного, диференціального та інтегрального коефіцієнтів. На рис. 2.27 зображено вікно налаштування регулятора.

The screenshot displays the configuration interface for a PID controller. On the left, a sidebar lists various settings categories with green checkmarks indicating they are configured. The main area is divided into three panels:

- Input / output parameters:** Shows a block diagram with 'Setpoint' (input), 'Input' (process variable), and 'Output' (control signal) fields. A graph icon is also present.
- Controller type:** Shows 'Density' selected as the process variable, 'kg/m³' as the unit, and 'Automatic mode' as the control mode. There are checkboxes for 'Invert control logic' and 'Activate Mode after CPU restart'.
- PID Parameters:** Shows various tuning parameters with input fields:
 - Enable manual entry: ☒
 - Proportional gain: 1.8
 - Integral action time: 40.0 s
 - Derivative action time: 0.9 s
 - Derivative delay coefficient: 0.2
 - Proportional action weighting: 1.0
 - Derivative action weighting: 1.0
 - Sampling time of PID algorithm: 1.0 s
 - Tuning rule: (dropdown menu)
 - Controller structure: PID

Рисунок 2.27 – Налаштування параметрів ПІД-регулятора

Після реалізації програмної та функціональної структури проекту виконано оцінення коректності роботи ПІД-регулятора. Для цього у налаштуваннях регулятора відкрито вікно Comission window, де відображаються внутрішні сталі блоку, а саме: CurrentSetpoint, ScaledInput, Output.

Для отримання регулювання на основі режиму pidtune в таблиці спостереження виставлені вручну значення уставки, масштабування сигналу під уставку та сирий сигнал.

Результат pidtune-моделювання зображено на рис. 2.28.

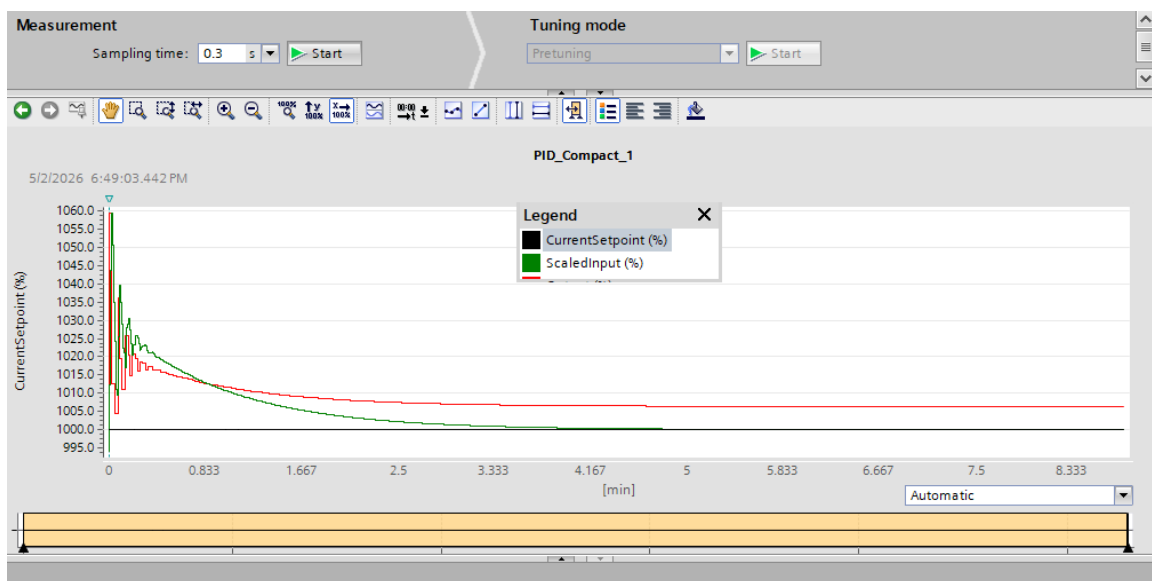


Рисунок 2.28 – Моделювання процесу корекції стану регулятора

Результатом моделювання внутрішнього контуру ПІД-регулятора є система з запасом стійкості і перерегулюванням. Після подачі сирого сигналу з датчика спостерігаються значні затухаючі коливання, після чого вихідна величина наближається до заданої уставки. Наявність короточасного коливання визначено наявністю інерційності та запізнення в системі.

В дереві проекту додано графік “Trace”, куди завантажено пристрої та блоки проекту. Вікно із вибором інтерфейсу підключення та завантаження апаратного забезпечення в симулятор зображено на рис. 2.29.

					КНУ КРБ .174.26.12.02 ЛЗ	Арк .
Зм .	Лист	№ документа	Підпис	Дата		63

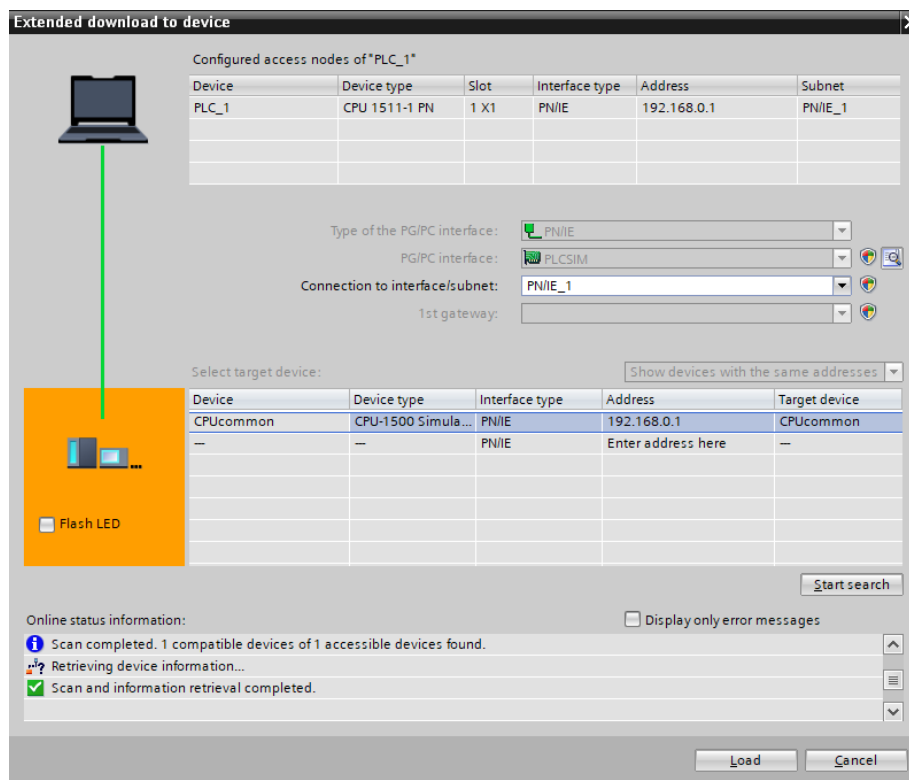


Рисунок 2.29 – Вікно завантаження проекту в симулятор

На рис. 2.30 зображено вікно симулятора із завантаженим станом ЦПУ 1511.

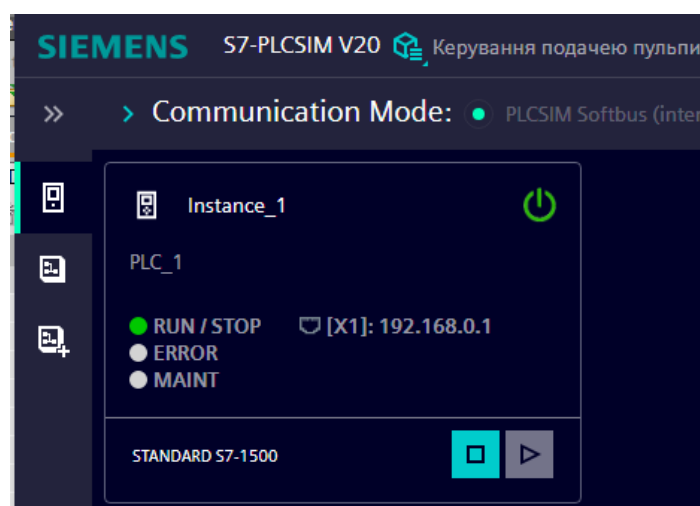


Рисунок 2.30 – Екземпляр ЦПУ для симуляції програми

Для відображення коректного графіку регулювання використані теги з таблиці watch table, а саме:

- Set_Point – задана уставка щільності;

- Density_Scaled – масштабування сигналу під уставку\ПЧ;
- Pump_Speed_Raw – корекція подачі пульпи від обертів насоса (імітація);
- Pump_Speed_Final – проміжна змінна, що подається на вхід блоку запізнення\інерції.

Результат моделювання контуру керування зображено на рис. 2.30.

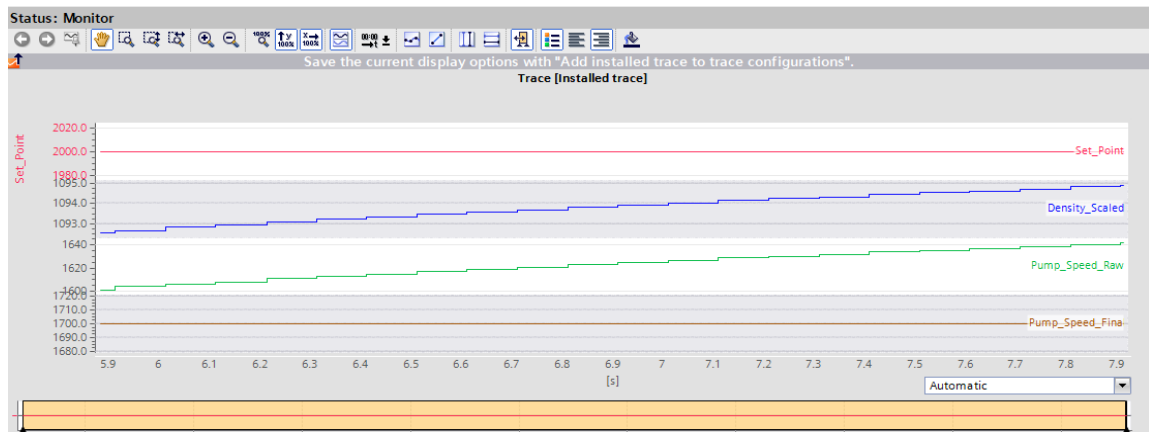


Рисунок 2.30 – Моделювання контуру регулювання

Результатом трасування є підтвердження працездатності системи автоматизованого керування. При задані сталого значення уставки величина Density_Scaled поступово наближається до заданого рівня уставки, а керуючий сигнал Pump_Speed_Raw змінюється плавно, без ознак нестійкості. Це свідчить про коректну роботу замкненого контуру регулювання та наявність інерційної складової об'єкта.

Отриманий графік можна вважати придатним для підтвердження правильності програмної реалізації.

					КНУ КРБ .174.26.12.02 ЛЗ	Арк .
Зм .	Лист	№ документа	Підпис	Дата		65

ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі вирішено вузькопрофільне, але критично важливе для збагачувальних фабрик завдання — усунуто проблему неефективного ручного та напіваавтоматичного керування живленням гідроциклону ГЦ-710. Замість інерційного контролю за непрямыми показниками впроваджено замкнену систему автоматичного регулювання, яка безперервно стабілізує густину пульпи шляхом динамічного коригування продуктивності насосного агрегата.

Серцем модернізації виступає контролер SIMATIC S7-1500 (CPU 1511-1 PN), який через перетворювач частоти SINAMICS G120X керує 132-кіловатним електродвигуном ґрунтового насоса 1ГрК-400/40. Зворотний зв'язок реалізовано за допомогою ультразвукового неконтактного датчика Rhosonics SDM, що дозволяє системі функціонувати в умовах екстремальної абразивності без передчасного зносу чутливих елементів та втрати точності вимірювань.

Динаміку технологічного об'єкта було ретельно досліджено в середовищі MATLAB/Simulink. Незважаючи на об'єктивні складнощі контуру, зокрема транспортне запізнення потоку пульпи у трубопроводі тривалістю 4 секунди, синтезований ПД-алгоритм та аналіз карти полюсів довели повну математичну стійкість розробленої системи керування.

Окремої уваги заслуговує рівень програмної реалізації в TIA Portal V20. Архітектура логіки відрізняється оптимізованою структурою без надлишкових обчислювальних ланок. Затримки та інерційність фізичної системи технічно грамотно реалізовані за допомогою стандартних інструментів, зокрема блоку Filter_PT1, що забезпечує стабільну роботу алгоритму та відповідає суворим вимогам до написання ПЛК-програм.

Запропонований комплекс рішень підкріплений повноцінною схемотехнічною документацією, розробленою в EPLAN Electric P8.

					КНУ КРБ.174.26.12.01.ПЗ			
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата				
Разробив	Савостяненко В.				ВИСНОВОК	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірів	Савицький О.І.						66	1
Н контроль	Маринич І.А.							
Затвердив	Маринич І.А.					КНУ АКІТР – 23ск		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки: структура і правила оформлення. Київ: ДП «УкрННЦ», 2015. 26 с. (Інформація та документація).
2. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання: загальні вимоги та правила складання. Київ: ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).
3. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові: загальні вимоги та правила. Київ: ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація).
4. ДСТУ 3651.0-97. Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення. Київ: Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація).
5. Бондаренко С. Г., Захарчук Я. О. Система автоматизованого контролю та управління виробничими процесами підприємства: thesis. 2017.
URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/66846>
(дата звернення: 21.05.2026).
6. Водічев В. А., Монтік П. М., Алдаїрі А. Дослідження динамічних характеристик параметричних систем керування технологічними процесами // Automation technological and business-processes. 2014. Т. 19, № 19.
URL: <https://doi.org/10.15673/2312-3125.19/2014.27947>
(дата звернення: 21.05.2026).
7. Ельперін І. В. Промислові контролери. Київ: НУХТ, 2003. 320 с.

					КНУ КРБ.174.26.12.00.ПЗ			
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата	Список використаної літератури	Літера	Аркуш	Аркушів
Разробив	Савостяненко В.						67	4
Перевірів	Савицький О. І.							
Н контроль	Маринич І. А.							
Затвердив	Маринич І. А.					КНУ АКІТР – 23ск		

8. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Кривий Ріг: Вид. центр КНУ, 2019. 50 с.
9. Морнева М. О., Голубєва С. М., Торопов А. С. Цифрові системи автоматичного керування в мехатронних системах // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2021. № 5 (269). С. 20–23.
URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-269-5-20-23>
(дата звернення: 21.05.2026).
10. Проць Я. І., Данилюк О. А., Лобур Т. Б. Автоматизація неперервних технологічних процесів: навч. посіб. Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2008. 239 с.
11. Пупена В. М. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизації. Київ: Ліра-К, 2011. 552 с.
12. Романенко В. Д. Методи автоматизації прогресивних технологій. Київ: Вища шк., 1995. 519 с.
13. Кальницький М. Е. та ін. Розширення можливостей традиційних ультразвукових приладів для досліджень, вимірювань, контролю та діагностики // Methods and devices of quality control. 2025. № 2(55). С. 50–59. URL: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2025-2\(55\)-50-59](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2025-2(55)-50-59)
(дата звернення: 21.05.2026).
14. Рясна О. В. Сучасні методи автоматизованих систем управління технологічними процесами: thesis. 2017.
URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/66639>
(дата звернення: 21.05.2026).
15. Самотокін Б. Б. Лекції з теорії автоматичного керування: навч. посіб. Житомир: ЖІТІ, 2001. 508 с.

					КНУ КРБ .174 26 .12 .00.ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

16. Спосіб автоматичного регулювання розвантаження згущувача: пат. 23880 Україна, МПК В03В 5/00. Заявл. 29.01.2007; опубл. 11.06.2007, Бюл. № 8. URL: <http://uapatents.com/223880sposibavtomatichnogoregulyuvannyarozvantazheniya-zgushhuvacha.html> (дата звернення: 21.05.2026).
17. Татаренко Д. А. Програмовані логічні контролери з вбудованими засобами тестового та функціонального діагностування: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харків, 2007. 20 с.
18. Трегуб В. Г. Проектування систем автоматизації: навч. посіб. Київ: Ліра-К, 2019. 345 с.
19. Федік Л. Ю., Кондіус І. С. Основні етапи проектування систем автоматизації і аналіз застосовуючих програм для реалізації цього процесу. 2023. № 74. С. 122–127. URL: <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2022.74.20> (дата звернення: 21.05.2026).
20. Хмілярчук О. І. Вибір систем автоматизованого проектування. *Технологія і техніка друкарства*. 2011. № 3(33). С. 13–16. URL: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(33\).2011.52149](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(33).2011.52149) (дата звернення: 21.05.2026).
21. Шумигай Д. А., Ладанюк А. П., Бойко Р. О. Програмне забезпечення системи управління технологічним комплексом з метою підвищення ефективності виробництва. *Automation technological and business - processes*. 2015. Т. 24, № 24. URL: <https://doi.org/10.15673/2312-3125.24/2015.56329> (дата звернення: 21.05.2026).
22. Berger H. Automating with simatic S7-1200: configuring, programming and testing with step 7. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2018. 745 p.
23. Gottardo M. Let's program a PLC! Esercizi di programmazione in TIA PORTAL V17 S7-1200/1500 wincc basic e advanced per HMI: secondo volume. Lulu Press, Inc., 2022.

					КНУ КРБ .174.26.12.00.ПЗ	Арк.
						69
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

24. Tubbs S. P. Programmable logic controller (PLC) tutorial, siemens simatic S7-1200. Stephen P. Tubbs, 2016. 178 p.
25. 3000 об/хв – асинхронні електродвигуни Сіменс Сімотікс GP/SD. *ТОВ "ПРОНГРУП" АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЕНЕРГЕТИКА.*
URL: <https://prongroup.com.ua/shop/1e1503-3aa234fa4/?srsltid=AfmBOoreTjmfQ4lDqcZTPvsYQMIRhB3S6zcaNAHo6CJkCAtbT5AaeTJm> (дата звернення: 21.05.2026).
26. Siemens. Брошура | SINAMICS G120X. *SIEMENS PORTAL.*
URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:8e7aec69-0112-4d47-8b97-8cf1995703a1/di-sinamics-g120x-air-water-broschuere-deenus-144.pdf> (дата звернення: 21.05.2026).
27. Компані Плазма. Грунтовий насос ГрК 400/40. *Компані Плазма Промислове Обладнання.*
URL: https://www.plasma.com.ua/pump/abrasive_liquids/grk400_40.html (дата звернення: 21.05.2026).
28. Hydrocyclone and method for liquid-solid separation and classification : patent US7293657B1 United States. No. US09 ; applied on 05.02.2000 ; published on 13.11.2007, Bulletin no. 1. 11 p.
29. Siemens. S71500rh_manual. *Siemens.*
URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/833/109754833/att_1025369/v1/s71500rh_manual_ru-RU_ru-RU.pdf (date of access: 21.05.2026).

					КНУ КРБ .174.26.12.00.ПЗ	Арк.
						70
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		