

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
151 – Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані
технології

тема роботи:

***«Автоматизована системи керування завантаженням
дробильного агрегату в умовах Південного ГЗК»***

Виконав студент гр. _____ Самоткан Я.А.

Керівник _____ Жосан А.А.

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: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« » червня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТ-22ск Самоткану Ярославу Андрійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизована системи керування завантаженням дробильного агрегату в умовах Південного ГЗК»

затверджено наказом по університету № 106с від 31.01.2025р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 64 с., додатки 3, презентація у Microsoft PowerPoint (слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

доц. Жосан А.А.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>18.03.2025</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>20.03.2025</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>29.04.2025</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>20.05.2025</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>25.05.2025</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>06.06.2025</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>10.06.2025</i>

6. Дата видачі завдання: р.

Керівник _____/Жосан А.А./

7. Запевнення: Я, Самоткан Ярослав 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 _____//

АНОТАЦІЯ

Самоткан Я.А. Автоматизована системи керування завантаженням дробильного агрегату в умовах Південного ГЗК: кваліфікаційна робота бакалавра : 151 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2025. 64 с.

Метою роботи є підвищення ефективності та надійності подачі сировини до дробильного агрегату шляхом розробки та впровадження автоматизованої системи керування з урахуванням динамічних характеристик.

У першому розділі досліджено конструктивні особливості вібраційних живильників, які використовуються на підприємствах гірничо-металургійного комплексу. Наведено порівняльний аналіз основних типів живильників за критеріями надійності, ефективності подачі та можливості інтеграції в автоматизовані системи

У другому розділі виконано побудову математичної моделі процесу подачі сировини та її динаміки в середовищі MATLAB/Simulink. Розроблено алгоритм регулювання, що реалізує зворотний зв'язок за струмом навантаження дробарки та дозволяє оперативно реагувати на зміни технологічного середовища. У рамках роботи алгоритм регулювання реалізовано у середовищі TIA Portal для програмованого логічного контролера Siemens S7-1200. Здійснено конфігурування входів/виходів, створено програмну логіку у вигляді мереж LAD та організовано взаємодію з оператором через HMI-панель.

ВІБРАЦІЙНИЙ ЖИВИЛЬНИК, ДРОБИЛЬНИЙ АГРЕГАТ, ПОДАЧА СИРОВИНИ, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ПІ-РЕГУЛЯТОР, SIEMENS S7-1200, TIA PORTAL, HMI, MATLAB/SIMULINK.

					КНУ.РБ.151.25.03.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Самоткан Я.А.			АНОТАЦІЯ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Жосан А.А.							у	4	1
Н. Контр.		Жосан А.А						АКНТ			
Затверд.		Жосан А.А.									

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 СИСТЕМНИЙ ОГЛЯД КОНСТРУКТИВНИХ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВІБРАЦІЙНИХ ЖИВИЛЬНИКІВ У КОНТЕКСТІ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ДРОБЛЕННЯ.....	9
1.1 Структура технологічного процесу дроблення і роль вузлів подачі сировини...	9
1.2 Технологічна база дослідження та характеристика об'єкта автоматизації в умовах Південного ГЗК.....	14
1.3 Огляд існуючих рішень з автоматизації вібраційних живильників у гірничо-збагачувальній промисловості.....	18
1.4 Вимоги до проектованої системи автоматизації.....	22
Висновки до розділу.....	27
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ СИРОВИНИ ДО ДРОБИЛЬНОГО АГРЕГАТУ	29
2.1 Математичне моделювання процесу подачі сировини у вузлі «живильник – дробарка»	29
2.2 Реалізація математичної моделі у середовищі MATLAB/Simulink.....	31
2.3 Оцінка ефективності роботи системи автоматичного регулювання.....	34
2.4 Алгоритм роботи автоматизованої системи.....	37
2.5 Реалізація алгоритму керування в середовищі TIA Portal.....	41
2.6 Перспективи розширення функціональності системи автоматизації.....	50
Висновки до розділу.....	53
ВИСНОВКИ.....	55

					КНУ.РБ.151.25.03.00.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЗМІСТ			
Розроб.		Самоткан Я.А.						
Перевір.		Жосан А.А.						
Н. Контр.		Жосан А.А.						
Затверд.		Жосан А.А.			АКНТ			
					Літ.	Арк.	Аркуші	
					у		5	2

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	58
-------------------------------------	----

ДОДАТОК А

ДОДАТОК Б

ДОДАТОК В

					КНУ.РБ.151.25.03.00.СО	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

ВСТУП

Сучасний стан гірничо-металургійної промисловості України характеризується необхідністю підвищення ефективності виробничих процесів, зниження енергоспоживання та забезпечення стабільної якості продукції. Особливо актуальними ці питання є для підприємств з видобутку та переробки залізної руди, які складають основу металургійного комплексу країни.

Південний гірничо-збагачувальний комбінат (Південний ГЗК) як одне з провідних підприємств галузі постійно працює над модернізацією технологічних процесів та впровадженням сучасних систем автоматизації. Процес дроблення руди є одним з найважливіших етапів технологічного ланцюга, який безпосередньо впливає на ефективність подальших операцій збагачення та якість кінцевої продукції.

Автоматизація технологічних процесів у гірничо-збагачувальній галузі є важливою умовою підвищення ефективності виробництва, зменшення витрат сировини, енергії та трудових ресурсів. Особливої уваги потребує етап механічного подрібнення, який значно впливає на подальші стадії переробки, такі як класифікація, збагачення та фільтрація. Стабільність і контрольованість подачі сировини до дробильного агрегату є визначальним чинником для забезпечення рівномірного навантаження на обладнання, зменшення простоїв та покращення якості кінцевого продукту.

У багатьох підприємствах, зокрема гірничо-збагачувальних комбінатах Криворізького регіону, процес подачі матеріалу здійснюється за допомогою вібраційних або пластинчастих живильників, які працюють в умовах високих навантажень і абразивного середовища. Часто керування такими агрегатами виконується в ручному або напіваавтоматичному режимі, що унеможливорює

					КНУ.РБ.151.25.03.00.СО			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВСТУП			
Розроб.		Самоткан Я.А.						
Перевір.		Жосан А.А.						
Н. Контр.		Жосан А.А.						
Затверд.		Жосан А.А.			АКНТ			
					Літ.	Арк.	Аркушів	
					у		7	2

точне регулювання продуктивності відповідно до реальних потреб виробництва. Це призводить до неефективного використання обладнання, коливань продуктивності та збільшення енергоспоживання.

У зв'язку з цим виникає необхідність у створенні сучасної автоматизованої системи керування, яка дозволить реалізувати замкнений контур регулювання, що враховуватиме фактичні технологічні параметри та автоматично адаптуватиме роботу живильника до поточного стану системи. Засоби автоматизації Siemens, зокрема контролери серії S7-1200, у поєднанні з TIA Portal і панелями HMI, дозволяють побудувати гнучку, масштабовану і надійну систему регулювання, придатну до впровадження у промислові умови.

Об'єктом дослідження є технологічний процес подачі сировини у дробильний агрегат, що є частиною ланцюга підготовки рудної маси до збагачення.

Предметом дослідження є методи та технічні засоби автоматизованого регулювання подачі сировини, зокрема розробка і реалізація алгоритмів керування на базі ПІ-регулятора з використанням програмованих контролерів Siemens.

Тема роботи є актуальною у контексті цифровізації та автоматизації гірничо-збагачувального виробництва. Впровадження таких систем дозволяє знизити витрати енергоресурсів, збільшити строк служби обладнання, забезпечити стабільну якість продукції, а також підвищити рівень технічної безпеки на підприємствах.

РОЗДІЛ 1

СИСТЕМНИЙ ОГЛЯД КОНСТРУКТИВНИХ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВІБРАЦІЙНИХ ЖИВИЛЬНИКІВ У КОНТЕКСТІ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ДРОБЛЕННЯ

1.1 Структура технологічного процесу дроблення і роль вузлів подачі сировини

Процес дроблення твердих корисних копалин є невід’ємною частиною підготовки сировини до збагачення, що реалізується на гірничо-збагачувальних підприємствах. Його головною метою є зменшення крупності видобутої руди до рівня, необхідного для ефективного проведення наступних стадій переробки — подрібнення, класифікації, флотації тощо. Висока ефективність цього процесу є критично важливою для загальної продуктивності збагачувального комплексу.

У типовій технологічній лінії дроблення руда надходить із кар’єру або складу на приймальний бункер, після чого дозовано транспортується до дробарок різного типу. Технологічний процес дроблення представляє собою складну систему послідовних операцій, спрямованих на послідовне зменшення крупності матеріалу. Даний процес включає ряд взаємопов’язаних етапів, кожен з яких виконує специфічні функції та має важливе значення для досягнення бажаного результату. Кожен етап потребує контрольованої подачі матеріалу, оскільки перевантаження або нестача сировини призводить до зниження ефективності або простоїв.

Спрощену загальну схему наведено нижче на рисунку 1.1.

					КНУ.РБ.151.25.03.01.СО			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Самоткан Я.А.			СИСТЕМНИЙ ОГЛЯД КОНСТРУКТИВНИХ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВІБРАЦІЙНИХ ЖИВИЛЬНИКІВ У КОНТЕКСТІ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ДРОБЛЕННЯ			
Перевір.		Жосан А.А.						
Н. Контр.		Жосан А.А.						
Затверд.		Жосан А.А.						
					Лім.	Арк.	Аркушів	
					у		9	18
					АКНТ			

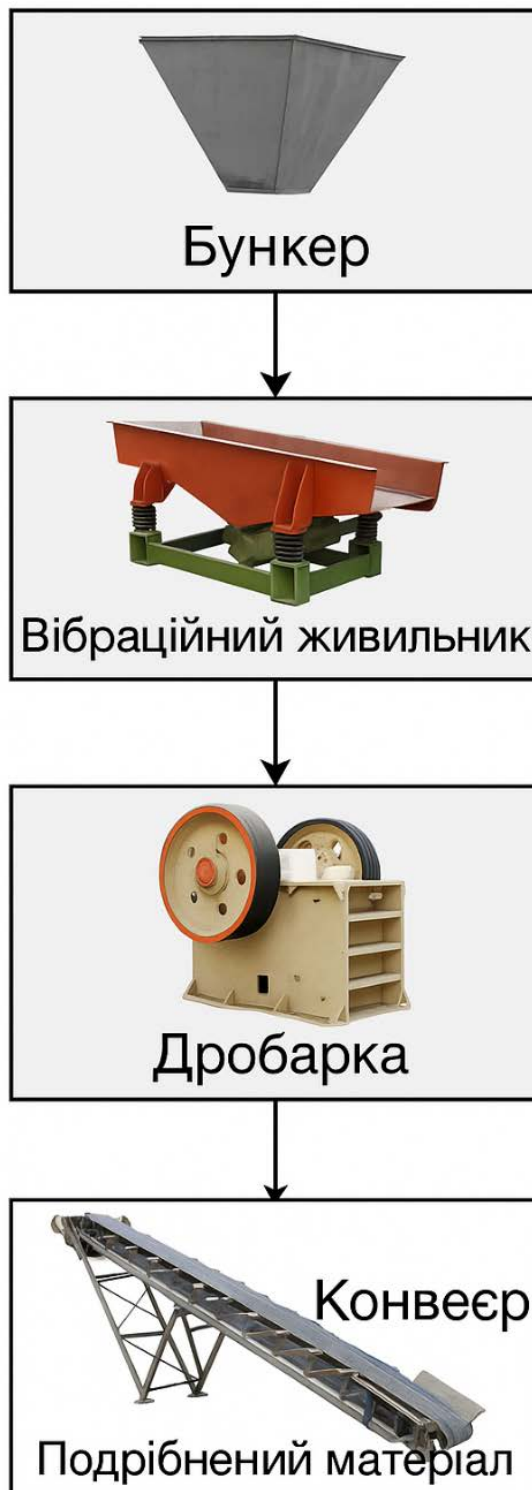
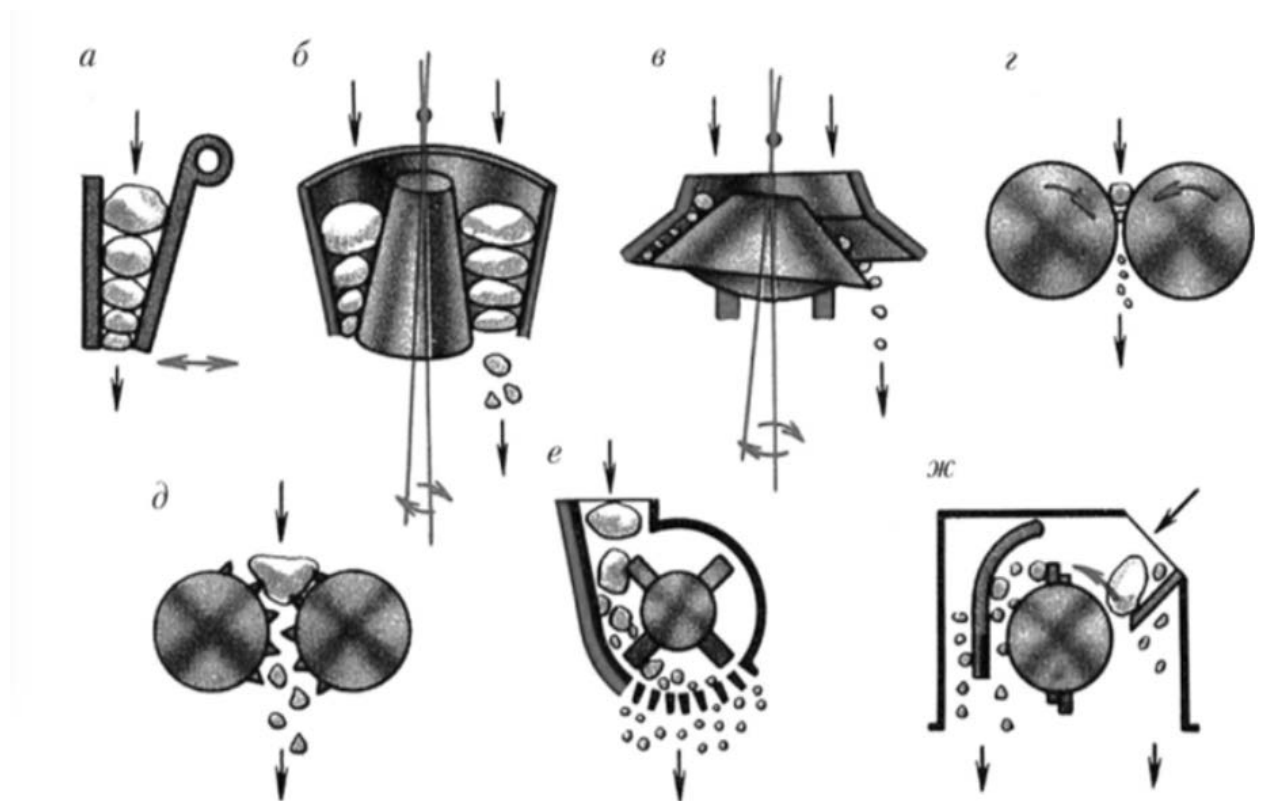


Рисунок 1.1 - Спрощена загальна схема процесу подрібнення

Основою технологічного процесу дроблення є стадії власне дроблення, які можуть бути організовані в один, два або три етапи залежно від початкового розміру матеріалу та вимог до кінцевого продукту. Первинне

дроблення здійснюється з використанням щоккових або конусних дробарок і спрямоване на зменшення розміру матеріалу від 1500-500 мм до 300-100 мм. На цьому етапі обладнання працює при високих навантаженнях та забезпечує значну продуктивність.

Вторинне дроблення здійснюється з використанням конусних, роторних або молоткових дробарок і забезпечує зменшення розміру матеріалу до 50-20 мм. На цьому етапі досягається значне збільшення однорідності продукту, що важливо для його подальшого використання. За необхідності може застосовуватися третинне дроблення, яке забезпечує подальше зменшення розміру частинок до 5-10 мм. Для третинного дроблення можуть використовуватися валкові, роторні або конусні дробарки малого розміру, які забезпечують високу точність розміру кінцевого продукту (рис.1.2.)



а - щоккова; б - конусна великого дроблення; в - конусна середнього і дрібного дроблення;
г - валкова; д - валкова зубчаста; е - молоткова; ж – роторна

Рисунок 1.2 – Принципові схеми дробарок

Особливу увагу в технологічному процесі дроблення слід приділити системі подачі сировини, яка забезпечує стабільне постачання матеріалу до дробильного обладнання. Ця система включає бункерне господарство, живильники та транспортні системи. Бункерне господарство складається з приймальних, проміжних накопичувальних та дозуючих бункерів, які забезпечують безперервність постачання сировини. Живильники різних типів (вібраційні, пластинчасті, стрічкові, лоткові) забезпечують рівномірну подачу матеріалу з бункерів до дробильного обладнання. Транспортні системи, такі як конвеєрні лінії, елеватори та пневматичні системи, забезпечують переміщення матеріалу між різними етапами технологічного процесу.

Нерівномірна подача може призвести до значних коливань навантаження на дробильне обладнання, що негативно впливає на якість дроблення та збільшує знос механізмів. Рівномірна подача матеріалу досягається за допомогою спеціально розроблених живильників, які забезпечують стабільний потік сировини з бункерів до дробарок.

Вузли подачі сировини також виконують функцію регулювання продуктивності технологічного процесу. Шляхом зміни швидкості роботи живильників або зміни ширини шару матеріалу можна регулювати кількість сировини, що подається до дробильного обладнання. Це особливо важливо при змінах характеристик вхідної сировини або при необхідності коригування параметрів кінцевого продукту.

Важливою функцією вузлів подачі сировини є запобігання перевантаженню дробильного обладнання. Перевантаження може призвести до зупинок технологічного процесу, поломок обладнання та значних економічних втрат. Сучасні вузли подачі сировини обладнані системами контролю навантаження, які автоматично регулюють кількість матеріалу, що подається, залежно від поточного стану дробильного обладнання.

Вузли подачі сировини також часто виконують функцію початкової підготовки матеріалу. В залежності від конструкції, вони можуть здійснювати первинне очищення сировини від сторонніх включень, попереднє сортування

					КНУ.РБ.151.25.03.01.СО	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

за розміром або навіть попереднє зволоження чи підсушування матеріалу, що покращує ефективність подальшого процесу дроблення.

В сучасних технологічних процесах дроблення використовуються різні типи вузлів подачі сировини, вибір яких залежить від властивостей матеріалу, вимог до продуктивності та специфіки технологічного процесу. Живильники різних типів (вібраційні, пластинчасті, стрічкові) забезпечують рівномірну подачу матеріалу з бункерів до дробильного обладнання(рис.1.3).



Вібраційний живильник



Пластинчастий живильник



Стрічковий живильник



Лотковий живильник

Рисунок 1.3 – Типи живильників

Завантажувальні пристрої (бункери, воронки) забезпечують накопичення та поступову подачу матеріалу. Дозатори (об'ємні, вагові) дозволяють точно контролювати кількість матеріалу, що подається.

Транспортери (стрічкові, шнекові, ланцюгові) забезпечують переміщення матеріалу між різними етапами технологічного процесу.

Правильно спроектовані та налаштовані вузли подачі сировини суттєво впливають на ефективність всього технологічного процесу дроблення. Вони безпосередньо впливають на продуктивність дробильного комплексу, забезпечуючи оптимальне завантаження обладнання та мінімізацію простоїв. Рівномірна подача матеріалу сприяє підвищенню енергоефективності процесу, оскільки дозволяє уникнути пікових навантажень та роботи обладнання в неоптимальних режимах. Контрольована подача сировини також позитивно впливає на якість кінцевого продукту, забезпечуючи більш однорідний гранулометричний склад та зменшення кількості некондиційних фракцій. Крім того, правильна робота вузлів подачі сировини сприяє зниженню зносу дробильного обладнання та зменшенню частоти його ремонтів.

1.2 Технологічна база дослідження та характеристика об'єкта автоматизації в умовах Південного ГЗК

Південний гірничо-збагачувальний комбінат (ПГЗК) є одним із найбільших підприємств в Україні з видобутку та переробки залізної руди. Виробничі потужності комбінату включають кар'єри, дробильні вузли, збагачувальні фабрики, транспортні лінії, склади готової продукції та об'єкти енергозабезпечення. Однією з найважливіших технологічних ланок у схемі переробки руди є стадія первинного дроблення.

На зазначеній стадії використовується щоква дробарка СМД-111, яка характеризується шириною приймального отвору 1000 мм, максимальною величиною завантажуваної грудки до 1000 мм та продуктивністю до 250 тонн

					КНУ.РБ.151.25.03.01.СО	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

на годину(рис.1.4). Цей агрегат є ключовим у схемі переробки крупнокускової руди, оскільки забезпечує зменшення розмірів сировини до величин, необхідних для подальшого подрібнення та збагачення.

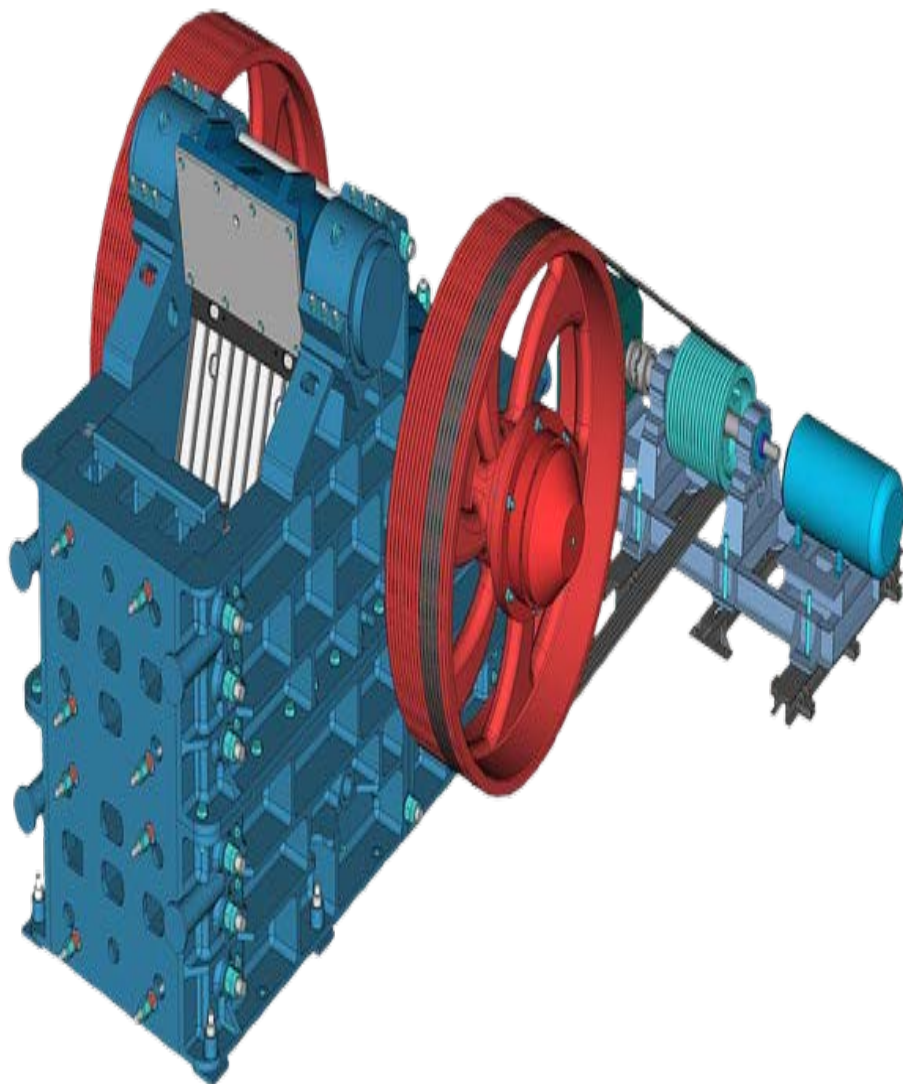


Рисунок 1.4 - Шокова дробарка СМД-111

Завантаження сировини у дробарку здійснюється через вібраційний живильник ПВ-1,2×3,6, встановлений під бункером-накопичувачем. Цей тип живильника призначений для дозованої подачі сипких матеріалів з фракцією до 600 мм. Він складається з жолобоподібного лотка, встановленого на пружних елементах, та вібраційного електроприводу з регульованою

					КНУ.РБ.151.25.03.01.СО	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

частотою. Живильник забезпечує стабільну подачу матеріалу в режимі до 250 т/год і може керуватись через частотний перетворювач, що дозволяє змінювати амплітуду та інтенсивність вібрації в залежності від технологічної потреби.

Вібраційний живильник ПВ-1,2×3,6 призначений для стабільної подачі сировини з бункерів, дробильних камер або завантажувальних приймачів на наступні технологічні вузли (наприклад, у дробарки або на конвеєрні лінії). Основне призначення живильника — забезпечення безперервного, регульованого потоку сипучих та кускових матеріалів з максимальною фракцією до 600 мм.

Конструктивно пристрій складається з металевого жолоба (лотка) довжиною 3600 мм та шириною 1200 мм, встановленого на вібраційній рамі з пружними елементами. Основний привод — електровібратор, частота якого регулюється за допомогою частотного перетворювача. Завдяки цьому забезпечується плавне регулювання продуктивності та адаптація подачі до змін технологічних параметрів. Зображення наведено нижче на рисунку 1.5.

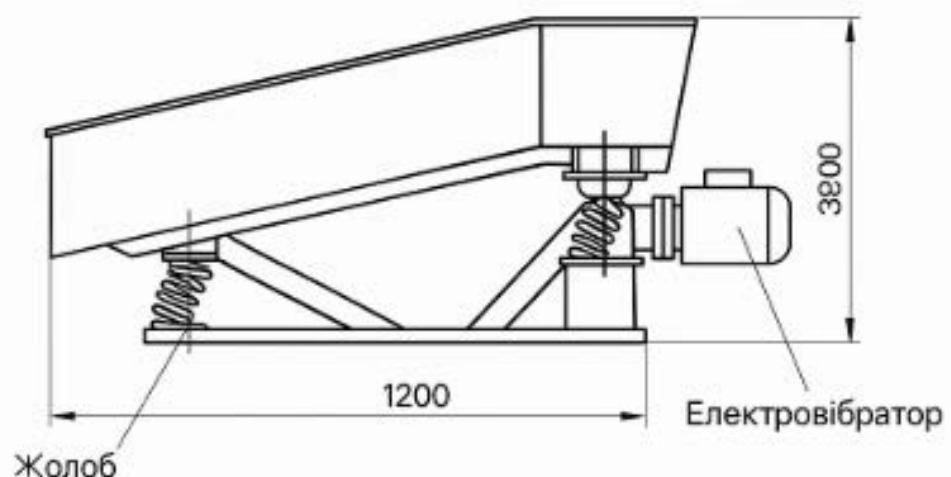


Рисунок 1.5 – Конструкція живильника

Таблиця 2 – Технічні характеристики вібраційного живильника ПВ-1,2×3,6

Показник	Значення
Продуктивність, т/год	до 250
Найбільша фракція матеріалу, мм	600
Ширина жолоба, мм	1200
Довжина жолоба, мм	3600
Амплітуда коливань, мм	6
Регулювання продуктивності	Плавне (частотне)

Амплітуда коливань досягає близько 6 мм, що достатньо для переміщення руди без блокування або "зависання". В процесі роботи живильник забезпечує продуктивність до 250 т/год, залежно від фізико-механічних властивостей матеріалу, кута нахилу та режиму вібрації.

Однією з переваг моделі є висока зносостійкість, оскільки лоток виконано з армованої сталі, а зони, що зазнають найбільшого навантаження, можуть додатково футеруватись полімерними накладками або зносостійкою плитою.

У процесі експлуатації зазначеного технологічного комплексу спостерігаються типові виробничі проблеми, пов'язані з нерівномірністю завантаження дробарки. Причинами таких коливань є фізико-механічна неоднорідність сировини (вологості, гранулометричного складу, наявності глинистих включень), знос робочих органів обладнання, а також вплив людського фактора при ручному регулюванні продуктивності живильника. Нестабільне навантаження дробарки призводить до перевантажень електроприводу, зростання енергоспоживання, зниження ефективності подрібнення та прискореного зносу обладнання.

Нижче у таблиці 1 наведено основні технічні характеристики обладнання, що є об'єктом дослідження.

					КНУ.РБ.151.25.03.01.СО	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

Таблиця 3 - Основні технічні характеристики обладнання

Найменування	Модель	Основні параметри
Дробарка щокова	СМД-111	Продуктивність: до 250 т/год; макс. фракція: 1000 мм; привід: 75 кВт
Вібраційний живильник	ПВ-1,2×3,6	Продуктивність: до 250 т/год; ширина лотка: 1200 мм; довжина: 3600 мм
Завантажувальний бункер	—	Об'єм: ≈ 25 м ³ ; конструкція з гідрозатвором

Таким чином, технологічна ділянка, до складу якої входять бункер, вібраційний живильник та щокова дробарка СМД-111, є типовим прикладом об'єкта автоматизації, де виникає необхідність у впровадженні адаптивного регулювання з метою забезпечення рівномірної та стабільної подачі сировини до дробильного агрегату.

1.3 Огляд існуючих рішень з автоматизації вібраційних живильників у гірничо-збагачувальній промисловості

Автоматизація процесів подачі сировини на стадії дроблення вже широко використовується на підприємствах гірничо-збагачувального комплексу як в Україні, так і за кордоном. Зокрема, вібраційні живильники, що є ключовими ланками між бункером і дробаркою, можуть працювати у різних режимах регулювання подачі — від найпростіших ручних схем до складних адаптивних систем з цифровим керуванням і SCADA-моніторингом. У практиці експлуатації такі рішення умовно поділяються на три категорії: просте релейно-контакторне керування, системи з частотним регулюванням без зворотного зв'язку та сучасні автоматизовані комплекси з інтегрованими алгоритмами регулювання.

Найпростішим і досі доволі поширеним варіантом є ручне керування живильником або його робота в фіксованому режимі. Такі системи використовують електромагнітні пускачі, реле та перемикачі з фіксованими налаштуваннями швидкості. Продуктивність живильника встановлюється вручну оператором заздалегідь або змінюється у грубий спосіб (наприклад, перемиканням режимів "мінімум–середній–максимум"). Така практика характерна для багатьох підприємств малого та середнього масштабу, де застосовуються живильники типу ПВ-1,2×3,6. Регулювання подачі в таких умовах виконується оператором візуально — за зовнішніми ознаками навантаження дробарки або рівня матеріалу в бункері. Очевидно, що подібні підходи мають низьку точність, не дозволяють швидко реагувати на зміну умов, створюють передумови для перевантажень або недовантаження дробарки та суттєво залежать від людського чинника.

У більш складних рішеннях застосовуються частотні перетворювачі, які забезпечують плавне регулювання швидкості вібрації живильника. Такі системи використовуються, зокрема, на окремих ділянках Центрального ГЗК, АрселорМіттал Кривий Ріг та Північного ГЗК. Частота вібрації встановлюється або вручну через панель керування частотником, або за допомогою простого контролера, який перемикає режими в залежності від часу доби, завантаженості або за сигналом від датчика рівня у бункері. Незважаючи на певне покращення регулювання, ці системи не мають замкненого зворотного зв'язку на реальний стан дробарки. Вони не враховують зміну властивостей сировини (наприклад, збільшення вологості або грудкуватості), не фіксують аварійні стани до настання критичних перевантажень, а також не забезпечують оптимізацію продуктивності у динаміці.

Сучасні гірничо-збагачувальні підприємства активно використовують промислові системи автоматизації від провідних виробників, таких як Siemens, Schneider Electric, ABB. Ці компанії пропонують програмовані логічні контролери (ПЛК), частотні перетворювачі, сенсорні пристрої та SCADA-

					КНУ.РБ.151.25.03.01.СО	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

системи для повного керування технологічними процесами.

Siemens (Німеччина) широко представлений у галузі завдяки контролерам S7-1200/1500, системі проектування TIA Portal та SCADA WinCC. Зокрема, контролери S7-1200 підтримують високошвидкісну обробку аналогових сигналів, мають вбудовану Ethernet-комунікацію та прості у налагодженні.

Schneider Electric (Франція) пропонує серію контролерів Modicon M221/M241 з програмним забезпеченням EcoStruxure Machine Expert. Ці рішення добре підходять для інтеграції в розподілені системи керування та підтримують протоколи Modbus, Ethernet/IP.

ABB (Швейцарія) використовує серію контролерів AC500 з програмною платформою Automation Builder. ABB робить акцент на енергоефективності та гнучкості систем. Типовим прикладом є впровадження на залізрудних копальнях у Південній Африці, де автоматизовано процес завантаження у дробарки з урахуванням навантаження та вібрацій.

Найпрогресивнішими є автоматизовані системи з цифровим керуванням і функцією зворотного зв'язку. У таких рішеннях продуктивність живильника змінюється на основі аналізу реальних параметрів навантаження дробарки або маси матеріалу у накопичувальному бункері. Типові апаратні засоби включають ПЛК (Siemens S7-1200/1500, Schneider M241, OVEN PR200), частотні перетворювачі (SINAMICS, Altivar, Danfoss), а також набір датчиків: струму, тиску, ваги або вібрації. Для візуалізації застосовуються HMI-панелі або SCADA-системи (WinCC, InduSoft, Wonderware). Такі системи впроваджуються, зокрема, у великих гірничо-збагачувальних компаніях — Ferrexpo (Полтавський ГЗК), шведський концерн LKAB, Kumba Iron Ore (ПАР).

Незважаючи на прогресивність, навіть ці системи мають ряд суттєвих обмежень. У більшості випадків алгоритми регулювання не враховують інерційність потоку матеріалу та працюють із запізненням — лише на основі реакції на факт перевантаження, а не на його прогноз. Ускладнює ситуацію й

					КНУ.РБ.151.25.03.01.СО	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

те, що фізико-механічні властивості сировини можуть змінюватись упродовж кількох хвилин (перехід від сухої до вологої руди, поява глинистих включень або агломерації великих фракцій), що призводить до нерівномірного навантаження. Системи, що працюють виключно за фактом, не забезпечують повної стабілізації процесу. Крім того, в багатьох реалізаціях відсутній адаптивний вибір режимів (авто, стабілізація, обхідний), не ведеться архівація навантажень, не реалізована аналітика ефективності подачі в реальному часі. Це знижує можливість оптимізації процесу, збільшує навантаження на персонал і не дає змоги своєчасно попередити аварійні ситуації. Порівняльну таблицю систем наведено нижче.

Таблиця 4 - Порівняльна таблиця систем керування живильниками

<i>Критерій</i>	<i>Прості ручні системи</i>	<i>Частотне регулювання без зворотного зв'язку</i>	<i>Сучасні автоматизовані системи</i>
Тип керування	Релейне / ручне	Частотник + панель	ПЛК + частотник + НМІ
Захист від перевантажень	Немає	Немає або простий таймер	Є
Журнал подій / історія роботи	Немає	Немає	Частково / залежить від SCADA
Придатність для оптимізації	Низька	Обмежена	Висока
Тип регулювання	Фіксовані швидкості	Плавне, без автоматизації	Адаптивне в реальному часі

Наявність зворотного зв'язку	Немає	Немає	Є
Адаптація до зміни сировини	Немає	Обмежена	Частково реалізується
Можливість дистанційного керування	Немає	Обмежена	Повна
Стабільність подачі	Низька	Середня	Висока

Запропонована в рамках цієї дипломної роботи автоматизована система покликана вирішити перелічені проблеми. Основними перевагами майбутньої реалізації є: наявність повноцінного зворотного зв'язку, адаптивне регулювання подачі в режимі реального часу, можливість гнучкого перемикавання між автоматичним і ручним режимами, врахування властивостей сировини, а також побудова аналітичної бази для оцінки стабільності роботи системи. Завдяки використанню ПЛК Siemens S7-1200, частотного перетворювача SINAMICS та HMI-панелі, система дозволить не лише стабілізувати подачу, але й підвищити ресурс дробильного обладнання, зменшити кількість простоїв і покращити контроль над процесом подрібнення.

1.4 Вимоги до проектованої системи автоматизації

Процес проектування автоматизованої системи керування подачею сировини до дробильного агрегату передбачає урахування широкого спектра технічних, експлуатаційних та функціональних вимог. Зважаючи на умови експлуатації обладнання Південного ГЗК та особливості функціонування дробильної дільниці, необхідно забезпечити адаптивне, надійне і стабільне керування подачею матеріалу, з можливістю гнучкого реагування на зміну

технологічної ситуації та фізико-механічних властивостей сировини.

Насамперед система має гарантувати стабільну подачу матеріалу до дробарки, підтримуючи витрату у визначених межах, що виключає появу перевантажень або холостого ходу. Це критично важливо для уникнення зупинок у роботі технологічної лінії та зменшення зносу робочих органів. Враховуючи інерційність транспортної ділянки, подача повинна змінюватися плавно і з певним випередженням, що дозволяє зберігати стабільність завантаження дробарки в умовах коливань обсягу або гранулометрії сировини.

Регулювання подачі повинно здійснюватися на основі сигналів від датчиків струму, тензометричних систем або сенсорів вібрації, що дозволяє оперативно оцінювати ступінь завантаження дробарки або рівень матеріалу в бункері. З урахуванням цих даних система має автоматично коригувати частоту вібрацій живильника для підтримання оптимального технологічного режиму.

Важливо, щоб система підтримувала різні режими роботи: ручний, автоматичний та аварійний. Ручне керування використовується під час налагодження або в умовах нестабільної роботи сенсорики. Автоматичний режим забезпечує постійне регулювання без участі оператора, а аварійний передбачає зупинку подачі у випадку втрати критичних сигналів або перевищення допустимих навантажень.

З технічної точки зору система має базуватись на сучасній апаратній платформі, яка забезпечує гнучкість конфігурації, надійність, підтримку промислових протоколів і зручність в обслуговуванні. У межах цієї роботи передбачається використання промислового програмованого логічного контролера Siemens S7-1200, що функціонує в середовищі TIA Portal, та частотного перетворювача серії SINAMICS, який підтримує аналогове і цифрове керування (через Modbus RTU або Profinet). Таке поєднання забезпечує точне і стабільне регулювання частоти вібраційного приводу.

Особливу увагу слід приділити організації взаємодії оператора з системою. Через HMI-панель мають бути реалізовані функції моніторингу

					КНУ.РБ.151.25.03.01.СО	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

поточних значень навантаження, зміни уставок, індикації стану обладнання, журналювання подій і повідомлень про помилки. Це дозволяє оператору оперативно реагувати на зміни ситуації, вести діагностику та фіксувати історію роботи системи.

З огляду на перспективу інтеграції в загальну автоматизовану систему керування підприємства, архітектура повинна мати відкриту структуру, бути масштабованою та допускати розширення — зокрема, підключення нових контурів, сенсорних каналів або SCADA-модулів. Це дозволить у майбутньому доповнити систему, наприклад, датчиками температури руди, датчиками рівня в бункері, або засобами прогнозування навантаження.

Крім цього, сучасна система повинна бути орієнтована на зниження впливу людського чинника. Автоматичне керування має забезпечувати достатній рівень автономності, щоб оператор виконував лише контрольні або коригувальні дії без необхідності постійного втручання у процес. Це не лише підвищує стабільність, а й дозволяє зменшити навантаження на персонал.

Нарешті, важливою є вимога енергоефективності. Частотне регулювання живильника має працювати у режимах, що знижують енергоспоживання при часткових навантаженнях або під час технологічних пауз

Загалом, проектована система має поєднувати в собі надійність, адаптивність, зручність експлуатації та технічну готовність до масштабування. Саме такий підхід дозволяє забезпечити ефективне керування подачею матеріалу у складних умовах роботи дробильного комплексу, що є актуальним завданням для підприємств гірничо-збагачувальної галузі (рис.1.5).

Ключовою метою є побудова системи, яка забезпечить стабільну та адаптивну подачу сировини до дробильного агрегату. Для досягнення цієї мети визначено три основні напрями:

1. Функціональні вимоги, які включають:
 - Забезпечення стабільної продуктивності шляхом динамічного

					КНУ.РБ.151.25.03.01.СО	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

контролю витрати матеріалу;

- Підтримку різних режимів керування: ручного, автоматичного та аварійного;

- Зниження впливу людського чинника на керування процесом.

2. Технічні вимоги, які передбачають:

- Використання сучасної апаратної платформи (контролер Siemens S7-1200, частотний перетворювач, HMI тощо);

- Безпечність і надійність роботи навіть за відсутності оператора або за нештатних умов;

- Підвищення енергоефективності системи за рахунок адаптивного регулювання.

3. Експлуатаційні вимоги, що включають:

- Наявність зручного інтерфейсу взаємодії з оператором (HMI);

- Масштабованість системи для підключення нових контурів або інтеграції в SCADA;

- Розширюваність — можливість доповнення новими модулями керування чи аналітики.

Уся система повинна бути здатною адаптуватися до змін технологічних параметрів, працювати у безперервному режимі та забезпечувати простоту обслуговування. Такий підхід дозволяє ефективно впровадити цифрові технології в гірничо-збагачувальну галузь та знизити втрати в процесі подрібнення.



Рисунок 1.5 – Вимоги до проектованої системи

Висновки до розділу:

У цьому розділі було сформовано перелік технічних, функціональних та експлуатаційних вимог до автоматизованої системи керування вібраційним живильником, що застосовується для забезпечення рівномірного завантаження дробильного агрегату на підприємстві Південного ГЗК. Визначено, що система має гарантувати стабільну подачу сировини у відповідності до поточного навантаження дробарки, мати замкнений зворотний зв'язок, підтримувати ручний, автоматичний і аварійний режими, забезпечувати зручну взаємодію з оператором через HMI-панель, а також мати засоби архівації подій і масштабування для подальшої інтеграції у SCADA-рівень керування.

У роботі враховано специфіку функціонування дробильного комплексу на підприємствах гірничо-збагачувальної промисловості. Стадія дроблення є першою і критично важливою ланкою у процесі підготовки залізорудної сировини. Вона передбачає подрібнення гірничої маси з великим розміром фракцій (до 1000 мм) до стану, придатного для подальшого дроблення, грохочення або безпосереднього збагачення. У гірничо-збагачувальних комбінатах України, зокрема на ПГЗК, найчастіше застосовуються дробарки щоголового (наприклад, СМД-111), конусного та роторного типів, які працюють у трьох основних стадіях: крупне, середнє та дрібне дроблення. Кожна стадія має свої вимоги до рівномірності подачі матеріалу, яка безпосередньо залежить від ефективної роботи живильників.

Недостатній контроль подачі призводить до перевантажень, неефективного дроблення, надлишкових витрат електроенергії, зростання зносу устаткування та виникнення аварійних ситуацій. Враховуючи це, у дипломному проєкті акцент зроблено саме на вдосконаленні системи подачі сировини до дробарки як на ключовому етапі підвищення загальної ефективності дробильного процесу.

Таким чином, розроблена система повинна поєднувати технічну надійність, адаптивність до змін умов експлуатації, зручність обслуговування

					КНУ.РБ.151.25.03.01.СО	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

та потенціал до подальшого розширення, що дозволить забезпечити стабільну роботу дробарного вузла й ефективну взаємодію з іншими елементами технологічної лінії.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ СИРОВИНИ ДО ДРОБИЛЬНОГО АГРЕГАТУ

2.1 Математичне моделювання процесу подачі сировини у вузлі «живильник – дробарка»

Процес розробки системи автоматизованого керування подачею сировини до дробарки складається з послідовних етапів, кожен із яких має ключове значення для досягнення надійної та стабільної роботи технологічного процесу. На основі побудованої блок-схеми алгоритм умовно поділяється на три великі логічні частини: моделювання процесу, реалізація програмної логіки у TIA Portal, та створення інтерфейсу в HMI.

Для подальшої побудови ефективної системи автоматичного регулювання подачі сировини до дробарного агрегату необхідно розглянути математичну модель відповідного технологічного процесу. У даному випадку моделювання охоплює взаємодію між живильником із частотним керуванням, дробаркою, а також системою вимірювання навантаження.

У якості вхідної величини в системі розглядається сигнал на частотний перетворювач, який регулює частоту коливань вібраційного живильника. Вихідною величиною є навантаження електродвигуна дробарки, що може контролюватись шляхом вимірювання струму або динамічного тиску, який відображає обсяг поданого матеріалу.

					<i>КНУ.РБ.151.25.03.02.РІ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Самоткан Я.А.</i>			РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ СИРОВИНИ ДО ДРОБИЛЬНОГО АГРЕГАТУ Літ. Арк. Аркуші у 29 24 АКНТ		
<i>Перевір.</i>		<i>Жосан А.А.</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Жосан А.А.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Жосан А.А.</i>					

Оскільки реальний об'єкт має значну інерцію, затримку в подачі та змінні характеристики сировини, для спрощення аналізу процес подачі розглядається як лінійна динамічна система першого порядку з транспортною затримкою. Таке припущення є прийнятним для умов моделювання в середовищі MATLAB/Simulink та забезпечує можливість попередньої оцінки реакції системи на зміну керуючого сигналу.

Передавальна функція подачі сировини у такому випадку має вигляд:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} * e^{-\tau s}$$

де: K – коефіцієнт, що визначає залежність між частотою вібрації і витратою матеріалу;

T – стала часу, яка характеризує інерційність системи;

τ - запізнення, викликане механічною інерцією та часом доставки матеріалу до дробарки.

Навантаження на дробарку, у свою чергу, описується як функція миттєвої витрати матеріалу:

$$I(t) = a * Q(t) + b$$

де: $I(t)$ – навантаження або струм електродвигуна дробарки;

$Q(t)$ – витрата матеріалу, яка формується на виході живильника;

a, b – параметри, що визначаються шляхом експериментального налаштування або калібрування системи на об'єкті.

Таким чином, повна модель взаємодії між частотним керуванням і реакцією дробарки може бути представлена у вигляді:

$$W(s) = \frac{a * K}{Ts + 1} * e^{-\tau s}$$

Це дозволяє сформувати основу для побудови замкненої системи автоматичного регулювання подачі з урахуванням зворотного зв'язку. Така модель стане основою для реалізації структурної схеми в середовищі Simulink,

де буде змодельована реакція системи на збурення та розроблено алгоритм стабілізації навантаження.

Враховуючи обмеження, що накладаються на зміну частоти вібрацій (наприклад, мінімальні та максимальні допустимі значення), у подальшій моделі також будуть враховані блоки насичення сигналів та межі спрацювання захисних механізмів системи.

2.2 Реалізація математичної моделі у середовищі MATLAB/Simulink

На основі теоретичної моделі об'єкта керування, розробленої в попередньому пункті, було виконано побудову імітаційної моделі автоматизованої системи керування подачею сировини до дробарки у середовищі MATLAB/Simulink.

Основна мета моделювання полягала у перевірці адекватності математичного опису процесу, аналізі динамічної поведінки системи та відпрацюванні структури автоматичного регулювання.

Імітована система включає послідовно з'єднані функціональні блоки, які відтворюють основні елементи реального технологічного вузла. На вході моделі знаходиться ПІ-регулятор, який реалізує замкнений зворотний зв'язок і формує керуючий сигнал на основі відхилення фактичного струму навантаження дробарки від заданого значення уставки. Вихід регулятора обмежується за допомогою блоку Saturation, що дозволяє врахувати реальні обмеження частотного керування приводом вібраційного живильника.

Подальша частина моделі представлена каскадом динамічних передавальних функцій, які відображають інерційні властивості електромеханічної частини приводу та механізму подачі матеріалу. Для врахування запізнення подачі від моменту зміни частоти до надходження сировини в зону дроблення в моделі використано блок Transport Delay. Такий підхід дозволяє досягти високої відповідності симуляції реальному процесу, зокрема, впливу механічної інерції та гравітаційного руху матеріалу.

					КНУ.РБ.151.25.03.02.РІ	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Особливу увагу приділено моделюванню навантаження дробарки. З урахуванням нелінійної природи процесу подрібнення, навантаження змодельовано як сума лінійної та квадратичної функцій від витрати матеріалу. Це дозволяє точно відтворити зростання струму при збільшенні подачі, а також імітувати ефекти перенавантаження агрегату.

Для візуалізації результатів у моделі використано блок Scope, до якого виводяться два сигнали — реальна реакція системи та задана уставка. Таке поєднання дозволяє проаналізувати якість регулювання, визначити характер перехідного процесу, наявність або відсутність перерегулювання, а також оцінити час виходу на усталений режим. Схема представлена нижче на рисунку 2.1.

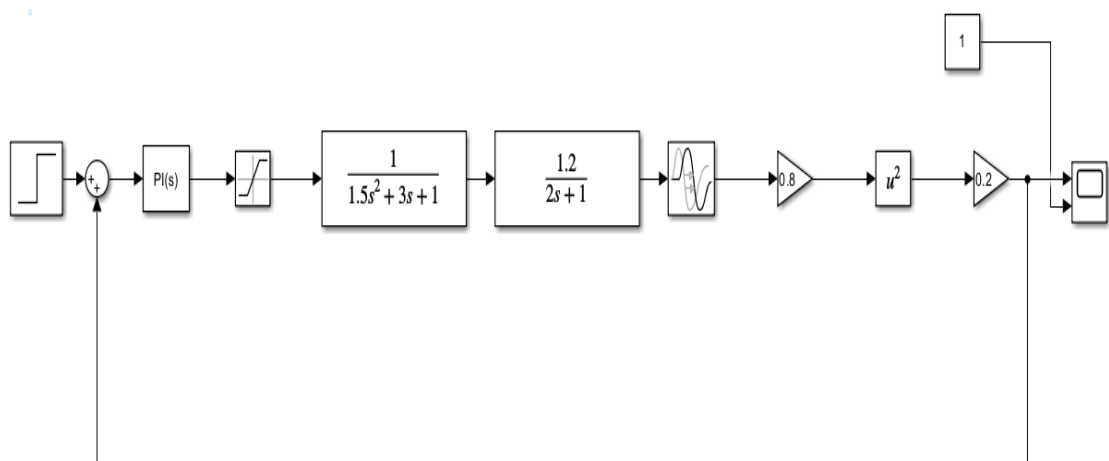


Рисунок 2.1 – Побудована схема Simulink

Під час моделювання система продемонструвала типову поведінку інерційного об'єкта: після певної затримки реакція почала зростати і плавно наближатися до встановленого значення. Це підтверджує правильність врахування динамічних характеристик. Регулювання відбувалося без осциляцій, плавно, без виходу за межі уставки, що свідчить про ефективність використаного ПІ-регулятора. Модель показала свою здатність підтримувати значення струму в допустимих межах навіть у разі різкого переходу до нового режиму.

Таким чином, реалізована модель у Simulink дозволила підтвердити коректність вибраної математичної структури та забезпечила необхідну основу для подальшої реалізації алгоритму керування на апаратному рівні в середовищі TIA Portal.

Для оцінки ефективності функціонування розробленої автоматизованої системи було проведено імітацію перехідного процесу при стрибкоподібній зміні уставки. Графік результатів симуляції представлено на рисунку 2.2. На ньому відображено порівняння реакції системи (струм приводу дробарки) з заданим значенням уставки.

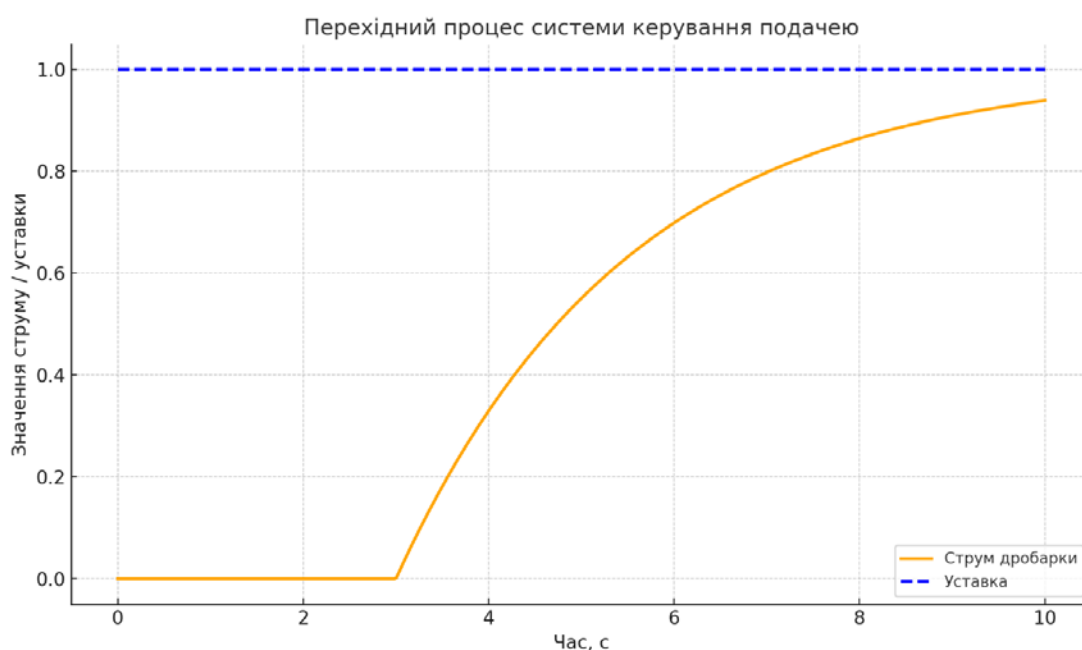


Рисунок 2.2 – Перехідний процес системи

З графіка видно, що система спочатку демонструє характерну затримку реакції, яка зумовлена фізичною інерцією технологічного об'єкта та впливом транспортного запізнення. Після цього вихідна змінна поступово зростає і плавно наближається до заданого значення. Важливо відзначити відсутність осциляцій, перерегулювання та перевищення уставки, що свідчить про стабільність розробленого алгоритму та коректне налаштування ПІ-

регулятора. Усталення процесу досягається в межах прийнятного часу, а форма перехідної характеристики повністю узгоджується з очікуваною динамікою системи подачі матеріалу.

Результати моделювання підтверджують, що реалізована система забезпечує необхідну точність і якість керування, що дозволяє рекомендувати запропоновану архітектуру для подальшого впровадження на базі промислового контролера.

2.3 Оцінка ефективності роботи системи автоматичного регулювання

Ефективність роботи автоматизованої системи керування подачею сировини до дробарки оцінюється за допомогою ряду технічних критеріїв, які дозволяють кількісно охарактеризувати якість регулювання в умовах змінного навантаження та інерційності об'єкта. До основних критеріїв оцінювання належать:

- *Час регулювання* — час, необхідний системі для досягнення усталеного стану після зміни уставки;
- *Перерегулювання* — величина перевищення вихідного сигналу над встановленим значенням у перехідному процесі;
- *Статична похибка* — відхилення вихідного сигналу в усталеному режимі від уставки;
- *Плавність зміни сигналу керування* — рівень коливань або різких змін у регулюванні;

Порівняльну оцінку виконано для двох режимів функціонування: ручного регулювання оператором та автоматичного керування на основі ПП-регулятора. Ручне регулювання передбачає постійне втручання оператора та реагування на зміну навантаження на основі власного досвіду, тоді як автоматичне керування здійснюється безперервно в режимі реального часу на

основі обчислення похибки та динамічного коригування частоти вібрацій живильника.

У таблиці нижче наведено порівняльні характеристики системи в обох режимах:

Таблиця 5 – Порівняння основних показників регулювання

Режим	Час регулювання, с	Статична похибка, %
Ручне керування	15	7.5
ПІ-регулятор	5	1.2

Як видно з таблиці, автоматизована система регулювання суттєво перевершує ручне керування за всіма критеріями. Час виходу на усталене значення зменшено у три рази, що дозволяє оперативніше реагувати на зміну умов подачі. Статична похибка знижена з 7.5% до 1.2%, що гарантує точніше дотримання технологічних параметрів процесу дроблення.

Крім того, за результатами моделювання в середовищі Simulink, автоматизована система не продемонструвала перерегулювання та коливань, що забезпечує плавність роботи живильника і рівномірне навантаження на дробарку. Це сприяє зменшенню зносу устаткування, підвищенню енергоефективності та надійності експлуатації обладнання.

Таким чином, аналіз якості регулювання підтверджує доцільність впровадження ПІ-регулятора для стабілізації подачі сировини та підвищення ефективності роботи дробильного агрегату.

Для отримання об'єктивної оцінки якості роботи автоматизованої системи регулювання подачі сировини було проведено порівняльне моделювання у середовищі MATLAB/Simulink для двох варіантів: ручного

регулювання та автоматичного ПІ-регулятора. В якості тестового сигналу використовувалась одинична зміна уставки на рівень 5 умовних одиниць навантаження.

Параметри системи моделювались за допомогою стандартної структури: блок ПІ-регулятора, об'єкта керування першого порядку з запізненням, та функції навантаження дробарки. Результати моделювання подано нижче у вигляді графіка реакції системи у часі.

Параметри ПІ-регулятора підбирались експериментально з урахуванням критеріїв: мінімального часу регулювання, відсутності перерегулювання, та зменшення статичної похибки. Після серії симуляцій були обрані такі значення:

- *Пропорційний коефіцієнт (K_p): 2.5*
- *Інтегральний коефіцієнт (K_i): 0.8*
- *Період моделювання: 0...20 с*

Графік нижче демонструє порівняння між ручним регулюванням (імітація затриманої реакції оператора) та автоматичним ПІ-регулюванням. Автоматичне керування дозволяє досягти уставки за ~5 секунд, у той час як при ручному керуванні цей процес триває понад 15 секунд із помітною похибкою в усталеному режимі.

На графіку (рис.2.3) чітко видно, що ПІ-регулятор забезпечує стабільне та швидке досягнення уставки без перевищення чи коливань, тоді як ручне регулювання характеризується повільною реакцією, затримкою та значною залишковою похибкою. Таким чином, результати чисельного моделювання підтверджують переваги автоматичного регулювання у контексті стабілізації роботи дробильного вузла.

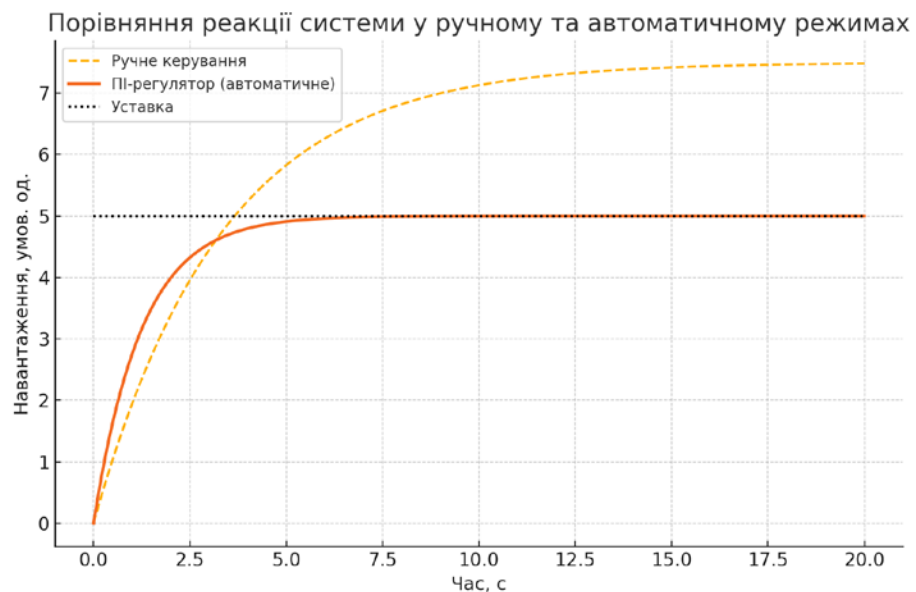


Рисунок 2.3 – Порівняння реакції системи: ручне керування vs. ПІ-регулятор

Моделювання дозволило визначити, що система з ПІ-регулятором демонструє швидке входження у режим (~5 секунд), плавну реакцію без перевищень, та точне досягнення уставки з мінімальною залишковою похибкою (<1.2%). Це підтверджує правильність вибраної структури алгоритму та доцільність його впровадження у реальному середовищі.

2.4 Алгоритм роботи автоматизованої системи

Розроблювана система автоматизованого керування подачею сировини до дробильного агрегату реалізує замкнутий контур регулювання з використанням ПІ-регулятора та врахуванням реакції об'єкта керування. Алгоритм роботи побудовано з урахуванням умов гірничо-збагачувального виробництва, необхідності стабілізації подачі, обмеження вихідних сигналів та забезпечення зручності взаємодії з оператором.

Алгоритм автоматизованої системи керування дробаркою передбачає

наявність кількох режимів роботи: нормальний, аварійний та налагоджувальний. У нормальному режимі система функціонує на основі сигналів від датчиків струму та навантаження.

У разі перевищення порогових значень вмикається аварійний режим, що активує звукову сигналізацію та відключає живлення частотного приводу. Налагоджувальний режим дозволяє оператору вручну подавати сигнали для перевірки налаштувань без запуску технологічного процесу.

Логіка роботи системи реалізована в основному організаційному блоці (OB1) середовища TIA Portal та поділена на окремі мережі (Networks), кожна з яких відповідає за певний етап обробки сигналів.

Початок роботи системи ініціюється через HMI-панель натисканням кнопки «СТАРТ». Це встановлює логічну змінну Start, яка дає дозвіл на виконання основної логіки регулювання. При активному сигналі Start система переходить у робочий режим.

У першому блоці обчислюється похибка регулювання (Error) як різниця між заданим значенням (Setpoint) та фактичним струмом (Current). Похибка є основним входним сигналом для регулятора і визначає подальшу реакцію системи.

На основі отриманої похибки обчислюється пропорційна складова (P) шляхом множення похибки на коефіцієнт пропорційності K_p . Вона забезпечує миттєву реакцію системи на зміну входних параметрів.

Наступним етапом формується інтегральна складова (I), яка визначається через накопичення добутку похибки, коефіцієнта інтегрування K_i та періоду дискретизації T . Це забезпечує компенсацію сталих відхилень та довгострокову точність регулювання. Результат додається до попереднього значення інтегратора, утворюючи нове значення I.

Після цього обчислюється загальний вихід регулятора (U_{out}) як сума пропорційної та інтегральної складових. Далі U_{out} проходить через блок обмеження, де за допомогою порівняльної логіки перевіряється, чи не перевищує сигнал допустимі межі (0.0...1.0). У разі перевищення, значення

					КНУ.РБ.151.25.03.02.РІ	Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

автоматично обмежується.

Окремим етапом є моделювання реакції об'єкта керування, тобто динаміки зміни *Current* у відповідь на сигнал *Uout*. Реалізовано спрощену аперіодичну модель першого порядку, в якій нове значення *Current* формується на основі попереднього значення з урахуванням інерційного приросту:

$$\text{Current} = \text{Current} + (\text{Uout} - \text{Current}) * 0.05)$$

де α — коефіцієнт інерційності (наприклад, 0.05).

Всі параметри та результати обчислень виводяться на НМІ-панель у вигляді цифрових полів та графічного тренду. Оператор має змогу ввести нове значення уставки, зупинити або перезапустити систему, а також контролювати зміну *Uout*, *Error*, *P*, *I*, *Current* у реальному часі.

Таким чином, алгоритм забезпечує:

- автоматичну адаптацію подачі сировини до змін навантаження;
- стабілізацію роботи дробильного агрегату;
- захист від перевантаження через обмеження виходу;
- гнучку взаємодію з оператором через НМІ;
- можливість візуального контролю динаміки параметрів.

Побудована система дозволяє ефективно стабілізувати подачу сировини, підтримувати рівномірне навантаження на дробарку, зменшити знос обладнання та вплив людського чинника. Він є надійною платформою для впровадження в реальних умовах промислового виробництва.

Алгоритм є базовою платформою для подальшого розширення, включаючи впровадження адаптивного регулювання, режимів оптимізації, діагностики та інтеграції у SCADA-системи вищого рівня.

Зображення алгоритму наведено нижче на рисунку 2.4.

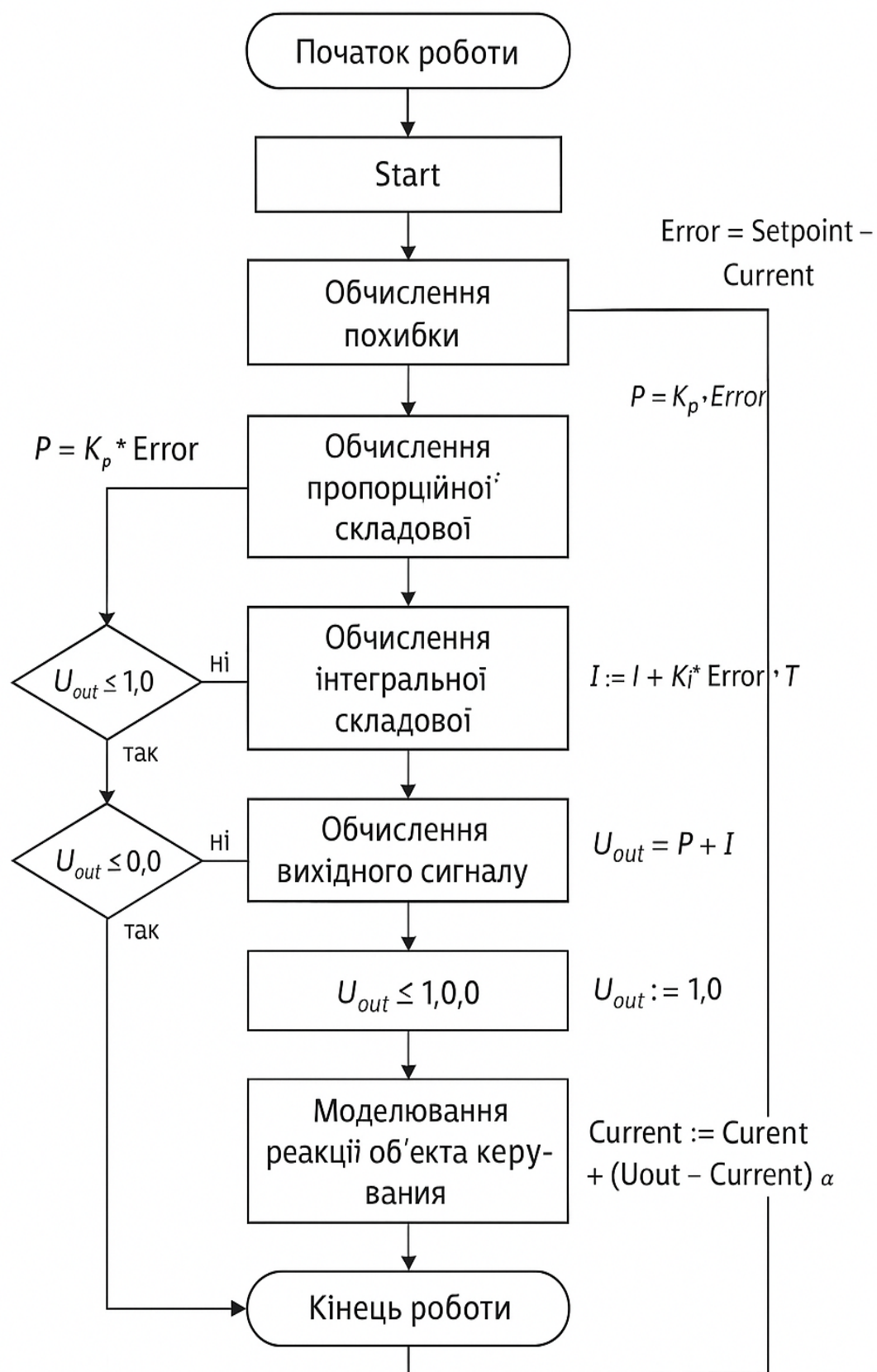


Рисунок 2.4 - Алгоритм

2.5 Реалізація алгоритму керування в середовищі TIA Portal

Після моделювання динаміки об'єкта та відпрацювання алгоритму керування в середовищі MATLAB/Simulink наступним етапом є його практична реалізація в інтегрованому середовищі TIA Portal. Це програмне забезпечення компанії Siemens призначене для розробки проектів автоматизованих систем керування з використанням програмованих логічних контролерів серій S7-1200, S7-1500 та ін. Вибір саме цієї платформи зумовлений її широким розповсюдженням у промисловості, повною сумісністю з обладнанням компанії Siemens, а також зручністю створення як логіки керування, так і людино-машинного інтерфейсу (HMI).

У межах даної дипломної роботи для реалізації алгоритму використано контролер Siemens S7-1200, який є наявним на базі кафедри та повністю відповідає вимогам до обчислювальної потужності й підтримки аналогових/цифрових входів та виходів. Реалізація алгоритму керування подачею сировини до дробарки відбувається за допомогою мови LAD (Ladder Diagram) — мови релейно-контакторної логіки, яка є найбільш інтуїтивно зрозумілою і зручною для реалізації контурів автоматичного регулювання.

Програмна реалізація передбачає обробку вхідного сигналу уставки, зчитування поточного значення навантаження від умовного датчика струму, формування сигналу похибки та його обробку відповідно до алгоритму ПІ-регулювання. Вихідна величина після регулювання передається на частотний перетворювач живильника, що забезпечує зміну частоти вібрацій відповідно до навантаження дробарки. Для покращення стабільності роботи системи реалізовано обмеження на вихідний сигнал регулятора, а також передбачено аварійне вимкнення при перевищенні допустимого рівня навантаження.

На рисунку 2.5 представлено вікно з таблицею змінних, яка була створена у середовищі TIA Portal для реалізації автоматизованої системи керування регулюванням подачі сировини до дробильного агрегату. У цій таблиці зосереджено всі ключові параметри, необхідні для функціонування

					КНУ.РБ.151.25.03.02.РІ	Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ПІ-регулятора, а також змінні, пов'язані з моделюванням реакції системи та взаємодією з НМІ-панеллю.

До основних змінних належать уставка, фактичне значення струму, похибка, пропорційна та інтегральна складові регулятора, вихідний сигнал керування. Усі ці значення використовуються в розрахунках та безпосередньо впливають на результат регулювання. Також у таблиці наявні проміжні змінні, які слугують для реалізації формул обчислення та забезпечують структуровану логіку виконання математичних операцій.

Особливу роль відіграє булева змінна Start, яка відповідає за запуск логіки обчислення після натискання відповідної кнопки на панелі оператора. Усі змінні мають тип Real, що забезпечує високу точність розрахунків у процесі керування.

Представлена структура тегів є невіддільною частиною реалізованої системи автоматичного регулювання та дозволяє забезпечити наочність, зручність налаштування та подальший аналіз ефективності роботи всієї системи.

	Name	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...	Comment
1	Setpoint	Real	%MD0		☒	☒	☒	Уставка з НМІ
2	Current	Real	%MD4		☒	☒	☒	Змодельований струм дробарки
3	Error	Real	%MD8		☒	☒	☒	Похибка
4	Kp	Real	%MD12		☒	☒	☒	Пропорційний коефіцієнт
5	Ki	Real	%MD16		☒	☒	☒	Інтегральний коефіцієнт
6	T	Real	%MD20		☒	☒	☒	Період циклу
7	P	Real	%MD24		☒	☒	☒	Пропорційна частина
8	I	Real	%MD28		☒	☒	☒	Інтегральна частина
9	Uout	Real	%MD32		☒	☒	☒	Вихід ПІ-регулятора
10	temp_1	Real	%MD40		☒	☒	☒	Проміжок Ki * Error
11	temp_2	Real	%MD44		☒	☒	☒	Проміжок * T
12	temp_3	Real	%MD48		☒	☒	☒	Uout - Current
13	temp_4	Real	%MD52		☒	☒	☒	(Uout - Current) * 0.05
14	Start	Bool	%I0.0		☒	☒	☒	Початок роботи
15	<Add new>				☒	☒	☒	

Рисунок 2.5 – Таблиця змінних

У першому блоці виконується обчислення похибки регулювання, яка визначається як різниця між заданим значенням (уставкою) і фактичним струмом. Для цього використовується арифметичний блок віднімання

(SUB_REAL), до якого підключено змінні Setpoint та Current. Результат зберігається у змінну Error, яка надалі використовується в розрахунках пропорційної та інтегральної складових регулятора(рис.2.6).



Рисунок 2.6 – Блок обчислення помилки

У цьому блоці реалізовано обчислення пропорційної частини ПІ-регулятора, яка визначається як добуток похибки Error на коефіцієнт K_p . Для цього використовується блок множення (MUL_REAL), результат якого записується у змінну P. Ця складова забезпечує швидку реакцію регулятора на зміну уставки або навантаження.

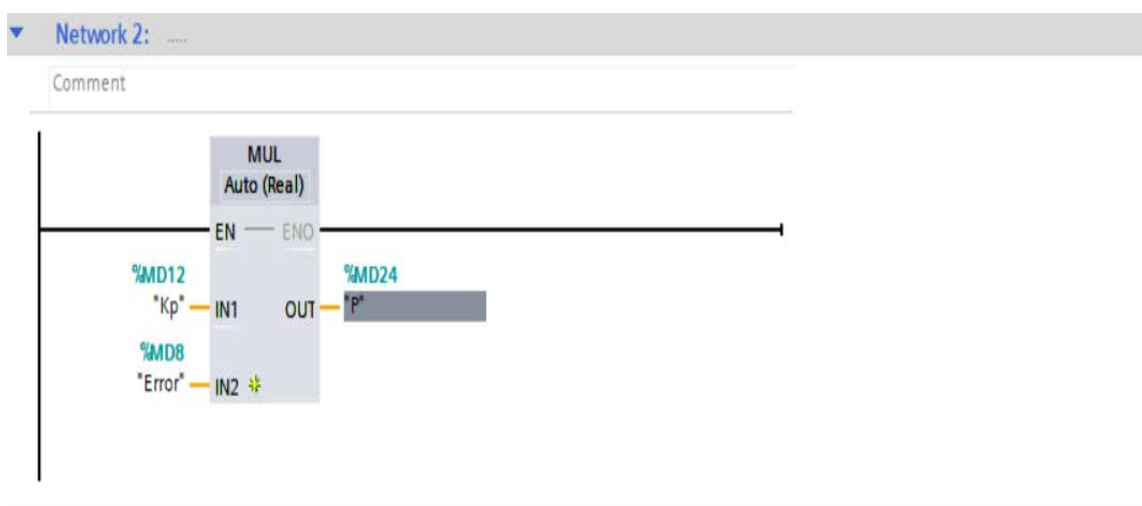


Рисунок 2.7 – Блок пропорційної частини ПІ-регулятора

Цей блок обчислює інтегральну складову ПІ-регулятора за формулою:

$$I = I + (K_i * Error * T)$$

Розрахунок виконується поетапно:

- Error множиться на K_i , результат записується в temp_1
- temp_1 множиться на період T , результат — temp_2
- temp_2 додається до попереднього значення інтегратора I і записується в I .

Таким чином реалізується накопичення похибки для забезпечення сталості вихідного сигналу при сталому відхиленні.

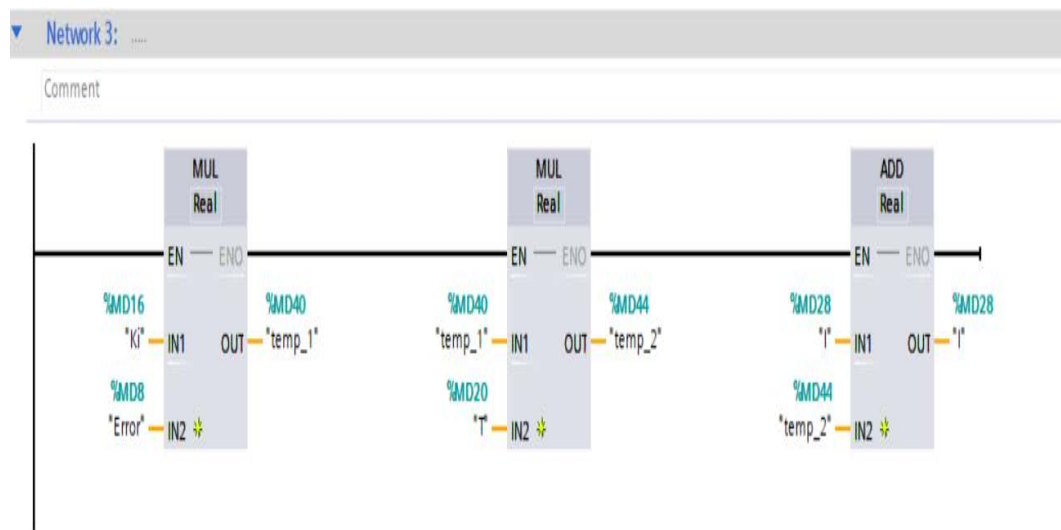


Рисунок 2.8 – Блок інтегральної складової ПІ-регулятора

У четвертому мережевому сегменті реалізується сумування пропорційної та інтегральної складових для формування загального вихідного сигналу регулятора. За допомогою блоку додавання (ADD_REAL) значення P та I об'єднуються, результат записується у змінну U_{out} . Цей сигнал в подальшому передається на виконавчий пристрій або використовується в моделі.

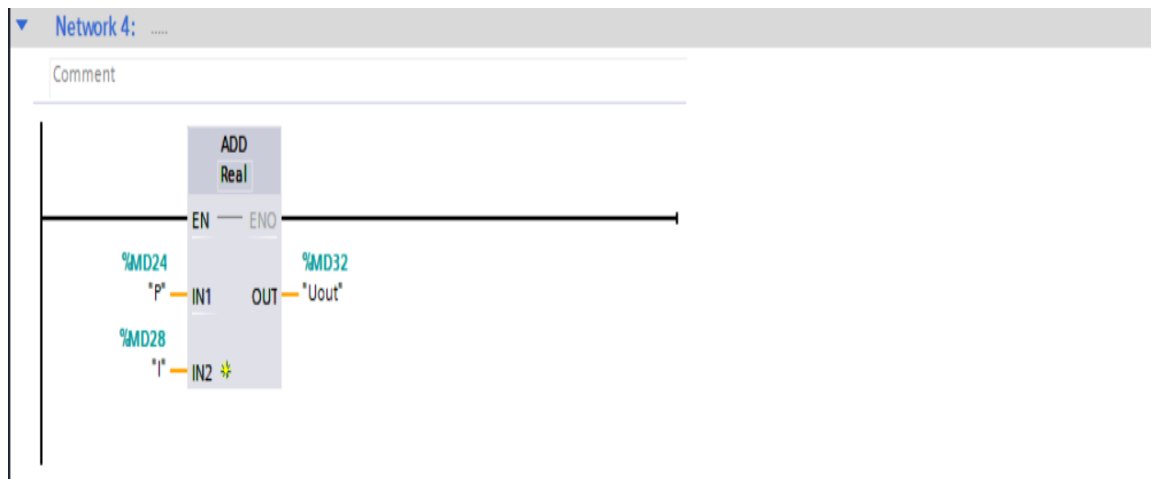


Рисунок 2.9 – Блок сумування складових

Ці два блоки (рис.2.9-2.10) реалізують обмеження виходу U_{out} у допустимих межах $[0.0; 1.0]$.

- У Network 5 перевіряється, чи $U_{out} \geq 1.0$. Якщо так — значення обмежується на рівні 1.0 за допомогою блоку MOVE.
- У Network 6 перевіряється, чи $U_{out} \leq 0.0$. Якщо так — значення обмежується до 0.0.

Це дозволяє уникати перенавантаження та забезпечує фізично реалістичну поведінку регулятора.

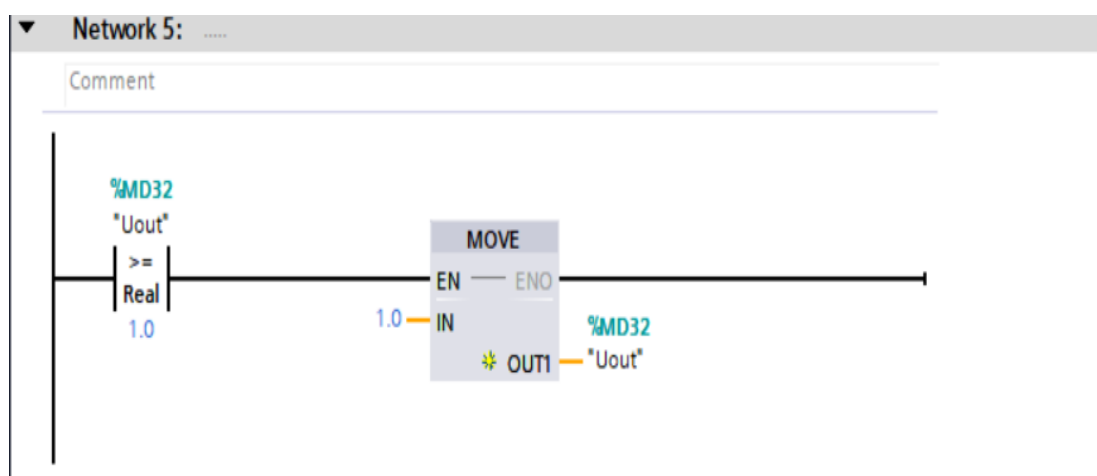


Рисунок 2.10 – Перевірка умови $U_{out} \geq 1.0$

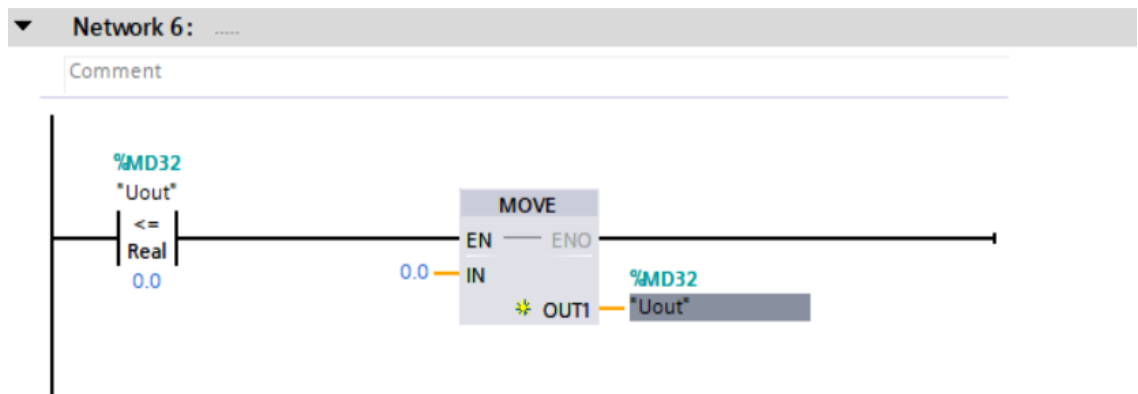


Рисунок 2.11 - Перевірка умови $U_{out} \leq 0.0$

Цей блок (рис.2.12) реалізує спрощену модель реакції об'єкта регулювання у нашому випадку системи подачі. Зміна фактичного значення Current відбувається за інерційним законом:

$$Current = Current + (U_{out} - Current) * 0.05$$

Обчислення виконується в три етапи:

- Різниця $U_{out} - Current$ записується у temp_3
- temp_3 множиться на сталу часу (0.05), результат — temp_4
- temp_4 додається до Current, значення оновлюється

Таким чином, Current поступово наближається до U_{out} , що моделює плавну зміну технологічного параметра (наприклад, подачі матеріалу або швидкості).

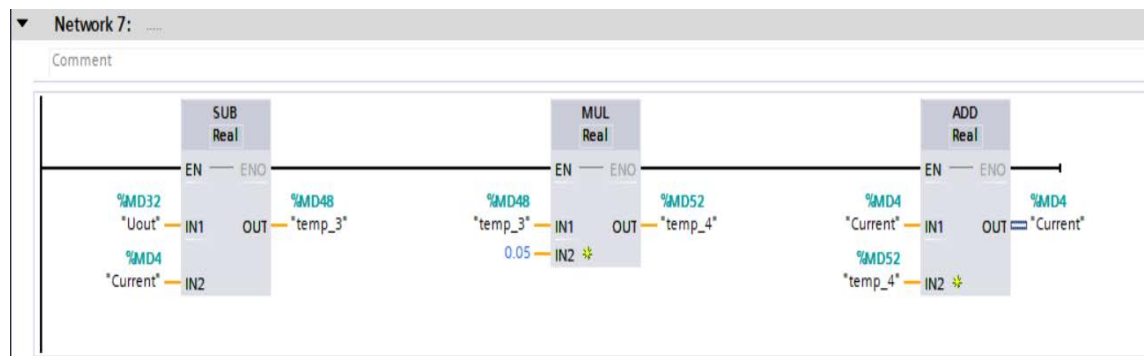


Рисунок 2.12 – Блок модель реакції об'єкта регулювання

Ця поетапна реалізація дозволяє повністю змодельовати поведінку системи з ПІ-регулятором, а також надати можливість її візуального аналізу через НМІ-панель. Усі обчислення здійснюються в реальному часі, з урахуванням фізичних обмежень та інерційності об'єкта.

Після реалізації основної логіки ПІ-регулятора у середовищі TIA Portal було необхідно забезпечити зручну взаємодію користувача з системою та візуальний контроль за перебігом регулювання. Для цього була розроблена панель оператора на базі НМІ-пристрою Siemens KTP600 Basic PN, що дозволяє виводити актуальні значення технологічних параметрів, здійснювати введення уставки, запускати обчислення та спостерігати за динамікою зміни величин у режимі реального часу.

Інтерфейс користувача є невід'ємною частиною системи автоматичного керування та дозволяє оператору здійснювати базове управління процесом без необхідності втручання у внутрішню структуру програми контролера. Це, у свою чергу, підвищує зручність експлуатації, скорочує час реагування на зміну умов роботи та забезпечує прозорість у роботі всієї автоматизованої системи.

Для забезпечення інтеграції між системою керування, розробленою у контролері Siemens S7-1200, та панеллю оператора типу KTP600 Basic PN, була сформована таблиця НМІ-тегів. Теги використовуються для обміну інформацією між програмною частиною ПЛК та елементами візуалізації на НМІ-екрані.

Кожен тег на НМІ відповідає певній змінній у контролері та прив'язаний до відповідної адреси в області пам'яті (%M або %MD). Таким чином, значення з ПЛК передаються до графічного інтерфейсу в режимі реального часу, а також дозволяють здійснювати введення параметрів оператором.

Список основних НМІ-тегів включає:

- Setpoint — змінна типу Real, яка визначає уставку для системи. Значення вводиться оператором безпосередньо через інтерфейс панелі. Тег прив'язаний до PLC-адреси %MD0.
- Current — відображає змодельоване поточне значення струму (або

					КНУ.РБ.151.25.03.02.РІ	Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

аналогічного технологічного параметра). Значення оновлюється в реальному часі з контролера, прив'язка — %MD4.

- Error — значення похибки між уставкою і фактичним значенням. Виводиться на HMI як результат обчислення. Прив'язка — %MD8.
- P — відображає поточне значення пропорційної складової ПІ-регулятора (%MD24).
- I — показує інтегральну частину регулятора (%MD28), яка відповідає за накопичення похибки.
- Uout — вихідний сигнал регулятора, який є сумою складових P та I. Значення Uout використовується також для тренд-моніторингу. Прив'язка — %MD32.
- Start — булева змінна (Bool, %I0.0), яка активується при натисканні кнопки СТАРТ на HMI. Дає дозвіл на виконання регуляторної логіки.

Усі ці теги були додані у таблицю HMI-панелі через секцію HMI Tags, з обов'язковим зазначенням з'єднання з PLC, типу даних, прив'язки до відповідної змінної та видимості для Runtime (рис.2.13).

Name	Data type	Connection	PLC name	PLC tag	Address
Current	Real	HMI_Connectio...	PLC_1	Current	
Error	Real	HMI_Connectio...	PLC_1	Error	
I	Real	HMI_Connectio...	PLC_1	I	
P	Real	HMI_Connectio...	PLC_1	P	
Setpoint	Real	HMI_Connectio...	PLC_1	Setpoint	
Uout	Real	HMI_Connectio...	PLC_1	Uout	
Start(1)	Bool	HMI_Conne...	PLC_1	Start	
<Add new>					

Рисунок 2.13 – HMI tags

Завдяки грамотно спроектованим тегам забезпечено повноцінну інтеграцію між контролером і HMI, що дозволяє виводити технологічні параметри на екран, здійснювати керування та реалізовувати візуальний контроль якості регулювання.

Розроблений інтерфейс HMI (рис.2.14) забезпечує зручну взаємодію оператора з автоматизованою системою керування. На головному екрані панелі розміщено поля для введення уставки, виводу основних параметрів регулятора та відображення результатів у вигляді графіка.

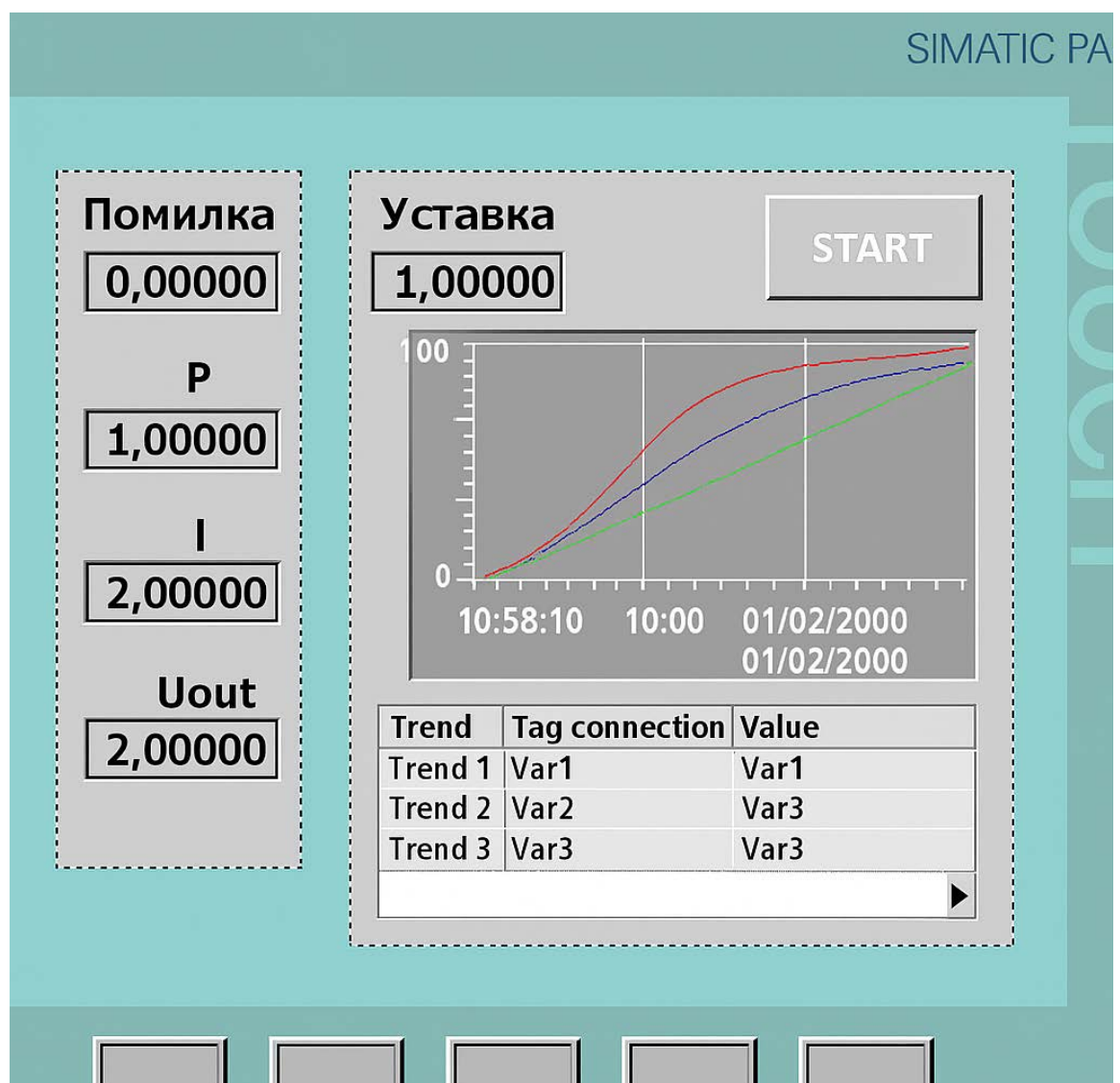


Рисунок 2.14 – Розроблена HMI PANEL

Поле «Уставка» дозволяє оператору задати бажане значення керованого параметра, наприклад витрату або швидкість подачі. Паралельно виводяться значення «Струм» (фактичне навантаження), «Похибка», «Пропорційна» та «Інтегральна» складові, а також «Сигнал керування» — загальний вихід ПП-регулятора.

Для запуску алгоритму передбачено кнопку «СТАРТ», яка активує виконання обчислень у контролері. У нижній частині інтерфейсу розміщено компонент «Trend View», який дозволяє у реальному часі спостерігати за зміною ключових параметрів: уставки, фактичного значення та виходу регулятора. Завдяки цьому оператор може швидко оцінити стабільність процесу, динаміку регулювання та якість роботи системи.

Інтерфейс побудований таким чином, щоб забезпечити максимальну наочність, простоту користування та мінімізувати ризик помилок у роботі персоналу.

2.6 Перспективи розширення функціональності системи автоматизації

Сучасна тенденція в автоматизації виробничих процесів передбачає перехід від класичних регуляторів до інтелектуальних систем, здатних адаптуватися до змін технологічного середовища, самостійно оптимізувати режими роботи та запобігати аварійним станам. У рамках розробленої системи автоматизованого регулювання подачі сировини до дробильного агрегату передбачається подальше розширення функціональних можливостей. Це включає застосування сучасних методів штучного інтелекту, прогнозової аналітики, підключення до SCADA-рівня, а також реалізацію діагностичних і адаптивних режимів керування.

Одним з напрямів вдосконалення є впровадження регулятора на основі нечіткої логіки (Fuzzy Logic Controller). Такий підхід дозволяє враховувати нечіткі лінгвістичні правила, що особливо ефективно у випадках, коли модель

					<i>КНУ.РБ.151.25.03.02.РІ</i>	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

об'єкта недостатньо точна або параметри швидко змінюються. Наприклад, при підвищенні навантаження та різкому зростанні похибки система автоматично зменшить подачу матеріалу. В умовах нестабільної вологості або зміни гранулометричного складу сировини це дозволить підтримувати рівномірну роботу дробарки без необхідності ручного втручання оператора.

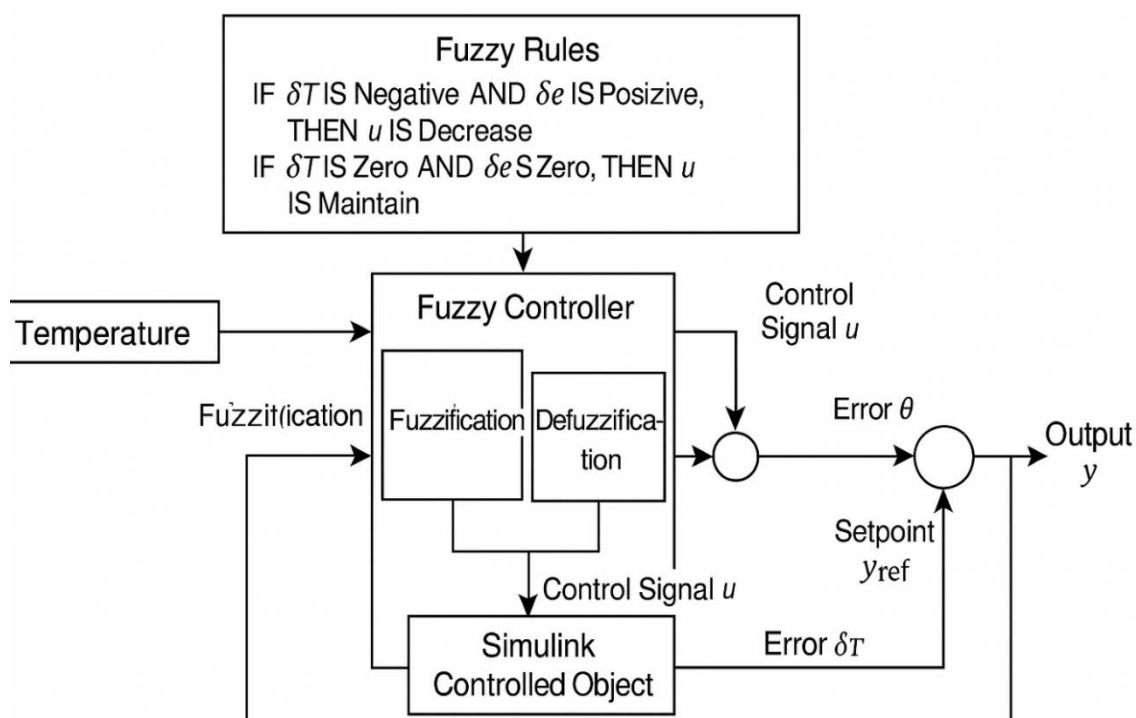


Рисунок – Приклад реалізації нечіткого регулятора у структурі керування (умовне зображення)

Рисунок 2.15 – Приклад реалізації нечіткого регулятора у структурі керування

Іншим перспективним напрямом є використання штучних нейронних мереж. Нейромережеві моделі здатні самостійно навчатися на основі історичних даних та здійснювати прогнозування навантаження, виявлення аномалій, а також адаптацію параметрів регулятора в режимі реального часу. Наприклад, якщо в системі протягом зміни спостерігається циклічне зростання навантаження, нейромережа зможе передбачити такий тренд і завчасно скоригувати параметри подачі. Це дозволить уникнути перевантаження

приводу, знизити витрати енергії та покращити плавність процесу.

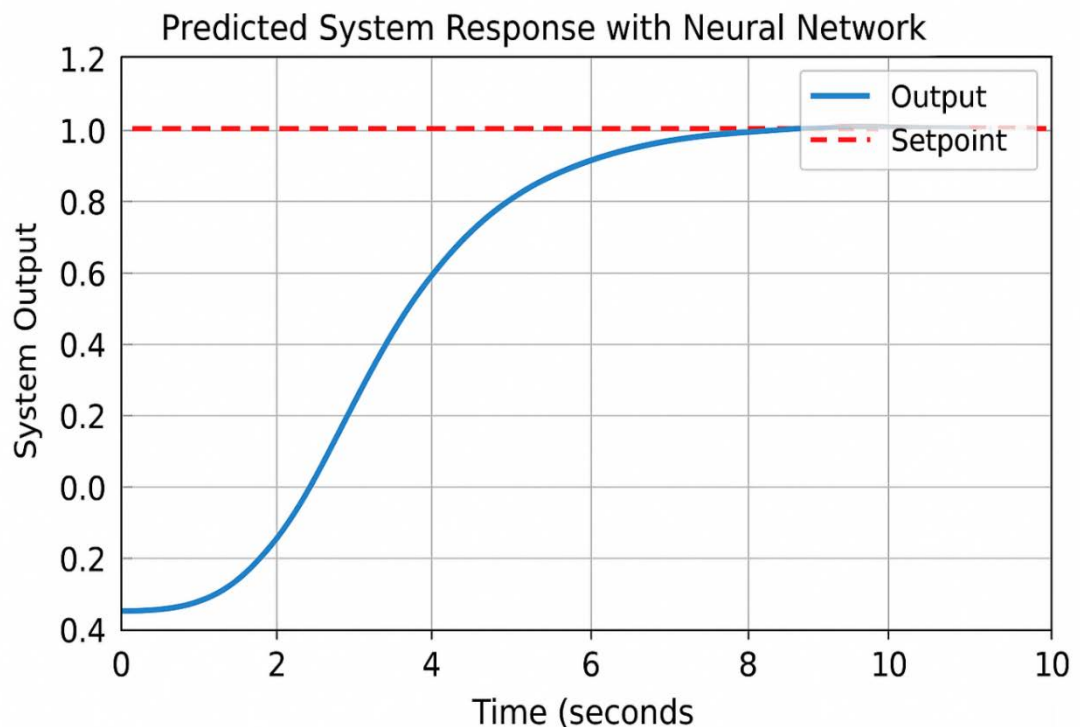


Рисунок 2.16 – Візуалізація прогнозованої реакції системи з неймережею

Наступним кроком розвитку є повна інтеграція системи у SCADA-рівень управління. Це дозволяє організувати централізований моніторинг, журналювання параметрів процесу, дистанційне керування та формування аналітичних звітів. Завдяки підтримці стандартів OPC UA можливе підключення до корпоративних систем обліку енергоспоживання, планування технічного обслуговування та оптимізації виробництва.

Ще одним напрямком удосконалення є впровадження концепції прогнозного технічного обслуговування (Predictive Maintenance). Завдяки збиранню даних з датчиків вібрації, струму, температури та навантаження можливо з високою точністю визначати знос вузлів живильника та дробарки. Наприклад, аналіз характеру зміни сигналу струму може вказати на початок

деформації механізму приводу або просідання амортизаторів. Завчасне попередження оператора дозволяє запобігти аварійній зупинці та планово виконати ремонт.

Таким чином, подальший розвиток автоматизованої системи керування подачею сировини може реалізовуватися за декількома напрямками: від адаптивного регулювання та прогнозової аналітики до повної цифрової інтеграції у SCADA/ERP-рівень. Це дозволить не лише підвищити ефективність дробильного вузла, а й зробити систему більш гнучкою, самонавчальною та енергоефективною відповідно до вимог індустрії 4.0.

Висновки до розділу:

У даному розділі було створено алгоритм розробленої системи, за яким реалізовано математичну модель ПІ-регулятора, адаптовану для керування процесом подачі сировини до дробильного агрегату. Модель була впроваджена у середовищі TIA Portal із використанням контролера Siemens S7-1200, а також програмної логіки, заснованої на послідовному обчисленні пропорційної та інтегральної складових з урахуванням зворотного зв'язку та обмежень вихідного сигналу.

Змодельовано поведінку регульованого об'єкта — інерційної системи, яка відображає характерну динаміку фактичного значення технологічного параметра у відповідь на зміни уставки. Для забезпечення зручності взаємодії з оператором було створено НМІ-панель із можливістю введення параметрів, запуску обчислень та візуалізації результатів у вигляді цифрових індикаторів і графіка тренду.

Запуск симуляції в середовищі PLCSIM підтвердив коректність реалізації алгоритму та дозволив візуально оцінити якість регулювання. Система забезпечує поступове наближення значення до уставки, стабільну поведінку, а також збереження коректної роботи за умов динамічної зміни параметрів.

Результати моделювання підтвердили працездатність розробленої схеми

					<i>КНУ.РБ.151.25.03.02.РІ</i>	Лист
						53
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

та її придатність для подальшого впровадження у реальні умови експлуатації. Сформована структура проекту є універсальною і може бути використана як основа для реалізації адаптивного регулятора або розширення системи з урахуванням фізичних сенсорів і виконавчих механізмів.

					КНУ.РБ.151.25.03.02.РІ	Лист
						54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було спроектовано, змодельовано та протестовано автоматизовану систему керування подачею сировини до дробильного агрегату з використанням сучасної апаратної та програмної платформи Siemens.

Важливим результатом роботи стало формування алгоритму роботи системи, що реалізує замкнутий контур ПІ-регулювання з урахуванням інерційності об'єкта. Алгоритм охоплює повний цикл обробки сигналів: обчислення похибки, генерація пропорційної та інтегральної складової, обмеження вихідного сигналу, моделювання реакції живильника. Завдяки цьому вдалося досягти стабільного регулювання навіть за змінних умов навантаження.

Основу системи становить програмований логічний контролер S7-1200, реалізація алгоритмічного забезпечення виконана у середовищі розробки TIA Portal із застосуванням мови LAD (Ladder Logic), що забезпечує наочність структури та зручність масштабування системи.

Об'єктом автоматизації обрано вібраційний живильник, що є частиною технологічної схеми попереднього дроблення сировини у гірничо-збагачувальному виробництві. У процесі роботи виконано аналіз характеристик подачі, динаміки навантаження дробарки та факторів, що впливають на стабільність процесу. Це дозволило сформулювати вимоги до майбутньої системи, зокрема: забезпечення рівномірного подавання матеріалу, зменшення коливань навантаження, наявність зворотного зв'язку, захист від перевантаження та зручний інтерфейс для оператора.

Алгоритм керування побудований на основі класичної моделі ПІ-регулятора з реалізацією замкнутого контуру регулювання, врахуванням.

					КНУ.РБ.151.25.03.00.00		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ		
Розроб.		Самоткан Я.А.					
Перевір.		Жосан А.А.					
Н. Контр.		Маринич І.А.					
Затверд.		Рубан С.А.			АКНТ		
					Лім.	Арк.	Аркуші
					у	55	3

інерційних властивостей об'єкта та застосуванням обмеження вихідного сигналу. Всі розрахункові блоки структуровано поетапно, з розділенням обчислень похибки, пропорційної та інтегральної складових, а також побудовою моделі реакції системи у вигляді простого аперіодичного ланцюга. Програмна частина успішно протестована за допомогою симуляційного пакета PLCSIM, що дозволило переконатись у працездатності логіки та її адекватній поведінці при зміні уставки або умов роботи

Важливою складовою проєкту є створення зручного та інформативного HMI-інтерфейсу для взаємодії з оператором. Інтерфейс включає можливість введення уставки, моніторинг значень ключових змінних (струм, похибка, сигнал керування, складові регулятора), а також графічне представлення процесу у вигляді тренд-графіка. Це дозволяє оператору не лише керувати процесом у реальному часі, а й здійснювати візуальний контроль стабільності та динаміки системи.

Результати роботи продемонстрували, що використання типових апаратно-програмних рішень на базі Siemens є ефективним для побудови локальних систем автоматизації з розширеними функціями регулювання. Запропонована система здатна забезпечити стабільне, енергоефективне та адаптивне керування подачею сировини до дробильного обладнання. Завдяки модульності архітектури, вона легко інтегрується у склад існуючих технологічних ліній, може бути підключена до SCADA-системи верхнього рівня та адаптована до особливостей різних підприємств.

Крім того, побудована система має потенціал для подальшого вдосконалення, зокрема: впровадження адаптивних регуляторів із самоналаштуванням, використання методів нечіткої логіки або штучних нейронних мереж для підвищення точності керування в умовах змінних вхідних характеристик. Отже, розроблений програмно-апаратний комплекс має не лише прикладну цінність для автоматизації процесу дроблення на гірничо-збагачувальних підприємствах, а й є платформою для подальших досліджень та інженерних розробок у сфері інтелектуального керування

					КНУ.РБ.151.25.03.00.ПЗ	Лист
						56
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

технологічними процесами.

Таким чином, усі поставлені цілі та завдання роботи були виконані повною мірою. Розроблена система підтвердила свою ефективність у середовищі моделювання та може бути впроваджена на практиці для підвищення технологічної дисципліни, зниження простоїв і підвищення економічної результативності виробничих процесів.

					КНУ.РБ.151.25.03.00.ПЗ	Лист
						57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пономарьов В. С., Пашкевич А. І. Автоматизація технологічних процесів. К. : Либідь, 2020. 392 с.
2. Siemens AG. SIMATIC S7-1200 Programmable controller. System Manual. Edition 12/2022. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://support.industry.siemens.com>
3. Ковальчук І. О., Бесєдін В. В. Системи автоматизованого керування технологічними процесами. Харків : НТУ "ХПІ", 2021. 260 с.
4. ДСТУ ISO 12100:2021. Безпечність машин. Загальні принципи проєктування. Оцінка ризику та зменшення ризику. Національний стандарт України.
5. Шевченко В. І. Моделювання систем автоматичного керування в середовищі TIA Portal : навч. посіб. К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 112 с.
6. Рудий А. О., Ткаченко П. М. Сучасні SCADA-системи та засоби HMI. Дніпро : Наука і освіта, 2019. 144 с.
7. Плеханов С. М., Тихонов Є. М. Мікропроцесорна техніка та програмування ПЛК. Київ : Кондор, 2018. 230 с.
8. IEC 61131-3:2013. Programmable Controllers – Part 3: Programming Languages. International Electrotechnical Commission.
9. Siemens Industry Software. TIA Portal: Getting Started Guide. SIMATIC STEP 7 and WinCC V17. 2022. [Електронний ресурс].
10. Струк Н. І., Яковенко Ю. В. Інтелектуальні системи керування технологічними процесами. Кривий Ріг : КНУ, 2021. 156 с.
11. Чеканін В. Г. Системи автоматичного керування з ПІ-регуляторами. Львів : Видавництво ЛНТУ, 2020. 178 с.
12. Офіційна документація Siemens: SIMATIC HMI Panels — Configuration Manual. <https://support.industry.siemens.com>

					<i>КНУ.РБ.151.25.03.00.00</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Самоткан Я.А.			СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ		
Перевір.		Жосан А.А.					
Н. Контр.		Жосан А.А.					
Затверд.		Жосан А.А.					
					Лім.	Арк.	Аркуші
					у	58	3
					АКНТ		

13. Узлов Ю. В., Сімкін О. І. АСУ тракту середнього та мілкового подрібнення залізної руди. Автоматизація та комп'ютерні-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку. Матеріали Секція 1. Всеукраїнська наук.-практ. інтернет-конф. м. Черкаси, 11–17 березня 2024 р. С. 55–56. URL: <https://conference.ikto.net/public/archive/2024.html>

14. Автоматизація виробничих процесів : підручник / І. В. Ельперін, О. М. Пупена, В. М. Сідлецький, С. М. Швед. 2-ге вид., випр. К. : Ліра-К, 2021. 378 с.

15. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum Settings for Automatic Controllers. Transactions of the ASME. 1942.

16. Борисов Ю. М., Тітов В. В. Теорія автоматичного керування. Частина І. К. : НУХТ, 2019.

17. Немцов А. І. Автоматизація гірничо-збагачувальних фабрик. Дніпро : Техніка, 2018.

18. Kellenberger D. Introduction to PID Control. Control Engineering. 2021.

19. Мазур І. І., Коваль А. В. Вібраційне подрібнення та живильники: конструкція та автоматизація. Дніпро : НГУ, 2020.

20. Ogata K. Modern Control Engineering. 5th ed. Pearson Education, 2010.

21. Дудкін І. В., Зіненко О. В. Промислові контролери: принципи програмування. Харків : УПА, 2020.

22. Thomas R. PLC Programming for Industrial Automation. Springer, 2022.

23. Скляр В. І. Методи проектування систем автоматичного керування. К. : Ліра-К, 2019.

24. Левченко А. Г. Основи автоматизації гірничого виробництва. Кривий Ріг : КНУ, 2021.

25. Вишневецький І. В. Програмовані логічні контролери та середовище TIA Portal. Харків : ХНУРЕ, 2020.

26. ASTROM K. J., HAGGLUND T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. ISA, 2006.

27. Wescott T. Applied Control Theory for Embedded Systems. Newnes, 2011.

28. ГОСТ 24.104-85. Автоматизовані системи. Основні положення.

					КНУ.РБ.151.25.03.00.ПЗ	Лист
						59
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

29. ГОСТ 34.602-89. Технічне проєктування автоматизованих систем.
30. Siemens. Getting started with SIMATIC WinCC (TIA Portal).
<https://support.industry.siemens.com>
31. Морозов Д. І. Системи керування з регуляторами типу П, ПІ, ПІД. Київ : НТУУ, 2017.
32. Винокуров Є. С. Контроль і автоматизація гірничих процесів. Дніпро : УГХТУ, 2016.
33. Siemens Industry. Best practices for controlling analog processes with S7-1200. 2021.
34. MathWorks. Control System Toolbox Documentation.
<https://www.mathworks.com>
35. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавру для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2019. 50 с.
36. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).
37. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).
38. 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)
39. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація)

ДОДАТОК А

NETWORK 1 // Ініціалізація

Start := HMI_Start_Button;

NETWORK 2 // Обчислення похибки

Error := Setpoint - Current;

NETWORK 3 // Пропорційна дія

P := Kp * Error;

NETWORK 4 // Інтегральна дія

I := I_prev + Ki * Error * T;

I_prev := I;

NETWORK 5 // Вихід регулятора

Uout := P + I;

NETWORK 6 // Обмеження виходу

IF Uout > 1.0 THEN Uout := 1.0;

IF Uout < 0.0 THEN Uout := 0.0;

NETWORK 7 // Модель об'єкта

Current := Current + (Uout - Current) * Alpha;

NETWORK 8 // Сигнали HMI

HMI_Current := Current;

HMI_Uout := Uout;

HMI_Error := Error;

ДОДАТОК В

% Параметри об'єкта та ПІ-регулятора

$K_p = 2.5;$

$K_i = 0.8;$

$T = 0.1;$

$\text{Alpha} = 0.05;$

$\text{Setpoint} = 1.0;$

$\text{Current} = 0;$

$I = 0;$

$\text{time} = 0:T:20;$

% Ініціалізація векторів

$\text{Uout} = \text{zeros}(\text{size}(\text{time}));$

$\text{Error} = \text{zeros}(\text{size}(\text{time}));$

$y = \text{zeros}(\text{size}(\text{time}));$

for $k = 2:\text{length}(\text{time})$

$\text{Error}(k) = \text{Setpoint} - \text{Current};$

$P = K_p * \text{Error}(k);$

$I = I + K_i * \text{Error}(k) * T;$

$\text{Uout}(k) = P + I;$

% Обмеження

$\text{Uout}(k) = \min(\max(\text{Uout}(k), 0), 1);$

% Модель об'єкта

$\text{Current} = \text{Current} + (\text{Uout}(k) - \text{Current}) * \text{Alpha};$

$y(k) = \text{Current};$

end

% Побудова графіка

```
plot(time, y); grid on;  
title('Система з ПІ-регулятором');  
xlabel('Час (с)'); ylabel('Вихід');
```

ДОДАТОК С

% Приклад використання нейромережі для прогнозування навантаження

% Створення синтетичних даних

```
inputs = (0:0.1:10)';
```

```
targets = sin(inputs) + 0.1*randn(size(inputs));
```

% Створення мережі

```
net = feedforwardnet(10); % одна прихована шара з 10 нейронів
```

% Навчання мережі

```
net = train(net, inputs', targets');
```

% Прогнозування

```
outputs = net(inputs');
```

% Відображення результату

```
plot(inputs, targets, 'b', inputs, outputs, 'r--');
```

```
legend('Реальні значення', 'Прогноз');
```

```
title('Прогнозування навантаження нейромережею');
```