

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 спеціальності

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

тема роботи:

***«Автоматизована система керування завантаженням кульових
млинів та подрібненням залізорудної сировини»***

Виконав студент гр. АКІТ-23ск _____ Ратушний А.А.

Керівник _____ Тиханський М.П.

Нормоконтроль _____ Маринич І. А.

Завідувач кафедри _____ Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТР-23ск Ратушному Артему Андрійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизована система керування
завантаженням кульових млинів та подрібненням залізорудної сировини»

затверджено наказом по університету № 172с від 30.03.2026

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 10.06.2026 р.

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

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

доц. Тиханський М. П.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>01.03.26</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>05.04.26</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>01.05.26</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>25.05.26</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>28.05.26</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>20.05.26</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>05.06.25</i>

6. Дата видачі завдання: 28.01.2026р.

Керівник _____ / Тиханський М.П./

7. Запевнення: Я, Ратушний Артем Андрійович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Ратушний А.А./

АНОТАЦІЯ

Ратушний А.А. Автоматизована система керування завантаженням кульових млинів та подрібненням залізорудної сировини: кваліфікаційна робота бакалавра : 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2026. 76 с.

Метою роботи є розробка та дослідження автоматизованої системи керування завантаженням кульового млина в процесі подрібнення руди, яка забезпечує стабілізацію основних технологічних параметрів, підвищення надійності роботи обладнання та покращення ефективності подрібнення.

Об'єктом дослідження є технологічний процес подрібнення руди в кульовому млині, що працює у складі збагачувального комплексу.

Предметом дослідження є методи, моделі та технічні засоби автоматизованого керування завантаженням кульового млина.

У першому розділі було обґрунтовано доцільність автоматизації процесу подрібнення руди. Проаналізовано будову та принцип роботи кульового млина, особливості технологічної схеми подрібнення, а також основні параметри, що впливають на ефективність процесу.

У другому розділі було розроблено математичні, імітаційні, функціональні та програмні основи автоматизованої системи керування завантаженням кульового млина. Результати підтверджують можливість стабілізації основних параметрів процесу подрібнення та підвищення надійності роботи обладнання.

Ключові слова:

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, КУЛЬОВИЙ МЛИН, ПОДРІБНЕННЯ, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ПРОГРАМОВАНІЙ КОНТРОЛЕР

					КНУ КРБ.174.26.10.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Ратушний А.А.			АНОТАЦІЯ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Тиханський М.П.								4	1
								КНУ АКІТР-23ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ	9
1.1 Обґрунтування доцільності автоматизації процесу подрібнення.....	9
1.2 Опис об'єкта автоматизації.....	10
1.3 Характеристика технологічного процесу подрібнення.....	13
1.4 Принципи автоматизованого керування процесом подрібнення руди....	16
1.5 Огляд існуючих методів автоматичного керування процесом подачі руди в млин	18
Висновки до розділу	25
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ТА ЇЇ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ	28
2.1 Узагальнені структурні схеми елементів комплексу подрібнення руди.	28
2.2 Імітаційне моделювання роботи кульового млина та контурів керування	34
2.3 Розроблення функціональної схеми автоматизації	41
2.4 Розробка програмного забезпечення системи завантаження млина	50
Висновки до розділу	68
ВИСНОВКИ.....	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	74

					КНУ КРБ.174.26.10.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЗМІСТ				Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Ратушиний А.А.									
Перевір.		Тиханський М.П.								5	1
									КНУ АКІТР-23ск		
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

ВСТУП

Гірничо-металургійна промисловість належить до стратегічно важливих галузей економіки, ефективність роботи якої значною мірою визначається рівнем технічного оснащення, енергоефективністю виробничих процесів та стабільністю якості готової продукції. Одним із ключових етапів збагачення рудної сировини є процес подрібнення, під час якого здійснюється руйнування рудних частинок до необхідної крупності з метою подальшого розкриття корисних мінералів і забезпечення ефективної роботи класифікаційного та сепараційного обладнання.

Процес подрібнення руди в кульових млинах є складним, енергоємним і багатофакторним технологічним процесом. Його перебіг залежить від витрати вихідної руди, подачі води, гранулометричного складу матеріалу, подрібнюваності сировини, стану футеровки, кульового завантаження, циркуляційного навантаження та режиму роботи класифікаційного обладнання. Зміна хоча б одного з цих параметрів може призводити до порушення оптимального режиму роботи млина, зниження продуктивності, погіршення якості подрібненого продукту та збільшення питомих енерговитрат.

Актуальність теми роботи обумовлена необхідністю підвищення ефективності керування процесом подрібнення руди шляхом упровадження автоматизованої системи контролю та регулювання завантаження кульового млина. Використання сучасних засобів автоматизації дає змогу забезпечити стабілізацію подачі руди, підтримання раціонального співвідношення між твердою та рідкою фазами, оперативний контроль технологічних параметрів, своєчасне виявлення відхилень і запобігання аварійним режимам роботи обладнання.

					КНУ КРБ.174.26.10.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Ратушний А.А.			ВСТУП			Лім.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Тиханський М.П.								6	3
								КНУ АКІТР-23ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

Особливе значення має автоматизація першої стадії подрібнення, оскільки саме на цьому етапі формується основа для подальшої класифікації та збагачення матеріалу. Недостатнє або надмірне завантаження млина негативно впливає на продуктивність усього технологічного комплексу. За ручного керування оператор змушений працювати із запасом, щоб уникнути переповнення млина, однак це часто призводить до неповного використання його продуктивності. Тому розробка системи автоматизованого керування, здатної підтримувати задані параметри процесу та враховувати зміну властивостей руди, є практично важливим завданням.

Метою роботи є розробка та дослідження автоматизованої системи керування завантаженням кульового млина в процесі подрібнення руди, яка забезпечує стабілізацію основних технологічних параметрів, підвищення надійності роботи обладнання та покращення ефективності подрібнення.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- проаналізувати технологічний процес подрібнення руди в кульовому млині як об'єкт автоматизації;
- визначити основні керуючі, збурювальні та вихідні параметри процесу;
- розглянути відомі методи контролю завантаження млина та оцінити їхні переваги й обмеження;
- побудувати структурні схеми елементів комплексу подрібнення;
- отримати математичну модель кульового млина за основним каналом керування;
- виконати імітаційне моделювання роботи виконавчих пристроїв і контурів керування;
- дослідити роботу системи з використанням ПІД-регуляторів;
- розробити функціональну схему автоматизації;
- обґрунтувати вибір технічних засобів контролю, регулювання та програмованого логічного контролера;
- розглянути принципи програмної реалізації системи керування та організації обміну даними.

					КНУ КРБ.174.26.10.00.ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'єктом дослідження є технологічний процес подрібнення руди в кульовому млині, що працює у складі збагачувального комплексу.

Предметом дослідження є методи, моделі та технічні засоби автоматизованого керування завантаженням кульового млина.

У роботі використано методи аналізу технологічних процесів, структурного моделювання, математичного опису динамічних об'єктів, імітаційного моделювання, теорії автоматичного керування, а також принципи побудови систем на базі програмованих логічних контролерів.

Практичне значення роботи полягає в тому, що запропоновані структурні, математичні та функціональні рішення можуть бути використані під час створення або модернізації систем автоматизованого керування процесами подрібнення руди на збагачувальних підприємствах. Реалізація такої системи дозволяє підвищити стабільність технологічного режиму, зменшити вплив збурень, покращити якість керування завантаженням млина та створити умови для більш раціонального використання енергетичних і матеріальних ресурсів.

					КНУ КРБ.174.26.10.00.ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Обґрунтування доцільності автоматизації процесу подрібнення

Для підприємств гірничо-металургійного комплексу України одним із першочергових завдань залишається посилення конкурентних позицій виробництва. Досягти цього можна шляхом зниження собівартості готової продукції, раціонального використання енергетичних ресурсів, а також підтримання стабільних або покращених якісних показників кінцевого продукту. Одним із найбільш результативних напрямів розв'язання зазначених завдань є впровадження комплексної автоматизації технологічних процесів [1, 2].

Кульові барабанні млини використовують для тонкого подрібнення мінеральної сировини на гірничо-збагачувальних комбінатах, у цементному виробництві та на теплових електростанціях.

Операції подрібнення належать до базових процесів гірничої промисловості. Для подальшого зростання суміжних виробництв необхідно впроваджувати сучасні подрібнювальні системи з високим показником довговічності. Основними векторами розвитку залишаються мінімізація виробничих втрат та вдосконалення якості товарів, що безпосередньо впливає на підвищення економічної ефективності об'єкта. Такі результати можуть бути забезпечені завдяки впровадженню сучасних технічних рішень і більш повному використанню можливостей наявного обладнання [3].

За прийнятою технологічною схемою перша стадія магнітного збагачення об'єднує млин, класифікатор і магнітний сепаратор.

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Ратушний А.А.			РОЗДІЛ 1			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Тиханський М.П.								9	15
								КНУ АКІТР-23ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

Комплекс подрібнення є однією з ключових ланок збагачувального виробництва, оскільки потребує значних капітальних вкладень і супроводжується високими експлуатаційними витратами. Саме від стабільності та продуктивності роботи цього комплексу значною мірою залежить техніко-економічна ефективність усього процесу збагачення.

З позиції автоматичного керування подрібнення є складним об'єктом. Процес має виражену нелінійну природу, значну кількість взаємопов'язаних регульованих параметрів і високу чутливість до зовнішніх та внутрішніх збурень. Для компенсації таких впливів потрібна достатньо потужна система керування. Традиційні контури регулювання можуть забезпечувати прийнятний результат лише за окремих умов, однак у разі порушення режиму вони не завжди здатні своєчасно змінити характер впливу на процес. Тому керування подрібненням повинно поєднувати безперервне регулювання з логічним керуванням, яке дає змогу за потреби оперативно змінювати стратегію роботи системи [3, 4].

1.2 Опис об'єкта автоматизації

Руду переважно подрібнюють у барабанних млинах різних конструктивних виконань [5-6].

Барабанний млин (рис. 1.1) виконано у вигляді циліндричного барабана 1, оснащеного торцевими кришками 2, 3 та порожнистими цапфами 4 і 5. Вихідний матеріал надходить у млин через цапфу 4, а готовий подрібнений продукт відводиться через цапфу 5. Цапфи встановлено на підшипникових опорах, завдяки чому барабан обертається навколо горизонтальної осі [5].

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

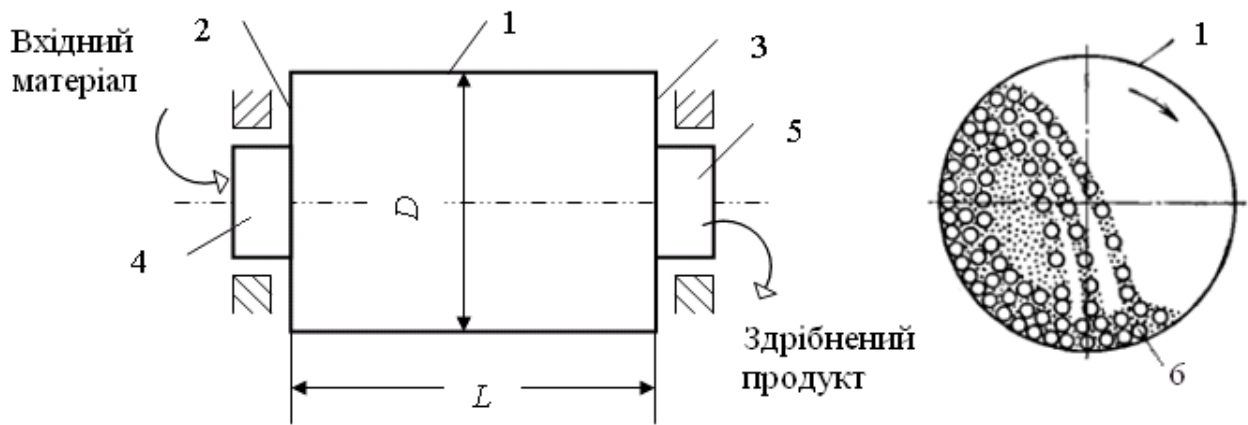


Рисунок 1.1 – Будова та принцип роботи обертового барабанного млина

Під час обертання барабана подрібнювальне середовище 6, до якого належать кулі, стрижні, шматки руди або рудна галька, разом із матеріалом під дією сил тертя та відцентрових сил притискається до внутрішньої поверхні барабана. Далі воно піднімається на певну висоту, після чого падає або скочується вниз. Руйнування руди відбувається внаслідок ударної дії падаючого середовища, роздавлювання та стирання між шарами матеріалу, що переміщуються всередині млина. Поздовжній рух матеріалу забезпечується різницею рівнів у зонах завантаження і розвантаження, а також тиском потоку сировини, яка безперервно подається в барабан. Саме тому з боку розвантаження цапфа має більший діаметр, ніж у зоні завантаження. За мокрого подрібнення матеріал переміщується водним потоком, а за сухого – повітрям.

До основних геометричних параметрів барабанного млина належать внутрішній діаметр барабана D , визначений без урахування футеровки, та його робоча довжина L [7].

На гірничозбагачувальному комбінаті подрібнення дробленої магнетитової руди, а також доподрібнення магнітних продуктів виконують у кульових млинах із центральним розвантаженням. У трьох стадіях подрібнення застосовують млини типу МШЦ-4500х6000 [8].

Основні технічні дані кульового млина МШЦ-4500х6000 наведено в таблиці 1.1 [8].

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Основні технічні параметри кульового млина МШЦ-4500х6000

Тип млина	Довжина барабана (без футерування), мм	Внутрішній діаметр барабана, мм		Робочий об'єм млина, м ³	Частота обертання барабана млина, хв ⁻¹	Встановлена потужність електродвигуна кВт
		без футерування	у світлі			
МШЦ-4500х6000	6000	4500	4200	82	16.2	2500

Загальний вигляд кульового млина типу МШЦ подано на рисунку 1.2 [4].

Млин МШЦ має циліндричний барабан 1, до якого з обох боків болтовими з'єднаннями прикріплено торцеві кришки 2 і 3. Вони відлиті разом із завантажувальною 10 та розвантажувальною 11 порожнистими цапфами, що спираються на підшипники 6 і 7. Усередину барабана завантажують чавунні та сталеві кулі різного діаметра, переважно від 40 до 150 мм, заповнюючи ними приблизно половину робочого об'єму млина.

На рисунку 1.2 використано такі позначення: 1 – барабан; 2 і 3 – торцеві стінки; 4 і 5 – порожнисті цапфи; 6 і 7 – підшипники; 8 – зубчастий вінець; 9 – комбінований живильник; 10, 11 – завантажувальна та розвантажувальна воронки; 12, 13 – футерувальні плити; 14 – люк; 15 – ведуча шестерня; 16 – вал.

Для захисту від інтенсивного зношування барабан і торцеві кришки облицьовують броньовими плитами 12 і 13, які фіксують болтами. У корпусі барабана передбачають один або два оглядові люки 14. Під час роботи млина пульпа піднімається до рівня розвантажувальної цапфи 11, після чого подрібнений матеріал виводиться з барабана. Горловина розвантажувальної цапфи 11 має дещо більший діаметр порівняно з горловиною завантажувальної цапфи 10.

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

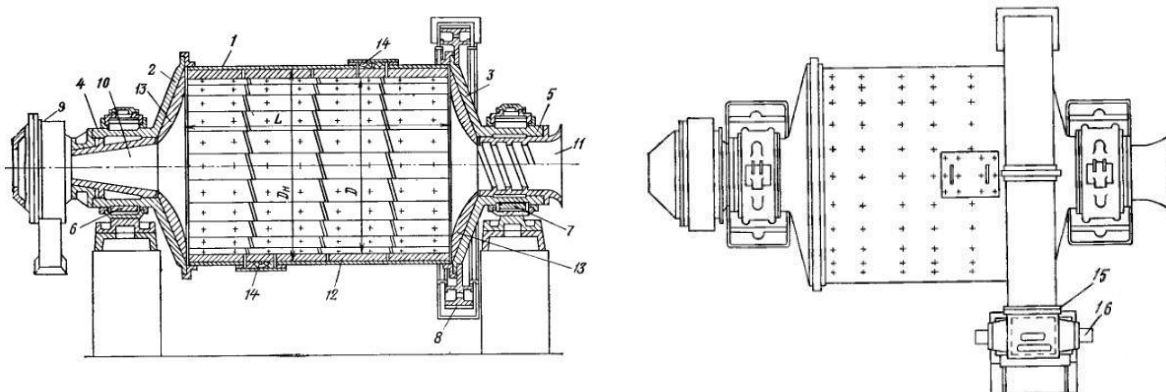


Рисунок 1.2 – Кульовий млин із центральним розвантаженням

Вихідна сировина надходить у млин через центральний отвір комбінованого живильника 9, а піски класифікатора подаються за допомогою черпака равлика.

Обертання барабана забезпечується електродвигуном через малу шестерню 15, установлену на ведучому валу 16, та зубчастий вінець 8, закріплений на барабані [9].

1.3 Характеристика технологічного процесу подрібнення

Дроблена магнетитова руда та магнітні продукти, які утворюються як проміжні продукти магнітної сепарації, подрібнюються на секціях у три стадії. Для цього застосовують кульові млини з центральним розвантаженням, а класифікація подрібненого матеріалу здійснюється за послідовного з'єднання подрібнювального й класифікаційного обладнання. Основним обладнанням процесу є млини МШЦ.

Дроблена вихідна руда крупністю 20-0 мм, у якій масова частка класу +20 мм становить 13,0 %, подрібнюється у кульових млинах першої стадії МШЦ-4500х6000. Ці млини мають центральне розвантаження, корисний об'єм 82 м³ і працюють у замкнутому циклі з двоспиральним класифікатором 2КСН-2,4.

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки подрібнення руди організовано у замкнутому циклі з класифікатором, відповідна технологічна схема подана на рисунку 1.3.

Режимні параметри та якісні показники роботи млинів на першій стадії подрібнення наведено в таблиці 1.2 [5, 10].

Сировина подається з бункерів гравітаційним способом через живильники на систему горизонтальних та похилих конвеєрів, що транспортують її до млинів. Регулювання обсягів подачі здійснюється шляхом коригування швидкості горизонтальних стрічок, при цьому зазор між патрубками та конвеєром залишається незмінним.

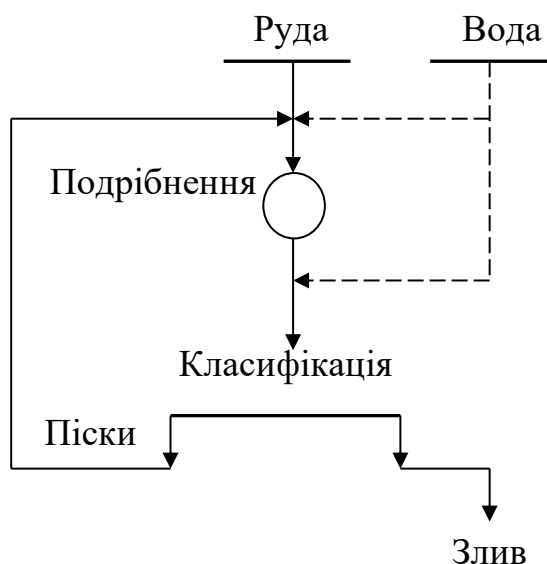


Рисунок 1.3 – Технологічна схема першої стадії подрібнення та класифікації

Контроль продуктивності здійснюється за показаннями механічних ваг ЛТМ-1М, установлених на похилих конвеєрах [11].

Розвантаження млина, тобто його злив, у спіральному класифікаторі розділяється на піски та злив класифікатора. Піски, що формують циркулююче навантаження на рівні 100-150 %, спіраллю повертаються у поворотний жолоб і разом із вихідною рудою знову надходять у млин для доподрібнення. Злив класифікатора самопливом по жолобах спрямовується на першу стадію магнітної сепарації. Для розрідження пульпи у зливах класифікаторів до вмісту твердого 35-40 % у пульпоподільовач додатково подається вода.

Кульовий млин функціонує у режимі замкнутого циклу, де класифікація подрібненого продукту виконується спіральними класифікаторами. Подрібнення і класифікацію здійснюють у мокрому режимі з подаванням води в млин у кількості 12,1 м³/год на тонну руди [7, 9].

На продуктивність подрібнювального агрегату суттєво впливають крупність вихідного та кінцевого продуктів, подрібнюваність сировини, ступінь заповнення млина подрібнювальним середовищем, а також розмір, форма, густина і твердість цього середовища. Крім того, важливими є густина пульпи, її кількість у млині та величина циркулюючого навантаження.

Перелічені параметри змінюються у широких межах, що пояснюється статистичним характером як окремих складових, так і самого процесу подрібнення. Частина факторів, зокрема стан подрібнювального середовища та футеровки, поступово змінюється в часі. За висновками більшості дослідників, збільшення кількості вихідної сировини призводить до зниження виходу готового класу.

Одним із найважливіших керуючих впливів, за допомогою якого можна змінювати крупність продукту на виході млина, є витрата води, що подається в млин.

Як об'єкт керування замкнутий цикл подрібнення описується сукупністю вхідних, збурювальних і вихідних параметрів. До вхідних керуючих впливів належать продуктивність за вихідною рудою Q (т/год), витрати води в млин і класифікатор, частота обертання барабана млина та витрата куль (т/зміну). Основними вхідними збуреннями є гранулометричний склад початкової руди, її крупність, подрібнюваність, витрати пісків, а також технічний стан куль і футеровки. До вихідних керованих величин належать густина пульпи (т/м³), середній розмір частинок, продуктивність за готовим класом у розвантаженні млина та вміст класу мінус 0,074 мм.

Найбільш істотними збурювальними чинниками є крупність і подрібнюваність вихідного матеріалу. Їхня зміна в часі потребує періодичного

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коригування продуктивності живильника відповідно до поточних фізичних властивостей сировини.

1.4 Принципи автоматизованого керування процесом подрібнення руди

Процес збагачення рудної сировини спрямований на підготовку матеріалу до такого стану, за якого окремі мінеральні компоненти максимально розкриваються та відокремлюються один від одного. Досягнення цього результату забезпечується послідовним виконанням операцій дроблення, подрібнення та класифікації подрібненого продукту за крупністю.

Узагальнену схему автоматизації процесу подрібнення руди в млині наведено на рисунку 1.4 [12, 13].

З наведеної схеми видно, що керування процесом побудоване на взаємодії двох основних контурів автоматичного регулювання:

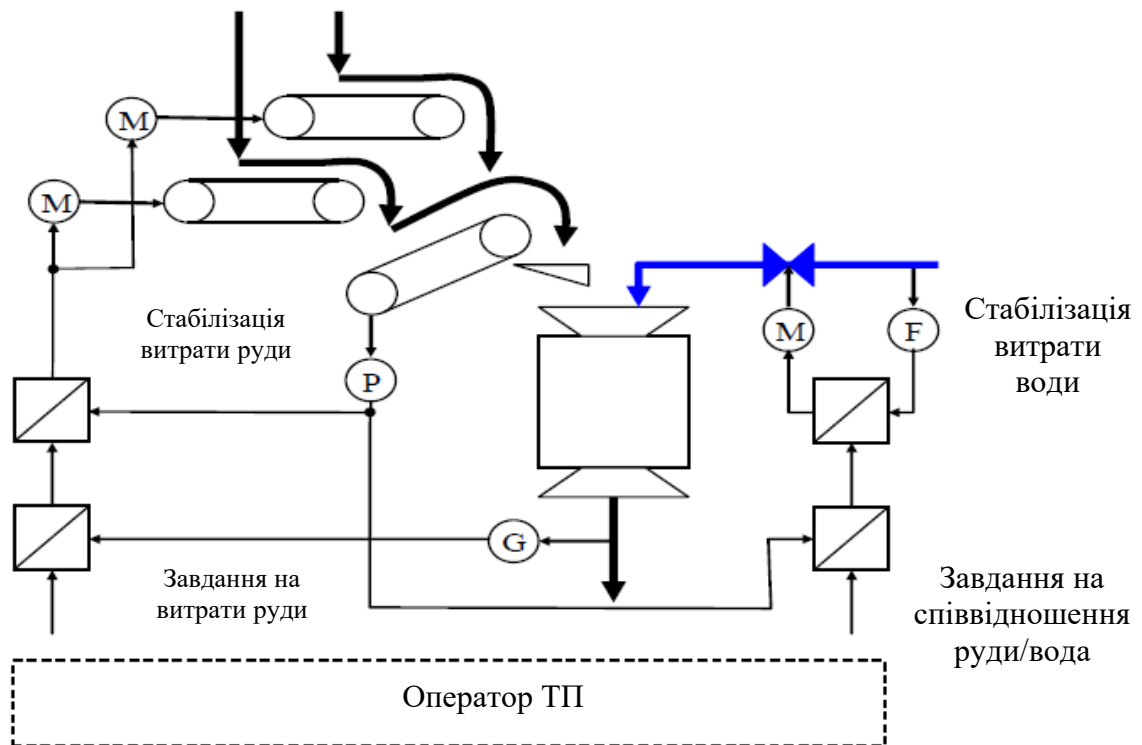
- перший контур підтримує задану продуктивність циклу за вихідною рудою. Регулювальна дія формується шляхом зміни подачі рудної маси, що практично реалізується через коригування швидкості руху живильних конвеєрів;
- другий контур забезпечує стабілізацію співвідношення між твердою фазою та водою. Для цього змінюється витрата води, яка подається безпосередньо у барабан млина.

Оператор із пульта керування задає необхідну продуктивність циклу за вихідною рудою та встановлює потрібне співвідношення «руда–вода». Значення цих параметрів обираються з урахуванням поточних фізико-механічних властивостей руди, що надходить на подрібнення.

Для прийняття технологічних рішень оператор отримує інформацію про виробничий план, енергоємність подрібнення, гранулометричний склад зливу млинів, фактичну продуктивність агрегату, а також про обсяги руди, що надходить із різних родовищ. На основі цих даних він може коригувати

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

завдання за витратою руди та підтримувати раціональне співвідношення «руда/вода».



P – конвеєрні ваги; *G* – гранулометр; *F* – витратомір; *M* – електродвигуни

Рисунок 1.4 – Узагальнена схема автоматизації процесу подрібнення руди в млині [12]

Пряме автоматизоване визначення параметрів руди, які характеризують її фізико-механічні властивості, у багатьох випадках є складним або технічно обмеженим. Це пояснюється неоднорідною структурою гірських порід, різною міцністю, наявністю тріщин, включень та інших природних дефектів. Водночас упровадження комплексних систем автоматичного керування технологічним процесом дає змогу враховувати кількість руди, що надходить у приймальні бункери збагачувального комплексу. За умови врахування транспортних запізнень і перемішування матеріалу можна опосередковано оцінювати співвідношення різних типів руд у потоці, який подається на подрібнення [12].

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 1.5 використано такі умовні позначення: T_p – завдання за витратою руди; T_v – завдання на співвідношення «руда/вода»; V_p і V_v – відповідно об’єми руди та води; C_{x2} – гранулометричний склад зливу млина; P і Q – енергоспоживання та продуктивність млина [12, 13].

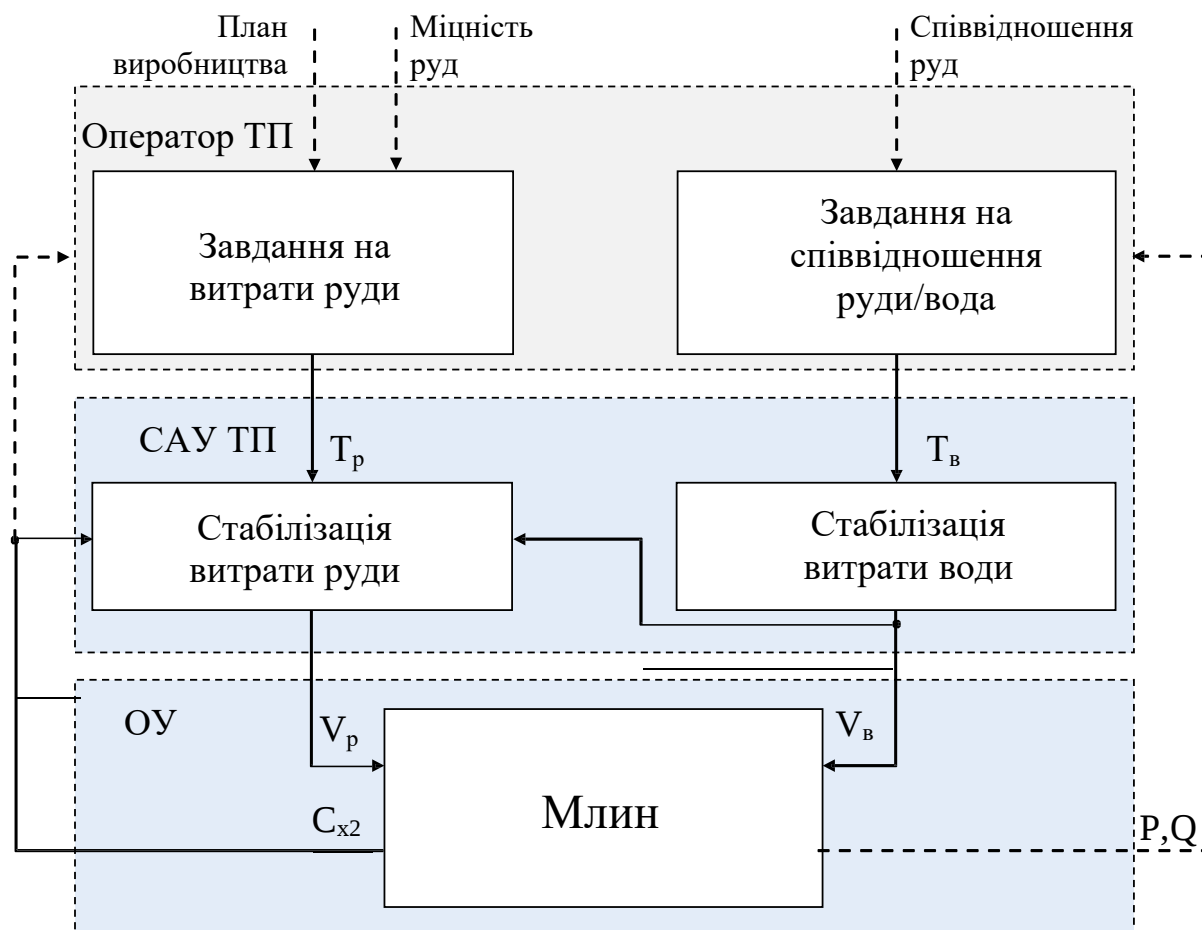


Рисунок 1.5 – Структурна схема керування першою стадією подрібнення руди в млині

1.5 Огляд існуючих методів автоматичного керування процесом подачі руди в млин

Стабілізація подачі руди є базовою умовою керованої роботи подрібнювального комплексу У реальних виробничих умовах пропускна здатність агрегату постійно змінюється під впливом гранулометричного складу,

подрібнюваності та вологості руди, стану футерування, кульового або стержневого завантаження, а також режиму циркуляційного навантаження. Тому жорстке підтримання незмінної витрати руди часто змушує оператора працювати із запасом безпеки, знижуючи завдання на живильник для запобігання переповненню барабана. Такий підхід зменшує ризик аварійного режиму, але водночас обмежує продуктивність і підвищує питомі енерговитрати процесу подрібнення [1].

У межах цієї роботи регулювання подавання руди до стержневого млина доцільно розглядати через систему конвеєрного зважування. Конвеєрні ваги забезпечують безперервне вимірювання масової витрати матеріалу, відносно прості в експлуатації та можуть давати похибку порядку 1 %. Для надійнішого контролю завантаження витрату руди бажано поєднувати з непрямыми ознаками внутрішньомлинового заповнення: акустичним сигналом, активною потужністю приводу, тиском в опорах, густиною пульпи та показниками сучасних систем безперервного моніторингу [2; 3].

На збагачувальних фабриках ступінь заповнення млина або наближений стан його завантаження найчастіше контролюють такими способами:

- аналіз акустичного сигналу, який формується під час роботи млина;
- вимірювання середньої або змінної складової активної потужності приводного двигуна;
- контроль тиску мастила чи зворотного тиску в опорних підшипниках;
- виявлення передумов переповнення за характером виходу гальки або великих частинок;
- радіоізотопне визначення рівня, густини або об’ємного заповнення;
- застосування систем безперервного контролю завантаження з обробкою кількох вимірювальних сигналів.

Далі наведено узагальнений аналіз основних підходів, їхніх переваг, обмежень і можливостей використання в автоматизованій системі керування завантаженням млина.

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.5.1 Контроль акустичного сигналу, що формується під час роботи млина

Акустичний метод ґрунтується на тому, що характер шуму млина змінюється разом із режимом руху подрібнювального середовища та матеріалу всередині барабана. За неповного завантаження переважають удари куль або стержнів об футерування, а зі збільшенням кількості матеріалу інтенсивність окремих ударних складових зменшується, оскільки шар руди частково демпфує механічні взаємодії. Саме тому акустичний сигнал може використовуватися як непряма ознака ступеня заповнення та характеру руху внутрішньомлинового завантаження [2; 3].

Первинним перетворювачем у таких системах зазвичай є мікрофон або акустичний датчик, розміщений поблизу корпусу млина, у зоні падіння подрібнювального середовища або біля розвантажувальної горловини. Для зменшення впливу сторонніх звуків застосовують напрямлене встановлення мікрофона, акустичні екрани, захисні камери з отворами та вузькосмугову фільтрацію. Вторинний перетворювач підсилює сигнал, виділяє інформативну частотну смугу, після чого результат подається на фільтр згладжування або до програмного алгоритму оцінювання завантаження.

Перевагою акустичного методу є швидка реакція на зміну стану барабана та можливість безконтактного спостереження за режимом роботи. Основні недоліки пов'язані з чутливістю до зовнішнього шумового фону, необхідністю індивідуального налаштування для конкретного млина та поступовою зміною акустичної картини внаслідок зношування футерування і подрібнювального середовища. Через це акустичний сигнал доцільно застосовувати не ізольовано, а разом з іншими технологічними параметрами [3].

1.5.2 Контроль середньої потужності приводного двигуна млина

Одним із поширених способів оцінювання завантаження млина є використання активної потужності, яку споживає приводний електродвигун. За певних умов між рівнем внутрішньомлинового заповнення та потужністю приводу існує функціональна залежність $P = f(\varphi)$, де φ характеризує ступінь

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

заповнення барабана. Якщо фактична потужність відхиляється від заданого значення, система керування змінює продуктивність живильника, а отже - витрату руди, що надходить у млин [1; 2].

У сучасніших підходах аналізують не лише середнє значення активної потужності, а й її змінну складову. Коливання потужності можуть бути пов'язані з періодичним входженням ліфтерів у рудно-кульове завантаження, рухом зони носка та плеча заряду, а також з власними коливаннями електромеханічної системи «барабан - привід». Виконуючи обробку спектральних компонентів можливо отримати корисну інформацію про динаміку завантаження, однак потребує коректного налаштування фільтрів і надійної калібровки моделі [2; 3].

На рисунку 1.6 наведено узагальнену схему стабілізації завантаження за активною потужністю.

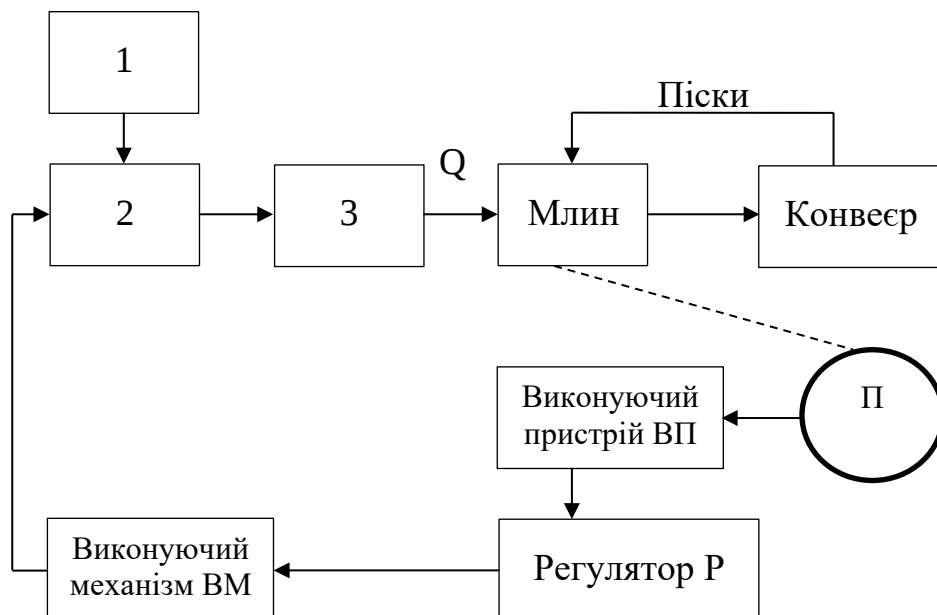


Рисунок 1.6 - Схема стабілізації заповнення млина за значенням активної потужності $P = \text{const}$

Вимірювальний пристрій контролює поточне значення P , після чого сигнал надходить до перетворювача та регулятора. За наявності відхилення від заданого рівня регулятор формує керуючу дію на виконавчий механізм. При

цьому змінюється витрата руди з бункера на конвеєр і, відповідно, кількість руди, що подається до млина.

Основне обмеження цього способу полягає в тому, що активна потужність відображає не лише заповнення млина, а й властивості руди, стан футерування, параметри завантаження подрібнювального середовища та режим роботи приводу. Тому за різких коливань крупності або міцності руди система, що побудована тільки на стабілізації $P = \text{const}$, може підтримувати електричний показник, але не гарантувати стабільний вихід готового класу.

1.5.3 Контроль тиску в опорних підшипниках млина

Ще один непрямий спосіб визначення завантаження полягає у вимірюванні тиску мастила або зворотного тиску в опорних підшипниках барабана. Оскільки маса матеріалу та подрібнювального середовища впливає на навантаження, яке передається на опори, такий сигнал може бути пов'язаний зі ступенем заповнення млина. У промисловій практиці подібні вимірювання використовують для оцінювання загальної маси заряду та виявлення тенденцій до перевантаження [7].

Перевагами методу є відносна простота реалізації, використання наявної гідравлічної або мастильної інфраструктури та менша чутливість до електричних завад порівняно з каналом активної потужності. Водночас тиск в опорах не є однозначною характеристикою технологічного стану млина. На нього впливають температура мастила, стан підшипників, зношування футерування, зміна маси кульового завантаження, особливості приводу та механічні перекоси. Через це метод потребує регулярної калібровки, а для точного автоматичного регулювання його бажано доповнювати іншими вимірювальними каналами.

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.5.4 Радіоізотопний спосіб контролю заповнення та густини пульпи

Радіоізотопні засоби контролю застосовують у технологічних процесах тоді, коли потрібне безконтактне вимірювання параметрів у трубопроводах, жолобах, бункерах або закритих апаратах. Принцип роботи в цьому випадку базується на зміні інтенсивності іонізуючого випромінювання після проходження або відбиття від контрольованого середовища. Для релейних пристроїв це може бути стрибкоподібна зміна вихідного сигналу за досягнення певного рівня матеріалу, а для щільномірів - безперервне перетворення ослаблення гамма-випромінювання у значення густини [14; 15].

У системах збагачення радіоізотопні щільноміри особливо корисні для контролю пульпи, оскільки датчик не контактує безпосередньо з абразивним і часто неоднорідним середовищем. Джерело випромінювання та детектор розміщують по різні боки трубопроводу або каналу; зі збільшенням густини пульпи до детектора доходить менша частина випромінювання. Після калібрування прилад може видавати сигнал густини, концентрації твердого або масової витрати, що важливо для стабілізації роботи класифікаторів, гідроциклонів і зливів млина [14].

Радіоізотопний контроль може також використовуватися для оцінювання об'ємного заповнення млина за характером відбиття гамма-випромінювання від матеріалу в барабані. Це дозволяє виявляти переповнення та підвищувати надійність захисту агрегату. Проте головними обмеженнями є вимоги радіаційної безпеки, необхідність спеціального дозволу на експлуатацію джерел іонізуючого випромінювання, регламентоване обслуговування та відповідальне поводження з джерелами.

1.5.5 Системи безперервного контролю завантаження

Найбільш перспективним напрямом є побудова систем безперервного контролю, у яких стан млина визначається не за одним параметром, а за сукупністю сигналів. До таких сигналів можуть належати акустичні

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

характеристики, вібрації, деформації корпусу або футерування, активна потужність, швидкість обертання, тиск в опорах, витрата руди, витрата води, густина пульпи та інші технологічні змінні. Об'єднання різнорідних даних дозволяє зменшити неоднозначність окремих вимірювань і точніше оцінити внутрішню динаміку завантаження [2; 3].

Ці системи працюють як інформаційна підтримка оператора або як частина замкнутого контуру автоматичного керування. У першому випадку вони попереджають про недовантаження, перевантаження чи нестійкий режим. У другому - формують рекомендації або безпосередньо коригують завдання на живильник, подачу води та інші виконавчі механізми. Практична ефективність такого підходу залежить від якості датчиків, математичної моделі, алгоритмів фільтрації та періодичної перевірки адекватності оцінки завантаження.

1.5.6 Аналітичний висновок щодо вибору способу контролю

Виконавши аналіз методів контролю завантаження робимо висновок - жоден з розглянутих способів не забезпечує універсального та повністю незалежного визначення завантаження млина. Акустичний канал швидко реагує на зміну режиму, але потребує захисту від шумів. Потужнісний метод легко інтегрується в систему електроприводу, однак залежить від властивостей руди та механічного стану агрегату.

Контроль тиску в підшипниках дає інформацію про загальну масу заряду, але має температурні та механічні похибки. Радіоізотопні вимірювання ефективні для густини пульпи і безконтактного контролю, проте пов'язані з регламентами радіаційної безпеки.

Саме тому для системи автоматизації завантаження руди доцільно застосовувати комбінований підхід: конвеєрні ваги як основний канал вимірювання витрати руди, а непрямі показники стану млина - як коригувальні та захисні сигнали.

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 - Порівняльна характеристика способів контролю завантаження млина

Спосіб контролю	Що вимірюється	Основні переваги	Основні обмеження
Акустичний сигнал	Шум і спектральні складові роботи млина	Швидка реакція, безконтактність, можливість виявлення зміни руху заряду	Вплив сторонніх шумів, потреба в налаштуванні частотних фільтрів
Активна потужність приводу	Середнє або змінне значення споживаної потужності	Проста інтеграція з електроприводом, придатність для автоматичного регулювання	Залежність від властивостей руди, стану футерування та параметрів приводу
Тиск в опорних підшипниках	Навантаження на опори барабана	Простота, відносна стійкість до електричних завад	Температурний дрейф, вплив механічного стану вузлів і зношування
Радіоізотопний контроль	Густина пульпи, рівень або заповнення за ослабленням випромінювання	Безконтактність, робота з абразивними середовищами, придатність для трубопроводів	Вимоги радіаційної безпеки, спеціальне обслуговування і дозвільні процедури
Безперервний багатоканальний контроль	Сукупність сигналів: акустика, потужність, тиск, витрата, густина тощо	Вища надійність оцінки, можливість раннього виявлення перевантаження	Складність моделі, потреба в калібруванні та якісній обробці даних

Висновки до розділу

У першому розділі було розглянуто технологічні, конструктивні та організаційні передумови автоматизації процесу подрібнення руди в кульовому млині. Встановлено, що процес подрібнення є однією з найбільш енергоємних і відповідальних операцій у структурі збагачувального виробництва, оскільки саме від його стабільності залежить якість підготовки рудної сировини,

продуктивність наступних стадій класифікації та магнітної сепарації, а також загальна ефективність роботи збагачувальної фабрики.

У ході аналізу об'єкта автоматизації визначено, що кульовий млин є складним технологічним агрегатом із великою кількістю взаємопов'язаних параметрів. На його роботу впливають витрата вихідної руди, подача води, гранулометричний склад матеріалу, подрібнюваність руди, циркуляційне навантаження, стан футеровки, кульове завантаження та інші чинники. Через це процес подрібнення має нелінійний характер і потребує не лише стабілізації окремих параметрів, а й комплексного автоматизованого керування.

Розглянута технологічна схема подрібнення показала, що перша стадія процесу виконується у замкнутому циклі з класифікатором. Така організація дозволяє повертати недостатньо подрібнений матеріал на повторне подрібнення, забезпечуючи необхідний вміст готового класу у зливі класифікатора. Водночас замкнутий цикл ускладнює керування, оскільки зміна одного параметра, наприклад витрати руди або води, впливає на густину пульпи, циркуляційне навантаження, продуктивність млина та якість кінцевого продукту.

Було встановлено, що основними керуючими впливами в системі автоматизації є подача руди та витрата води. Регулювання витрати руди дозволяє впливати на продуктивність млина, а зміна витрати води забезпечує підтримання необхідного співвідношення твердої та рідкої фаз у пульпі. Для ефективного керування оператор повинен враховувати виробничий план, енерговитрати, гранулометричний склад зливу, властивості руди та фактичний режим роботи обладнання.

У розділі також проаналізовано відомі способи контролю завантаження млина. До них належать акустичний контроль, вимірювання активної потужності приводного двигуна, контроль тиску в опорних підшипниках, радіоізотопні методи та багатоканальні системи безперервного контролю. Кожен із цих методів має власні переваги, однак жоден із них не забезпечує повністю універсального та незалежного визначення ступеня завантаження млина. Це

					КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пояснюється впливом зовнішніх збурень, зміною властивостей руди та технічним станом агрегату.

Найбільш доцільним для практичного використання є комбінований підхід, за якого основним каналом контролю подачі руди можуть бути конвеєрні ваги, а додатковими інформаційними сигналами — активна потужність приводу, акустичні характеристики, густина пульпи, тиск в опорах та інші технологічні параметри. Такий підхід дозволяє підвищити надійність оцінювання стану млина, своєчасно виявляти перевантаження або недовантаження та підтримувати процес у раціональному режимі.

У першому розділі було обґрунтовано доцільність автоматизації процесу подрібнення руди. Встановлено, що кульовий млин є складним об'єктом керування, робота якого залежить від великої кількості технологічних, механічних і фізико-механічних чинників. Проаналізовано будову та принцип роботи кульового млина, особливості технологічної схеми подрібнення, а також основні параметри, що впливають на ефективність процесу. За результатами першого розділу обґрунтовано необхідність автоматизації процесу подрібнення руди, визначено основні параметри об'єкта керування, розглянуто технологічну схему роботи млина та виконано порівняльний аналіз методів контролю його завантаження. Отримані результати створюють основу для подальшої розробки функціональної схеми автоматизації, вибору технічних засобів контролю та побудови системи керування процесом подрібнення.

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.01.ПЗ</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ТА ЇЇ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ

2.1 Узагальнені структурні схеми елементів комплексу подрібнення руди

Для дослідження технологічного комплексу доцільно спочатку виокремити його основні складові. Надалі як об'єкт керування розглядається не окремий апарат, а весь вузол подрібнення у сукупності взаємопов'язаних процесів.

Функція млина полягає у доведенні рудної сировини до необхідної крупності шляхом інтенсивного механічного руйнування частинок.

До керувальних вхідних впливів, які визначають режим роботи млина, переважно зараховують:

- витрату руди, що подається у барабан млина, Q_p ;
- кількість води, яка надходить безпосередньо до млина, $Q_{м.в}$;
- частоту обертання барабана n , об/хв;
- масу або рівень кульового завантаження q_k .

Структурне подання млина як керованого об'єкта наведено на рис. 2.1.

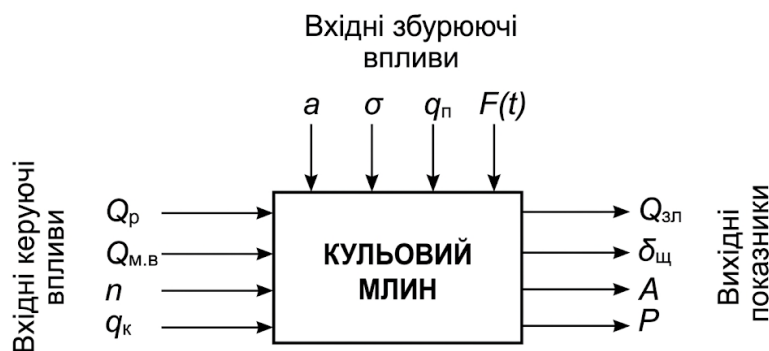


Рисунок 2.1 – Узагальнена структурна схема млина як об'єкта керування

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>РОЗДІЛ 2</i>		
Розроб.		Ратушний А.А.					
Перевір.		Тиханський М.П.					
Н. Контр.		Маринич І.А.					
Затверд.		Маринич І.А.					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						28	37
					<i>КНУ АКІТР-23ск</i>		

До збурювальних вхідних факторів належать:

- зміна фізико-механічних властивостей руди, що надходить на подрібнення, σ ;
- вміст контрольного класу крупності у вихідному матеріалі α , %;
- витрата пісків $q_{к.п}$ за умови роботи млина у замкнутому циклі з класифікаційним апаратом.

Окрему групу впливів формують експлуатаційні чинники: поступове спрацювання куль, зношення футеровки барабана та загальне старіння механічного обладнання, що умовно описується функцією $F(t)$.

Ефективність роботи млина доцільно оцінювати за такими вихідними технологічними й енергетичними показниками:

- потужністю, яку споживає електродвигун приводу млина, P , кВт;
- акустичним сигналом працюючого агрегату A , що може характеризуватися частотою або рівнем амплітуди;
- густиною пульпи у зливі млина $\delta_{ц}$, кг/л;
- об'ємною витратою пульпи у зоні зливу млина, $Q_{зл}$, м³/год.

У більшості промислових режимів частота обертання барабана не змінюється під час експлуатації. Її добирають на етапі налагодження для певного типу руди, після чого підтримують на сталому рівні.

Основними каналами регулювання процесу подрібнення є:

- витрата руди у млин – частка готового класу у зливі;
- витрата руди у млин – акустичний відгук барабанного агрегату;
- витрата руди у млин – густина зливу млина;

Подача води формується залежно від кількості руди, що надходить у млин. У цій взаємодії витрата руди є провідною координатою, а витрата води виступає залежною величиною.

Математичне подання кульового млина за каналом «витрата сировини – запас проміжного продукту в млині»

Для опису матеріального балансу цього каналу використовується таке рівняння:

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{dM}{dt} = Q_1 - Q_2,$$

де M – запас матеріалу всередині млина; Q_1 – потік вихідної сировини, що надходить на подрібнення; Q_2 – потік подрібненого продукту на виході.

Величина вихідного потоку Q_2 визначається кількістю матеріалу M , що перебуває у млині. Для усталених режимів цю залежність подають у вигляді статичної характеристики:

$$Q_2 = Q_2(M)$$

Наведена статична залежність має екстремальний характер. Якщо матеріал у млині відсутній, тобто $M = 0$, то утворення готового продукту неможливе, а продуктивність Q_2 дорівнює нулю.

За поступового збільшення запасу матеріалу M продуктивність Q_2 зростає лише до певної межі. Коли барабан надмірно заповнений, інтенсивність подрібнення різко зменшується, злив класифікатора скорочується, а значення Q_2 знову наближається до нуля.

Співвідношення справедливе для рівноважних станів. У перехідних режимах фактична величина Q_2 може не збігатися зі статичною залежністю $Q_2(M)$, тому необхідно оцінювати швидкість повернення системи до усталеного стану після відхилення.

У термінах теорії стійкості рівноважний режим $Q_{2cm} = Q_2(M)$ можна трактувати як незбурений рух, а відхилення від нього – як збурений рух технологічного об'єкта.

Рівняння збуреного руху формують, позначивши через $Q_2 = Q_2 - Q_2(M)$ різницю між поточним значенням вихідного потоку та його рівноважним значенням.

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Швидкість зміни Q_2 у збуреному режимі визначається величиною самого відхилення, а також інтенсивністю внутрішньої циркуляції матеріалу в млині.

$$\frac{d\Delta Q_2}{dt} = -\omega \cdot \Delta Q_2 \text{ або } \frac{1}{\omega} \cdot \frac{d\Delta Q_2}{dt} + \Delta Q_2 = 0$$

Параметр ω відображає швидкість циркуляції матеріалу та інтенсивність внутрішніх процесів у агрегаті. Величина $T_B = 1/\omega$ є сталою часу, яка характеризує тривалість перехідного процесу.

$$Q_2(t) = Q_2[M(t)]$$

Після суміщення рівняння статичної характеристики з рівнянням збуреного руху одержуємо:

$$\frac{1}{\omega} \cdot \frac{d\Delta Q_2}{dt} + \Delta Q_2 + \Delta Q_{2cm} = Q_2(M)$$

оскільки

$$Q_{2cm} + \Delta Q_2 = Q_2$$

а також

$$\frac{d\Delta Q_2}{dt} \approx \frac{d(Q_{2cm} + \Delta Q_2)}{dt} = \frac{dQ_2}{dt}$$

звідси випливає

$$\frac{1}{\omega} \cdot \frac{dQ_2}{dt} + Q_2 = Q_2(M)$$

Підставивши відповідний вираз із рівняння балансу, маємо:

$$Q_2 = Q_1 - \frac{dM}{dt}$$

Оскільки збурена складова є малою порівняно з основним рухом системи, її можна не враховувати. Тоді рівняння набуває спрощеного вигляду:

$$\frac{d\Delta M}{dt} + Q_2(\Delta M) = \Delta Q_1$$

Далі запишемо це рівняння у перетвореній формі:

$$\frac{1}{Q_2(\Delta M)} \cdot \frac{d\Delta M}{dt} + 1 = \frac{Q_1(\Delta M)}{Q_2(\Delta M)}$$

Для скорочення запису введемо позначення:

$$\frac{1}{Q_2(\Delta M)} = T \frac{Q_1(\Delta M)}{Q_2(\Delta M)} = K$$

Після цього отримуємо:

$$T \cdot \frac{d\Delta M}{dt} + \Delta M = K \cdot \Delta Q_1$$

В операторній формі одержане співвідношення записується так:

$$\Delta M \cdot (Tr + 1) = K \cdot \Delta Q_1$$

Отже, передаточна функція досліджуваного об'єкта має вигляд:

$$W_M(p) = \frac{\Delta M}{\Delta Q_1} = \frac{K}{Tp + 1}$$

Під час мокрого подрібнення матеріал проходить уздовж барабана та перемішується, тому динаміка процесу містить транспортне запізнення. З урахуванням цього передаточна функція за каналом «витрата сировини – запас проміжного продукту в млині» записується у такому вигляді:

$$W_M(p) = \frac{K}{Tp + 1} \cdot e^{-\tau p}$$

За розгінною кривою об'єкта визначають основні динамічні параметри: сталу часу T , коефіцієнт підсилення $K_{об}$ і час запізнення τ (рис. 2.2).

Для їх визначення через точку перегину характеристики проводять дотичну та зчитують такі значення:

- час запізнення $\tau = 2,4$ хв;
- стала часу інтегрування $T = 2,8$ хв;
- коефіцієнт підсилення $k = -0,81$.

У підсумку передаточна функція млина для каналу «витрата сировини – запас проміжного продукту в млині» подається так:

$$W_M(p) = \frac{-0,81}{2,8p + 1} \cdot e^{-2,4p}$$

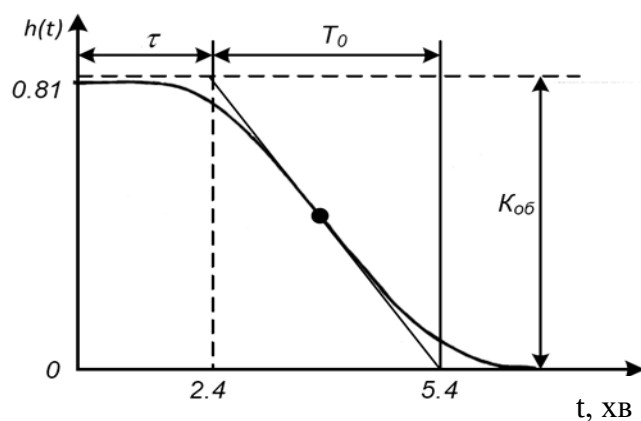
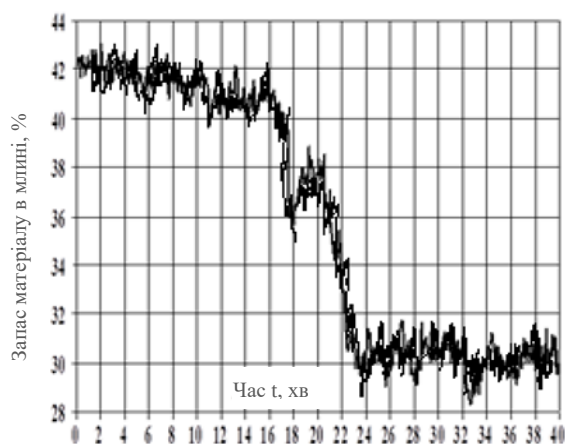


Рисунок 2.2 – Розгінна крива млина для каналу «витрата сировини – запас проміжного продукту в млині»

2.2 Імітаційне моделювання роботи кульового млина та контурів керування

2.2.1 Дослідження обладнання завантаження млина без регуляторів

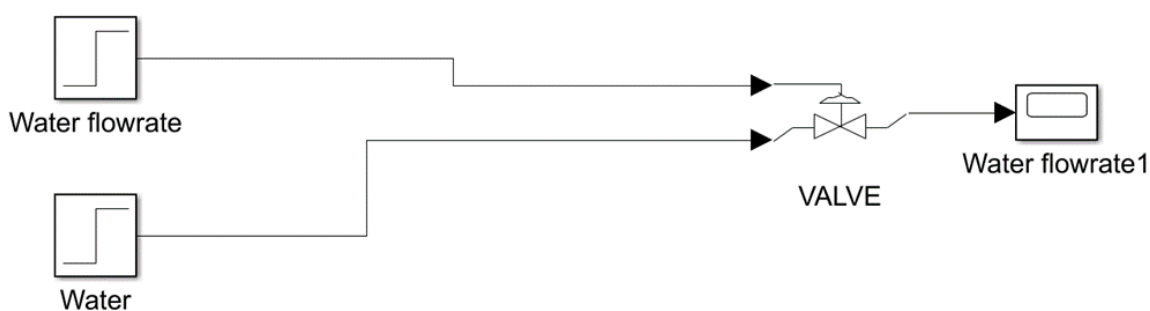


Рисунок 2.3 – Модель виконавчого пристрою подачі води до млина

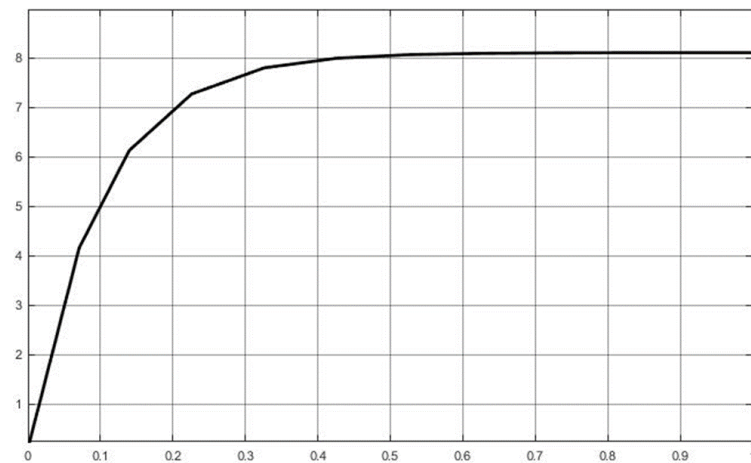


Рисунок 2.4 – Перехідна характеристика виконавчого пристрою подачі води до млина

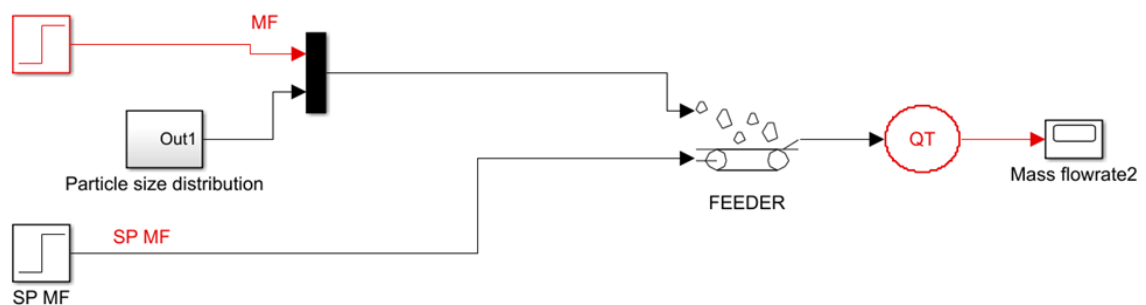


Рисунок 2.5 – Імітаційна модель живильника дробленої руди

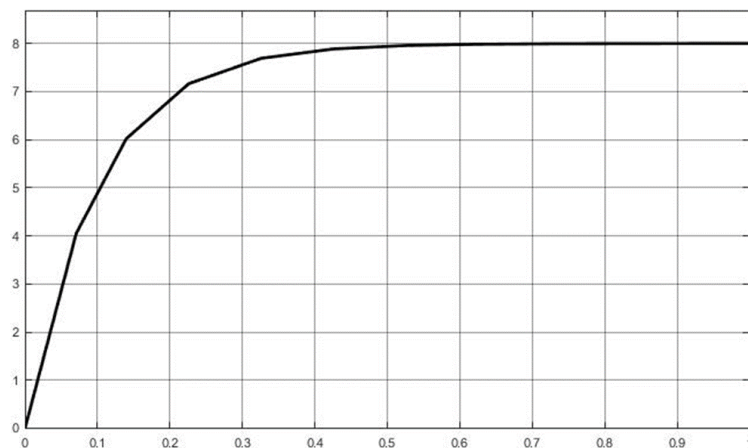


Рисунок 2.6 – Перехідна характеристика живильника дробленої руди

2.2.2 Дослідження обладнання завантаження млина з регуляторами

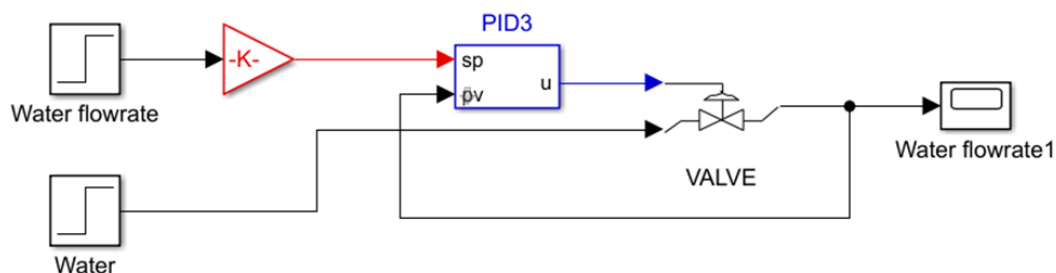


Рисунок 2.7 – Модель керування подачею води у млин із застосуванням ПІД-регулятора

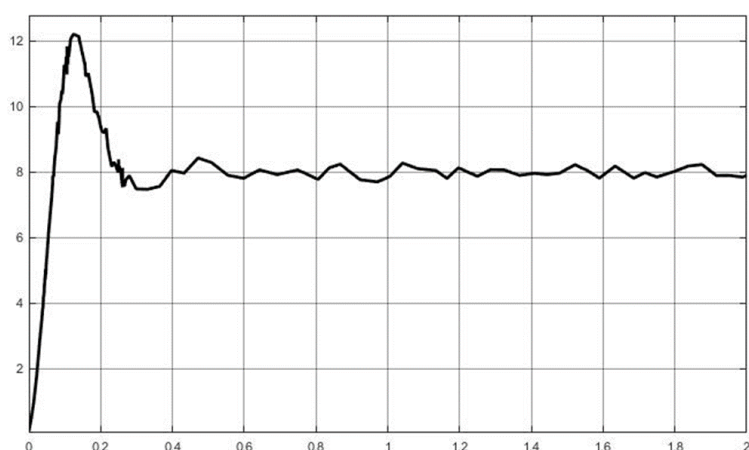


Рисунок 2.8 – Перехідний процес системи подачі води у млин з ПІД-регулятором

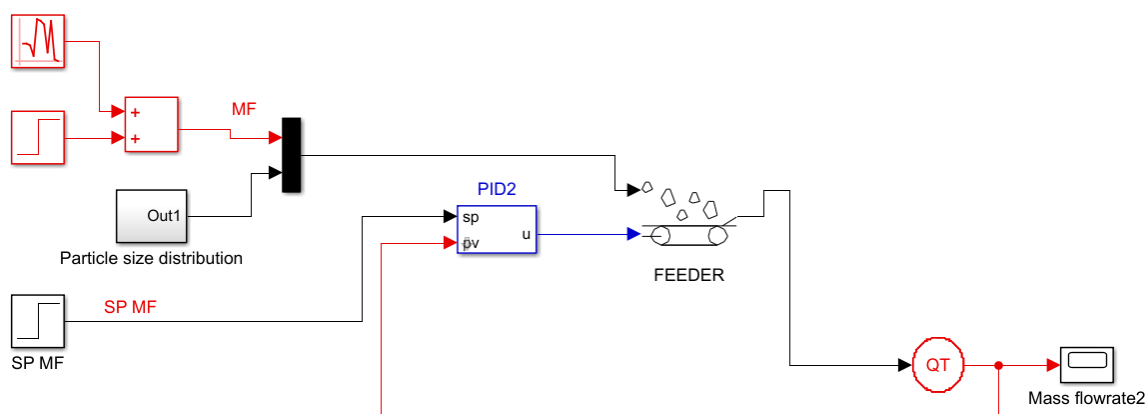


Рисунок 2.9 – Модель керування живильником дробленої руди з ПІД-регулятором

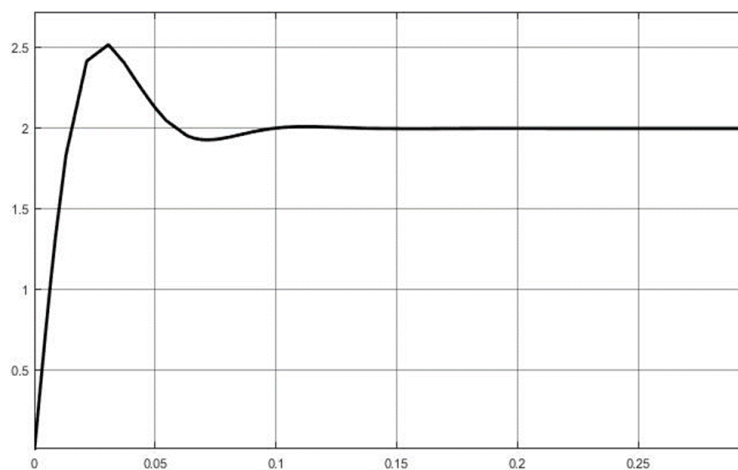


Рисунок 2.10 – Перехідний процес живильника дробленої руди з ПІД-регулятором

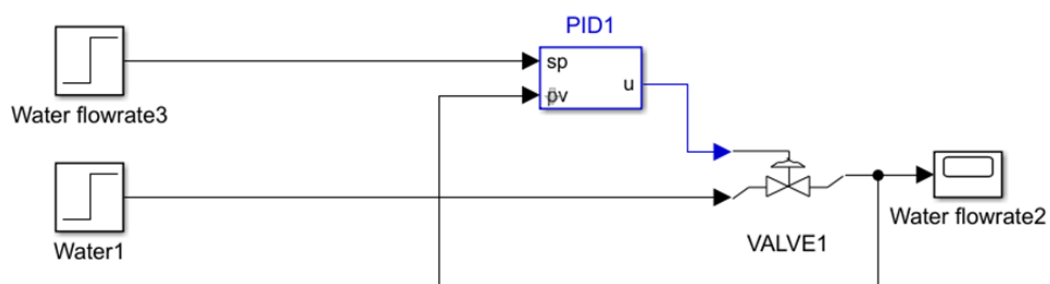


Рисунок 2.11 – Модель керування виконавчим пристроєм подачі води у злив класифікатора з ПІД-регулятором

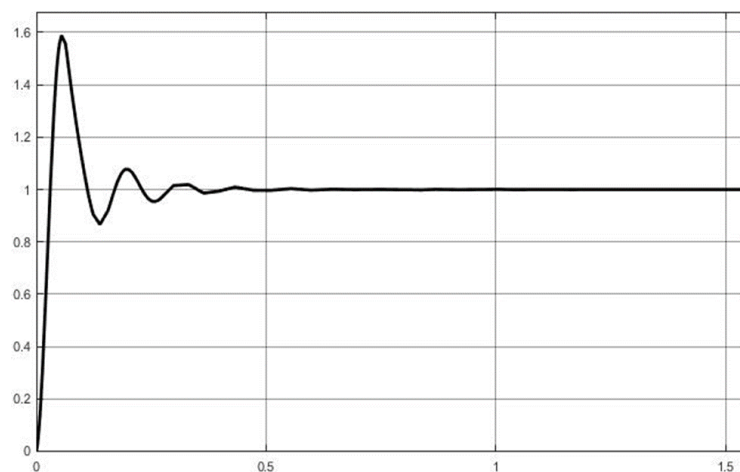


Рисунок 2.12 – Перехідний процес системи подачі води у злив класифікатора з ПІД-регулятором

2.2.3 Моделювання кульового млина в замкненому циклі подрібнення

Імітаційну модель автоматичного керування кульовим млином, що працює у замкненому циклі з класифікатором та виконавчими механізмами завантаження, показано на рис. 2.13. У моделі використано класичні ПІД-регулятори, які впливають на відповідні технологічні параметри. Параметри регуляторів добираються традиційним способом з урахуванням динамічних характеристик об'єкта керування.

Результати проведеного імітаційного експерименту наведено у вигляді графічних залежностей.

На рис. 2.14 подано зміну витрати води, що надходить у млин. Масову витрату руди на вході млина показано на рис. 2.15. Графік витрати води у злив класифікатора наведено на рис. 2.16. Також у роботі подано зміну густини пульпи у зливі класифікатора (рис. 2.17) і циркуляційного навантаження, тобто масової витрати твердого, яке повертається з класифікатора до млина у вигляді пісків (рис. 2.18). У сталому режимі цей показник наближається до 100%.

На рис. 2.19 відображено масову частку твердого готового класу, що подається на подальше збагачення як вихідний продукт. Усталене значення становить приблизно 48%.

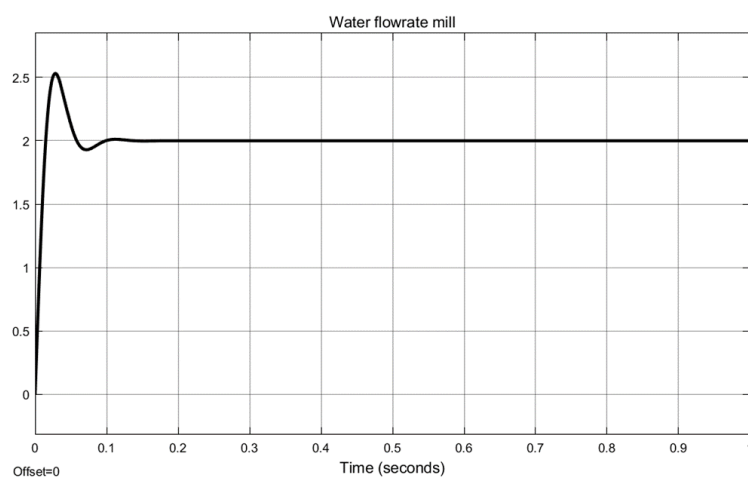


Рисунок 2.14 – Графік витрати води, що подається у млин

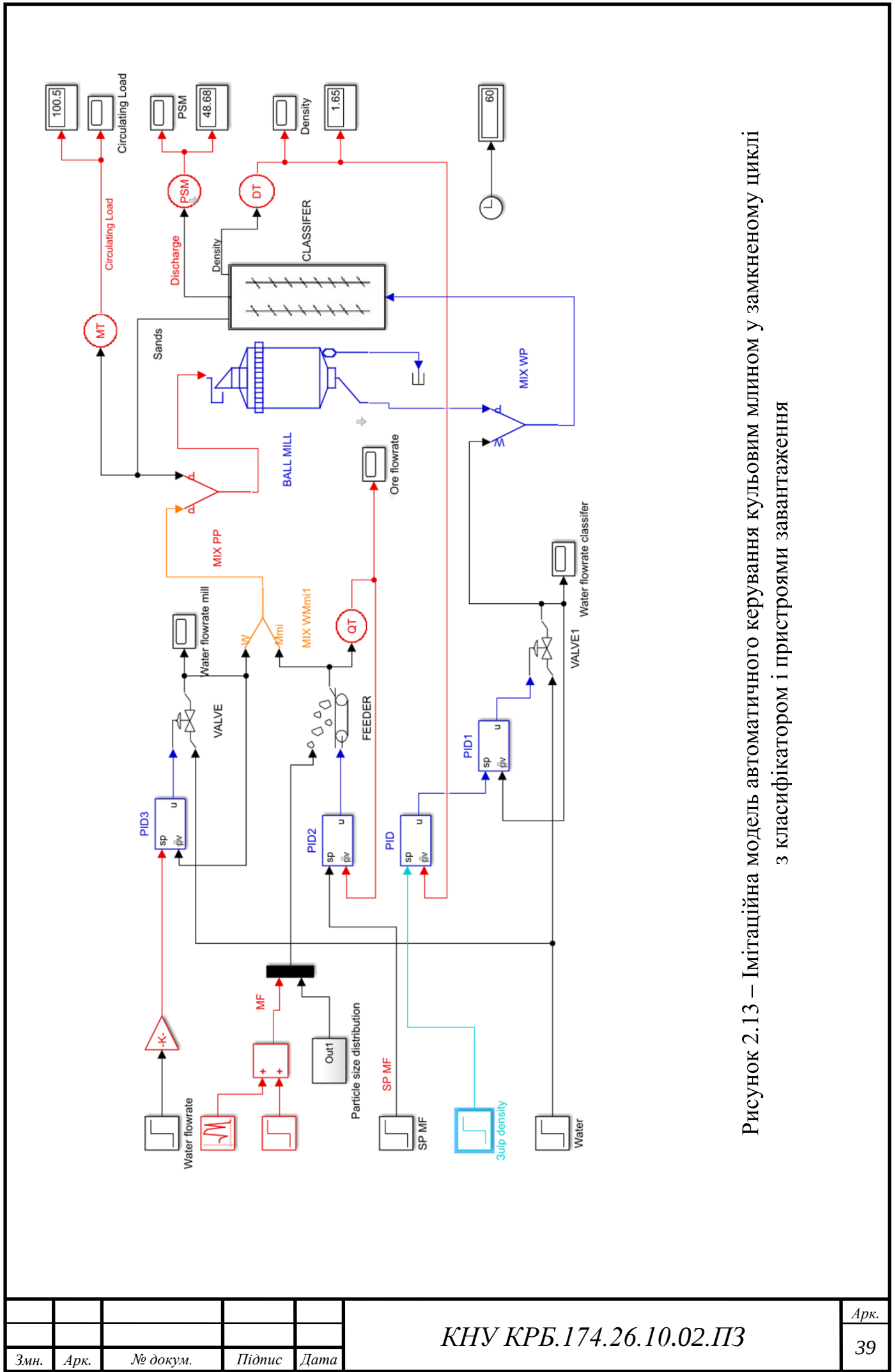


Рисунок 2.13 – Імітаційна модель автоматичного керування кульовим млином у замкненому циклі з класифікатором і пристроями завантаження

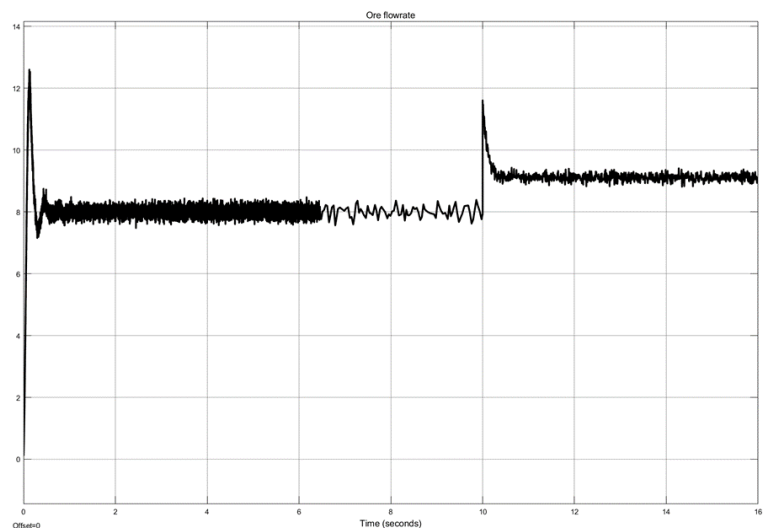


Рисунок 2.15 – Графік масової витрати руди на вході млина

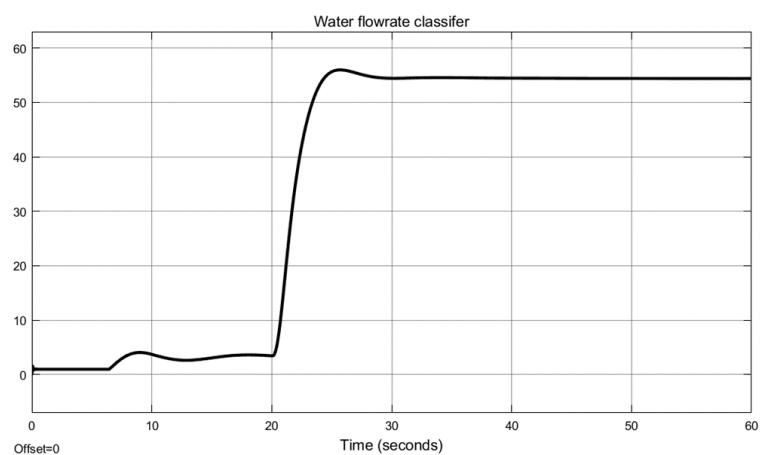


Рисунок 2.16 – Графік витрати води у злив класифікатора

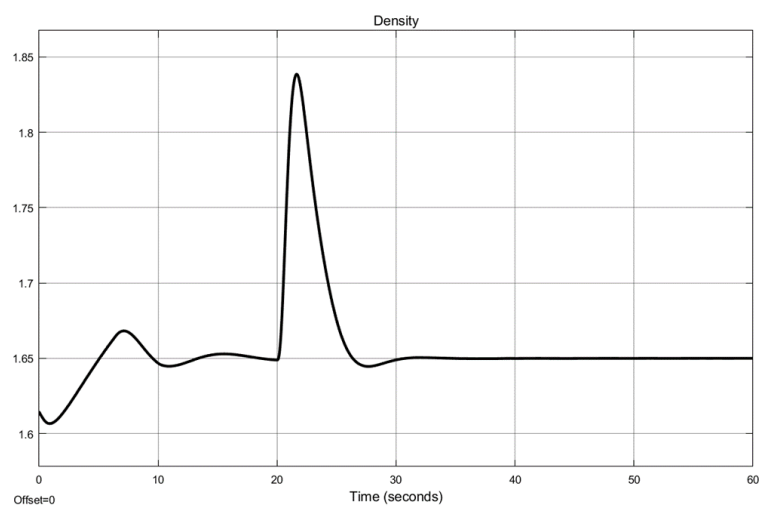


Рисунок 2.17 – Зміна густини пульпи у зливі класифікатора

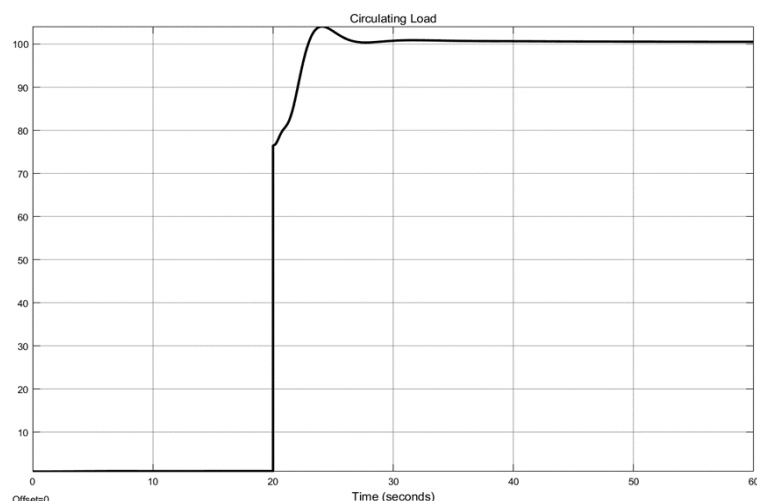


Рисунок 2.18 – Зміна циркуляційного навантаження, що характеризує повернення твердого матеріалу з класифікатора до млина

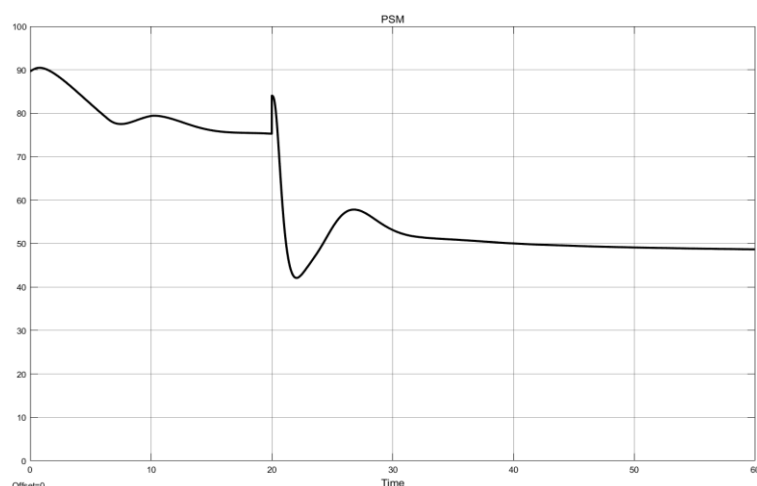


Рисунок 2.19 – Масова частка твердого готового класу у вихідному продукті, що спрямовується на збагачення

2.3 Розроблення функціональної схеми автоматизації

З урахуванням вимог до автоматизованої системи керування завантаженням кульового млина та підібраної апаратної бази сформовано функціональну схему автоматизації, яку наведено на рис. 2.20.

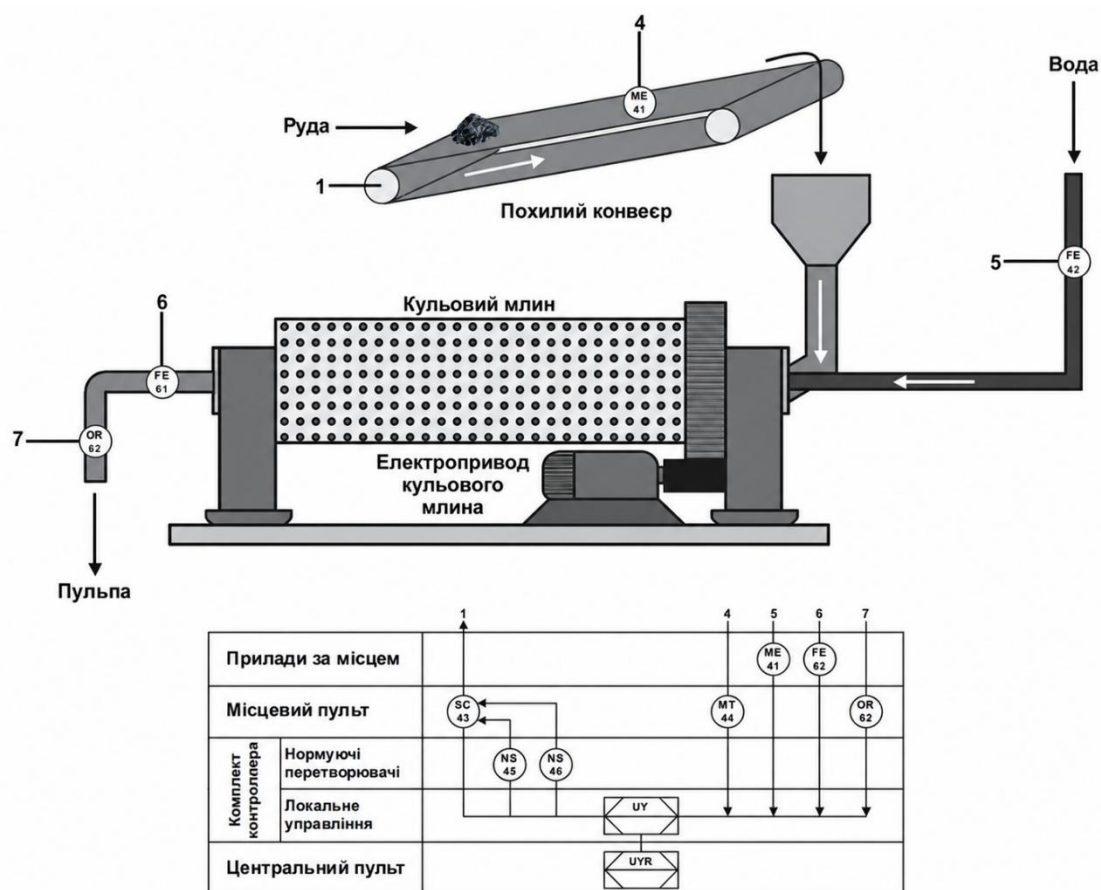


Рисунок 2.20 – Функціональна схема автоматизованого керування

Задання режимів роботи та коригування параметрів системи здійснюється оператором через людино-машинний інтерфейс UYR. Інформація з панелі оператора передається до контролера UY за допомогою мережевого інтерфейсу Ethernet.

Програмований логічний контролер отримує від перетворювача WE 4_3 дані про поточну масу руди на один погонний метр стрічки. Крім того, до нього надходять сигнали від FT 5_2 щодо витрати води, від FT 6_2 щодо витрати пульпи та від DT 7_3 щодо густини пульпи. На основі поточних і попередніх вимірювань контролер визначає фактичний рівень завантаження кульового млина.

Далі ПІД-регулятор, реалізований у програмі контролера, формує керувальну дію, що відповідає потрібній швидкості конвеєрної стрічки. Отримане значення надходить на частотний перетворювач SC 1_3, який змінює

режим роботи електродвигуна конвеєра.

Розраховані значення разом із поточними станами датчиків і виконавчих механізмів передаються на операторську панель, де відображаються засобами НМІ.

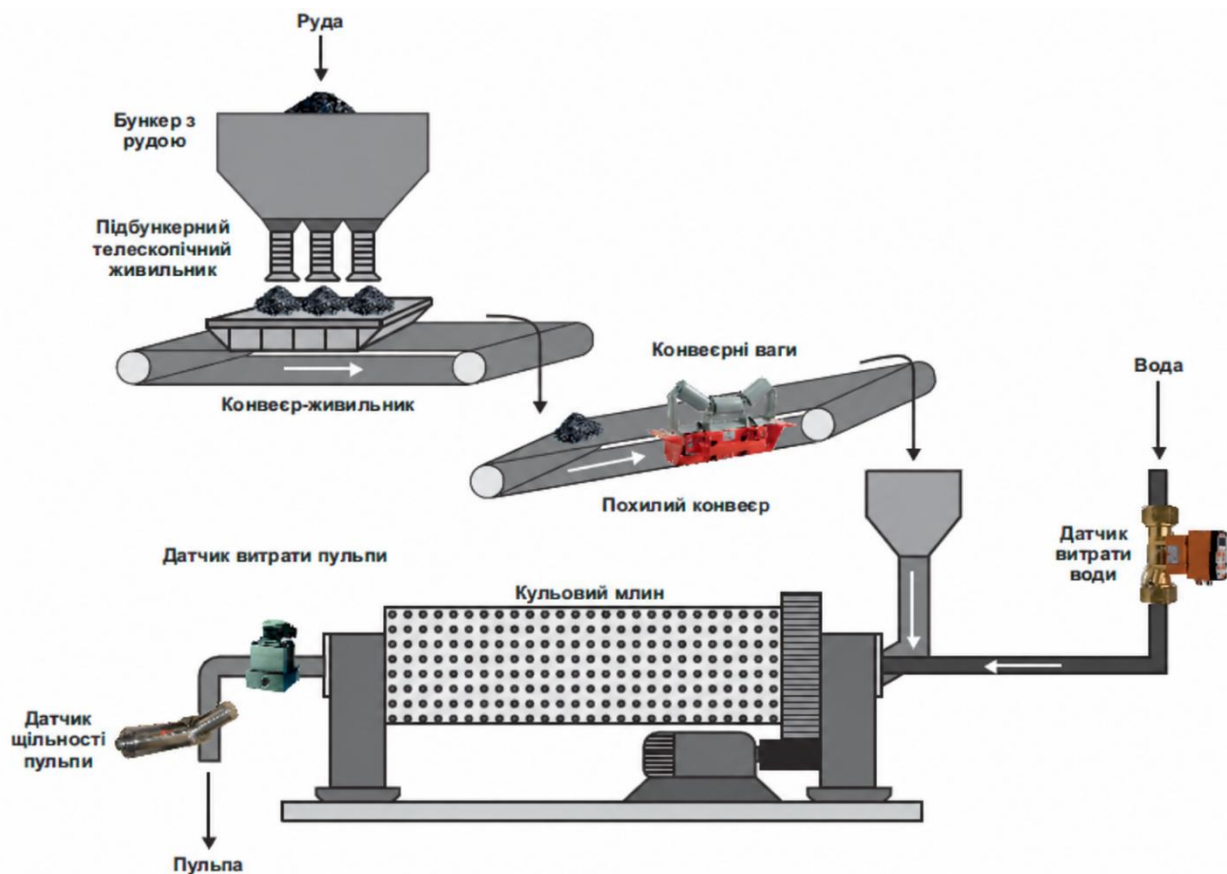


Рисунок 2.21 – Розміщення датчиків і виконавчих механізмів системи керування

Конвеєрні ваги

Автоматичні конвеєрні ваги безперервної дії ВНКА призначені для вимірювання маси сипких матеріалів, зокрема руди та вугілля. Наявність інтерфейсу RS-485 дає змогу включати ці ваги до складу автоматизованої системи керування [18] (рис. 2.22).

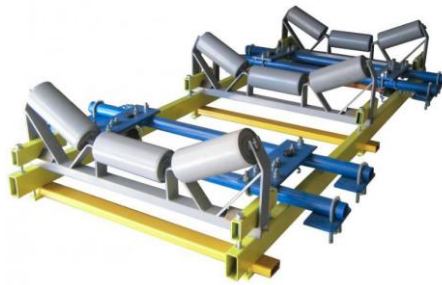
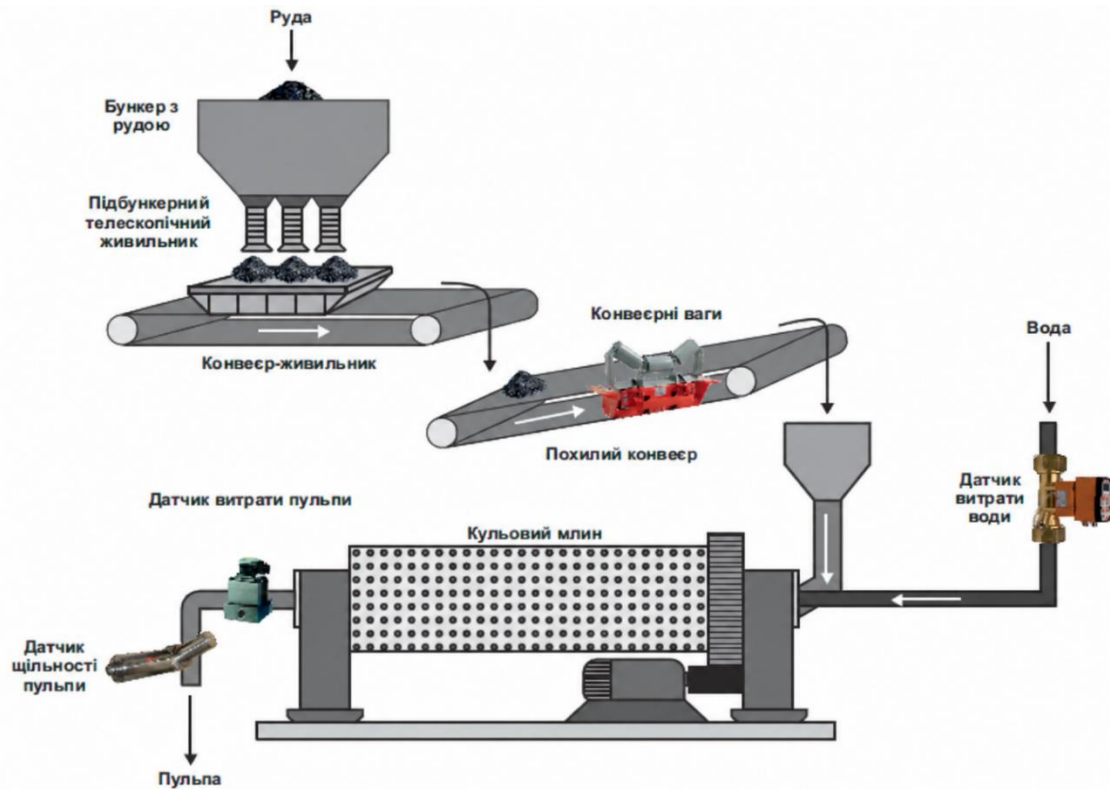


Рисунок 2.22 – Загальний вигляд конвеєрних ваг ВНКА



Таблиця 2.1 – Технічна характеристика ваговимірювального комплексу ВНКА [18]

№	Найменування параметра	Значення
1	Розмір вимірювального ролика (діаметр), мм	160
2	Частота імпульсів на 1 цикл обертання, штук	18
3	Максимальна довжина лінії зв'язку, м	не більше 100
4	Робочий діапазон напруги (DC), В	9 ÷ 24
5	Гранична споживана потужність, Вт	не більше 1
6	Вага обладнання, кг	2
7	Розрахунковий експлуатаційний ресурс, років	не менше 10

Датчик швидкості

Швидкість руху конвеєрної стрічки пропонується контролювати імпульсним датчиком ДКС [27]. Пристрій розрахований на роботу за низьких швидкостей і формує 1–2 імпульси за один оберт вимірювального ролика (рис. 2.23). Його можна використовувати у складі конвеєрних дозувальних систем.



Рисунок 2.23 – Імпульсний датчик швидкості ДКС

Таблиця 2.2 – Експлуатаційні характеристики датчика ДКС [27]

№	Найменування параметра	Значення
1	Фізичні розміри корпусу, мм	360×265×195
2	Робочий діапазон швидкості полотна, м/с	до 3,15
3	Дистанція зв'язку з контролером, м	до 200
4	Напруга постійного струму (живлення), В	10...30
5	Потужність, що споживається, Вт	не більше 1,5
6	Вага пристрою, кг	4,5
7	Гарантований період експлуатації, років	≥ 10

Датчик витрати води

За технологічними умовами витрата води у млині змінюється орієнтовно в межах 50-90 л/хв. Тому витратомір має забезпечувати стабільне вимірювання щонайменше в діапазоні 20-100 л/хв і формувати стандартний аналоговий сигнал. Цим вимогам відповідає Kobold RCD-1141GC34N-C, що вимірює 20-140 л/хв і має вихід 4-20 мА [19] (рис. 2.24).



Рисунок 2.24 – Витратомір води Kobold RCD-1141GC34N-C

Таблиця 2.3 – Основні технічні параметри датчика витрати води [19]

№	Найменування параметра	Значення
1	Діапазон виміру, л/хв	0.5 – 3.3 ... 300 – 2350
2	Діаметр труби, мм	33,5
3	Різьблення	N9, 2»
4	Тип індикатора	Електронний
5	Тип аналогового виходу	4 ÷ 20 мА
6	Тип дискретного виходу	NPN
7	Точність	± 3% від повної шкали
8	Напруга живлення, В	24
9	Максимальний споживаний струм, мА	80

Датчик витрати пульпи

Витрата пульпи у млині за технологічними даними може перебувати в межах 150-300 л/хв. Отже, датчик повинен працювати приблизно в діапазоні 100-350 л/хв, мати уніфікований аналоговий вихід і бути придатним для рідин із в'язкістю до 500 мм²/с. Витратомір Kobold DZR-3006F017 має діапазон 2-600 л/хв та вихідний сигнал 4-20 мА, тому відповідає зазначеним вимогам [20] (рис. 2.25).



Рисунок 2.25 – Витратомір пульпи Kobold DZR-3006F017

Контроль витрати робочої суміші (пульпи) забезпечується датчиком, що працює в межах 2–600 л/хв. Конструкція приладу дозволяє пропускати частки розміром до 50 мкм та передбачає стандартне фланцеве з'єднання для монтажу в систему. Передача даних здійснюється через аналоговий інтерфейс (4–20 мА) або дискретний вихід типу NPN. Для стабільної роботи пристрою необхідне живлення напругою 24 В, при цьому пікове споживання струму не перевищує 120 мА.

Щільномір пульпи

Для безперервного контролю густини пульпи у системі передбачено щільномір ДЕНСЕЛЛ [21].

Робота цього приладу ґрунтується на прямому методі визначення густини, коли зважується сталий об'єм рідини, що проходить через трубу 1 (див. рис. 2.26). Такий принцип придатний для багатофазних середовищ із завислими частинками, які можуть осідати.

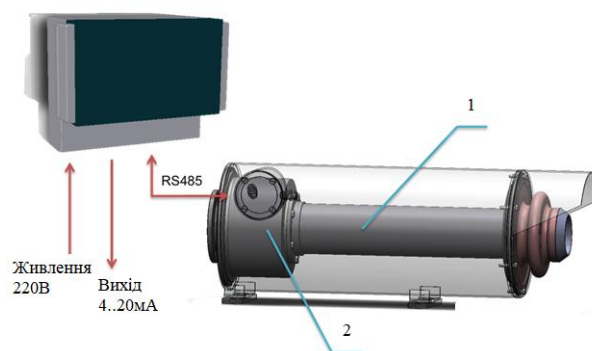


Рисунок 2.26 – Функціональна схема роботи щільноміра ДЕНСЕЛЛ

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики щільноміра ДЕНСЕЛЛ

Найменування параметру	Значення
Діапазон вимірювання: - щільності, кг/м - температури, °С	1000..3500 -15..+70
Межа похибки вимірювання щільності, %: - для пульп і шламів - для суспензій	±0,5 ±0,3
Межа похибки вимірювання температури, °С	±0,5
Вихідний сигнал електронного блоку, мА	4-20
Живлення від мережі змінного струму: - напруга, В - частота, Гц	220 +10/-15% 50 ±1
Споживана потужність, ВА	35
Електричний опір ізоляції силових ланцюгів живлення, Мом	не менше 40
Маса ДЕНСЕЛЛ, кг	19
Число каналів вимірювання: - щільності - температури	1 1
Габаритні розміри ДЕНСЕЛЛ, мм	204x225x660

ДЕНСЕЛЛ забезпечує безперервне вимірювання густини рідкого середовища у відкритих каналах і трубопроводах за умови підключення через байпасну лінію.

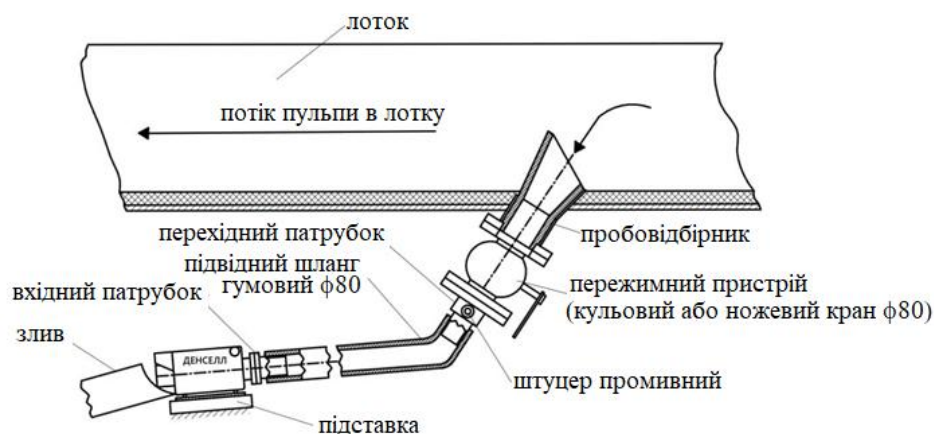


Рисунок 2.27 – Загальна схема підключення щільноміра ДЕНСЕЛЛ [21]

Частотний перетворювач для електроприводу живильника

Під час вибору частотного перетворювача враховано, що система повинна керувати завантаженням млина шляхом зміни швидкості конвеєра. Такі перетворювачі застосовують для регулювання швидкості трифазних асинхронних двигунів. Для електроприводу конвеєра обрано Lenze 8200 E82EV223K4B201 потужністю 22 кВт із живленням від трифазної мережі 380 В (рис. 2.28) [22].



Рисунок 2.28 – Частотний перетворювач Lenze 8200 E82EV223K4B201

Конструктивне виконання: корпус пристрою відповідає класу захисту IP20.

Вибір контролера для системи керування

Для реалізації автоматичного керування процесом подрібнення у схемі магнітного збагачення прийнято програмований контролер Siemens S7-1200 [23].



Рисунок 2.29 – Зовнішній вигляд програмованого контролера SIMATIC S7-1200

Контролери SIMATIC S7-1200 працюють у режимі реального часу й можуть застосовуватися як у локальних вузлах автоматики, так і в більш

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

складних системах автоматичного керування. Вони підтримують обмін даними через Industrial Ethernet/PROFINET, а також з'єднання PtP.

Кожний центральний процесор S7-1200 оснащений Ethernet-інтерфейсом для програмування, діагностики та обміну даними з іншими засобами автоматизації, пристроями й HMI-системами. Для зв'язку можуть використовуватися TCP/IP, ISO on TCP або функції S7 у режимі сервера чи клієнта. За потреби контролер доповнюється 4-канальним комутатором Industrial Ethernet CSM 1277 у форматі модулів S7-1200. Окрім центрального процесора, сигнальних модулів і плат, система може містити:

- блок живлення PM 1207 з $U_{вх} \sim 115/230$ В, $U_{вих} = 24$ В і номінальним струмом навантаження 2,5 А;
- некерований комутатор Industrial Ethernet CSM 1277: 4 x RJ45, 10/100 Мбіт/с;
- карти пам'яті SIMATIC Memory Card обсягом 2 або 24 Мбайт для розширення пам'яті контролера;
- імітатори з перемикачами для відтворення дискретних вхідних сигналів під час налагодження програми.

Для оперативного керування й візуального моніторингу разом із контролерами S7-1200 доцільно застосовувати базові операторські панелі SIMATIC із вбудованим Ethernet-інтерфейсом.

2.4 Розробка програмного забезпечення системи завантаження млина

Програмне забезпечення системи АСЗМ призначене для передавання повідомлень між PLC та вбудованими системами керування приводами конвеєра, насосних агрегатів. ПЗ містить блоки для послідовного зчитування статусу та параметрів насосних агрегатів. Також за допомогою мережевих повідомлень можливо задавати продуктивність насосних агрегатів та керувати заданою швидкістю частотно-керованого привода.

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4.1 Опис загального порядку роботи системи

Комплекс автоматизованого управління процесом помелу руди збирає дані про роботу млина, такі як швидкість обертання, завантаженість рудою та бажану продуктивність. Використовуючи інформацію про щільність і обсяг зливу з класифікатора, історію подачі сировини та дані з датчиків ваги та струму, система розраховує оптимальні обсяги подачі води та руди для досягнення максимальної ефективності та стабільності помелу.

Система також контролює наявність сировини та, у разі її дефіциту, може активувати додаткові механізми подачі, наприклад, насоси або резервні джерела. Ця система автоматизує процес помелу руди, оптимізуючи його за рахунок збору та аналізу даних про роботу млина.

Система враховує щільність і обсяг зливу з класифікатора, історію подачі сировини та дані з датчиків ваги та струму, щоб динамічно регулювати подачу води та руди.

Це гарантує максимальну ефективність та стабільність помелу, а також мінімізує ризики простою через нестачу сировини. Завдяки автоматизованому контролю та динамічному регулюванню, система економить ресурси та час, роблячи процес помелу більш продуктивним та надійним.

Після завантаження ПЛК відбувається ініціалізація змінних та налаштування пристроїв. Після цього система переходить до основного робочого циклу.

В основному циклі відображається поточний стан насосних агрегатів, зчитується та відображається стан запірної арматури. Відображаються задані значення продуктивності насосів та їх поточні значення. Також обчислюється продуктивність агрегатів за витратами сировини до млинів і класифікатора.

2.4.2 Налаштування зв'язку Modbus RTU в середовищі TIA-Portal

Modbus RTU – це один з найпоширеніших протоколів для обміну даними між PLC та іншими пристроями в промислових мережах. В середовищі TIA-

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Portal від Siemens, яке використовується для програмування контролерів серії S7, реалізація зв'язку через Modbus RTU включає використання спеціальних функціональних блоків [24].

Основні блоки зв'язку Modbus RTU [25]:

MB_COMM_LOAD: використовується для ініціалізації та конфігурації параметрів зв'язку Modbus RTU, задає параметри, такі як швидкість передачі, формат кадру, паритет, тайм-аути і т.д.

MB_MASTER: застосовується для реалізації функцій головного пристрою (master) в мережі Modbus RTU, забезпечує надсилання команд на підлеглі пристрої (slave) та отримання відповідей.

MB_SLAVE: використовується для реалізації функцій підлеглого пристрою (slave), обробляє запити від головного пристрою та повертає відповідні дані.

Кроки організації зв'язку Modbus RTU

1. Конфігурація обладнання:
2. Ініціалізація зв'язку:
3. Реалізація функцій головного пристрою (Master):
4. Реалізація функцій підлеглого пристрою (Slave):
5. Тестування та налагодження:

Код для ініціалізації зв'язку та читання регістрів з підлеглого пристрою:

					<i>КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ</i>	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

ladder
Копировать код
// Ініціалізація зв'язку
CALL "MB_COMM_LOAD"
REQ := TRUE
PORT := 1
BAUD := 9600
PARITY := 0
STOP_BITS := 1
DATA_BITS := 8
TIMEOUT := 1000
MB_MODE := 1
BUSY := #MB_COMM_LOAD_BUSY
DONE := #MB_COMM_LOAD_DONE
ERROR := #MB_COMM_LOAD_ERROR
STATUS := #MB_COMM_LOAD_STATUS
// Читання регістрів з підлеглого пристрою
CALL "MB_MASTER"
REQ := TRUE
MODE := 0 // Читання регістрів
ADDR := 1 // Адреса підлеглого пристрою
DATA_ADDR := 0 // Початкова адреса регістрів
DATA_LEN := 10 // Кількість регістрів для читання
MB_DB := 1 // Номер блоку даних для збереження результатів
BUSY := #MB_MASTER_BUSY
DONE := #MB_MASTER_DONE
ERROR := #MB_MASTER_ERROR
STATUS := #MB_MASTER_STATUS

```

Рисунок 2.30 – Приклад коду для ініціалізації зв'язку та читання регістрів

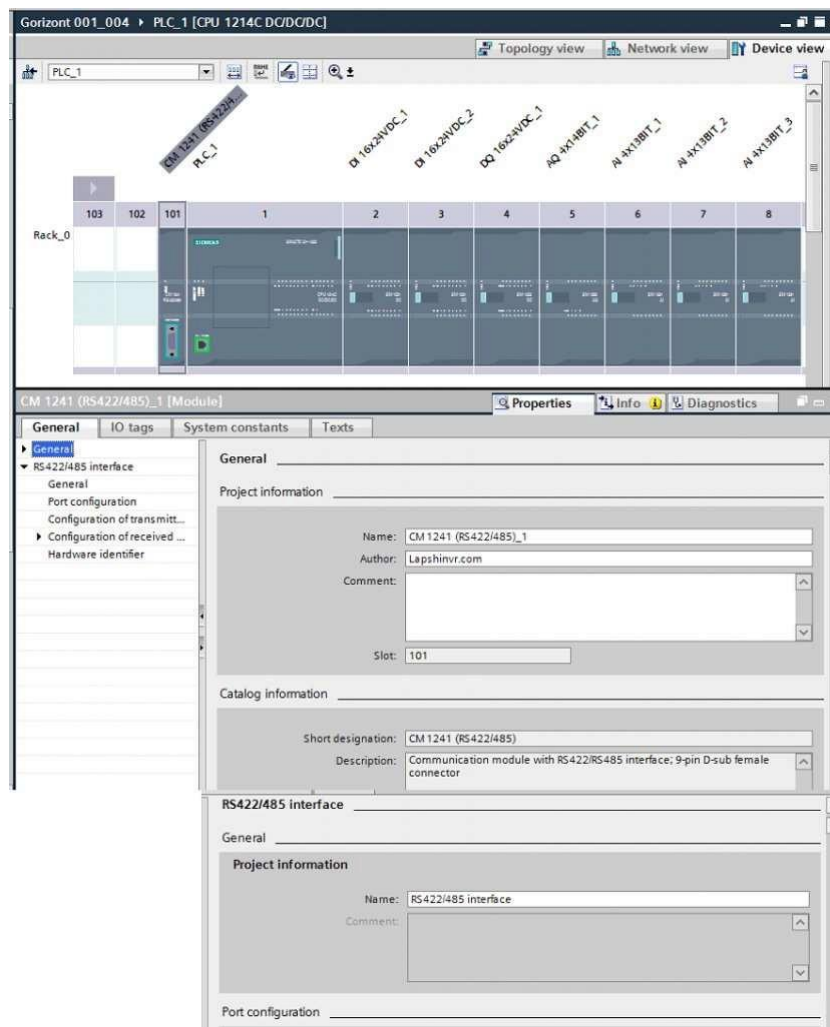


Рисунок 2.31 – Встановлення опцій комунікаційного модуля CM1241

Цей приклад демонструє базову конфігурацію та використання блоків MB_COMM_LOAD і MB_MASTER для ініціалізації зв'язку та читання регістрів з підлеглого пристрою в мережі Modbus RTU.

Дано опис поєднання S7 1200 ПЛК Siemens (TIA-Portal v15.1) за допомогою комунікаційного модуля CM1241 з вбудованими системами керування насосами Wilo Stratos. Наведемо покрокову інструкцію з налаштування MODBUS RTU з контролером Сіменс S7-1200:

Завдання параметрів комунікаційного порту показано на рисунку 2.31. На рис. 2.32 формується стартова послідовність та вказано розмір буферу повідомлення.

Transmission options

RTS On delay: 0 ms

RTS Off delay: 0 ms

☐ Send break at message start

Number of bit times in a break: 0 Bit times

☐ Send idle line after a break

Idle line after a break: 40 Bit times

Configuration of received message

• **Message start**

☒ Start on any character

☐ Start on special condition

☐ Recognize message start with broken line

☐ Recognize message start with idle line

Idle line time: 40 Bit times

☐ Recognize message start with single character

Message start character (HEX): 0

Message start character (ASCII): 176

☐ Recognize message start with a character sequence

Number of strings to define: 1

5-character message start sequence

Message start sequence 1

☐ Check character 1

Character value (HEX): 0

Character value (ASCII): ANY

☐ Check character 2

Character value (HEX): 0

Character value (ASCII): ANY

☐ Check character 3

Character value (HEX): 0

Maximum length of message: 0 bytes

☐ Detect message end by fixed message length

Fixed message length: 0 bytes

☐ Read message length from message

Offset of length field in message: 0 bytes

Size of length field: 0 bytes

The length field following the data is not included in the message: 0 bytes

☐ Recognize message end with a character sequence

5-character message end sequence

☐ Check character 1

Character value (HEX): 0

Character value (ASCII): ANY

☐ Check character 2

Character value (HEX): 0

Character value (ASCII): ANY

☐ Check character 3

Character value (HEX): 0

Character value (ASCII): ANY

☐ Check character 4

Character value (HEX): 0

Character value (ASCII): ANY

☐ Check character 5

Character value (HEX): 0

Character value (ASCII): ANY

Receive buffer

Received frames in buffer: 20

☒ Prevent overwriting

☒ Clear receive buffer on startup

Hardware identifier

Hardware identifier

Hardware identifier: 177

Рисунок 2.32 – Встановлення опцій комунікаційного модуля CM1241

Створюємо блок OB100, який може запровадити та активувати

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

комунікаційну функцію та вказати параметри зв'язку (рис. 2.33).

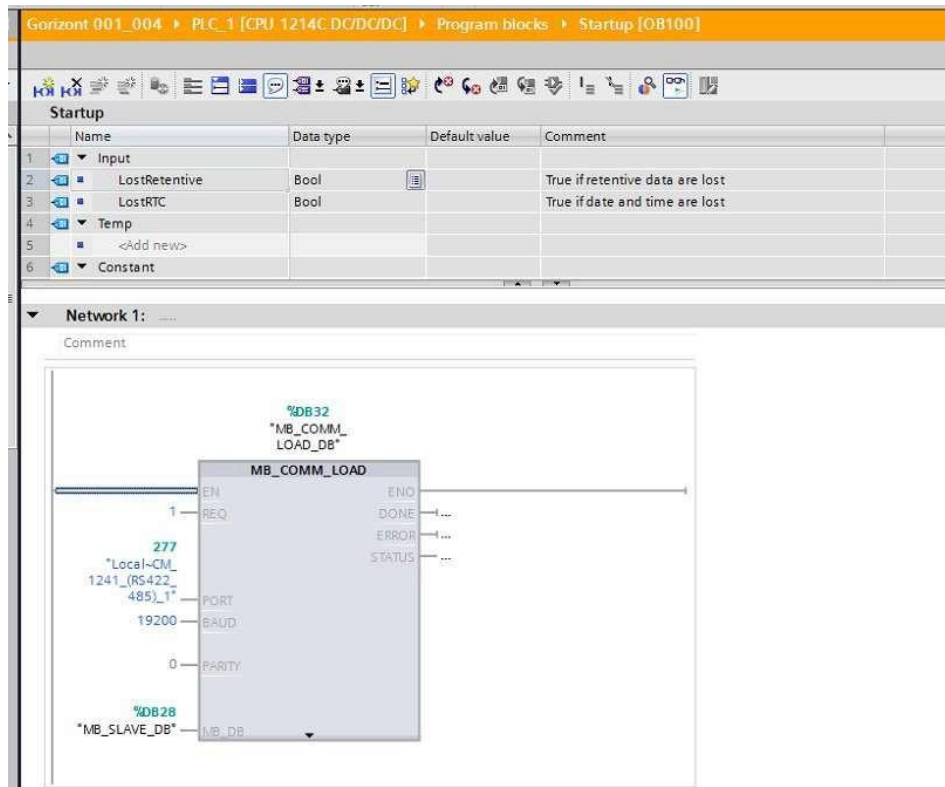


Рисунок 2.33 – Виклик блоку встановлення зв'язку

В основному ОВ 1 опитуємо підлеглі бібліотеки (усі насоси виступають як підлеглі пристрої). Викликаємо функцію Modbus Slave (вона робить дані блоку DB в регістри на порті комунікаційного пристрою). Адресація з 1 або 4xxxx1. Виклик функції показано на рис. 2.34.

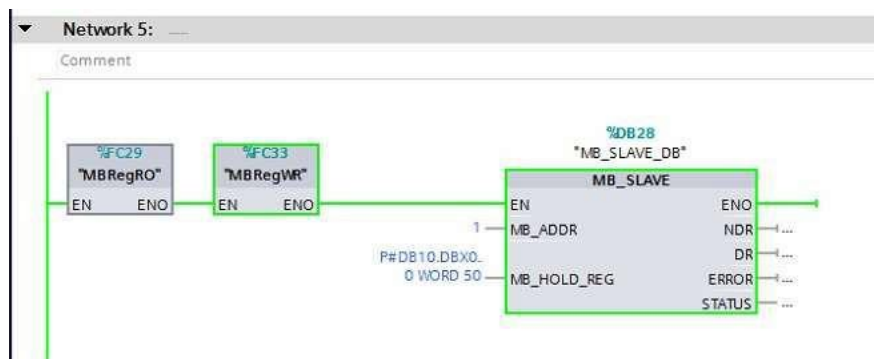


Рисунок 2.34 – Приклад застосування блоку опитування підлеглого пристрою

Якщо відкрити блок даних функції MB_COMM_LOAD (MB_COMM_LOAD_DB). Аналізуємо інформацію, що надходить у системні

блоки від підлеглих пристроїв. На рис. 2.35 показано статуси інформаційного обміну.

MB_COMM_LOAD_DB									
	Name	Data type	Start value	Monitor value	Retain	Accessible f...	Visible in ...	Setpoint	Comm...
1	Input								
2	REQ	Bool	FALSE	TRUE		☒	☒		The en...
3	PORT	PORT	16#FFFF	16#0115		☒	☒		The PtP...
4	BAUD	UDInt	0	19200		☒	☒		The ba...
5	PARITY	UInt	0	0		☒	☒		The par...
6	FLOW_CTRL	UInt	0	0		☒	☒		Transm...
7	RTS_ON_DLY	UInt	0	0		☒	☒		The en...
8	RTS_OFF_DLY	UInt	0	0		☒	☒		The en...
9	RESP_TO	UInt	1000	1000		☒	☒		The tim...
10	Output								
11	DONE	Bool	FALSE	TRUE		☒	☒		Boolea...
12	ERROR	Bool	FALSE	FALSE		☒	☒		Boolea...
13	STATUS	Word	W#16#0	16#0000		☒	☒		Status ...
14	InOut								
15	MB_DB	MB_BASE							The ins...
16	Static								
17	ICHAR_GAP	UInt	0	0		☒	☒		
18	RETRIES	UInt	2	2		☒	☒		
19	WRREC_STATUS	Word	2	16#0002		☒	☒		
20	RDREC_STATUS	Word	2	16#0002		☒	☒		
21	SFC_STATUS	Word	2	16#0002		☒	☒		
22	Port_CFG_SFB	Array[0..25] of Byte							
23	Send_CFG_SFB	Array[0..16] of Byte							
24	Rcv_CFG_SFB	Array[0..60] of Byte							
25	STOP_BITS	USInt	1	1		☒	☒		

Рисунок 2.35 – Вміст data-block MB_COMM_LOAD в режимі моніторингу

Рис. 3.36 відображає поточні дані, отримані контролером ПЛК під час обміну даними з підлеглим пристроєм. Опис змінних: NDR:

0: Завдання не розпочато або виконується.

1: Завдання успішно завершено. MB_State:

Встановлює з'єднання з Modbus TCP-клієнтом, отримує та надсилає Modbus-повідомлення.

Bad_CRC_Count: Кількість отриманих запитів з помилкою CRC.

Request_Count: Загальна кількість запитів, отриманих цим сервером.

Broadcast_Count: Кількість отриманих широкомовних запитів.

Exception_Count: Кількість помилок Modbus, що потребують винятку.

Success_Count: Кількість запитів, отриманих без помилок протоколу.

Extended_Addresssing: Налаштування одно- або двобайтної адресації

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ		Арк.
							57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

веденого пристрою.

Init_OK: Перевіряє керуючу базу даних та ініціалізує веб-додаток.

Name	Data type	Start value	Monitor value	Retain	Accessible f...	Visible in ...	Setpoint	Comm...
1 ▶ Base	MB_BASE			☐	☒	☒	☐	
2 ▶ Input				☐	☐	☐	☐	
3 ▶ MB_ADDR	UInt	0	1	☐	☒	☒	☐	The Mo...
4 ▶ Output				☐	☐	☐	☐	
5 ▶ NDR	Bool	FALSE	FALSE	☐	☒	☒	☐	A Mod...
6 ▶ DR	Bool	FALSE	FALSE	☐	☒	☒	☐	A Mod...
7 ▶ ERROR	Bool	FALSE	FALSE	☐	☒	☒	☐	Modbu...
8 ▶ STATUS	Word	W#16#0	16#0000	☐	☒	☒	☐	Status ...
9 ▶ InOut				☐	☐	☐	☐	
10 ▶ MB_HOLD_REG	Variant			☐	☐	☐	☐	Modbu...
11 ▶ Static				☐	☐	☐	☐	
12 ▶ SEND_PTP_SFB	Array[0..11] of Byte			☐	☐	☐	☐	
13 ▶ RCV_PTP_SFB	Array[0..11] of Byte			☐	☐	☐	☐	
14 ▶ MB_State	Word	W#16#0	16#0004	☐	☒	☒	☐	
15 ▶ Request_Count	Word	W#16#0	16#60F9	☐	☒	☒	☐	
16 ▶ Slave_Message_Count	Word	W#16#0	16#60F9	☐	☒	☒	☐	
17 ▶ Bad_CRC_Count	Word	W#16#0	16#0000	☐	☒	☒	☐	
18 ▶ Broadcast_Count	Word	W#16#0	16#0000	☐	☒	☒	☐	
19 ▶ Exception_Count	Word	W#16#0	16#0000	☐	☒	☒	☐	
20 ▶ Success_Count	Word	W#16#0	16#60F9	☐	☒	☒	☐	
21 ▶ SL_Status_Hold	Word	W#16#0	16#0000	☐	☐	☐	☐	
22 ▶ HR_Start_Offset	Word	W#16#0	16#0000	☐	☒	☒	☐	
23 ▶ Init_OK	Bool	FALSE	TRUE	☐	☐	☐	☐	
24 ▶ Broadcast_Flag	Bool	FALSE	FALSE	☐	☐	☐	☐	
25 ▶ SL_Error_State	Bool	FALSE	FALSE	☐	☐	☐	☐	
26 ▶ Extended_Address	Bool	FALSE	FALSE	☐	☒	☒	☐	
27 ▶ XMT_Set_NDR	Bool	FALSE	FALSE	☐	☐	☐	☐	
28 ▶ XMT_Set_DR	Bool	FALSE	FALSE	☐	☐	☐	☐	

Рисунок 2.36 – Вміст data-block MB_SLAVE при он-лайн контролі

Індикатори RX/TX горять майже безперервно, що характеризує обмін пакетами даних.

2.4.3 Розробка програмної процедури інформаційного обміну по інтерфейсу Modbus RTU

Проектування та програмування систем з пристроями з підтримкою протоколу Modbus RTU необхідно мати спеціалізоване програмне забезпечення та технічні засоби. Одним з найпоширеніших технічних засобів є перетворювач RS-485/USB.

При розробці пристроїв на базі Modbus RTU найчастіше реалізується функція Slave, оскільки це здебільшого різноманітні датчики, керовані реле, модулі вводу/виводу тощо. Master-пристрої створюються рідше. В

автоматизаційних мережах як майстер зазвичай виступає контролер, який зазвичай вже має реалізацію Modbus-стека, або OPC Server/SCADA система, укомплектовані Modbus-драйвером.

Для опитування підлеглих пристроїв із контролера Simatic використовуються два функціональні блоки: MB_COMM_LOAD_DB8 (одноразово для конфігурації комунікаційного процесора) та MB_SLAVE (циклічно для читання та/або запису регістрів/катушок). Тому в програмі екземпляр MB_COMM_LOAD_DB8 з'являється лише один раз, а екземпляр MB_SLAVE — кілька разів, але з різними вхідними параметрами.

Зручніше об'єднати весь обмін в один зовнішній функціональний блок, а сам блок, враховуючи необхідність обробки даних, реалізувати мовою SCL. Створюється функціональний блок з іменем ModbusMasterV20 мовою SCL.

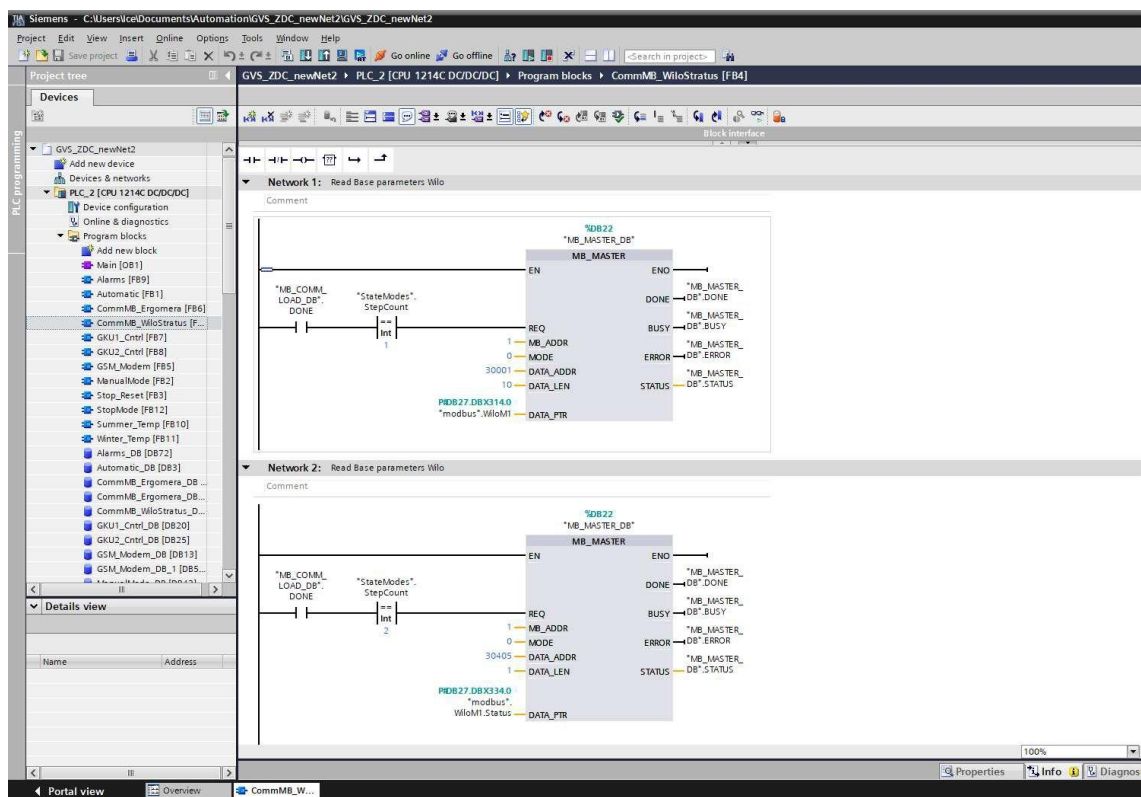


Рисунок 2.37 – Приклад виклику блоків ініціалізації обміну мережі Modbus RTU

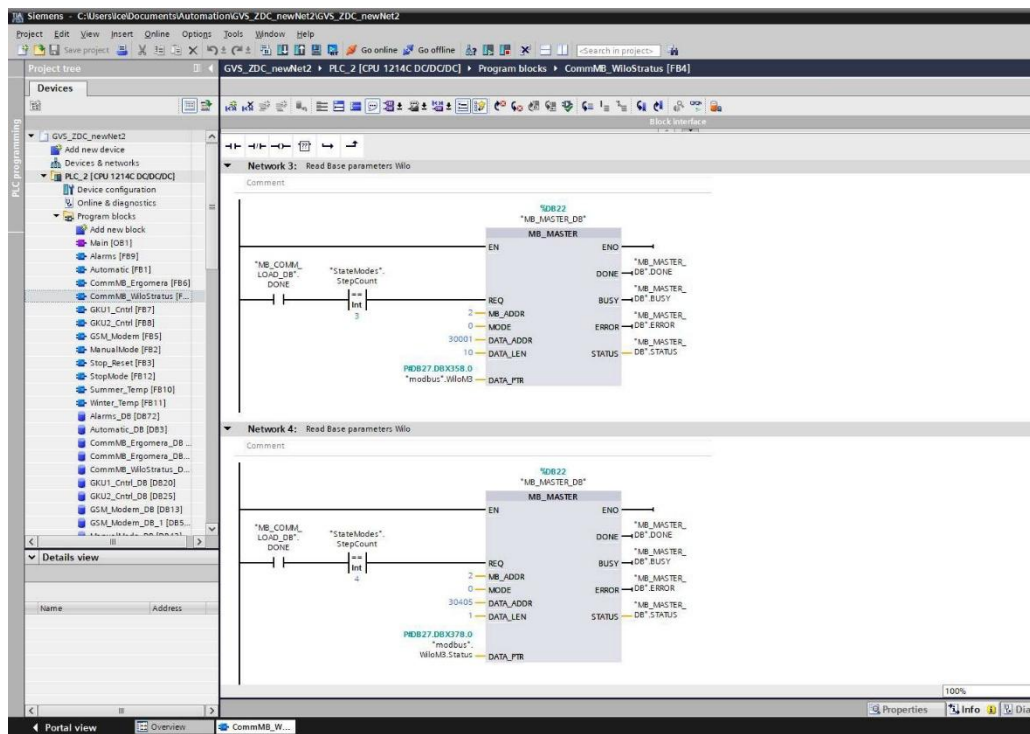


Рисунок 2.38 – Приклад виклику блоків ініціалізації обміну мережі Modbus RTU (продовження)

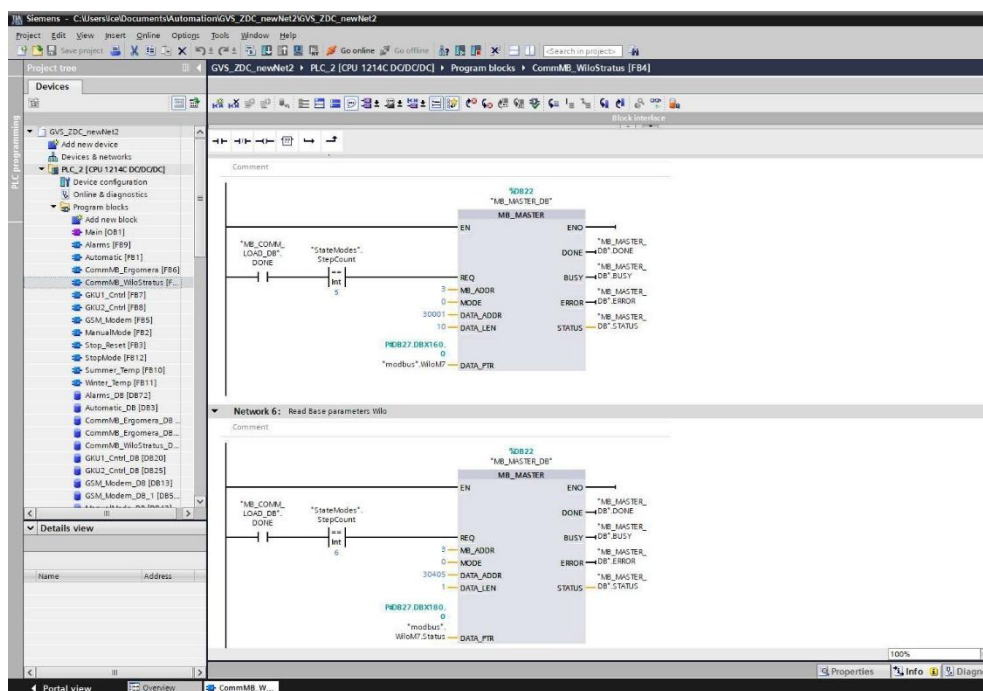


Рисунок 2.39 – Приклад виклику блоків ініціалізації обміну мережі Modbus RTU (продовження)

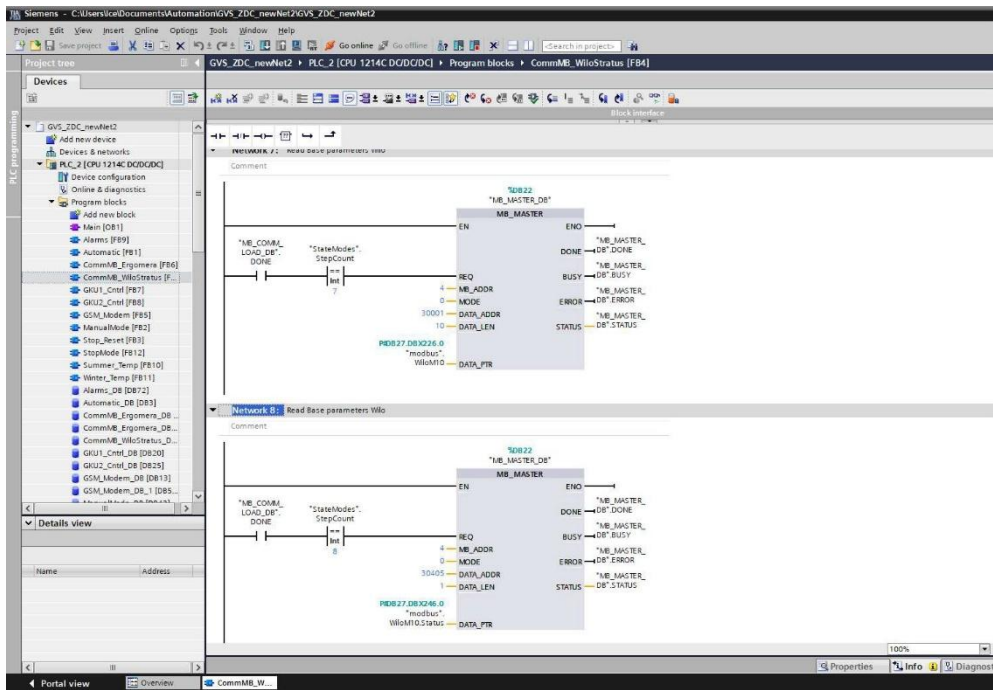


Рисунок 2.40 – Приклад виклику блоків ініціалізації обміну мережі Modbus RTU (продовження)

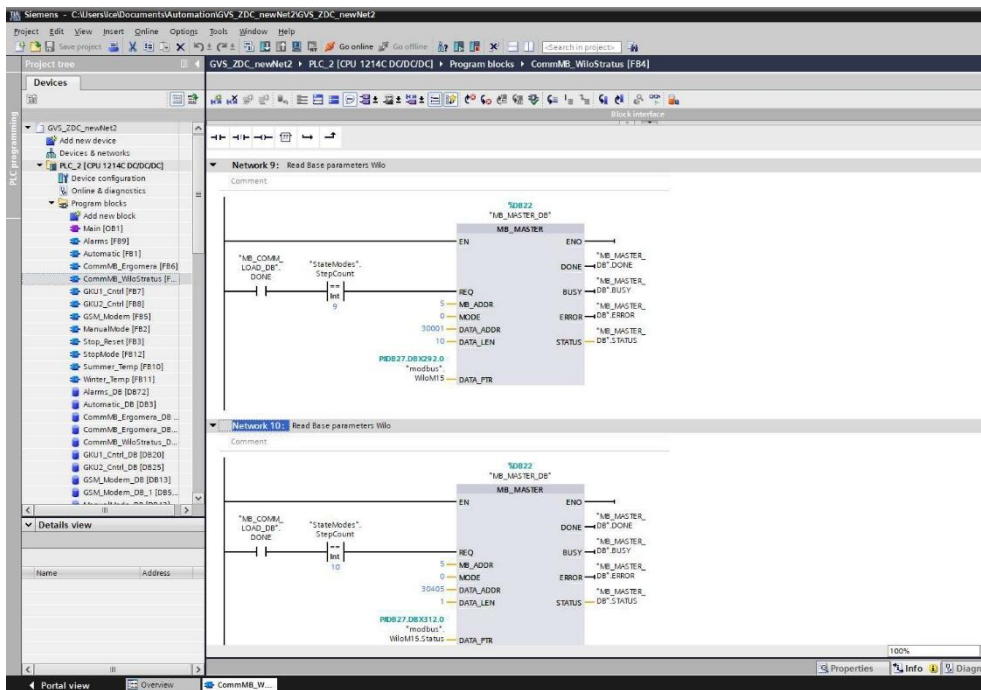


Рисунок 2.41 – Приклад виклику блоків ініціалізації обміну мережі Modbus RTU (продовження)

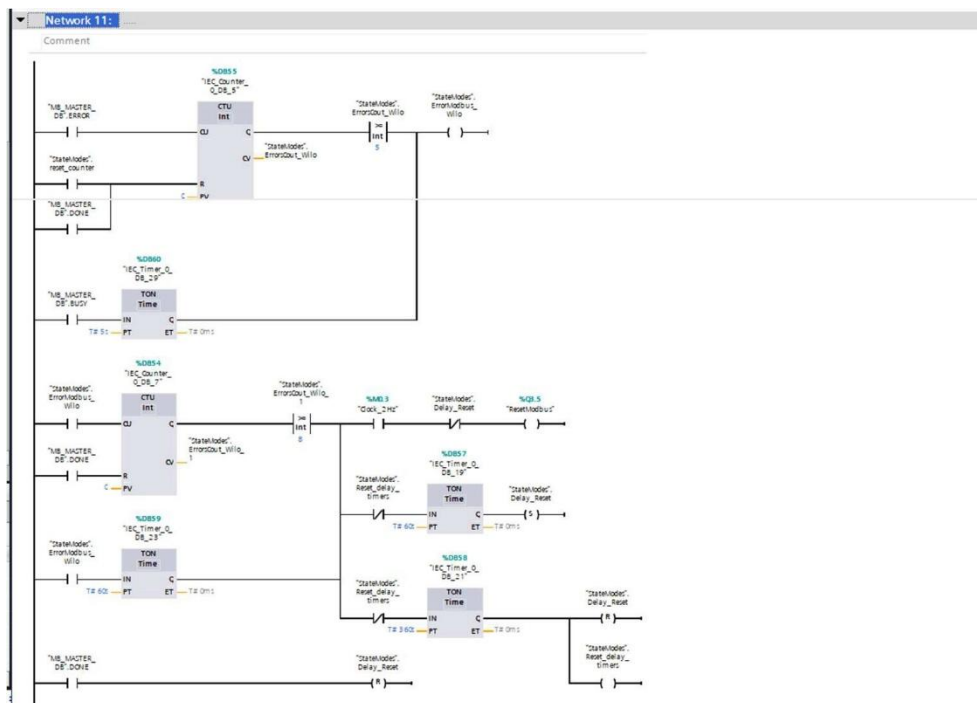


Рисунок 2.42 – Приклад виклику блоків ініціалізації обміну мережі Modbus RTU (продовження)

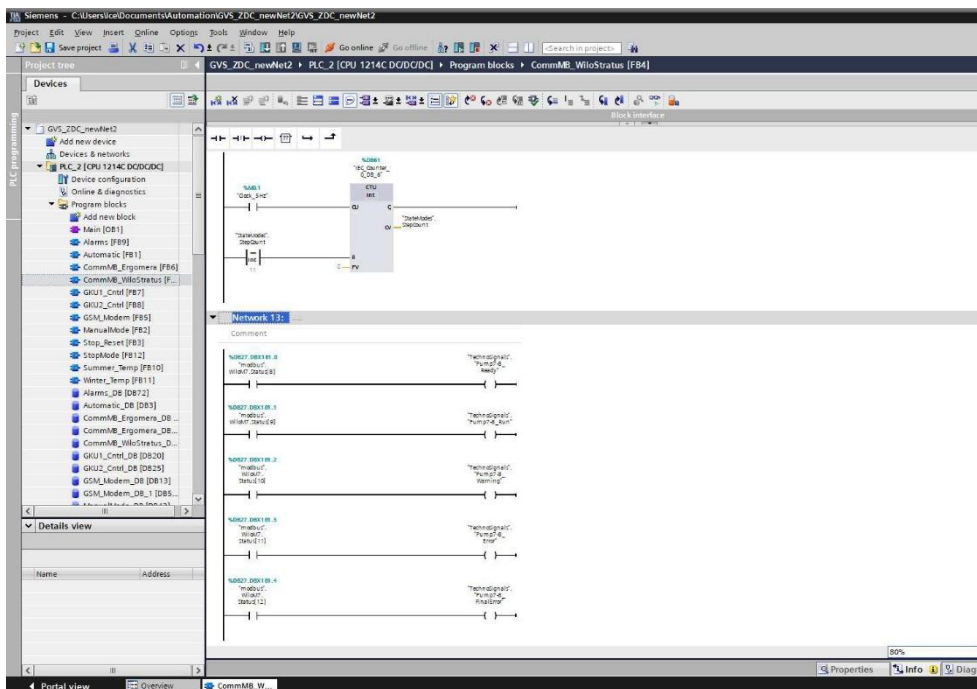


Рисунок 2.43 – Фрагмент коду завдання прапорців стану виконавчих пристроїв

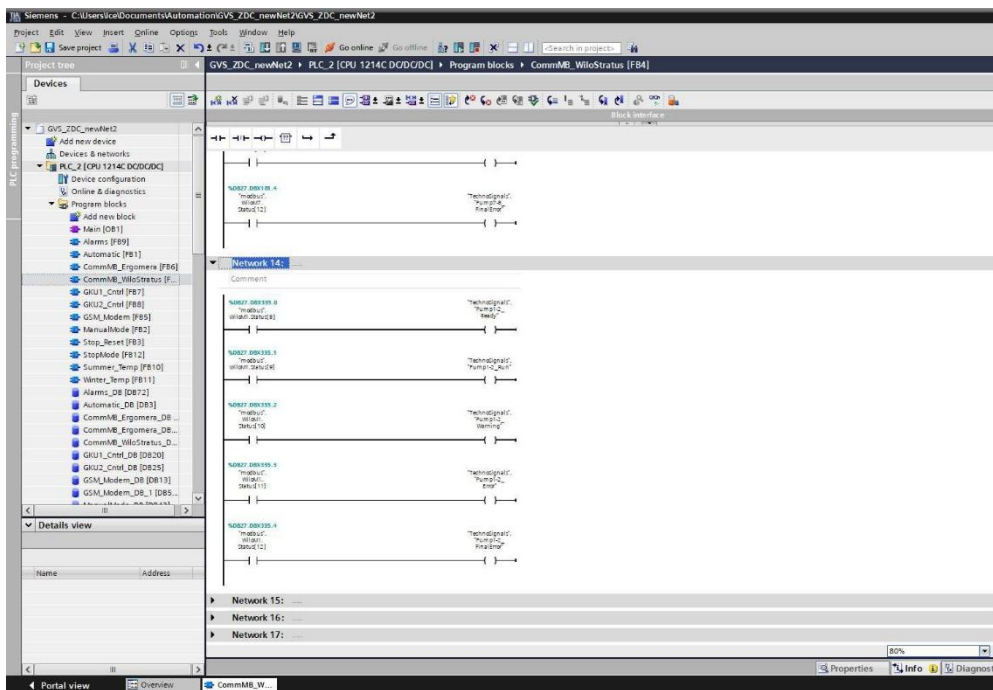


Рисунок 2.44 – Фрагмент коду завдання прапорців стану виконавчих пристроїв
(продовження)

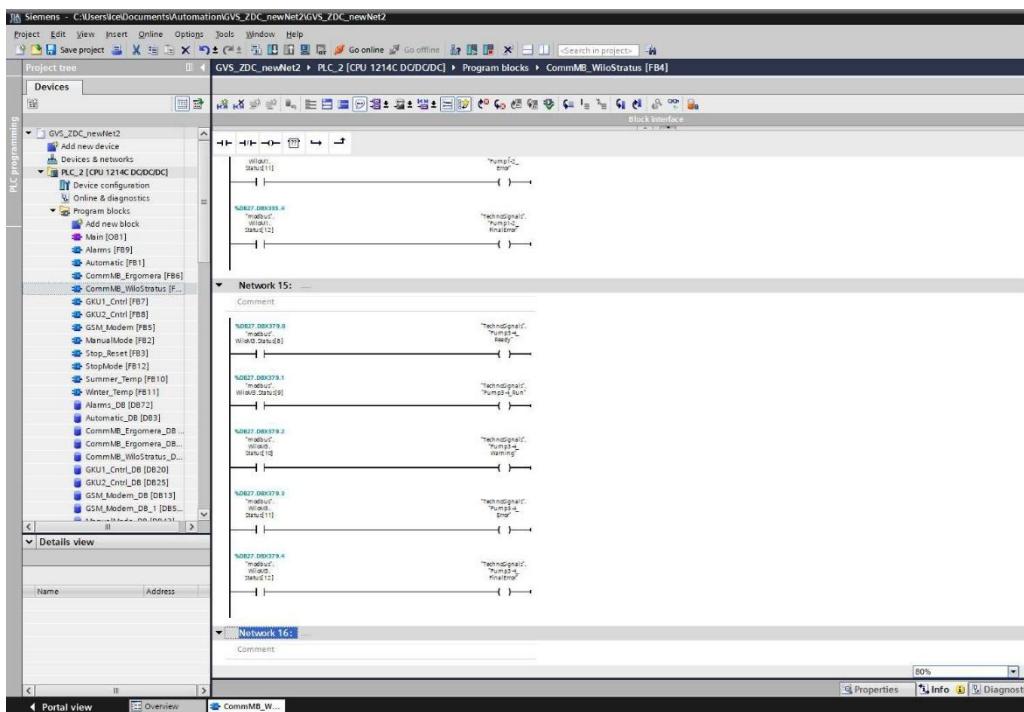


Рисунок 2.45 – Фрагмент коду завдання прапорців стану виконавчих пристроїв
(продовження)

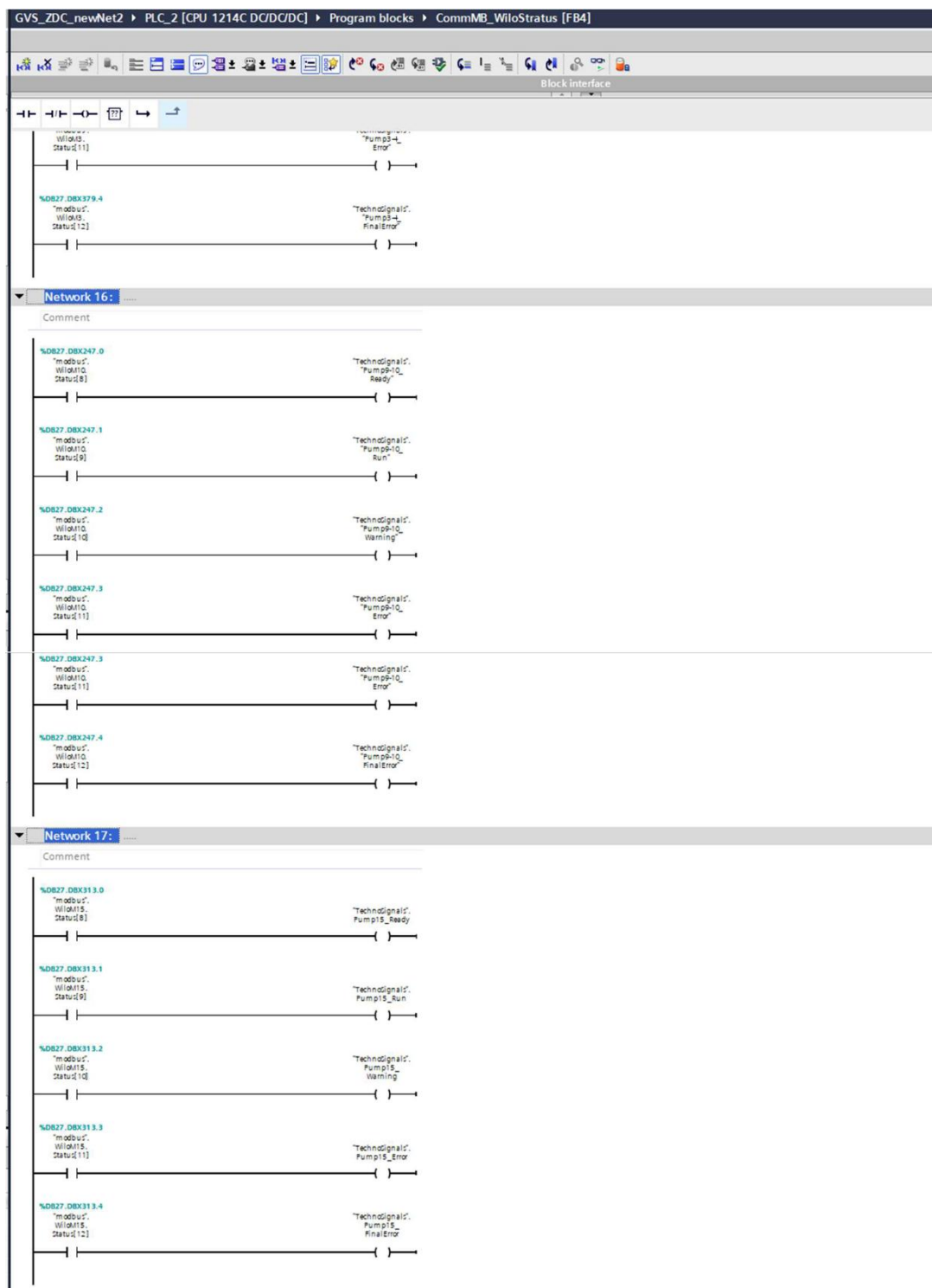


Рисунок 2.46 – Фрагмент коду завдання прапорців стану виконавчих пристроїв
(продовження)

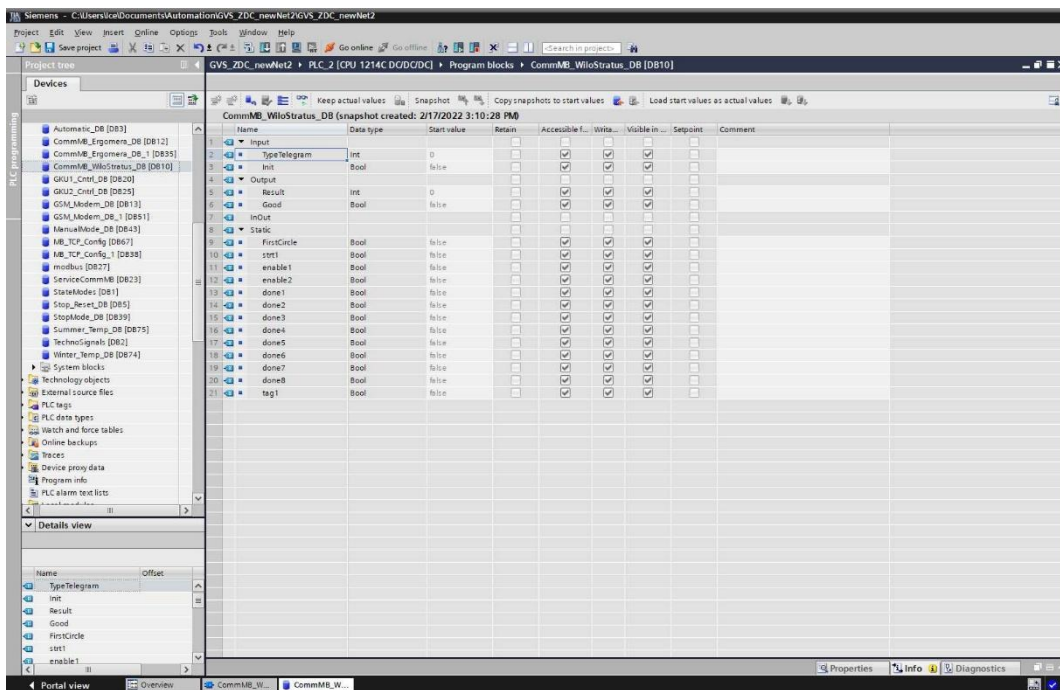


Рисунок 2.47 – Вміст програмного блоку CommMB

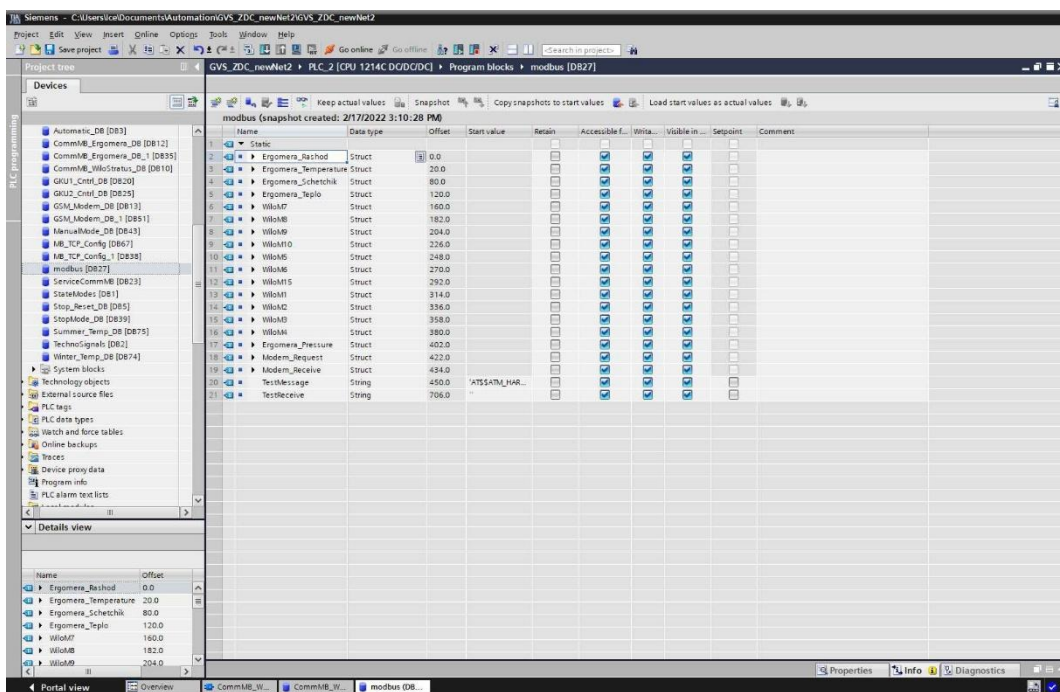


Рисунок 2.48 – Вміст дата-блоку зі структурами зберігання повідомлень, що надходять через мережу Modbus RTU

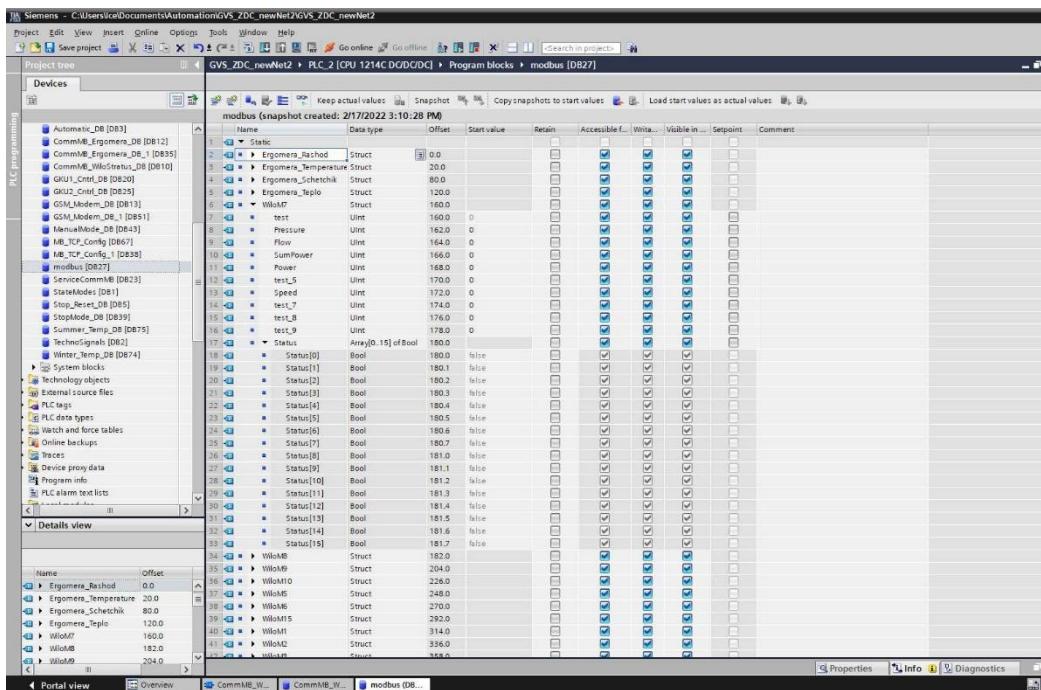


Рисунок 2.49 – Вміст структури зберігання повідомлень, що надходять від насосних агрегатів

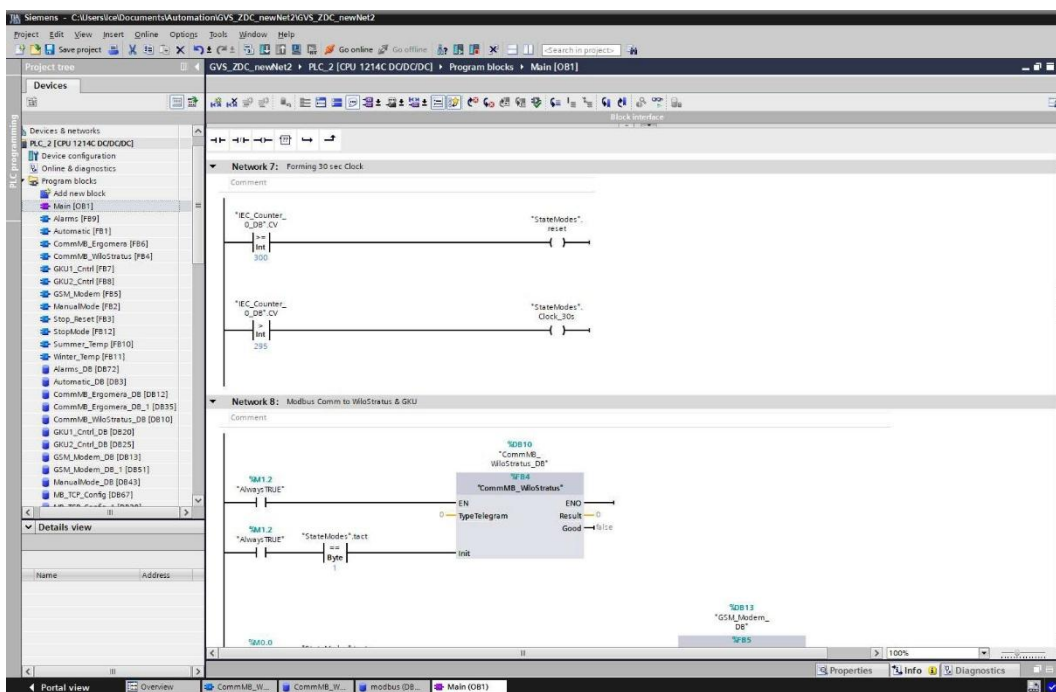


Рисунок 2.50 – Приклад застосування блоку CommMB

2.4.4 Графічний інтерфейс оператора

Графічний інтерфейс розроблено для пристрою НМІ КТР900 Comfort [26]. Пристрій інтегровано в єдину інформаційну мережу з програмованим логічним контролером і робочою станцією через інтерфейс Industrial Ethernet/Profinet.

Створено головний екран, який відображає інформацію про стан системи додавання сировини. Можливість зміни та завдання поточної продуктивності реалізована за допомогою цифрових індикаторів, налаштованих на введення та виведення інформації. Доступ до зміни параметрів надається після введення пароля, причому доступ автоматично скидається через дві хвилини.

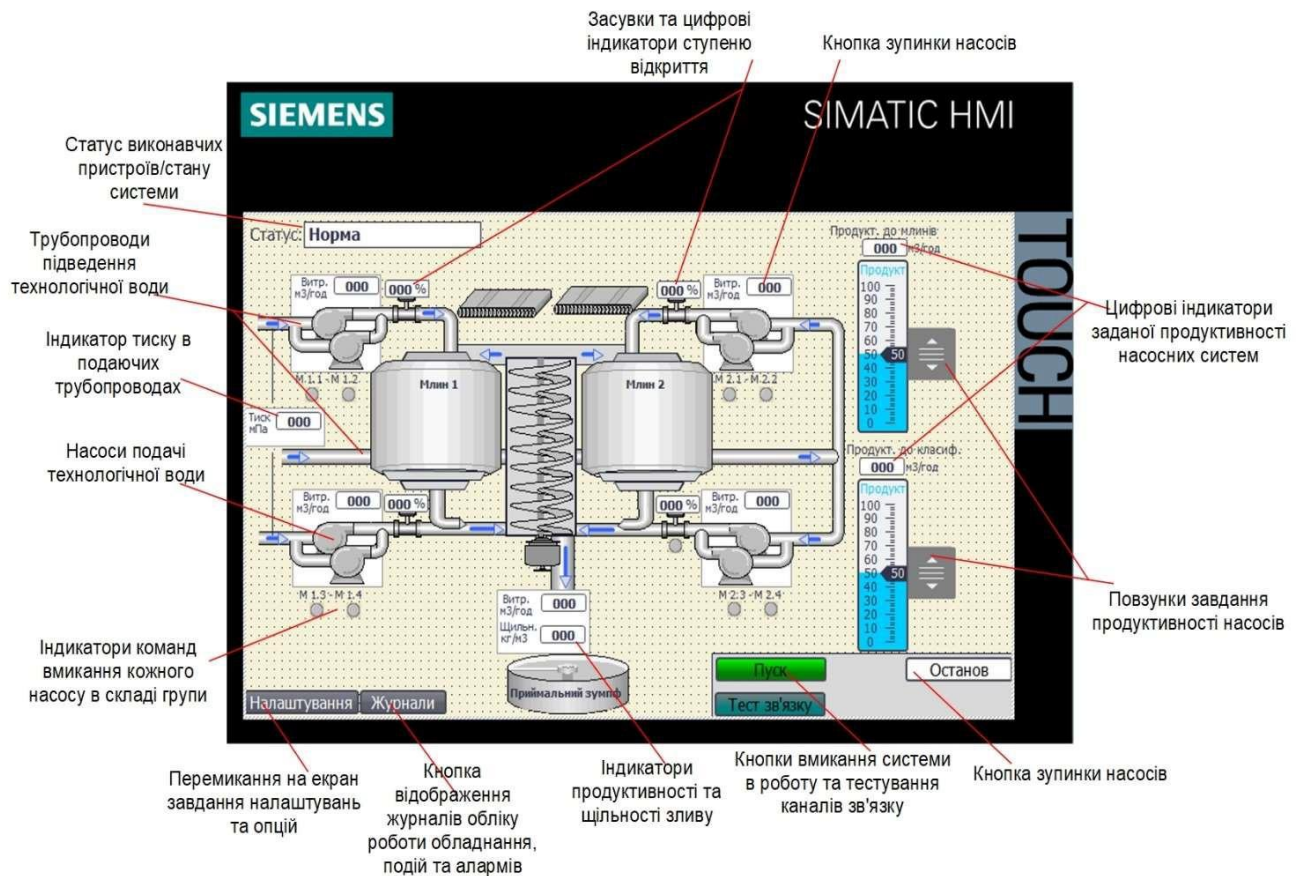


Рисунок 2.51 – Розташування графічних елементів керування на фреймі панелі оператора

Кольорова схема має наступний вигляд. Виконавчі пристрої, що вимкнені або зачинені, позначені сірим кольором. Працюючі агрегати та відкриті клапани позначені зеленим кольором. Якщо насосний агрегат перебуває в аварійному стані, він позначається червоним кольором.

Поряд із кожною групою насосів відображається інтегроване значення поданої сировини за останню годину.

Праворуч на екрані розташоване поле для завдання та відображення

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

поточних режимів. У нижній частині екрана виводяться записи журналу тривоги.

Висновки до розділу

У другому розділі було виконано розробку та дослідження моделей елементів технологічного комплексу подрібнення руди, а також розглянуто принципи побудови автоматизованої системи керування завантаженням кульового млина. На основі аналізу процесу подрібнення млин було представлено як об'єкт керування, для якого визначено основні вхідні керуючі впливи, збурювальні фактори та вихідні технологічні показники.

Встановлено, що до основних керуючих впливів належать витрата руди, витрата води, частота обертання барабана та кульове завантаження. До збурювальних факторів віднесено зміну фізико-механічних властивостей руди, гранулометричний склад вихідного матеріалу, витрату пісків класифікатора, зношування куль, футеровки та загальний технічний стан обладнання. Це підтверджує, що кульовий млин є складним динамічним об'єктом із нелінійними властивостями та значною кількістю взаємопов'язаних параметрів.

У розділі було розглянуто математичне подання кульового млина за каналом «витрата сировини – запас проміжного продукту в млині». Для цього використано рівняння матеріального балансу, яке враховує вхідний потік сировини, вихідний потік продукту подрібнення та запас матеріалу всередині барабана. Було показано, що статична характеристика цього каналу має екстремальний характер: за недостатнього завантаження млин не забезпечує необхідної продуктивності, а за надмірного заповнення інтенсивність подрібнення знижується.

На основі розгінної характеристики визначено основні динамічні параметри об'єкта: час запізнення, сталу часу та коефіцієнт підсилення. Отримана передаточна функція враховує транспортне запізнення, яке виникає внаслідок переміщення та перемішування матеріалу вздовж барабана. Це

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

дозволило описати динаміку млина більш наближено до реальних умов мокрого подрібнення.

Виконане імітаційне моделювання роботи виконавчих пристроїв подачі води та живильника дробленої руди без регуляторів дало змогу оцінити їхню природну перехідну поведінку. Отримані перехідні характеристики показали, що без автоматичного регулювання система не забезпечує достатньої точності та швидкодії підтримання заданих параметрів. Тому для підвищення якості керування було досліджено роботу обладнання з використанням ПІД-регуляторів.

У процесі моделювання контурів керування з ПІД-регуляторами було встановлено, що застосування регуляторів дозволяє стабілізувати подачу води, керувати живильником дробленої руди та підтримувати витрату води у злив класифікатора. Це забезпечує більш стійкий режим роботи системи, зменшує перехідні відхилення та покращує якість регулювання технологічних координат.

Окремо було змодельовано роботу кульового млина у замкнутому циклі подрібнення з класифікатором і виконавчими пристроями завантаження. Результати моделювання показали можливість стабілізації витрати води в млин, масової витрати руди, витрати води у злив класифікатора, густини пульпи, циркуляційного навантаження та масової частки готового класу. Це підтверджує працездатність запропонованої структури автоматичного керування.

У другому розділі також було розроблено функціональну схему автоматизації, у якій передбачено використання датчиків витрати, конвеєрних ваг, засобів вимірювання густини пульпи, частотного перетворювача, виконавчих механізмів і програмованого логічного контролера. Передбачено, що контролер отримує інформацію від первинних перетворювачів, обробляє її, розраховує керуючі дії та передає сигнали на виконавчі пристрої. Така структура дозволяє організувати замкнуте автоматичне керування процесом завантаження млина.

У межах розділу обґрунтовано вибір технічного забезпечення системи, зокрема засобів вимірювання витрати, швидкості, густини, а також

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

програмованого контролера Siemens S7-1200. Використання такого контролера є доцільним, оскільки він підтримує роботу в реальному часі, забезпечує обмін даними через промислові мережі та може бути інтегрований із панеллю оператора й виконавчими пристроями.

Також було розглянуто програмну реалізацію системи керування та налаштування зв'язку Modbus RTU в середовищі TIA Portal.

Отже, у другому розділі було розроблено математичні, імітаційні, функціональні та програмні основи автоматизованої системи керування завантаженням кульового млина. Отримані результати підтверджують можливість стабілізації основних параметрів процесу подрібнення, підвищення надійності роботи обладнання та створення передумов для впровадження системи у виробничих умовах.

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було розглянуто питання автоматизації процесу подрібнення руди в кульовому млині та розроблено основні рішення для побудови системи автоматизованого керування завантаженням млина. Виконане дослідження підтвердило, що процес подрібнення є одним із найбільш складних і відповідальних етапів збагачувального виробництва, оскільки він значною мірою визначає продуктивність наступних операцій, якість підготовки рудної сировини та ефективність використання енергетичних ресурсів.

У першому розділі було обґрунтовано доцільність автоматизації процесу подрібнення руди. Встановлено, що кульовий млин є складним об'єктом керування, робота якого залежить від великої кількості технологічних, механічних і фізико-механічних чинників. Проаналізовано будову та принцип роботи барабанного й кульового млина, особливості технологічної схеми подрібнення, а також основні параметри, що впливають на ефективність процесу.

Було визначено, що перша стадія подрібнення руди здійснюється у замкнутому циклі з класифікатором. Такий режим забезпечує повернення недостатньо подрібненого матеріалу на повторне подрібнення, однак водночас ускладнює керування процесом. Зміна витрати руди, подачі води або властивостей матеріалу впливає на густину пульпи, циркуляційне навантаження, якість зливу класифікатора та вихід готового класу. Це підтверджує необхідність використання автоматизованих систем керування.

У роботі було проаналізовано відомі способи контролю завантаження млина, зокрема акустичний метод, контроль активної потужності приводного двигуна, вимірювання тиску в опорних підшипниках, радіоізотопний

					КНУ КРБ.174.26.10.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Ратушний А.А.			ВИСНОВКИ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Тиханський М.П.								70	3
								КНУ АКІТР-23ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

контроль і багатоканальні системи безперервного моніторингу. Встановлено, що жоден із розглянутих методів не є повністю універсальним, оскільки кожен із них має певні обмеження. Найбільш доцільним є комбінований підхід, за якого основним каналом контролю подачі руди виступають конвеєрні ваги, а додатковими сигналами є параметри стану млина та пульпи.

У другому розділі було розроблено структурні схеми елементів комплексу подрібнення руди та визначено основні входи, виходи й збурення об'єкта керування. Показано, що до керуючих впливів належать витрата руди, витрата води, частота обертання барабана та кульове завантаження, а до збурень — зміна властивостей руди, гранулометричного складу, стану футеровки, кульового завантаження та циркуляційного навантаження.

Було побудовано математичну модель кульового млина за каналом «витрата сировини – запас проміжного продукту в млині». На основі матеріального балансу та аналізу розгінної характеристики визначено динамічні параметри об'єкта, зокрема сталу часу, коефіцієнт підсилення та час запізнення. У моделі враховано транспортне запізнення, що є важливою особливістю процесу мокрого подрібнення.

Імітаційне моделювання дало змогу дослідити роботу виконавчих пристроїв подачі води та руди як без регуляторів, так і з використанням ПІД-регуляторів. Результати показали, що введення ПІД-регулювання покращує якість перехідних процесів, зменшує відхилення регульованих величин і забезпечує більш стабільну роботу системи. Моделювання замкнутого циклу подрібнення з класифікатором підтвердило можливість підтримання необхідних технологічних параметрів у заданих межах.

У роботі було розроблено функціональну схему автоматизації, яка передбачає використання програмованого логічного контролера, датчиків витрати, засобів контролю густини пульпи, конвеєрних ваг, частотного перетворювача та панелі оператора. Така система забезпечує збір технологічної інформації, її обробку, формування керуючих дій і передавання команд на виконавчі механізми.

					КНУ КРБ.174.26.10.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

Обґрунтовано вибір технічних засобів для реалізації системи керування. Використання програмованого контролера Siemens S7-1200 є доцільним завдяки його можливості працювати в режимі реального часу, підтримувати промислові протоколи зв'язку, взаємодіяти з панелями оператора та забезпечувати надійну роботу локальних систем автоматизації. Розгляд налаштування Modbus RTU в середовищі TIA Portal підтвердив можливість організації інформаційного обміну між контролером і польовими пристроями.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання запропонованих рішень для модернізації систем керування процесами подрібнення на збагачувальних підприємствах. Запропонована система дозволяє підвищити стабільність завантаження млина, зменшити ризик перевантаження, покращити якість регулювання витрати руди та води, а також забезпечити більш ефективне використання обладнання.

Отже, поставлена мета роботи досягнута: виконано аналіз процесу подрібнення руди як об'єкта автоматизації, розроблено структурні та математичні моделі, проведено імітаційне дослідження контурів керування, обґрунтовано вибір технічних засобів і розглянуто програмну реалізацію системи. Отримані результати створюють основу для подальшого впровадження автоматизованої системи керування завантаженням кульового млина у промислових умовах.

					КНУ КРБ.174.26.10.02.ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Амоша О. І., Вишневецький В. П., Збаразька Л. О. Концептуальні орієнтири промислової політики України (на середньострокову перспективу). *Економіка промисловості* . 2008. № 4. С. 3-21. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0000086230>

2. Monov V., Sokolov B., Stoenchev S. Grinding in Ball Mills: Modeling and Process Control. *Cybernetics and Information Technologies*. 2012. Vol. 12, No 2. P. 42–54. DOI: 10.2478/cait-2012-0012.

3 Білецький В.С., Смирнов В.О. Технологія збагачення корисних копалин (видання друге). Донецьк: Східний видавничий дім, 2009. 272 с.

4 Техніка і технологія збагачення корисних копалин. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 184 «Гірництво» / В. Г. Кравець, В. С. Білецький, В. О. Смирнов. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 286с.

5. Metso. Grinding mills – for mining and minerals processing. URL: <https://www.metso.com/mining/grinding/grinding-mills/> (дата звернення: 13.05.2026).

6. Rhosonics. Five reasons for measuring density in grinding circuits. Whitepaper. URL: <https://rhosonics.com/wp-content/uploads/2022/11/Rhosonics-Whitepaper-4-Five-reasons-for-measuring-density-in-grinding-circuits.pdf> (дата звернення: 13.05.2026).

7. Jankovic A., Valery W., Closed circuit ball mill – Basics revisited. *Minerals Engineering*. 2013. Vol. 43–44. P. 148–153. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687512003652>

8 Гірничорудне, дробильно-розмольне обладнання. Млин МШЦ. ТОВ "НБС Технологія ". 2007-2025. URL: <https://nbs-teh.com/ua/melnica-mshrgu-mshr-mshc-msc-4500h5000-4500h6000.html>

					КНУ КРБ.174.26.10.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Ратушиний А.А.			СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Тиханський М.П.								74	3
								КНУ АКІТР-23ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затвердив		Маринич І.А.									

9 Науменко Ю. В. Основи теорії режимів роботи барабанних млинів: Монографія [Текст] / Ю.В. Науменко. Рівне: Вид-во СПД Зелент О.І., 2009. 282с.

10. CEEC / ABB. Advanced Process Control for Grinding Circuits. URL : <https://www.ceecthefuture.org/resources/advanced-process-control-for-grinding-circuits>

11 Нормативний довідник. URL : <https://checkprice.com.ua/normatyvnyi-dovidnyk?page=100>

12 Zarubin, M. Yu. Neural networks in control systems for grinding and beneficiation of ferrous metal ores. *Modern Trends in Engineering Sciences*. 2014. P. 33-40.

13. Розробка адаптивної системи автоматичного управління обладнанням гірничо-збагачувального виробництва для оптимізації процесів в умовах нестабільності вхідних параметрів: монографія / М.Ю. Зарубін та ін. 2018. 188 с.

14 Каталог. Щільномір радіоізотопний. URL : <https://scma.com.ua/product/plotnomer-radioizotopny-j-obshhepromy-shlennogo-primeneniya-pr-1027m/>.

15. Góralczyk M., Krot P., Zimroz R., Ogonowski S. Increasing Energy Efficiency and Productivity of the Comminution Process in Tumbling Mills by Indirect Measurements of Internal Dynamics -An Overview. *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 24. Article 6735. URL: <https://doi.org/10.3390/en13246735>

16 Смирнов В.О., Білецький В.С. Проектування збагачувальних фабрик. Навч.посібник для ВНЗ. Донецьк: Східний видавничий дім, 2002. 296 с.

17 Barry A. Wills, Tim Napier-Munn Mineral processing technology. В/Н, Oxford, 2006. ISBN: 0750644508

18 Багатороликові конвеєрні ваги. URL : <https://sweda.com.ua/produktsiya/mnogorolikovye-konveiernye-vesy-vk-230/>

19 DPT - Target-Type Flow Meter. URL : <https://koboldusa.com/products/flow/paddle-flap-target-vane-flow-meters-switches/dpt-target-type-flow-meter/>

20 Витратомір. Лічильники води та насоси для промисловості. URL : <https://flowmeteroil.com/product/flomec-om-series-medium-capacity/>

					КНУ КРБ.174.26.10.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

21 Щільномір – безперервний вимір щільності пульпи в потоці. URL : <https://dredgers.com.ua/density-meter/>

22 Частотні перетворювачі Lenze. URL : <https://chastotnik.ua/ru/vfd-lenze>

23 SIMATIC S7-1200 G2. URL : <https://www.siemens.com/en-gb/products/simatic/s7-1200-g2/>

24 Practical Industrial Data Networks: Design, Installation and Troubleshooting / S. Mackay, E. Wright, D. Reynders, J. Park. Oxford : Newnes, 2004. 394 p.

25 Modbus RTU for drives. URL : <https://www.abb.com/global/en/areas/motion/drives/connectivity/fieldbus/modbus-rtu>

26 Панель оператора SIMATIC HMI TP900 Comfort. URL : https://tehpri.vod.su/katalog/paneli-operatora-siemens/simatic-hmi-comfort/tp900.html?srsId=AfmBOooLvcGTy_8fNqUkGK9QPK0f0etTgyHuvHyvm6-gN7FtVv4owDE

27 ДКС датчик контролю швидкості (ДКШ). URL : <https://upo.com.ua/product/dks-datchik/>

28 ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

29 ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с.(Інформація та документація).

30 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).

