

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеню вищої освіти – магістр
за освітньо-професійною програмою
«Киберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті»

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

тема роботи:

***«Адаптивне керування процесом розмагнічування залізородної
пультни»***

Виконав ст. гр. ЗАКІТР-23м. _____ Божок Д. О.

Керівник _____ Рубан С. А.

Нормоконтроль _____ Маринич І. А.

Завідувач кафедри _____ Рубан С. А.

Кривий Ріг – 2024

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Магістр

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри: к.т.н. Рубан С.А.

« 5 » липня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

студентові групи ЗАКІТР-23м. Божок Дмитру Олександровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Адаптивне керування процесом розмагнічування залізородної пульпи»

затверджено наказом по університету № 595с від 04.07.2024 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 01.12.2024 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 90с., додатки, презентація у Microsoft PowerPoint (16 слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-3

доц. Рубан С. А.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>10.07.24</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>15.07.24</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>18.08.24</i>
4	<i>Розділ 3</i>	<i>19.09.24</i>
5	<i>Висновки</i>	<i>15.10.24</i>
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>20.11.24</i>
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>28.11.24</i>
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>01.12.24</i>

6. Дата видачі завдання: 29.06.2024р.

Керівник _____ /Рубан С.А./

7. Запевнення: Я, Божок Дмитро Олександрович, 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.

Здобувач _____ / Божок Д. О./

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеню вищої освіти магістр за освітньо-професійною програмою «Кіберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті» зі спеціальності 174 – Автоматизація, комп'ютерно – інтегровані технології та робототехніка – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2024.

Об'єктом дослідження є процес розмагнічування залізорудної пульпи в умовах гірничо-збагачувальних комбінатів, що включає взаємодію магнітного поля з пульпою для зменшення остаточного намагнічування часток перед подальшими стадіями збагачення.

Метою роботи є розробка адаптивної системи керування процесом розмагнічування залізорудної пульпи, яка підвищить ефективність технологічного процесу та знизить енергетичні витрати шляхом динамічного налаштування параметрів розмагнічування в реальному часі.

У першому розділі проведено аналіз існуючих технічних рішень для процесу розмагнічування пульпи, досліджено методи автоматизації та системи керування, які застосовуються в сучасній промисловості. Визначено недоліки існуючих систем і обґрунтовано необхідність їх вдосконалення.

У другому розділі розроблено модель процесу розмагнічування, визначено основні принципи функціонування адаптивної системи керування та сформульовано вимоги до апаратного і програмного забезпечення. Використано методи ідентифікації об'єкта керування та принципи нечіткої логіки для побудови системи керування. Виконано вибір апаратного забезпечення (датчиків, контролерів та виконавчих механізмів), розроблено алгоритми збору.

У третьому розділі розроблено структурну, функціональну та принципову схему, розроблено програмне забезпечення для контролера та серверного ПК.

АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ, РОЗМАГНІЧУВАННЯ, ЗАЛІЗОРУДНА ПУЛЬПА, НЕЧІТКА ЛОГІКА, НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ,

ANNOTATION

Qualification Work for Obtaining a Master's Degree in the Educational and Professional Program "Cyber-Physical Systems in Industry, Business, and Transport" Specializing in 174 – Automation, Computer-Integrated Technologies, and Robotics – Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, 2024.

The research object is the process of demagnetizing iron ore pulp in the conditions of mining and processing plants, which includes the interaction of the magnetic field with the pulp to reduce the residual magnetization of particles before further stages of enrichment.

The aim of the work is to develop an adaptive control system for the process of demagnetizing iron ore pulp, which will increase the efficiency of the technological process and reduce energy costs by dynamically adjusting demagnetization parameters in real time.

In the first chapter, an analysis of existing technical solutions for the pulp demagnetization process is conducted. Methods of automation and control systems used in modern industry are studied. The shortcomings of existing systems are identified, and the necessity of their improvement is justified.

In the second chapter, a model of the demagnetization process is developed, the main principles of the adaptive control system's operation are defined, and requirements for hardware and software are formulated. Methods of object identification and principles of fuzzy logic are used to build the control system. Selection of hardware (sensors, controllers, and actuators) is carried out, and data acquisition algorithms are developed.

In the third chapter, the structural, functional, and schematic diagrams are developed, and software for the controller and server PC is created.

ADAPTIVE CONTROL, DEMAGNETIZATION, IRON ORE PULP, FUZZY LOGIC, NEURAL NETWORKS, ENERGY EFFICIENCY, INDUSTRIAL AUTOMATION.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	4
ЗМІСТ	6
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ ЗАВДАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ РОЗМАГНІЧУВАННЯ ЗАЛІЗОРУДНОЇ ПУЛЬПИ	14
1.1 Характеристика технологічного процесу розмагнічування залізорудної пульпи в умовах ПрАТ Центральний ГЗК	14
1.2 Аналіз існуючих рішень з розмагнічуванню залізорудної пульпи	16
1.2.1 Система розмагнічування в умовах ПрАТ «ЦГЗК»	16
1.2.2 Промисловий розмагнічувач 176А-СЭ.....	19
1.2.3 Прототип, який розроблений Національним технічний університетом «Дніпровська політехніка»	20
1.3 Обґрунтування необхідності вдосконалення системи керування процесом розмагнічування залізорудної пульпи.....	21
1.4 Висновки до розділу	24
2. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ РОЗМАГНІЧУВАННЯ ЗАЛІЗОРУДНОЇ ПУЛЬПИ	27
2.1 Математичне забезпечення системи керування процесом розмагнічування залізорудної пульпи	27
2.1.1 Ідентифікація об'єкта керування.....	27
2.2 Розробка алгоритму роботи системи адаптивного керування розмагнічуванням залізорудної пульпи.....	29
2.2.1 Результати моделювання системи в Матлаб.....	32
2.3 Технічне забезпечення системи керування процесом розмагнічування залізорудної пульпи	39
2.3.1 Обґрунтування структури комплексу технічних засобів для реалізації системи.....	39
2.3.2 Вибір датчиків та первинних перетворювачів.....	40
2.3.3 Вибір та обґрунтування характеристик виконавчих механізмів	44
2.3.4 Вибір промислового контролера та засобів введення-виведення.....	48
2.3.5 Вибір промислового серверного ПК.....	50
2.4 Висновки до розділу	52

3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА АПРОБАЦІЯ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ РОЗМАГНІЧУВАННЯ ЗАЛІЗОРУДНОЇ ПУЛЬПИ	54
3.1 Структурна схема проекту	54
3.2 Функціональна схема.....	57
3.3 Принципова схема	60
3.4 Розробка програмного забезпечення системи адаптивного керування процесом розмагнічування залізородної пульпи.....	62
3.4.1 Реалізація алгоритмів керування у програмного забезпеченні ТІА Portal V16.0	65
3.4.2 Розробка ПЗ для серверного ПК.....	72
3.5 Висновки до розділу	83
ВИСНОВКИ.....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	86

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСУТП – автоматизована система управління технологічним процесом.

АРМ – автоматизоване робоче місце.

БД – база даних.

ПЛК – програмований логічний контролер.

САУ – система автоматичного управління.

ФСА – функціональна схема автоматизації

ВСТУП

Актуальність теми

Україна займає одне з провідних місць у світі за запасами залізних руд і володіє потужною гірничорудною промисловістю. Одним із ключових завдань цієї галузі є виробництво високоякісного залізорудного концентрату та окатишів. Жорстка конкуренція на світовому ринку сировини вимагає впровадження невідкладних заходів для покращення якості залізорудних концентратів, одночасно знижуючи їхню собівартість на українських гірничозбагачувальних комбінатах.

Зберегти конкурентоспроможність на світовому ринку українські гірничозбагачувальні комбінати можуть лише за умови вдосконалення виробництва концентрату, який містить 68–70% заліза та не перевищує 2,5% кремнезему. Підвищення якості магнетитових концентратів може бути досягнуте за рахунок видалення з поверхні мінералів налиплих шламових частинок і руйнування техногенних зростків.

Дослідження процесів розмагнічування тонкодисперсних феромагнітних частинок проводяться так само давно, як і вивчення їхнього магнітного розділення [1]. На сьогодні в процесах збагачення застосовуються апарати для розмагнічування, що працюють у змінному магнітному полі промислової частоти 50 Гц [2].

У такому змінному полі магнітні флокули, що утворюють ланцюжки частинок, обертаються, слідуючи за вектором зовнішнього магнітного поля, що сприяє зменшенню їхніх розмірів. Ефективність впливу поля оцінюється за покращенням показників розділення порівняно з контрольними зразками, які не піддавалися дії змінного поля.

Розміри агрегатів частинок (флокул) визначаються методом фотозйомки або оцінюються візуально у прозорій ванні сепаратора, через яку проходить водний потік із невеликою кількістю частинок. Такий підхід дозволяє

безпосередньо спостерігати за поведінкою агрегатів і аналізувати їхні розміри [1].

У роботі [3] було продемонстровано можливість отримання суперконцентрату шляхом застосування таких технологічних прийомів: дефлокуляції у розмагнічувальних апаратах або механічного руйнування флокул за допомогою розведення пульпи водою під тиском перед другим етапом збагачення при зниженій напруженості магнітного поля сепараторів (31–40 кА/м). Подальша очистка хвостів здійснювалася на сепараторах із звичайною або підвищеною напруженістю поля.

Крім того, було введено операцію знешламлювання на початку технологічного процесу, що дало найбільший ефект для руд із високим утворенням шламів. Доведення концентрату проводилося за допомогою гідрокласифікації та глибокого знешламлювання.

Ця технологія була успішно відпрацьована в промислових умовах, у результаті чого отримано партію високоякісного концентрату з масовою часткою кремнезему менше 1% [3].

У сучасних умовах розвитку автоматизації та кіберфізичних систем необхідно автоматизувати процес розмагнічування залізозмісної руди і це стане одним із найбільш перспективних напрямків удосконалення виробничих систем. Зокрема, застосування інтелектуальних алгоритмів, що використовують методи нечіткої логіки та нейронних мереж, дозволяє динамічно змінювати параметри керування залежно від змінних характеристик технологічних середовищ. Це дозволяє підвищити якість і стабільність процесу розмагнічування, забезпечуючи ефективне використання енергетичних та матеріальних ресурсів.

Стан досліджуваної проблеми

Наукова література пропонує низку підходів до автоматизації процесу розмагнічування пульпи, але більшість з них базується на застосуванні традиційних жорстких алгоритмів, які не враховують динамічні зміни параметрів пульпи. У роботах [5], акцентується на необхідності автоматизованого керування процесами, однак запропоновані рішення часто орієнтовані на стандартні умови експлуатації обладнання. Проте в реальних

виробничих умовах змінність параметрів пульпи є суттєвим фактором, який впливає на якість розмагнічування та потребує нових підходів до керування процесом. [6], [7].

Зокрема, дослідження застосування методів нечіткої логіки та штучних нейронних мереж для адаптивного керування технологічними процесами отримали значну увагу в роботах закордонних дослідників. Праці таких авторів, пропонують використання інтелектуальних систем для динамічного регулювання процесів, але ці дослідження орієнтовані на інші галузі промисловості, і тематика розмагнічування пульпи лишається недостатньо вивченою. У вітчизняній літературі [8], [9] теми адаптивного керування саме процесом розмагнічування пульпи не висвітлені повною мірою, що вказує на необхідність подальшого дослідження цієї проблеми в контексті гірничо-збагачувальної промисловості.

Отже, аналіз наявних наукових публікацій свідчить про те, що на сьогодні існує потреба в розробці адаптивної системи керування, яка б враховувала динамічні зміни параметрів пульпи та забезпечувала оптимальні умови для процесу розмагнічування. Недостатня кількість досліджень у цій галузі підтверджує актуальність обраної теми і необхідність подальшого вивчення цього питання.

Метою роботи є розробка та впровадження адаптивної системи керування процесом розмагнічування залізородної пульпи, яка підвищить ефективність процесу та знизить енергетичні витрати шляхом динамічного налаштування параметрів розмагнічування залежно від змінних характеристик пульпи.

Для досягнення цієї мети були визначені такі завдання дослідження:

1. Провести аналіз існуючих систем розмагнічування та визначити їх недоліки в умовах змінних параметрів пульпи.

2. Розробити модель процесу розмагнічування пульпи, що враховує ключові технологічні параметри, такі як щільність, витрати пульпи та сила струму, який протікає через котушку розмагнічування.

3. Створити адаптивний алгоритм керування, що базується на нечіткій логіці та методах машинного навчання, для динамічної зміни параметрів процесу в режимі реального часу.

4. Провести моделювання процесу розмагнічування з використанням розробленого алгоритму та оцінити ефективність керування в умовах зміни технологічних параметрів.

Об'єктом дослідження є процес розмагнічування залізородної пульпи в умовах гірничо-збагачувальних комбінатів, який включає вплив магнітного поля на залізовмісні частки пульпи для їх ефективного розмагнічування перед подальшими стадіями збагачення. Особлива увага приділяється динамічним характеристикам процесу, які залежать від складу, щільності та швидкості потоку пульпи, а також від параметрів магнітного поля.

Предметом дослідження є адаптивні методи керування процесом розмагнічування залізородної пульпи, що базуються на використанні нечіткої логіки та нейронних мереж для динамічного налаштування параметрів магнітного поля і швидкості потоку пульпи з метою підвищення ефективності процесу та зниження енергетичних витрат.

Методи дослідження, що використовуються в роботі, включають:

Математичне моделювання – для побудови моделі процесу розмагнічування залізородної пульпи, що враховує фізичні параметри пульпи, інтенсивність магнітного поля та взаємодію між ними.

Методи нечіткої логіки – для розробки адаптивного алгоритму керування, який дозволяє враховувати зміни в технологічних параметрах пульпи та забезпечувати гнучке керування процесом.

Нейронні мережі – для прогнозування параметрів системи розмагнічування та оптимізації керування в умовах зміни характеристик пульпи в реальному часі.

Методи симуляційного моделювання – для тестування та верифікації розроблених алгоритмів у середовищі MATLAB/Simulink, що дозволить оцінити ефективність адаптивного керування за різних умов.

Експериментальні методи – для перевірки адекватності математичних моделей та алгоритмів керування в реальних промислових умовах на гірничо-

збагачувальному комбінаті, з використанням датчиків для збору даних про стан пульпи і магнітне поле.

Статистичний аналіз – для обробки отриманих даних з метою оцінки ефективності системи керування, порівняння результатів з існуючими методами та оптимізації алгоритму.

Практичне значення дослідження полягає в розробці та впровадженні адаптивної системи керування процесом розмагнічування залізородної пульпи, що дозволить підвищити ефективність технологічного процесу на гірничо-збагачувальних комбінатах. Основними аспектами практичного значення є:

1. Зниження енергетичних витрат – завдяки оптимізації параметрів магнітного поля та швидкості потоку пульпи в реальному часі, система забезпечить мінімізацію споживання енергії без зниження ефективності розмагнічування.

2. Підвищення якості продукції – адаптивне керування дозволить забезпечити стабільне та якісне видалення не магнітних часток з пульпи, що позитивно вплине на подальші етапи збагачення і якість кінцевого продукту.

3. Гнучкість та адаптивність – система автоматично підлаштовуватиметься під зміни фізичних параметрів пульпи, що дозволить підтримувати оптимальні умови розмагнічування навіть при зміні складу сировини.

4. Можливість впровадження на діючих виробництвах – розроблена система керування може бути інтегрована в існуючі автоматизовані системи гірничо-збагачувальних комбінатів, що спростить її впровадження та зменшить витрати на модернізацію обладнання.

5. Підвищення надійності та стабільності процесу – завдяки використанню інтелектуальних алгоритмів керування зменшуються коливання параметрів процесу, що підвищує його стійкість та зменшує ризик технологічних збоїв.

6. Економічна ефективність – впровадження системи дозволить скоротити витрати на енергоресурси, зменшити втрати через неефективне розмагнічування та покращити загальні економічні показники роботи підприємства.

РОЗДІЛ 1

1. АНАЛІЗ ЗАВДАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ РОЗМАГНІЧУВАННЯ ЗАЛІЗОРУДНОЇ ПУЛЬПИ

1.1 Характеристика технологічного процесу розмагнічування залізорудної пульпи в умовах ПрАТ Центральний ГЗК

Процес розмагнічування залізорудної пульпи є одним з ключових етапів у технології збагачення руд на гірничо-збагачувальних комбінатах (ГЗК), зокрема на ПрАТ «Центральний ГЗК» (Рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – ПрАТ «ЦГЗК»

Після стадії подрібнення та первинної магнітної сепарації частки залізорудної пульпи зберігають залишкову магнітну індукцію, що може ускладнити подальші етапи збагачення та знизити якість кінцевого продукту. Тому процес розмагнічування є важливим для забезпечення ефективності подальшої переробки та зниження втрат корисних компонентів руди.

Концентрат корпусу збагачення технологічних секцій №8–17 гідротранспортом надходить в відділення зневоднення концентрату. Пульпа надходить на 5–ти струменевий пульпорозподільник, потім чотири потоки мають можливість розподілятися на магнітні дешламатори типу МД–12 №11, 12, 21, 22 і один потік в двоструменевий пульпорозподільник на відм. + 2,400 в осях 31–32.

При надходженні обсягу концентрату понад пропускної здатності магнітних дешламаторів типу МД–12 №11, 12, 21, 22, даний обсяг з пульпорозподільника, минаючи знешламлення, надходить в двоструменевий пульпорозподільник і далі в зумпф насосів 1–4 «К» (концентратний).

Після дешламаторів згущений продукт надходить в пульпорозподільник на відм. +0,100, в осях 32–33 звідки двома потоками надходить в зумпф насосів 1–2«К» та 3–4«К», розділений на дві частини. Концентрат із зумпфа насосів 1–2«К» та 3–4«К» насосами по двом окремим трубопроводам, на кожному з яких встановлена розмагнічувальна котушка, надходить на два шестиструменевих пульпорозподільника, які змонтовані на відмітці +12,950, в осях 40–43. Кожен пульпорозподільник живить шість грохотів тонкого грохочення.

На грохотах Derrick 2SG48–60R–5STKStackSizer™ концентрат секцій ділиться на підрешітний (ПР) і надрешітний (НР) продукти, показаний на (Рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Derrick 2SG48–60R–5STKStackSizer

Надрешітний продукт грохотів є промпродуктом, який прямує в зумпф №1 звідки насосами типу 10/8MV-II-(6)-705L-100-PET перекачується в пульпорозподільник розташований на секції №18 корпусу збагачення (відм. + 2,200, осі 94-95).

Підрешітний продукт надходить в зумпф №8 звідки насосами тип 10/8MV-II-(6)-705L-100-PET подається в трьохструменевий пульпорозподільник FD, в осях 35-36, з якого основний потік прямує в магнітний дешламатор типу МД-12 №31, а два резервних потоки – в магнітні дешламатори типу МД-12 №21 і №11 для згущення та подальшого фільтрування.

На даний момент на ПрАТ «ЦГЗК» автоматизація керування котушкою розмагнічування не використовується.

1.2 Аналіз існуючих рішень з розмагнічуванню залізородної пульпи

1.2.1 Система розмагнічування в умовах ПрАТ «ЦГЗК»

Процес розмагнічування залізородної пульпи є важливим етапом у технологічному циклі збагачення залізних руд, оскільки дозволяє усунути залишкові магнітні властивості матеріалу після магнітної сепарації. Цей етап необхідний для забезпечення стабільної роботи подальшого обладнання, такого як вібраційні сита, флотаційні машини та гідроциклонів, оскільки наявність залишкових магнітних властивостей може викликати агломерацію часток і негативно вплинути на ефективність збагачення.

Умови роботи ПрАТ «Центральний ГЗК» характеризуються високою інтенсивністю обробки руди та змінністю її фізико-хімічних властивостей. Залізородна пульпа, що подається на розмагнічування, має значний вміст магнетиту, який залишається на частинках після первинного магнітного збагачення. Основним обладнанням для розмагнічування є котушка розмагнічування, що створює змінне магнітне поле, яке дозволяє розмагнічувати частки матеріалу шляхом динамічного перемагнічування.

У поточних умовах автоматика процесу розмагнічування на підприємстві відсутня. Основне обладнання для розмагнічування – котушка Eriez, показана на (Рис. 1.3), яка працює в парі з пристроєм плавного пуску «VMX-PFE-18». Цей пристрій живиться від стандартної трифазної мережі напругою 380 В.



Рисунок 1.3 – Eriez 12DRW

Пристрій «VMX-PFE-18», показаний на (Рис. 1.4), є класичним рішенням для забезпечення стабільного запуску електромагнітної котушки, що працює в умовах підвищених навантажень. Основна функція пристрою – забезпечення поступового підвищення напруги на котушці, щоб уникнути пускових струмів, які можуть пошкодити обмотки або викликати збої в роботі енергетичної системи підприємства.



Рисунок 1.4 – VMX-PFE-18

Параметри роботи пристрою задаються вручну, без можливості динамічного контролю залежно від змін технологічного процесу. Відсутність зворотного зв'язку від датчиків густини, витрат пульпи або температури викликає значні проблеми в стабільності роботи системи.

Основні недоліки існуючої системи:

1. *Відсутність автоматизації.* Поточний стан системи передбачає виключно ручне керування параметрами, що унеможлиблює оперативне реагування на зміни характеристик пульпи, таких як густина або вміст магнетиту.

2. *Фіксовані параметри роботи.* Налаштування струму та напруги для котушки виконується один раз на основі середніх значень технологічних параметрів, що не враховує їх динамічну зміну.

3. *Нестабільність роботи.* У випадках зміни технологічних параметрів, наприклад, збільшення густини пульпи, котушка може не забезпечувати достатнього рівня розмагнічування, що призводить до зниження якості кінцевого продукту.

4. *Високе енергоспоживання.* Відсутність адаптивного керування викликає перевитрату енергії через роботу котушки на максимальних параметрах, навіть якщо це не є необхідним.

Виробничі вимоги до системи розмагнічування:

1. *Стабільність процесу.* Забезпечення постійного рівня розмагнічування пульпи незалежно від змін її параметрів.

2. *Енергоефективність.* Мінімізація енергоспоживання без втрати ефективності розмагнічування.

3. *Гнучкість налаштування.* Можливість автоматичного регулювання параметрів роботи котушки залежно від змін густини, витрати та температури пульпи.

4. *Мінімізація людського фактору.* Впровадження автоматичних алгоритмів, що дозволяють зменшити залежність процесу від кваліфікації оператора.

Поточна система розмагнічування залізорудної пульпи на ПрАТ «Центральний ГЗК» базується на застарілих принципах керування, що ускладнює забезпечення стабільності процесу та ефективного використання енергоресурсів. Це обґрунтовує необхідність модернізації системи шляхом впровадження адаптивного керування з використанням сучасних методів автоматизації та кіберфізичних технологій, що стане основою для подальших досліджень у цій магістерській роботі.

1.2.2 Промисловий розмагнічувач 176А-СЭ

Принцип роботи цього апарата полягає в наступному. Навколо труби з немагнітного матеріалу, яка призначена для пропускання пульпи з визначеною витратою, розташована електрична обмотка. Обмотка секційована таким чином, що напруженість магнітного поля змінюється по довжині труби, наприклад, у 14 секціях, де кількість витків зменшується послідовно, що забезпечує зміну діаметра секцій котушок.

Труба може бути виготовлена з металу з високим питомим опором для зменшення вихрових струмів або з пластику. У результаті магнітне поле поступово зменшується від напруженості насичення до нуля, що задовольняє одну з умов розмагнічування. Водночас умова нерухомості частинок не виконується.

Дослідження застосування обробки магнетитової пульпи змінним магнітним полем перед гідроциклонуванням показали, що ефективність класифікації може зрости до 20% зі збільшенням ступеня розмагнічування до 90%.

Даний тип розмагнічувача не має системи зворотного зв'язку, не має адаптивної системи регулювання параметрів магнітного поля, тому використовується в якості статичного пристрою розмагнічування.

Даний пристрій зображено на (Рис. 1.5).

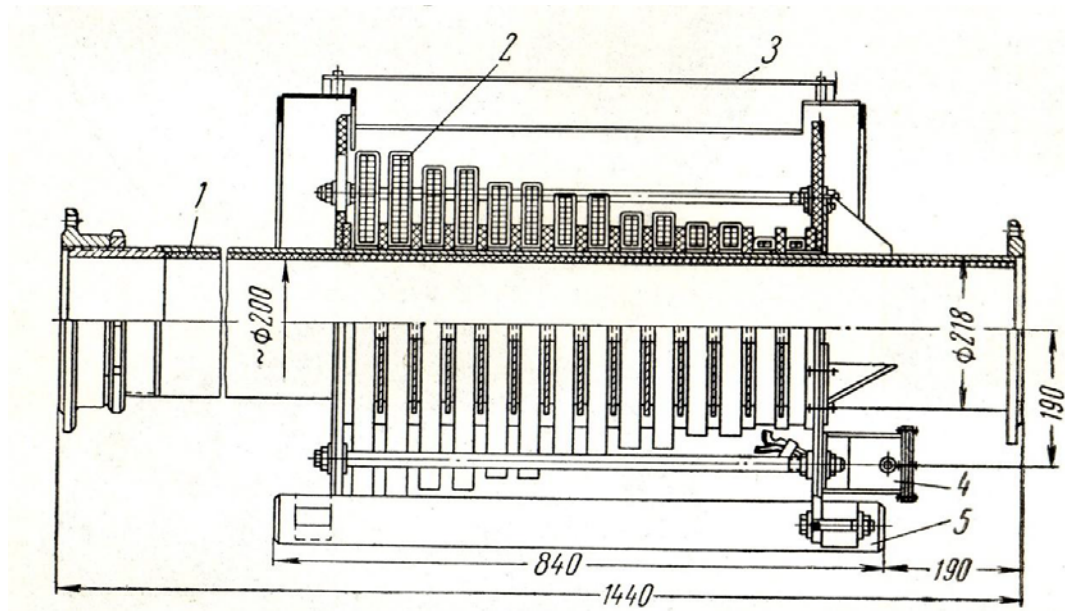


Рисунок 1.5 – Промисловий розмагнічувач

1.2.3 Прототип, який розроблений Національним технічним університетом «Дніпровська політехніка»

Як описано в [4] було розроблено та виготовлено лабораторну установку для розмагнічування магнетитової суспензії. Основним елементом цієї установки є соленоїд простої конструкції, у якому створюються загасаючі коливання, через які проходить магнетитова суспензія.

Соленоїд має зовнішній діаметр 20 мм, внутрішній діаметр 12 мм і довжину 130 мм. Він намотаний у три шари мідним дротом діаметром 1,2 мм, із загальною кількістю 300 витків. Індуктивність соленоїда становить 220мкГн, а активний опір – 0,5Ом.

Робота генератора відбувається наступним чином. У початковий момент часу тиратрон U1 залишається закритим, і конденсатор C1 заряджається до напруги джерела E1 через зарядну індуктивність L1, розрядну індуктивність L2 і соленоїд L3. Індуктивність L1 значно перевищує індуктивність L2. Коли на електрод керування тиратрона U1 надходить керуючий імпульс, тиратрон відкривається, і конденсатор C1 розряджається через розрядну індуктивність L2, тиратрон U1 та коливальний контур, який складається з конденсатора C2 і соленоїда L3. При зміні полярності напруги на тиратроні U1 він автоматично

закривається, а в контурі C2-L3 збуджуються загасаючі коливання, які виникають за рахунок енергії, накопиченої під час розряду конденсатора C1.

Застосування тиратрона забезпечує можливість створення імпульсів напруги амплітудою в кілька кіловольт із тривалістю фронту наростання імпульсу менше ніж 1мкс. У цій лабораторній установці ємність конденсатора C2 становила 109нФ, а максимальна амплітуда напруги в коливальному контурі досягала 3600 В. Схема електрична принципова показана на (Рис. 1.6).

Дана система також не має зворотного зв'язку та не використовується в системі автоматичного регулювання.

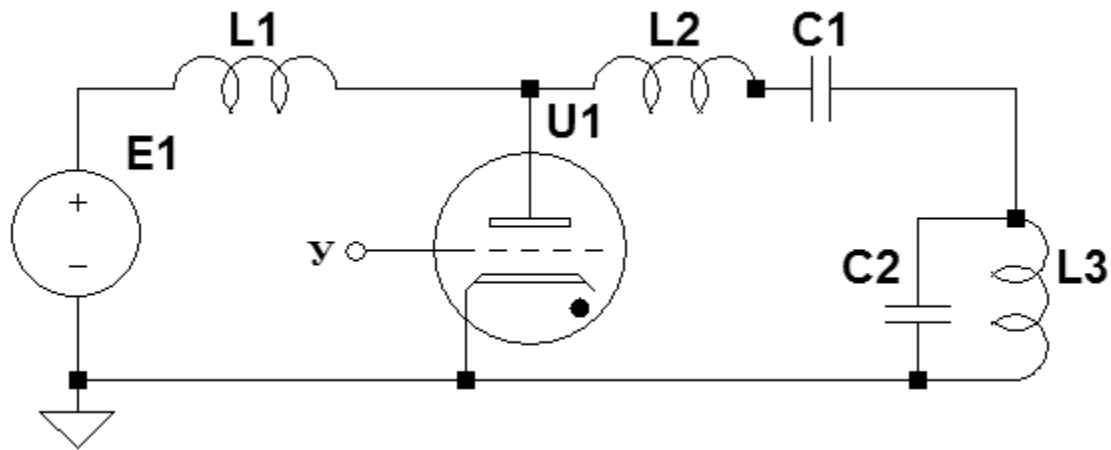


Рисунок 1.6 – Схема електрична принципова

Принцип дії подібної установки описано в [10], але вона має твердотільну реалізацію силової частини, а саме виконана на напівпровідникових тирісторах. Більш досконала модель подібного пристрою описана в [11].

1.3 Обґрунтування необхідності вдосконалення системи керування процесом розмагнічування залізорудної пульпи

Актуальність вдосконалення системи керування

Процес розмагнічування залізорудної пульпи відіграє ключову роль у технологічному циклі збагачення руди. Забезпечення якісного розмагнічування

необхідне для стабільної роботи подальших технологічних процесів, таких як гравітаційне розділення, флотація або магнітна сепарація. Проте на ПрАТ «Центральний ГЗК» відсутня автоматизація цього процесу, що значно обмежує його ефективність і енергоефективність.

Основні проблеми існуючих систем розмагнічування:

1. Відсутність автоматичного регулювання. Налаштування пристрою виконується вручну і базується на середньостатистичних параметрах пульпи. Це унеможлиблює адаптацію до змін технологічних умов, таких як густина або вміст магнетиту.

2. Перевитрата енергоресурсів. У разі роботи котушки без адаптивного регулювання її параметри часто встановлюються на максимальному рівні, навіть якщо це не є необхідним. Це призводить до нераціонального використання електроенергії.

3. Нестабільність роботи. Зміна параметрів пульпи, таких як густина або витрата, не враховується поточною системою, що може призводити до неповного розмагнічування або перевантаження котушки.

4. Залежність від людського фактору. Оператор повинен постійно слідкувати за параметрами процесу та виконувати ручні коригування, що знижує оперативність і точність керування.

Недоліки поточного підходу.

Ручне керування процесом розмагнічування має низку істотних недоліків:

- *Низька продуктивність.* Нестабільність параметрів пульпи часто призводить до необхідності повторного оброблення матеріалу.

- *Високий рівень втрат.* Недостатнє розмагнічування викликає агломерацію частинок, що знижує якість подальшого збагачення.

- *Відсутність зворотного зв'язку.* Поточна система не використовує дані з датчиків густини, витрати чи магнітної проникності для корекції параметрів роботи.

Вимоги до вдосконалення системи.

Для підвищення ефективності процесу розмагнічування необхідно впровадити адаптивну систему керування, яка має відповідати наступним вимогам:

- *Автоматичне регулювання параметрів.* Система повинна забезпечувати динамічне налаштування параметрів струму і напруги на котушці залежно від густини, витрати та складу пульпи.

- *Зниження енерговитрат.* Адаптивне керування дозволить оптимізувати енергоспоживання за рахунок роботи котушки в найбільш енергоефективних режимах.

- *Стабільність процесу.* Використання датчиків і аналітичних алгоритмів забезпечить постійний рівень розмагнічування незалежно від змін у технологічному середовищі.

- *Мінімізація людського фактору.* Автоматизація процесу дозволить зменшити залежність від кваліфікації оператора і підвищити точність керування.

Технологічні можливості вдосконалення.

1. *Інтеграція датчиків.* Використання густиномірів, витратомірів та сенсорів магнітної проникності забезпечить збір актуальної інформації про стан пульпи в реальному часі.

2. *Впровадження адаптивних алгоритмів.* Методи нечіткої логіки, нейронних мереж та ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) дозволять динамічно оптимізувати роботу котушки.

3. *Цифровий зв'язок.* Використання промислових мереж передачі даних, таких як Ethernet, забезпечить обмін інформацією між сенсорами, контролером і системою моніторингу.

4. *Інтерфейс для оператора.* Розробка інтерактивного інтерфейсу дозволить операторам контролювати стан системи та змінювати параметри в разі необхідності.

Аналіз існуючого стану системи керування процесом розмагнічування залізорудної пульпи свідчить про низький рівень автоматизації, що призводить

до перевитрати ресурсів та нестабільності роботи. Необхідність вдосконалення системи зумовлена потребою в забезпеченні стабільності процесу, підвищенні його ефективності та зниженні енергоспоживання.

Розробка адаптивної системи керування з використанням сучасних кіберфізичних технологій є важливим і обґрунтованим завданням, вирішення якого дозволить досягти значних економічних і технологічних переваг для підприємства.

1.4 Висновки до розділу

У першому розділі розглянуто ключові аспекти процесу розмагнічування залізорудної пульпи, включаючи його технічні та економічні обґрунтування, аналіз існуючих рішень та необхідність вдосконалення системи керування.

У розділі 1.1 проведено огляд технологічного значення процесу розмагнічування. Розмагнічування є важливою стадією у виробництві, оскільки дозволяє підвищити ефективність сепарації, зменшити втрати магнетиту та продовжити термін експлуатації обладнання. Цей етап є ключовим для досягнення стабільних показників продуктивності та якості.

У розділі 1.2 було проведено аналіз роботи діючих систем розмагнічування пульпи, які базуються на використанні застарілих методів і пристроїв, що не забезпечують динамічного регулювання параметрів процесу. Відсутність автоматичного зворотного зв'язку датчиків призводить до нестабільності роботи та перевитрати енергоресурсів. Недостатня ефективність ручного керування обумовлює потребу в автоматизації процесу з використанням сучасних методів адаптивного керування.

У розділі 1.3 детально обґрунтовано необхідність вдосконалення системи керування процесом розмагнічування залізорудної пульпи. Аналіз існуючого стану системи показав, що відсутність автоматизації на ПрАТ «ЦГЗК» призводить до низки технологічних і економічних проблем, зокрема:

Відсутність адаптивного регулювання: Налаштування параметрів котушки розмагнічування виконується вручну і не враховує змін технологічних параметрів пульпи, таких як густина, витрата чи магнітна проникність. Це знижує стабільність роботи системи.

Перевитрата енергоресурсів: Наразі котушка працює на фіксованих параметрах, які часто встановлюються з запасом, що призводить до перевитрати електроенергії.

Залежність від людського фактору: Процес розмагнічування значною мірою залежить від кваліфікації оператора, що може викликати помилки в налаштуваннях і призводить до зниження ефективності.

Нестабільність якості розмагнічування: Відсутність зворотного зв'язку від системи унеможлиблює контроль рівня розмагнічування в реальному часі, що знижує якість кінцевого продукту.

На основі цих проблем сформульовано основні вимоги до вдосконалення системи:

Автоматичне налаштування параметрів: Інтеграція сенсорів (густиномірів, витратомірів, магнітометрів) для отримання актуальних даних про стан пульпи та автоматичного регулювання параметрів котушки.

Підвищення енергоефективності: Використання адаптивних алгоритмів для мінімізації споживання енергії, забезпечуючи роботу котушки лише на необхідному рівні потужності.

Забезпечення стабільності процесу: Використання сучасних методів керування, таких як нечітка логіка, нейромережі або ANFIS, для динамічної оптимізації параметрів системи.

Мінімізація людського фактору: Запровадження автоматизованих рішень для зменшення ризиків, пов'язаних із помилками оператора.

Обґрунтування вказує на те, що модернізація системи є необхідною для підвищення технологічної ефективності, стабільності роботи та зниження витрат енергоресурсів. Впровадження адаптивної системи керування дозволить

покращити якість кінцевого продукту, оптимізувати виробничі процеси та мінімізувати залежність від зовнішніх змін і людського фактору.

Таким чином, у пункті 1.4 сформовано чітке підґрунтя для розробки нової адаптивної системи керування процесом розмагнічування залізорудної пульпи, що стане основою для подальших досліджень у рамках магістерської роботи..

РОЗДІЛ 2

2. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ РОЗМАГНІЧУВАННЯ ЗАЛІЗОРУДНОЇ ПУЛЬПИ

2.1 Математичне забезпечення системи керування процесом розмагнічування залізородної пульпи

Сучасні системи автоматизації в галузі збагачення корисних копалин базуються на точних математичних моделях технологічних процесів. Розмагнічування залізородної пульпи є одним із важливих етапів, що забезпечують подальше підвищення ефективності технологічних операцій, таких як класифікація, збагачення та поділ рудних компонентів. Математичне забезпечення системи керування процесом розмагнічування охоплює створення адекватної моделі об'єкта, визначення параметрів цієї моделі (ідентифікація), а також розробку алгоритмів оптимального або адаптивного керування.

Метою математичного опису є отримання рівнянь, які б адекватно відображали взаємозв'язок між вхідними сигналами (струмом котушки розмагнічування, витратами пульпи) та вихідними величинами (залишковою намагніченістю пульпи, ступенем розмагнічування). Надійна математична модель дає змогу не лише прогнозувати поведінку системи за різних умов, але й дозволяє застосовувати сучасні методи теорії керування, включаючи нейронні мережі, нечіткі системи або адаптивно-нейро-нечіткі підходи (ANFIS). Теорія з автоматизованих систем описана в [12], [13], [14].

2.1.1 Ідентифікація об'єкта керування

Ідентифікація об'єкта керування — це процес визначення параметрів та структури математичної моделі на основі наявних експериментальних даних. Об'єктом у даному випадку є технологічна ділянка, де відбувається

розмагнічування залізорудної пульпи. Хоча загальне фізичне уявлення про процес є зрозумілим — пульпа, що містить магнітні частинки заліза, проходить через магнітне поле котушки, внаслідок чого знижується її залишкова намагніченість — кількісне описання цього процесу не є тривіальним.

Процедура ідентифікації зазвичай включає кілька етапів. Спершу проводиться збір даних: фіксуються зміни струму в котушці, співвідношення витрат пульпи, та результативний рівень залишкової намагніченості на виході. Ці дані можуть бути отримані безпосередньо під час експлуатації технологічної лінії або у спеціальних експериментальних умовах. На основі цих вимірювань знаходиться математична залежність між дією (керуючими сигналами) та відгуком (вихідною змінною, тобто залишковою намагніченістю).

На практиці ідентифікація може бути виконана різними методами. Одним із базових підходів є статистична обробка даних з використанням регресійних моделей, які дозволяють підібрати параметри простих лінійних або нелінійних рівнянь. Проте процес розмагнічування пульпи часто характеризується суттєвою нелінійністю, залежністю від багатьох змінних, а також динамічною поведінкою (затримками, інерційністю, можливим впливом турбулентності потоку). Тому для більш точного опису доцільно застосовувати моделі з урахуванням часової динаміки, наприклад, диференційні рівняння або передавальні функції, що відтворюють поведінку системи в часі.

Якщо структура об'єкта є складною та важко піддається класичному математичному описанню, доцільно застосовувати підходи штучного інтелекту та машинного навчання. Для цього зібрані дані можуть бути використані для навчання нейронних мереж або побудови нечітких систем виводу. Такий підхід дозволяє отримати модель, здатну апроксимувати навіть дуже складні залежності, не вимагаючи детального знання внутрішніх фізичних закономірностей. Модель на основі нейронної мережі чи ANFIS може самостійно «навчитися» відображати взаємозв'язок між струмом, параметрами пульпи та залишковою намагніченістю, забезпечуючи хороший рівень точності прогнозування.

У підсумку, ідентифікація об'єкта керування процесом розмагнічування залізорудної пульпи — це комплексна процедура, що включає збір репрезентативних даних, попередню обробку сигналів, вибір структури моделі та визначення її параметрів. Результатом є адекватна математична модель, яка лежить в основі розробки ефективних систем автоматичного керування, що дозволяють оптимізувати режим розмагнічування, підвищувати якість продукту та знижувати енергозатрати.

Математична модель об'єкта керування. Процес розмагнічування можна описати диференціальними рівняннями, що враховують нелінійні залежності між вхідними і вихідними параметрами. Загальна форма моделі для опису процесу має вигляд:

$$\frac{dM}{dt} = f(I, \omega, C, V, M)$$

де:

M — рівень залишкового магнітного поля в пульпі після обробки;

I — сила струму в котушці розмагнічування;

ω — частота струму;

C — вміст магнетиту в пульпі;

V — швидкість потоку пульпи;

f — функція, що описує взаємодію цих параметрів.

Функція f є нелінійною і може бути уточнена на основі експериментальних даних або за допомогою методів ідентифікації об'єктів, таких як адаптивна регресія або методи машинного навчання.

2.2 Розробка алгоритму роботи системи адаптивного керування розмагнічуванням залізорудної пульпи

Розробка алгоритму керування процесом розмагнічування залізорудної пульпи передбачає створення гнучкої, чутливої до зміни умов технологічної лінії системи, яка здатна в реальному часі коригувати параметри впливу з метою

забезпечення стабільно низької залишкової намагніченості. З огляду на те, що процес розмагнічування має виражену нелінійність, а також може піддаватися впливу різноманітних дестабілізуючих факторів (варіації складу руди, коливання температури тощо), застосування традиційних статичних регуляторів часто виявляється недостатньо ефективним.

Адаптивний алгоритм керування має динамічно підлаштовуватися під поточний стан об'єкта і змінювати свої параметри у процесі експлуатації. Це може бути реалізовано завдяки поєднанню класичних методів керування з інтелектуальними підходами, такими як нечітка логіка, нейронні мережі чи адаптивно-нейро-нечіткі системи (ANFIS). Суть ідеї полягає у тому, що керуючий модуль «навчається» на основі даних поточної ситуації, оновлює свої внутрішні моделі та коригує параметри керування, щоб забезпечити найкраще наближення до бажаного стану пульпи.

Алгоритм роботи адаптивної системи зазвичай включає наступні етапи. Спершу вхідний блок приймає поточні дані: струму в котушці, витрат пульпи. Далі ці дані проходять через модуль оцінки стану, де на основі математичної моделі (ідентифікованої на попередньому етапі) та обраних критеріїв якості (наприклад, мінімізація відхилення від цільового рівня намагніченості) визначається, наскільки поточний режим роботи задовольняє задані вимоги.

Наступним кроком є модуль адаптації, який аналізує отримані результати та ухвалює рішення про зміну параметрів керування. Наприклад, якщо виявляється, що залишкова намагніченість пульпи перевищує цільовий рівень, модуль може збільшити струм у котушці або змінити форму та частоту живлення розмагнічувального поля. При використанні нечіткої логіки чи ANFIS правило прийняття рішень може бути сформульоване у вигляді лінгвістичних оцінок («висока залишкова намагніченість» потребує «збільшення інтенсивності розмагнічування»), а нейронна мережа може самостійно знайти складну багатовимірну залежність між вхідними й вихідними параметрами.

Адаптивний алгоритм періодично виконує процедуру оновлення: накопичені дані про роботу системи аналізуються, ідентифікаційна модель

коригується, а параметри регуляторів уточнюються, щоб відобразити зміни у властивостях пульпи або умовах виробництва. Така замкнена структура забезпечує безперервне підвищення ефективності керування, даючи змогу системі самостійно вдосконалюватись у процесі експлуатації.

При кінцевій реалізації адаптивного алгоритму потрібно врахувати апаратні обмеження: швидкодію контролерів, можливості сенсорів, затримки у вимірюваннях, комунікаціях та перетвореннях сигналу. Оптимально розроблений алгоритм має бути стійким до збурень, надійним, не спричиняти надлишкових коливань параметрів, а також забезпечувати оптимальний компроміс між швидкістю реакції на зміни та енергоефективністю.

Таким чином, розроблений адаптивний алгоритм керування розмагнічуванням залізородної пульпи ґрунтується на поєднанні математичної моделі процесу, інтелектуальних методів обробки інформації та засобів ідентифікації. Він покликаний автоматично підлаштовуватися до реальних виробничих умов, забезпечуючи стабільне досягнення заданих технологічних показників та підвищення ефективності процесу розмагнічування.

Алгоритм роботи системи

Перш за все, система отримує вхідні дані від датчиків, встановлених у технологічній лінії. До них належать вимірювання залишкової намагніченості пульпи, значення струму в котушці розмагнічування, швидкість подачі та концентрація магнетиту. Ці початкові параметри визначають вихідний стан процесу та формують вихідну точку для подальших обчислень.

На підставі отриманої інформації контролер оцінює стан об'єкта керування, порівнюючи фактичну залишкову намагніченість із цільовим значенням. У цей момент алгоритм визначає, наскільки система відхиляється від бажаного режиму. Якщо відхилення є незначним, система продовжує працювати у поточному режимі. Якщо ж розбіжності істотні, необхідно прийняти рішення щодо корекції.

Наступним кроком є запуск адаптивного модуля керування. Він аналізує сучасний стан системи та враховує попередні спостереження, тенденції зміни

параметрів, а також вбудовані правила або модель (наприклад, створену на основі нейронних мереж чи нечіткої логіки). Завдання цього модуля — визначити, які саме дії необхідні для зменшення або стабілізації залишкової намагніченості до заданого рівня. Це може включати зміну величини струму, частоти живлення котушки, або інші коригуючі впливи.

Після ухвалення рішення модуль видає керуючі сигнали на виконавчі механізми. Наприклад, струм котушки коригується у реальному часі, що забезпечує миттєву реакцію системи на зміну умов. Завдяки адаптивному характеру алгоритму система враховує набутий досвід, поступово оптимізуючи власний режим роботи без втручання оператора.

Завершальним етапом є оцінка результатів внесених змін. Контролер знову зчитує дані з датчиків і перевіряє, наскільки новий режим сприяє досягненню цільових параметрів. Якщо цільовий рівень залишкової намагніченості не досягнуто, цикл повторюється з урахуванням оновленої інформації. Така ітеративність забезпечує постійне покращення якості керування процесом та підтримку оптимального технологічного режиму.3. Розрахунок ефективності:

Розраховується поточне співвідношення витрат пульпи підрешітного продукту до витрат пульпи надрешітного продукту:

$$K_{\text{еф}} = \frac{Q_{\text{підреш}}}{Q_{\text{надреш}}}$$

2.2.1 Результати моделювання системи в Матлаб

В процесі моделювання було розроблено скрипт, який показаний нижче.

```
%% Параметри системи
```

```
Fs = 1000; % Частота дискретизації (Гц)
```

```
Tsim = 0.1; % Час симуляції (сек)
```



```

t = (0:1/Fs:Tsim)'; % Часовий вектор

% Параметри затухаючих коливань
I0 = 50; % Початкова амплітуда струму (A)
alpha = 50; % Коефіцієнт затухання

% Частота коливань (налаштовувальний параметр)
f = 300; % Гц (можете змінювати для експериментів)

% Струм котушки (затухаючі коливання)
iL = I0 * exp(-alpha * t) .* cos(2 * pi * f * t);

% Вихідні витрати без обмеження
over_screen_flow_raw = 250 + 50 * sin(2 * pi * 0.1 * t);
under_screen_flow_raw = (350 + 100 * cos(2 * pi * 0.05 * t)) * (1 + f/200);

% Розрахунок співвідношення
R_raw = under_screen_flow_raw ./ over_screen_flow_raw;

% Тепер масштабування так, щоб сумарні витрати ≤ 600 м³/год
% Обчислюємо суму сирих потоків
total_flow_raw = over_screen_flow_raw + under_screen_flow_raw;

% Масштабуючий коефіцієнт
scale_factor = 600 ./ total_flow_raw; % Використовуємо елементно, щоб для
кожної точки часу було ≤ 600

% Масштабуємо потоки
over_screen_flow = over_screen_flow_raw .* scale_factor;
under_screen_flow = under_screen_flow_raw .* scale_factor;

```

```

% Перераховуємо кінцеве співвідношення R (для інформації)
R = under_screen_flow ./ over_screen_flow;

% Ініціалізація ШІМ
pwm_signal = zeros(size(t));
duty_cycle = zeros(size(t));

% Логіка зміни ШІМ
for k = 1:length(t)
    if R(k) > 1
        % Якщо підрешітка більше за надрешітку
        duty_cycle(k) = 0.6 + 0.2 * sin(2 * pi * 0.1 * t(k)); % ~60%-80%
    else
        % Якщо надрешітка більше за підрешітку
        duty_cycle(k) = 0.3 + 0.2 * sin(2 * pi * 0.1 * t(k)); % ~30%-50%
    end

    % Генерація ШІМ-сигналу
    pwm_signal(k) = double(mod(floor(t(k)*Fs), round(1/duty_cycle(k)*Fs)) <
duty_cycle(k)*Fs);
end

% Моделювання датчика Холла (шум)
hall_sensor_output = iL + 0.01 * randn(size(iL));

% Візуалізація результатів
figure;

% 1) Витрати

```

```
subplot(5, 1, 1);  
plot(t, over_screen_flow, t, under_screen_flow);  
title('Витрати пульпи (загалом не більше 600 м3/год)');  
legend('Надрешітка', 'Підрешітка');  
xlabel('Час, с');  
ylabel('Витрати (м3/год)');  
grid on;
```

% 2) Співвідношення R

```
subplot(5, 1, 2);  
plot(t, R);  
title('Співвідношення підрешітка/надрешітка (R)');  
xlabel('Час, с');  
ylabel('R');  
grid on;
```

% 3) ШІМ-заповнення

```
subplot(5, 1, 3);  
plot(t, duty_cycle);  
title('ШІМ-заповнення (duty cycle)');  
xlabel('Час, с');  
ylabel('Заповнення');  
grid on;
```

% 4) ШІМ-сигнал

```
subplot(5, 1, 4);  
plot(t, pwm_signal);  
title('ШІМ-сигнал');  
xlabel('Час, с');  
ylabel('ШІМ');
```

```
grid on;

% 5) Струм котушки та сигнал Холла
subplot(5, 1, 5);
plot(t, iL, t, hall_sensor_output, '--');
title('Струм котушки та сигнал з датчика Холла');
legend('Струм котушки', 'Датчик Холла');
xlabel('Час, c');
ylabel('Струм (A)');
grid on;
```

Цей скрипт забезпечує комплексне моделювання системи розмагнічування залізородної пульпи, враховуючи динаміку струму котушки, контроль витрат пульпи, генерацію адаптивного ШІМ-сигналу та реалістичне моделювання вимірювань з датчика Холла. Завдяки інтеграції цих компонентів, скрипт дозволяє дослідити взаємодію між різними параметрами системи та їх вплив на ефективність розмагнічування.

Особливо важливим є адаптивний контроль через змінне співвідношення R , яке залежить від швидкості затухання струму та частоти коливань. Це дозволяє системі автоматично регулювати ШІМ-сигнал для підтримки оптимальних умов розмагнічування, забезпечуючи високу якість продукції та ефективне використання ресурсів.

Таким чином, скрипт надає потужний інструмент для аналізу та оптимізації процесу розмагнічування, дозволяючи дослідникам та інженерам здійснювати комплексні симуляції та приймати обґрунтовані рішення щодо налаштування параметрів системи.

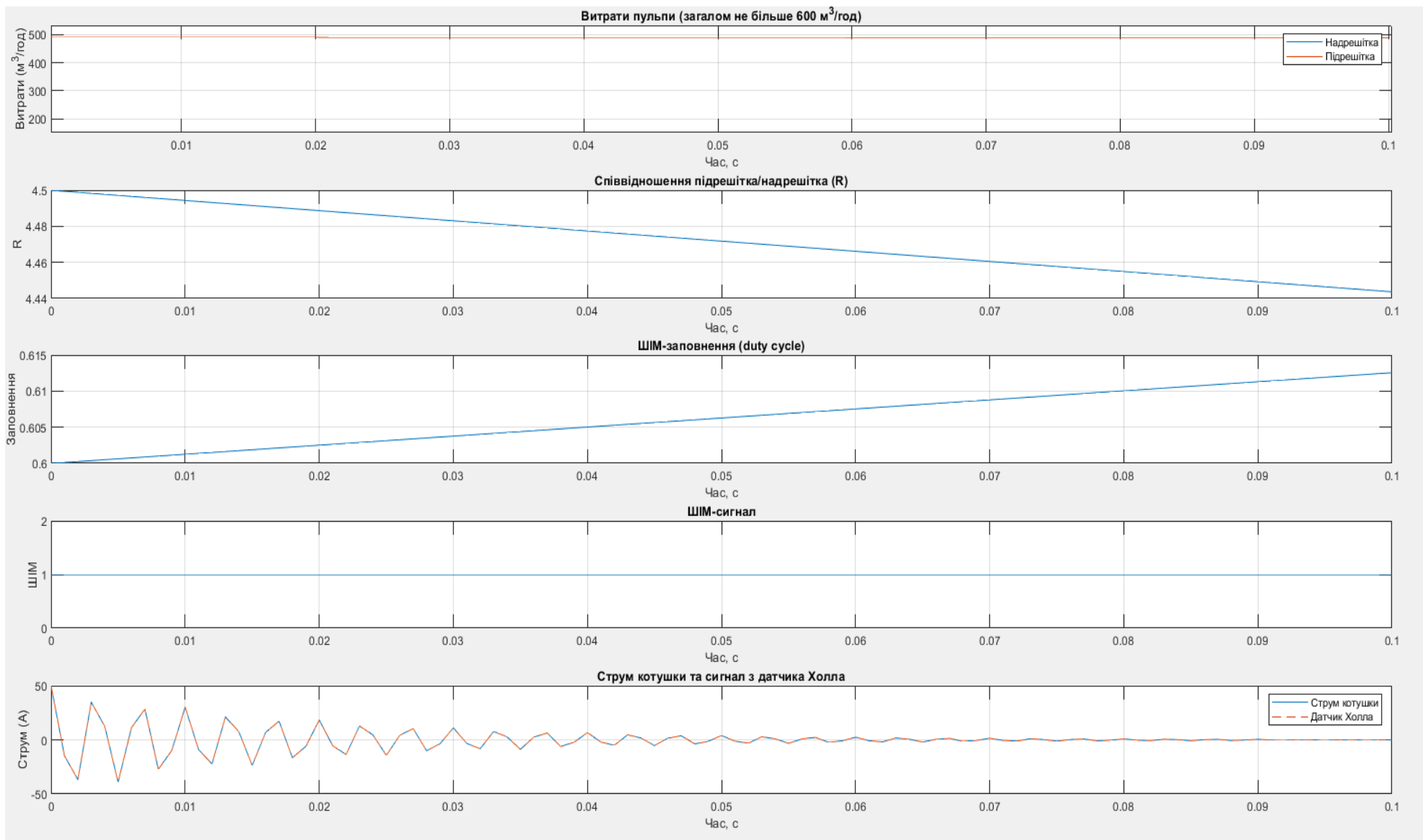


Рисунок 2.1 – Симуляція для частоти 300Гц

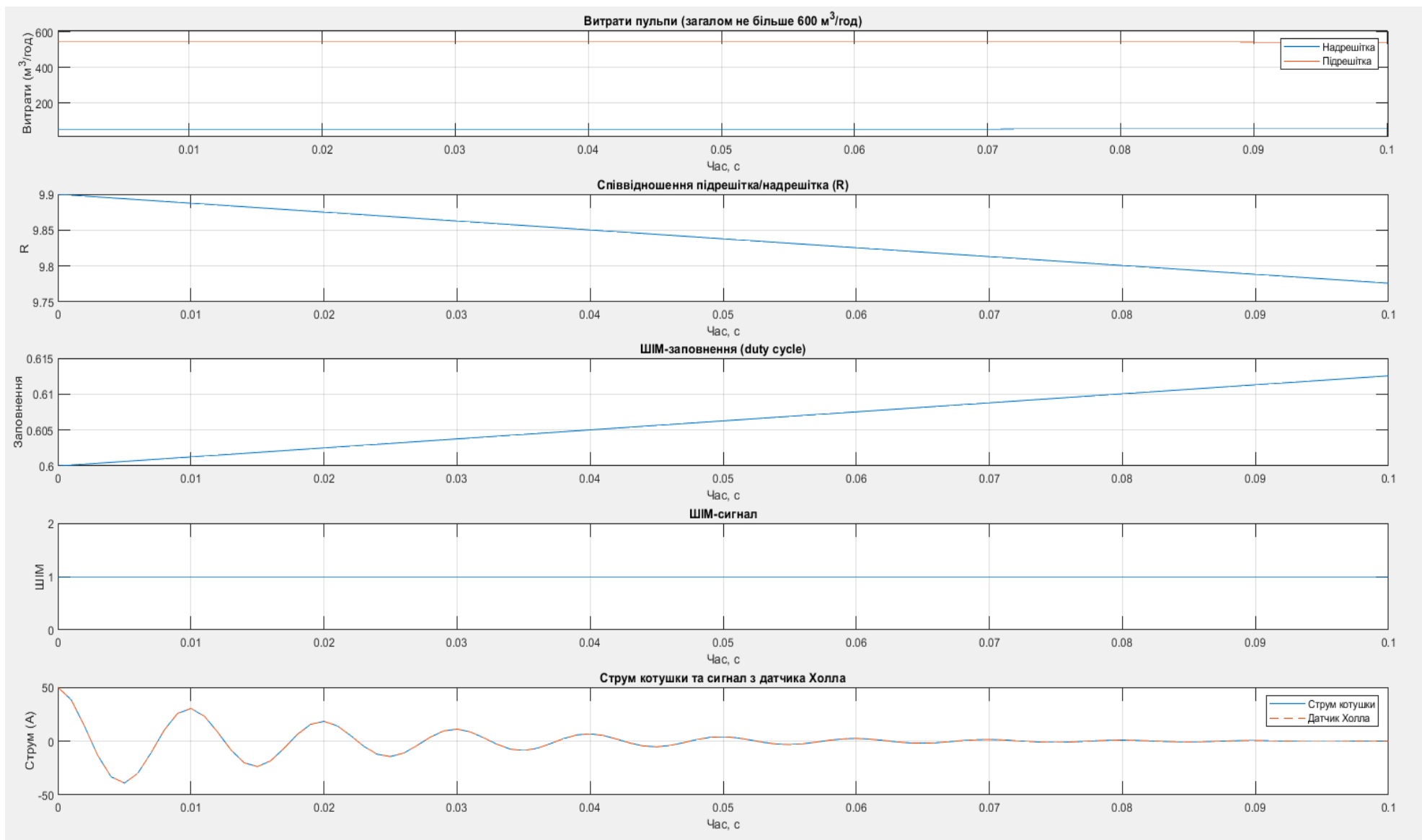


Рисунок 2.2 – Симуляція для частоти 900Гц

Результати симуляції показані на (Рис. 2.1) та (Рис. 2.2). Аналіз співвідношення витрат підрешітки до надрешітки, а також форми струму, та інтенсивність його затухання показав, що при збільшенні до певного рівня частоти струму розмагнічування, збільшується кількість підрешітки, тобто гідного класу, що в свою чергу є безпосередніми ознаками більш ефективного процесу розмагнічування пульпи.

2.3 Технічне забезпечення системи керування процесом розмагнічування залізородної пульпи

2.3.1 Обґрунтування структури комплексу технічних засобів для реалізації системи

Розробка системи керування процесом розмагнічування залізородної пульпи потребує вибору та обґрунтування комплексу технічних засобів, які забезпечать ефективність, стабільність і надійність роботи. Структура комплексу враховує вимоги до адаптивності, реального часу обробки даних і можливості інтеграції в існуючу інфраструктуру.

Основні компоненти системи керування:

1. Контролер Siemens S7-1500. Функції:

Збір даних від датчиків у реальному часі.

Реалізація базових алгоритмів керування (PID-регуляція).

Передача даних на серверний ПК.

Обґрунтування: Контролер Siemens S7-1500 забезпечує високу швидкість обробки даних і підтримує сучасні промислові протоколи зв'язку (PROFINET, Profibus), що є критично важливим для реалізації адаптивного керування.

2. Серверний ПК Siemens. Функції:

Обробка великих обсягів даних за допомогою нейронної мережі.

Прийняття рішень щодо адаптивного налаштування параметрів системи.

Зберігання даних для подальшого аналізу.

Обґрунтування: Серверний ПК із достатньою обчислювальною потужністю (процесор Intel i7, 16 ГБ RAM) забезпечує швидку обробку даних і підтримує роботу складних нейромережових алгоритмів.

3. Виконуючі механізми:

- силовий блок на IGBT-транзисторах. Функція: Регулювання струму і напруги на котушці розмагнічування.

Обґрунтування: IGBT-транзистори забезпечують високоефективне управління електричними параметрами з мінімальними втратами енергії.

- електропривід Auma SQR. Функція: Регулювання подачі пульпи для підтримання заданої густини в зумпфі.

Обґрунтування: Auma SQR забезпечує точне регулювання і надійну роботу у важких умовах.

4. Датчики:

- щільномір. Вимірює щільність пульпи у зумпфі.

- витратомір. Контролює об'ємну витрату пульпи.

- датчик струму. Контролює параметри струму котушки.

Обґрунтування: Датчики забезпечують постійний моніторинг ключових параметрів процесу, що є необхідним для реалізації адаптивного керування.

Обґрунтування: Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс забезпечує швидкий доступ до інформації про стан системи і дозволяє здійснювати контроль у разі виникнення нештатних ситуацій.

2.3.2 Вибір датчиків та первинних перетворювачів

Вибір датчиків та первинних перетворювачів є важливим етапом проектування системи адаптивного керування процесом розмагнічування залізорудної пульпи. Для забезпечення стабільності роботи системи і точності адаптивного керування до складу обраних технічних засобів включено датчики густини, витрати пульпи та струму. При виборі враховано характеристики, надійність і відповідність умовам експлуатації, [16].

1. Датчики щільності.

Для ефективного вимірювання густини пульпи, що транспортується трубопроводами, використовуються різні типи густиномірів. Нижче наведено огляд основних типів, їх переваг, недоліків та прикладів моделей.

Для даного проекту я вибрав Rhosonics SDM, який є ультразвуковим щільноміром. Він показаний на (Рис. 2.3), правильний монтаж показано на (Рис. 2.4), [17].



Рисунок 2.3 – Rhosonics SDM

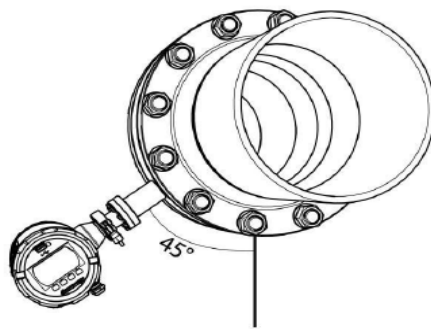


Рисунок 2.4 – Схема монтажу

2. Датчики витрати.

Датчики витратомірів – це пристрої, які вимірюють об’ємний або масовий потік рідини, газу або суспензії через трубопровід.

Вони використовують різні фізичні принципи (електромагнітна індукція, ультразвук, радіоізотопний метод, ефект Коріоліса тощо) для перетворення

фізичних параметрів потоку у електричний сигнал, який може бути оброблений для контролю та моніторингу процесів.

Для проекту я вибрав Siemens SITRANS FM MAGFLO, який показано на (Рис. 2.5) та (Рис. 2.6), [18]. Тому, що він є найкращим вибором для системи розмагнічування через його стійкість до густої пульпи, абразивів і високу точність.

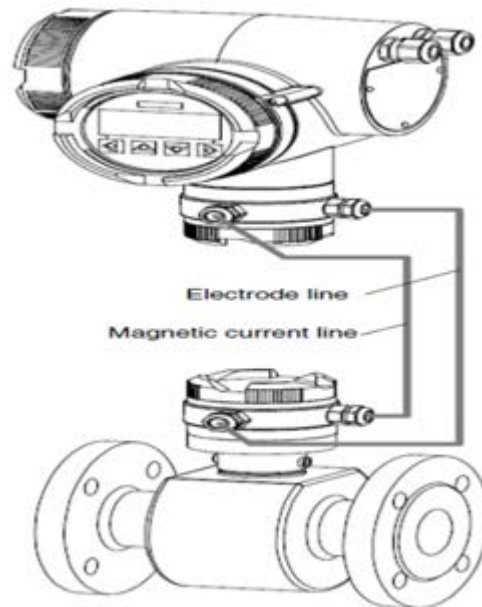


Рисунок 2.5 – Схема підключення Siemens SITRANS FM MAGFLO



Рисунок 2.6 – Siemens SITRANS FM MAGFLO

3. Датчики струму.

Для проектів, пов'язаних з вимірюванням струму в промислових системах, використовуються різні типи датчиків струму. Нижче наведено детальний аналіз основних типів, їх переваг, недоліків, а також приклади моделей.

Для даного проекту я вибрав датчик струму LEM LT 100-P

Цей датчик працює на основі ефекту Холла: магнітне поле, створене струмом, викликає зміну напруги, пропорційну величині струму. Він показаний на (Рис. 2.7) та (Рис. 2.8).



Рисунок 2.7 – Датчик струму

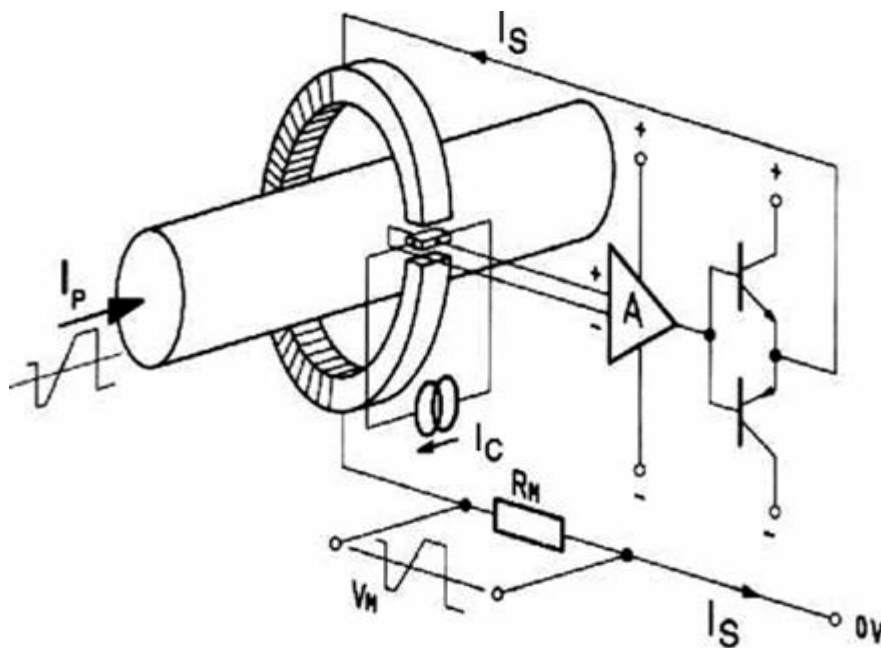


Рисунок 2.8 – Структурна схема датчика струму

Він має такі переваги:

- безконтактний метод вимірювання, що мінімізує механічний знос і підвищує надійність;
- високу точність вимірювань у широкому діапазоні струмів (до 100 А);
- швидку реакція на зміни струму, що забезпечує точний моніторинг у режимі реального часу;
- компактний розмір та легку інтеграція в систему автоматизації.

Але також він має і недоліки:

- необхідність зовнішнього живлення для роботи;
- відносно високу вартість порівняно з шунтовими датчиками.

2.3.3 Вибір та обґрунтування характеристик виконавчих механізмів

Виконавчі механізми є ключовим компонентом системи автоматизованого керування, які безпосередньо впливають на процес розмагнічування залізородної пульпи, реалізуючи команди від контролерів на основі інформації, отриманої від датчиків. Їхня функція полягає в забезпеченні точного регулювання параметрів процесу, таких як інтенсивність магнітного поля, швидкість потоку пульпи та інші технологічні змінні. У цьому пункті розглянуто вибір і обґрунтування характеристик виконавчих механізмів, необхідних для ефективної роботи системи керування.

При виборі виконавчих механізмів для системи керування процесом розмагнічування залізородної пульпи важливо врахувати такі вимоги:

Виконавчі механізми повинні забезпечувати точну зміну параметрів процесу відповідно до команд контролера.

Механізми мають працювати стабільно у складних промислових умовах, таких як підвищена температура, агресивне середовище та високі навантаження.

Час реагування виконавчих механізмів на команди повинен бути мінімальним для забезпечення стабільної роботи процесу.

Механізми повинні підтримувати інтеграцію з автоматизованими системами через відповідні інтерфейси та протоколи зв'язку.

Виконавчі механізми для регулювання інтенсивності магнітного поля

Для управління інтенсивністю магнітного поля у системах розмагнічування використовуються електромагнітні котушки або соленоїди, які генерують магнітне поле. Ефективність процесу залежить від можливості точного регулювання цієї інтенсивності.

Котушки використовуються для створення магнітного поля різної інтенсивності. Для ефективного керування процесом необхідно мати можливість змінювати напругу або струм, що подається на котушку, залежно від вимог процесу.

Силовий блок на IGBT-транзисторах

Силовий блок відповідає за керування напругою та струмом, що подаються на котушку розмагнічування, показаний на (Рис. 2.9).

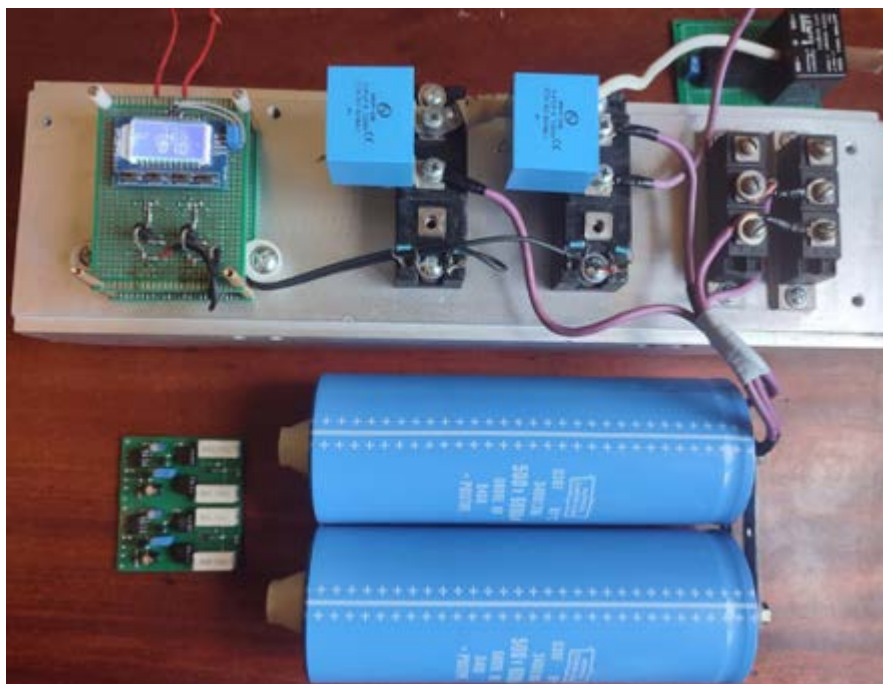


Рисунок 2.9 – Силовий блок на IGBT-транзисторах

Для реалізації цього процесу обрано інвертор на базі IGBT-транзисторів із такими характеристиками:

Робоча напруга: до 1200 В.

Максимальний струм: до 75 А.

Частота комутації: 20–25 кГц.

ККД: $\geq 95\%$.

Обґрунтування вибору IGBT-транзисторів:

Висока ефективність: Інвертори на IGBT-транзисторах забезпечують мінімальні втрати енергії під час комутації завдяки високому коефіцієнту корисної дії.

Швидка комутація: Висока частота комутації дозволяє забезпечити стабільність подачі змінного струму на котушку.

Надійність: IGBT-транзистори мають тривалий термін служби навіть за умов високих навантажень.

Сумісність із системами керування: Ці компоненти легко інтегруються з сучасними системами автоматики, такими як Siemens S7-1500.

Переваги силового блоку:

Висока точність регулювання струму та напруги.

Компактність конструкції.

Захист від перевантажень і короткого замикання.

Недоліки:

Висока вартість порівняно з тиристорними або MOSFET-рішеннями.

Необхідність активного охолодження для забезпечення стабільної роботи.

Очікуваний результат: Силовий блок на IGBT-транзисторах забезпечує точне і плавне регулювання параметрів струму та напруги котушки, що є критично важливим для підтримання ефективності розмагнічування.

Електропривід Auma SQR

Електропривід Auma SQR використовується для регулювання подачі пульпи у зумпф з метою підтримання оптимальної щільності, показаний на (Рис. 2.10), [19]. Його основні характеристики:

Максимальний момент: 200 Н·м.

Діапазон регулювання швидкості: 10–60 об/хв.

Живлення: 380 В, 50 Гц.

Інтерфейси зв'язку: Modbus, Profibus.

Обґрунтування вибору Auma SQR:

Точність: Висока точність позиціонування та регулювання швидкості дозволяє забезпечити стабільну подачу пульпи.

Стійкість до умов експлуатації: Auma SQR адаптований до важких умов промислового середовища, включаючи вологість, пил і абразивні матеріали.

Інтеграція: Привід легко інтегрується в систему керування, підтримуючи стандартні протоколи обміну даними.

Надійність: Тривалий термін служби та низькі витрати на обслуговування забезпечують економічну ефективність.

Переваги електроприводу:

Висока довговічність завдяки міцній конструкції.

Вбудовані системи захисту від перевантаження.

Зручність обслуговування та налаштування.

Недоліки:

Вища вартість порівняно з базовими приводами.

Відносно велика вага.

Очікуваний результат: Електропривід Auma SQR дозволяє стабільно підтримувати оптимальну густину пульпи у зумпфі, що критично важливо для забезпечення ефективності процесу розмагнічування.

Порівняння з альтернативними рішеннями

Силовий блок:

Тиристорні блоки: дешевші, але менш ефективні через високі втрати енергії та обмежену частоту комутації.

MOSFET-блоки: підходять для низької напруги і струмів, але не здатні ефективно працювати при навантаженнях, характерних для розмагнічування.

Електропривід:

Механічні регулятори: дешевші, але вимагають значного обслуговування і менш точні.

Приводи іншого типу (наприклад, Siemens G120): аналогічні за точністю, але менш стійкі до складних умов експлуатації.

Для системи керування процесом розмагнічування обрано:

Силовий блок на IGBT-транзисторах, що забезпечує точне регулювання параметрів струму та напруги котушки розмагнічування.

Електропривід Auma SQR, який дозволяє стабільно підтримувати необхідну густину пульпи.

Обрані виконавчі механізми забезпечують ефективність, точність і довговічність системи, оптимально відповідаючи вимогам складних промислових умов.



Рисунок 2.10 – Auma SQR

2.3.4 Вибір промислового контролера та засобів введення-виведення

Промисловий контролер є центральним елементом автоматизованої системи керування процесом розмагнічування залізородної пульпи. Він відповідає за обробку сигналів від датчиків, прийняття рішень щодо регулювання параметрів процесу, а також за передачу команд на виконавчі механізми. Крім того, контролер забезпечує зв'язок із системами моніторингу,

управління та архівації даних. Вибір контролера та засобів введення-виведення є ключовим для забезпечення надійної роботи всієї системи автоматизації.

Промисловий контролер повинен відповідати наступним основним вимогам:

Контролер має працювати стабільно в умовах високих температур, вологості, пилу і вібрацій, характерних для промислових середовищ.

Контролер повинен швидко реагувати на зміни параметрів процесу, забезпечуючи мінімальні затримки в обробці даних і передачі команд.

Система повинна мати можливість легкого розширення для підключення додаткових датчиків, виконавчих механізмів або функцій.

Контролер повинен підтримувати промислові стандарти протоколів зв'язку (Modbus, Profibus, Ethernet/IP тощо) для інтеграції з існуючими системами на підприємстві.

Контролер має підтримувати можливість реалізації складних алгоритмів керування, таких як ПД-регулятори, нечітка логіка або нейронні мережі.

Для моніторингу та управління процесом на відстані контролер має підтримувати засоби віддаленого доступу.

Вибір промислового контролера

Для вибору контролера необхідно враховувати вимоги до процесу автоматизації, а також масштаби виробництва. Оскільки процес розмагнічування залізорудної пульпи є складним і включає в себе велику кількість датчиків і виконавчих механізмів, рекомендується вибрати контролер із розширеними можливостями обробки даних і підтримкою сучасних технологій автоматизації.

Siemens SIMATIC S7-1500:

Це одна з найпопулярніших платформ для промислової автоматизації. Контролери SIMATIC S7-1500, показаний на (Рис. 2.11), [20], підтримують великий набір входів/виходів, промислові протоколи зв'язку, можливості програмування складних алгоритмів та інтеграцію з SCADA-системами. Вони також мають високу продуктивність і надійність.

Основні характеристики:

ЦП: 1-16 Мбайт оперативної пам'яті.

Інтерфейси: Ethernet, Profinet, Modbus TCP, Profibus.

Швидкість обробки: до 1 нс на операцію.

Підтримка PID-регуляторів і програмування на мовах стандарту IEC 61131-3 (LAD, FBD, STL, SCL).

Підтримка масштабованості:

SIMATIC S7-1500 легко масштабується за рахунок використання додаткових модулів введення-виведення, що дозволяє розширювати систему без заміни основного контролера.



Рисунок 2.11 – Siemens S7-1500

2.3.5 Вибір промислового серверного ПК

Для системи адаптивного керування процесом розмагнічування залізорудної пульпи критично важливим є використання надійного серверного ПК, який забезпечує високу обчислювальну потужність, стабільність і тривалу роботу в жорстких промислових умовах. Я обрав SIMATIC IPC547G від Siemens, показаний на (Рис. 2.12), [21].

SIMATIC IPC547G (Siemens)

Характеристики:

Процесор: Intel Core i7-6700 або Xeon E3.

Оперативна пам'ять: до 64 ГБ DDR4.

Сховище: RAID1 (2×2 ТБ HDD або SSD).

Операційна система: Windows 10 IoT Enterprise, підтримка Linux.

Інтерфейси: 2× Ethernet (1 Гбіт), USB 3.0, PCIe.

Робоча температура: 0–45°C.

Захист: відповідність стандартам IP20.

Переваги:

Обчислювальна потужність: Завдяки процесорам Intel Core i7 або Xeon, сервер забезпечує високу продуктивність для виконання складних нейромережових алгоритмів у реальному часі.

Надійність: Розрахований на безперебійну роботу в умовах промислового середовища.

Масштабованість: Підтримка великого обсягу оперативної пам'яті та конфігурацій RAID для підвищення надійності зберігання даних.

Інтеграція: Легка інтеграція в систему автоматизації через стандартизовані інтерфейси (Ethernet, PCIe).

Недоліки:

Висока вартість у порівнянні з іншими промисловими серверами.

Обмеження щодо робочої температури (не більше 45°C).

Для системи керування процесом розмагнічування залізородної пульпи обрано SIMATIC IPC547G. Цей сервер забезпечує високу обчислювальну потужність, оптимальну інтеграцію з контролерами Siemens і підтримує сучасні стандарти промислової автоматизації. Порівняно з Advantech IPC-610 та Beckhoff C6930, SIMATIC IPC547G краще підходить для складних задач обробки даних, таких як реалізація нейромережових алгоритмів.



Рисунок 2.12 – SIMATIC IPC547G

В якості комутатора, я вибрав Комутатор SCALANCE XB205-3 — це промисловий Ethernet-комутатор від Siemens, призначений для побудови надійних і гнучких мереж у промислових умовах. Який має 5 портів Ethernet (10/100 Мбіт/с) для підключення пристроїв та 3 порти , які підтримують оптоволоконне підключення (для великих відстаней або захисту від електромагнітних завад).

Також підтримує технології Plug & Play (автоматична конфігурація без необхідності програмування). Має високу сумісність з пристроями PROFINET і стандартами IEEE.

Використовується для підключення PLC, HMI, контролерів і інших пристроїв у виробничих та автоматизованих системах.

Цей комутатор є ідеальним вибором для невеликих мереж у промислових умовах, де потрібна висока надійність і простота у використанні.

Зовнішній вигляд показано на (Рис. 2.13).



Рисунок 2.13 – Комутатор SCALANCE XB 205-3

2.4 Висновки до розділу

У другому розділі виконано комплексний підхід до розробки системи адаптивного керування процесом розмагнічування залізорудної пульпи, що включає структурну, математичну, алгоритмічну та технічну реалізації. Ключові результати розділу представлені нижче.

У підрозділі 2.1 виконано математичне забезпечення елементів системи керування, зокрема електромагнітної котушки, силового блоку, густиноміра, витратоміра та інших компонентів. Розроблено моделі для ідентифікації об'єкта керування, які описують поведінку системи в реальних умовах.

У підрозділі 2.2 розроблено алгоритм роботи системи та результати моделювання в середовищі Матлаб.

У підрозділі 2.3 обґрунтовано вибір апаратного забезпечення:

Для вимірювання параметрів обрано датчики високої точності, зокрема густиномір Rhosonics SDM, витратомір Siemens SITRANS FM MAGFLO і датчик струму LEM LT 100-P.

Виконавчі механізми включають силовий блок на IGBT-транзисторах для регулювання електричних параметрів котушки та електропривід Auma SQR для стабілізації густини пульпи.

Промисловий серверний ПК SIMATIC IPC547G забезпечує обробку великих обсягів даних і виконання нейромережових алгоритмів.

Обрані компоненти гарантують точність, надійність і адаптивність системи в умовах промислової експлуатації.

У розділі сформовано цілісну концепцію адаптивної системи керування процесом розмагнічування залізородної пульпи. Запропонована структура та алгоритми забезпечують високу ефективність, стабільність та енергоефективність роботи системи. Математичне моделювання та обґрунтований вибір технічних засобів створюють основу для успішної реалізації системи у промислових умовах.

РОЗДІЛ 3

3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА АПРОБАЦІЯ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ РОЗМАГНІЧУВАННЯ ЗАЛІЗОРУДНОЇ ПУЛЬПИ

3.1 Структурна схема проекту

Розробка структурної схеми проекту є одним з ключових етапів для визначення компонентів системи адаптивного керування процесом розмагнічування залізорудної пульпи, їх взаємодії та зв'язків між ними. Структурна схема відображає основні елементи системи, їх функціональне призначення і інформаційні потоки. Структурна схема показана на (Рис. 3.1).

Як і більшість систем автоматичного регулювання, дана система поділяється на три рівні:

Рівень «0» - так званий польовий рівень (Field Level) до складу якого входять первинні перетворювачі та виконуючі механізми.

Рівень «1» - рівень контролерів (Control Level), до його складу входять мікроконтролери.

Рівень «2» - рівень диспетчеризації (Supervisory Level), до його складу входять АРМи, сервера і т. інше.

Працює дана схема таким чином. Сигнали з датчиків надходять до мікроконтролера Siemens S7-1500, який оцифровує, нормалізує та виконує певні алгоритмічні дії з сигналами, потім через комутатор XB205 оброблений сигнал надходить на SCADA – системи АРМу оператора, для контролю та внесення змін до технологічного процесу; на АРМ АСУ ТП для діагностики і моніторингу фахівцями АСУ ТП, і на інженерну станцію АСУ ТП, для внесення змін, при необхідності, до програмного забезпечення. Основна математична та логічна обробка сигналів, разом з видачею сигналів керування виконуючими механізмами відбувається промисловим сервером Siemens, в якому запущена

нейронна мережа для обробки інформації. Керуючі сигнали, потім надходять на аналогові виходи мікроконтролера Siemens і згодом на виконуючі механізми.

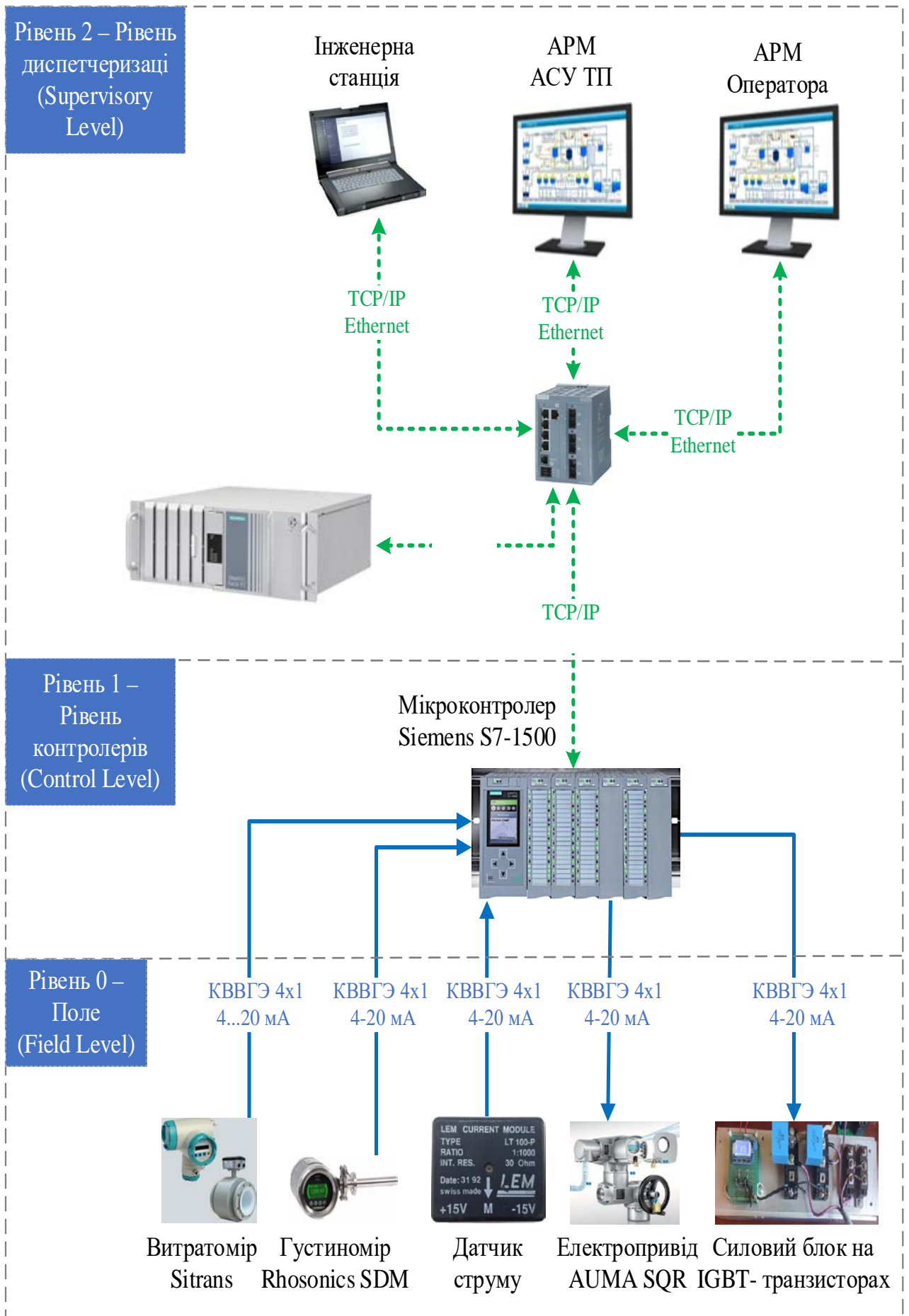


Рисунок 3.1 – Структурна схема автоматизації

3.2 Функціональна схема

Пояснення роботи функціональної схеми, яка показана на (Рис. 3.2).

Концентрат із технологічних секцій за допомогою гідротранспорту надходить до відділення зневоднення концентрату, розташованого в корпусі збагачення. Пульпа спрямовується на 5-ти струменевий пульпорозподільник.

Із 5-ти струменевого пульпорозподільника пульпа надходить на дешламатор типу МД–12 №12.

Після проходження дешламаторів згущений продукт надходить, з заданою щільністю, яка підтримується САР на базі мікропроцесорного регулятора «МІК-21» (в даному проєкті не розглядається), надходить у пульпорозподільник, поз. FD-13, на відмітці +0,100, звідки розподіляється потоком до технологічного зумпфа. Щільність концентрату підтримується за допомогою системи автоматичного регулювання, яка працює таким чином: фактична щільність вимірюється щільноміром, типу Rhosonics SDM, поз. 6а, і якщо, щільність концентрату в зумпфі більша, ніж необхідно, тоді відбувається відкриття виконуючого механізму, типу «Auma SQR» і збільшується подача технічної води в зумпф, до тих пір, доки величина фактичної щільності не досягне заданої. Але якщо щільність концентрату в зумпфі менша, ніж необхідно, тоді відбувається закриття виконуючого механізму і зменшується подача води в зумпф, до тих пір, доки величина фактичної щільності не досягне заданої.

Потім з технологічного зумпфа концентрат, заданої щільності, подається насосом по трубопроводу, який обладнаний розмагнічувальною котушкою, на 6-ти струменевий пульпорозподільник. Пульпорозподільник живить шість грохотів тонкого грохочення, типу «Derrick 2SG48–60R–5STKStackSizer™».

На грохотах Derrick 2SG48–60R–5STKStackSizer™ концентрат поділяється на два продукти:

1. Підрешітний продукт (ПР);
2. Надрешітний продукт (НР).

Надрешітний продукт є промпродуктом і прямує до зумпфа №1, звідки насосами типу «10/8MV-II-(6)-705L-100-PET» перекачується до пульпорозподільника, розташованого на секції №18 корпусу збагачення для повторного подрібнення. Витрати концентрату лінії НР контролюються витратоміром Sitrans, поз 3а.

Підрешітний продукт подається в зумпф №8, звідки насосами типу «10/8MV-II-(6)-705L-100-PET» спрямовується до 3-ох струменевого пульпорозподільника FD, для згущення і подальшого фільтрування. Витрати концентрату лінії ПР контролюються витратоміром Sitrans, поз 4а.

Співвідношення витрат підрешітного продукту до надрешітного продукту і буде показником якості роботи системи адаптивного керування процесом розмагнічування пульпи. Чим менше у нас продукту надходить по лінії надрешітки, тим більш ефективно працює котушка розмагнічення.

Також існує можливість архівувати величину та форму струму, яким протікає через котушку розмагнічення, за допомогою датчика струму на ефекті Холла, поз. 2а., а за допомогою алгоритмів нечіткої логіки можна знаходити закономірності між формою струму та оптимальним розмагнічуванням.

Силовий блок, поз. 7а, являється виконуючим механізмом, який впливає на режим роботи котушкою розмагнічування.

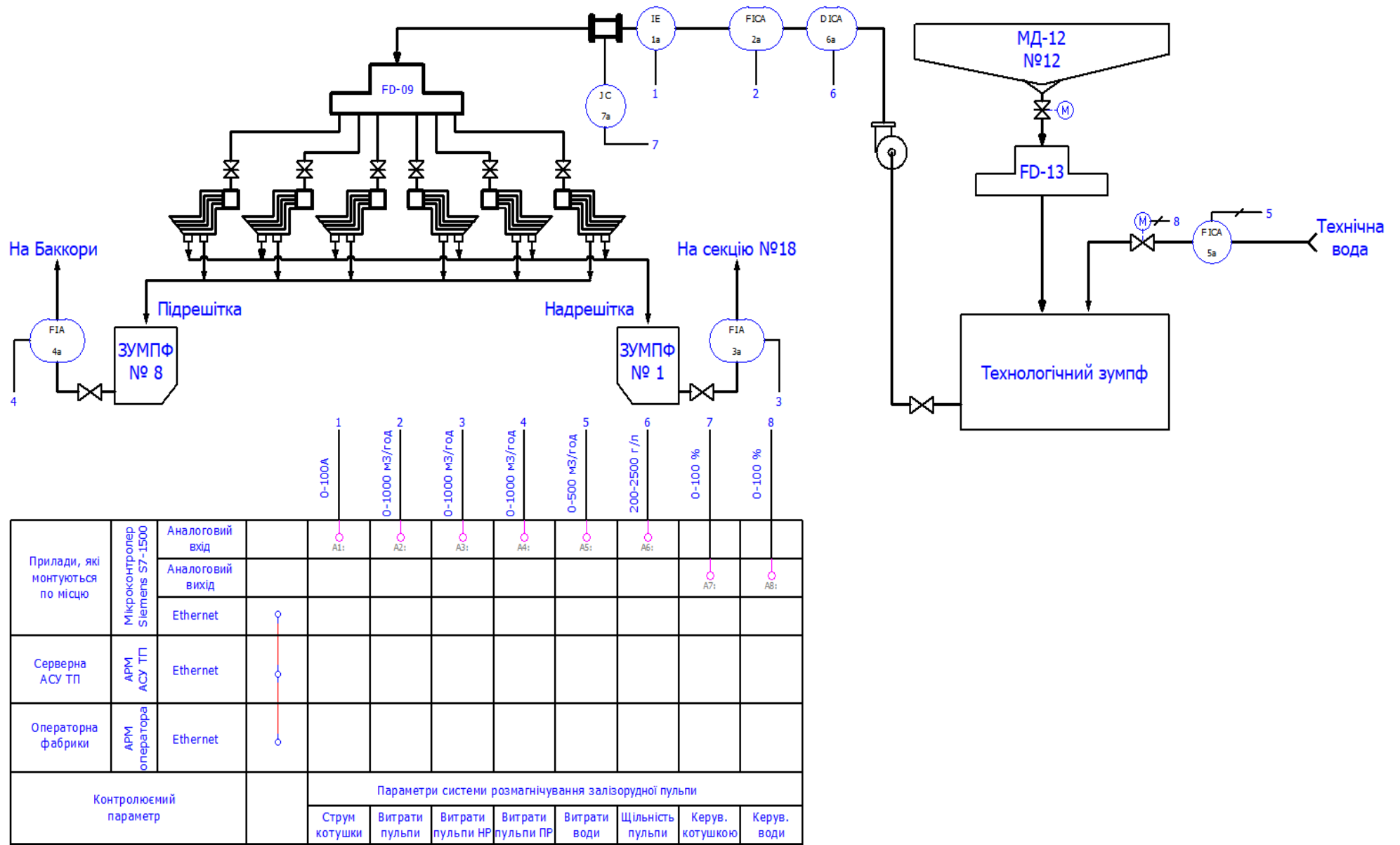


Рисунок 3.2 – Функціональна схема автоматизації

3.3 Принципова схема

Опис роботи принципової схеми показаної на (Рис. 3.3). Датчики витрати пульпи надрешітки (НР), (поз. 3а) та підрешітки (ПР), (поз. 4а) вимірюють витрату пульпи по відповідних технологічних лініях.

Вихідний сигнал 4–20 мА від кожного витратоміра передається на відповідні аналогові входи контролера Siemens S7-1500 (I0+, I1+).

Живлення витратомірів забезпечується від мережі змінного струму, напругою ~220 В, 50 Гц, з використанням захисного провідника (РЕ).

Датчик струму LEM LT 100-P вимірює струм котушки розмагнічування. Вихідний сигнал 4-20мА подається на відповідний аналоговий вхід контролера Siemens S7-1500 (I2+). Живиться датчик струму через блок живлення, що формує напругу ± 15 В. Блок живлення працює від мережі ~220 В, 50Гц.

Сенсор щільності концентрату генерує вихідний сигнал 4–20 мА, який надходить на аналоговий вхід контролера Siemens S7-1500 (I3+). Живлення сенсора забезпечується від мережі ~220 В.

Електропривод AUMA AC 01.2 (поз. 8а), використовується для регулювання подачі води. Він підключений до виходів (Q0+) контролера S7-1500. Живлення електроприводу забезпечується від мережі ~380 В, 50 Гц.

Силовий блок (поз. 7а), регулює роботу котушки розмагнічування на основі команд від контролера Siemens S7-1500 (Q1+). Живлення блоку забезпечується від мережі ~220 В.

Контролер Siemens S7-1500 приймає аналогові сигнали від витратомірів, датчика струму, сенсора щільності концентрату та передає їх до серверного ПК, який генерує сигнали управління для регулювання подачі води (AUMA) та керування струмом котушки розмагнічування. Живлення контролера забезпечується від джерела постійного струму напругою 24 В.

Основними функції системи є моніторинг витрат пульпи, щільності концентрату, струму котушки розмагнічування та керування подачею води та струмом котушки через виконавчі механізми.

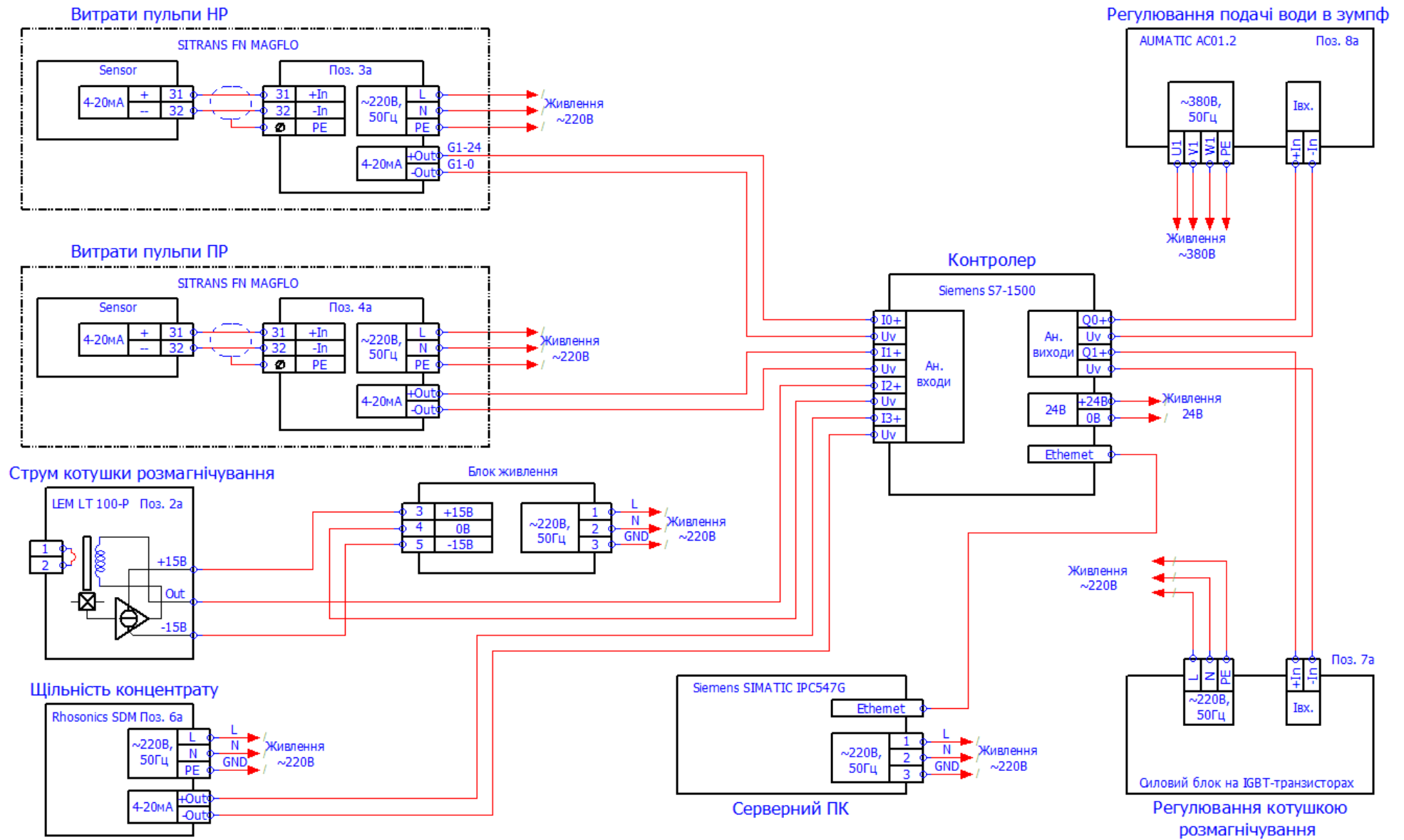


Рисунок 3.3 – Схема електрична принципова

3.4 Розробка програмного забезпечення системи адаптивного керування процесом розмагнічування залізорудної пульпи

Основною ідеєю є використання Siemens S7-1500 в якості пристрою для збору даних від датчиків і передачі їх на серверний ПК через OPC UA, де відбуваються обчислення (нейромережі, нечітка логіка). Результати розрахунків передаються назад на PLC для керування виконуючими механізмами.

Програмне забезпечення (ПЗ) є важливою частиною автоматизованої системи керування процесом розмагнічування залізорудної пульпи, оскільки воно забезпечує функціонування алгоритмів керування, аналіз даних від датчиків, моніторинг стану процесу та комунікацію з виконавчими механізмами. Правильний вибір ПЗ є критичним для досягнення високої ефективності системи, її гнучкості, масштабованості та надійності. У цьому пункті я розглянув критерії вибору та обґрунтування програмного забезпечення для реалізації системи керування процесом. Етапи реалізації показані на (Рис. 3.4).

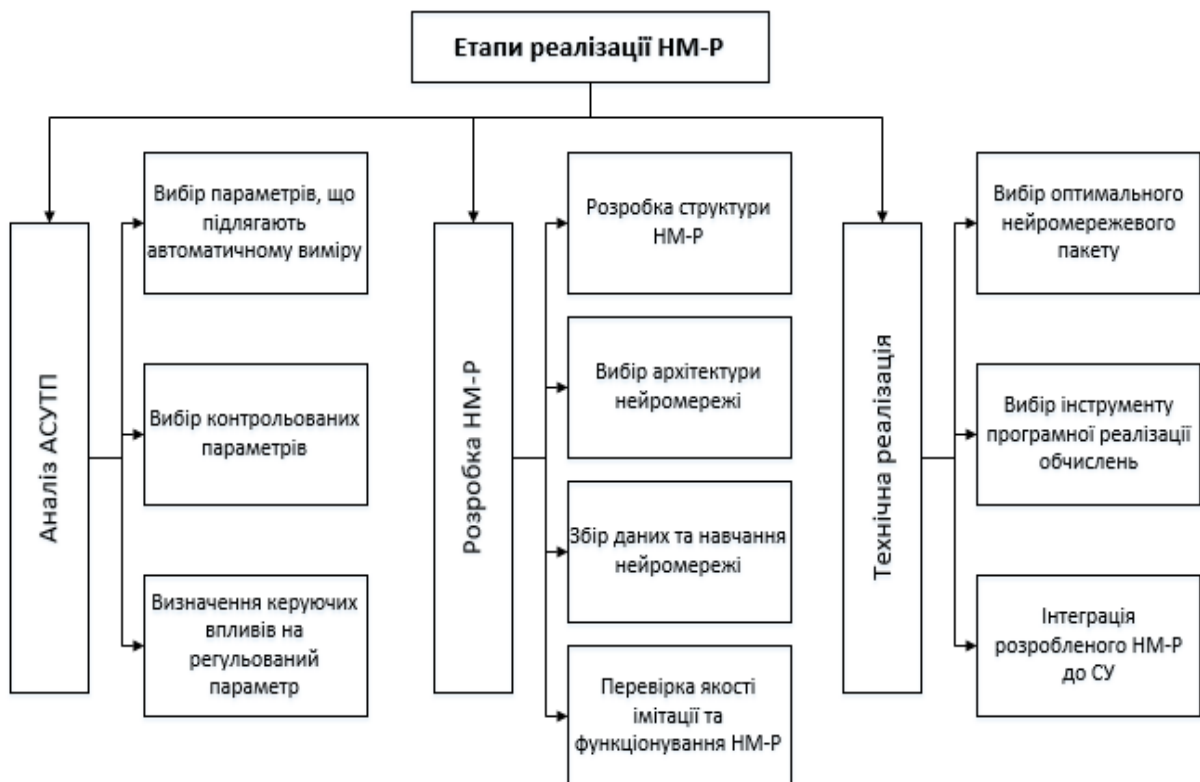


Рисунок 3.4 – Етапи реалізації нейронної мережі

Основні вимоги до програмного забезпечення

Вибір програмного забезпечення базується на наступних ключових вимогах:

1. Підтримка складних алгоритмів керування: ПЗ повинне мати можливість реалізації складних алгоритмів адаптивного керування, зокрема алгоритмів на базі нечіткої логіки, нейронних мереж або ПІД-регуляторів.

2. Швидкодія та обробка даних у реальному часі: Система повинна забезпечувати швидку обробку даних від датчиків і прийняття рішень у режимі реального часу для запобігання затримкам у процесі керування.

3. Інтеграція з обладнанням: ПЗ повинне підтримувати інтеграцію з апаратними засобами системи (контролерами, датчиками, виконавчими механізмами) через стандартні промислові протоколи, такі як Profibus, OPC UA тощо.

4. Можливість віддаленого моніторингу та керування: ПЗ повинне підтримувати віддалений доступ для моніторингу стану процесу та керування системою через інтерфейси, такі як веб-інтерфейси або спеціальні клієнтські програми.

5. Архівация даних та аналітика: Система повинна мати можливість зберігати дані з датчиків для подальшого аналізу, виведення графіків, прогнозування та оптимізації процесу.

6. Гнучкість та масштабованість: ПЗ повинне легко масштабуватись для додавання нових функцій або інтеграції додаткових компонентів у майбутньому.

Вибір програмного забезпечення

ПЗ для контролерів (PLC)

Для керування на рівні програмованих логічних контролерів (PLC) я використовую спеціалізоване програмне забезпечення, яке забезпечує розробку та реалізацію алгоритмів керування. Для даного проекту я вибрав Siemens TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal). Дане ПЗ має такі переваги:

1. Це інтегроване середовище розробки для автоматизації, яке дозволяє працювати з контролерами Siemens SIMATIC S7 (включно з S7-1200, S7-1500).

TIA Portal забезпечує повну інтеграцію з обладнанням, підтримує розробку ПІД-регуляторів.

2. Інтеграція з контролерами, панелями НМІ та пристроями введення-виведення.

3. Підтримка стандартів програмування IEC 61131-3 (Ladder, FBD, STL).

4. Інтерфейси для промислових протоколів (Profinet, Modbus).

5. Можливість симуляції процесу перед впровадженням.

Недоліками даного ПЗ є досить висока вартість ліцензії та складність для початкового налаштування та інтеграції без попереднього досвіду.

Для забезпечення зручного інтерфейсу операторів і моніторингу стану процесу використовуються системи НМІ (Human-Machine Interface), я вибрав Siemens WinCC (НМІ для TIA Portal). Дане ПЗ має такі переваги:

1. WinCC є частиною TIA Portal і забезпечує гнучке середовище для створення інтерфейсів оператора з підтримкою графічного відображення процесу, віддаленого моніторингу та архівації даних.

2. Підтримка динамічних графіків, панелей керування, сигналізації.

3. Архівація та аналіз даних в реальному часі.

4. Віддалений доступ до системи через веб-інтерфейси.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) системи забезпечують збір, архівацію та аналіз великих обсягів даних, а також моніторинг і управління технологічними процесами. В якості SCADA я вибрав Siemens WinCC SCADA тому, що це потужна система для моніторингу та управління, яка дозволяє візуалізувати процеси, архівувати дані та аналізувати їх для оптимізації роботи системи. Підтримує великі обсяги даних та тривалого архівування. Також підтримує віддалений доступ до системи через веб-інтерфейс. Та забезпечує підтримку широкого спектру протоколів для інтеграції з контролерами та іншими системами.

Для аналізу даних з метою оптимізації роботи системи, покращення ефективності процесу та прогнозування я використовую спеціалізоване ПЗ для обробки та аналізу великих обсягів даних.

Python — це високорівнева мова програмування загального призначення, яка відзначається простим і зрозумілим синтаксисом. Вона підходить для розробки веб-додатків, аналізу даних, автоматизації, машинного навчання та багатьох інших завдань завдяки великій кількості бібліотек і модулів. (для аналізу даних та машинного навчання).

Забезпечує гнучкі можливості для аналізу великих обсягів даних, побудови графіків та інтеграції з машинним навчанням. Використовується для прогнозування та оптимізації процесів.

Має широку бібліотеку інструментів для аналізу даних (NumPy, pandas, scikit-learn).

3.4.1 Реалізація алгоритмів керування у програмного забезпеченні TIA Portal V16.0

Siemens TIA Portal V16.0 (Totally Integrated Automation) є інтегрованою платформою для програмування та налаштування систем автоматизації, яка дозволяє розробляти алгоритми керування для промислових контролерів (PLC), моніторити процеси через інтерфейси HMI, а також інтегрувати компоненти системи автоматизації в єдину мережу. Реалізація алгоритмів керування в TIA Portal дозволяє забезпечити автоматичне та адаптивне управління технологічним процесом розмагнічування залізорудної пульпи.

Створюю новий проект і називаю його «Demagnetization_System».

Додаю контролер S7-1500, натискаючи у проекті «Add new device» та вибираю «Controller → CPU S7-1500». Вказую модель CPU 1515-2 PN. Артікул «6ES7 515-2AM02-0AB0». І натискаю «Add».

Потім додаю модулі вводу/виводу.

У вкладці «Device View» знаходжу модулі, які відповідають аналоговим датчикам. Тип модуля «AI 8xU/I/R/RTD BA_1». Перетягую його на потрібні слоти контролера.

Конфігурую аналогові входи (AI) на сигнал 4-20mA.

Таким чином добавляю модуль аналогового виходу. Який має такий тип «AQ 4xU/I ST_1».

Переконуюсь, що всі модулі вводу/виводу з'явилися у дереві конфігурації. Як показано на (Рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Налаштування

Призначаю IP-адресу контролеру «192.168.0.1».

Налаштовую змінні для сигналів. Створюю таблицю змінних.

Для цього переходжу у вкладку «PLC tags « → «Add new table».

Створюю змінні для кожного датчика.

FlowSensor_HP (тип: Real, область: AI).

FlowSensor_PR (тип: Real, область: AI).

CurrentSensor_Value (тип: Real, область: AI).

DensitySensor_Value (тип: Real, область: AI).

Призначаю адреси, для кожної змінної вказую адресу, яка відповідає фізичному входу модуля.

Створені теги та адреси показано на (Рис. 3.5).

Demagnetization_System ▶ PLC_1 [CPU 1515-2 PN] ▶ PLC tags

PLC tags

	Name	Tag table	Data type	Address
1	FlowSensor_HP	Default tag table	Int	%IW0
2	FlowSensor_PR	Default tag table	Int	%IW2
3	CurrentSensor_Value	Default tag table	Int	%IW4
4	DensitySensor_Value	Default tag table	Int	%IW6

Рисунок 3.5 – Теги сигналів від датчиків

Створюю логіку обробки сигналів.

Для оцифровки аналогової величини створюю функцію «Scale» як показано на (Рис. 3.6).

Demagnetization_System ▶ PLC_1 [CPU 1515-2 PN] ▶ Program blocks ▶ SCALE [FC]

SCALE

	Name	Data type	Default value	Comment
1	Input			
2	N	Int		
3	HL	Real		
4	LL	Real		
5	<Add new>			
6	Output			
7	OUT	Real		
8	<Add new>			
9	InOut			
10	<Add new>			
11	Temp			
12	<Add new>			

IF... CASE... OF... FOR... TO DO... WHILE... DO... (*...*) REGION

Block title:

Comment

Network 1:

Comment

```
1 #OUT := #N * (#HL - #LL) / 27648 + #LL;
```

Рисунок 3.6 – Модуль SCALE

Тепер програма має такий вигляд, як показано на (Рис. 3.7).

Demagnetization_System ▶ PLC_1 [CPU 1515-2 PN] ▶ PLC tags

PLC tags

	Name	Tag table	Data type	Address
1	FlowSensor_HP	Default tag table	Int	%IW0
2	FlowSensor_PR	Default tag table	Int	%IW2
3	CurrentSensor_Value	Default tag table	Int	%IW4
4	DensitySensor_Value	Default tag table	Int	%IW6
5	Витрати HP	Default tag table	Real	%MD8
6	Витрати PP	Default tag table	Real	%MD12
7	Струм котушки	Default tag table	Real	%MD16
8	Щільність концентрату	Default tag table	Real	%MD20

Рисунок 3.7 – Всі теги по датчикам

Нетворк, який показано на (Рис. 3.8), зроблено по кожному з аналогових ВХОДІВ.

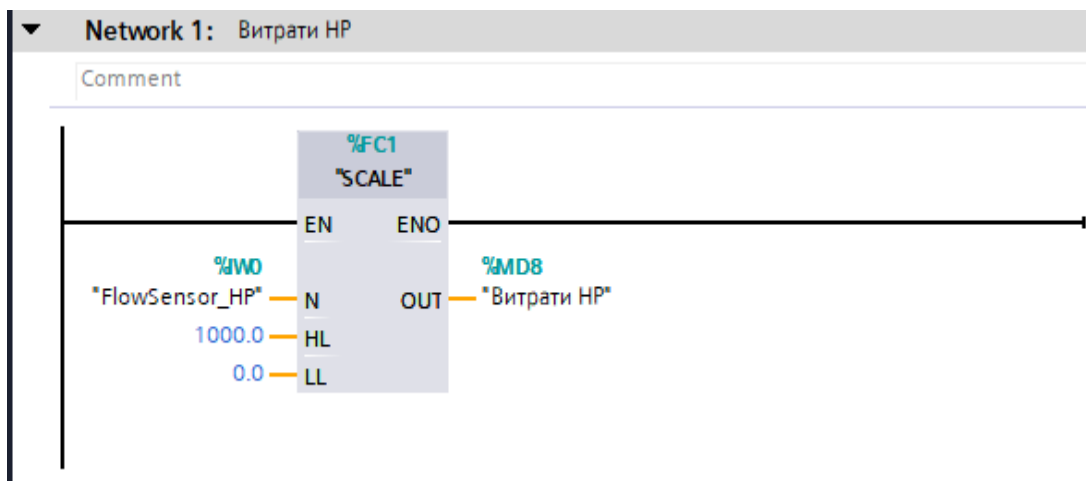


Рисунок 3.8 – Блок нормалізації сигналу

Тепер включаю OPC UA та налаштовую параметри сервера.

У розділі «General» назву за замовчуванням «S7-1500 OPC UA Server» залишаю. IP-адреса контролера 192.168.0.1.

У розділі «Security» налаштовую рівень безпеки. Для цього вибираю типи шифрування Basic256Sha256 для високого рівня безпеки.

Після цього додаю зміни у OPC UA. Для цього переходжу до вкладки «User-Defined Namespace». Цей розділ дозволяє визначати змінні, які будуть доступні

через OPC UA. Та додаю змінні (теги). Для цього натискаю «Add Tag» і вибираю змінні з програми.

Усі змінні, які я додав, відображаються у таблиці, як показано на (Рис. 3.9).

	Name	Tag table	Data type	Address	Re...	Writable from HMI/OPC UA/Web API	Sup...	Accessible from HMI/OPC UA/W...	Visi...	C
1	FlowSensor_HP	Default tag table	Int	%IW0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	FlowSensor_PR	Default tag table	Int	%IW2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	CurrentSensor_Value	Default tag table	Int	%IW4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	DensitySensor_Value	Default tag table	Int	%IW6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Витрати НР	Default tag table	Real	%MD8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Витрати ПР	Default tag table	Real	%MD12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Струм котушки	Default tag table	Real	%MD16	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Щільність концентрату	Default tag table	Real	%MD20	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	<Add new>				<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Рисунок 3.9 – Налаштування змінних для передачі по OPC UA

Зберігаю проект. Компілюю проект та перевіряю на помилки. Завантажую проект у CPU. Переходжу до «Online» → «Download to Device». Вибираю контролер, натисніть «Load», а потім переводжу CPU у режим «Run». Як показано на (Рис. 3.10) та (Рис. 3.11).

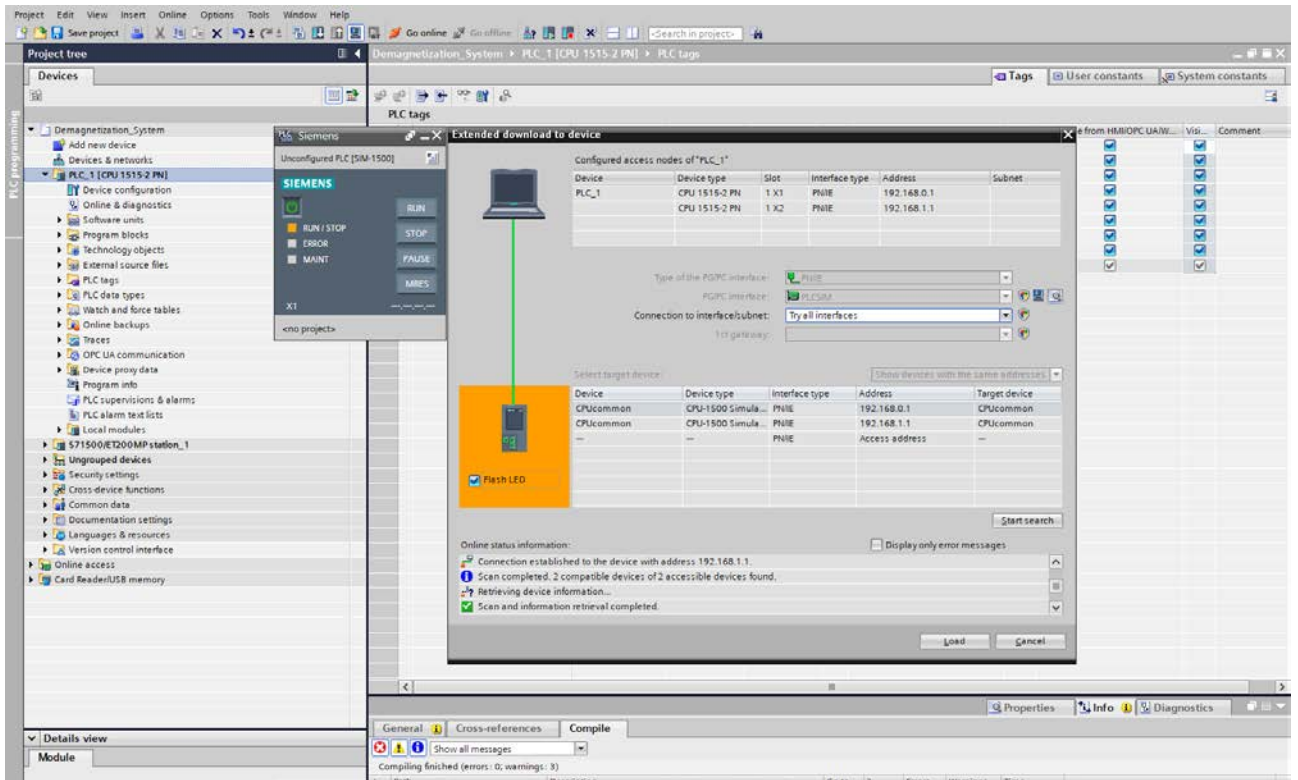


Рисунок 3.10 – Підключення в режимі онлайн

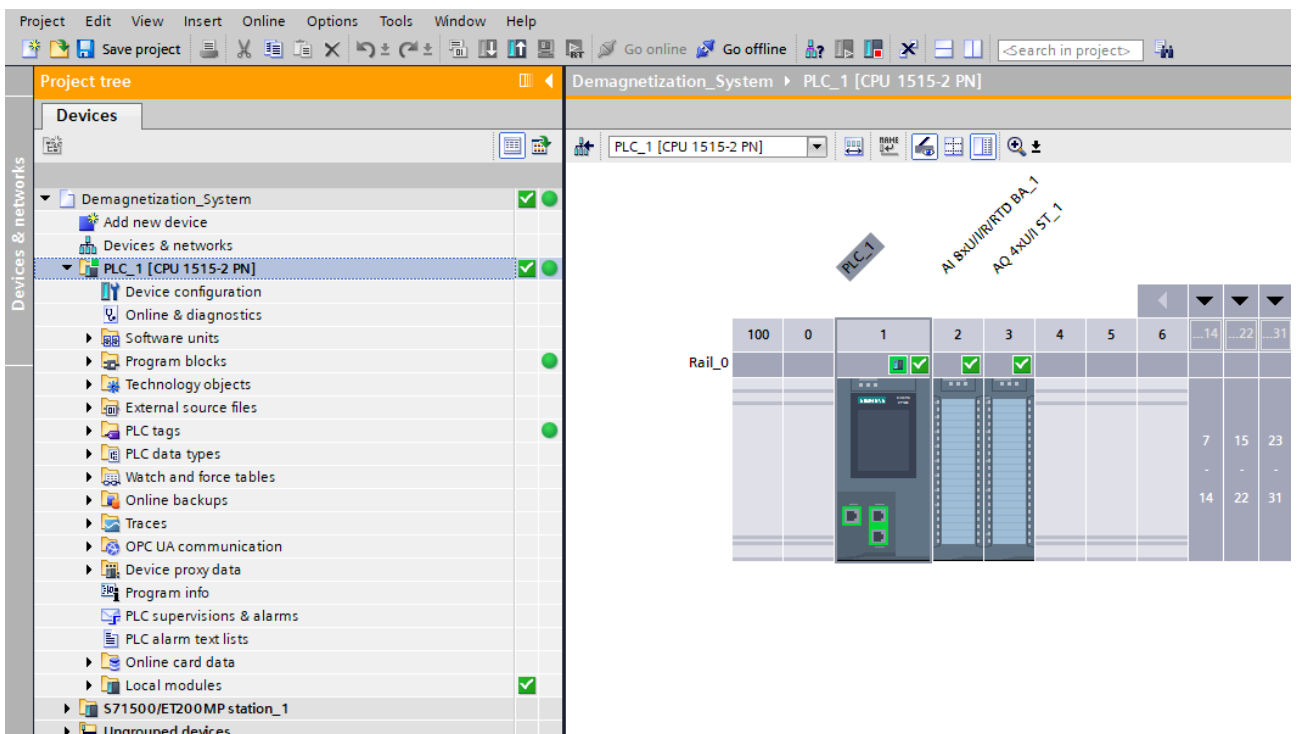


Рисунок 3.11 – Режим онлайн

Після вдалого завантаження до контролера, перевіряю OPC UA сервера. Для цього підключаю через OPC UA клієнт.

Використовуючи програму UaExpert, яку завантажив з офіційного сайту Unified Automation. Встановив UaExpert і запускаю. Додаю новий сервер у UaExpert. Натискаю «Add Server» → «Discovery». Та вводжу URL контролера «opc.tcp://192.168.0.1:4840». Після цього натискаю «Connect».

Після виконання цих кроків OPC UA сервер увімкнено на S7-1500. Змінні з програми доступні через OPC UA. Тепер можливо зчитувати та передавати дані із PLC на серверний ПК або інші системи.

Тепер виконую налаштування виконуючих механізмів (електроприводу Auma SQR і силового блоку на IGBT- транзисторах). Для цього потрібно підключити до S7-1500 через відповідні виходи контролера, щоб передавати керуючі сигнали з серверного ПК через PLC.

Перевіряю модуль у конфігурації TIA Portal. Для цього на вкладці «Device View» переконуюсь, що «AQ 4xU/I ST_1» доданий до S7-1500, а розташування модуля у слотах CPU збігається з фізичним підключенням. Після цього налаштовую режим модуля. Для цього клацаю на модуль в «Device View». Переходжу у вкладку «Properties» → «General» → «Channel Configuration». Для кожного каналу вибираю режим виходу «Current output» «(4-20 mA)», як показано на (Рис. 3.12).

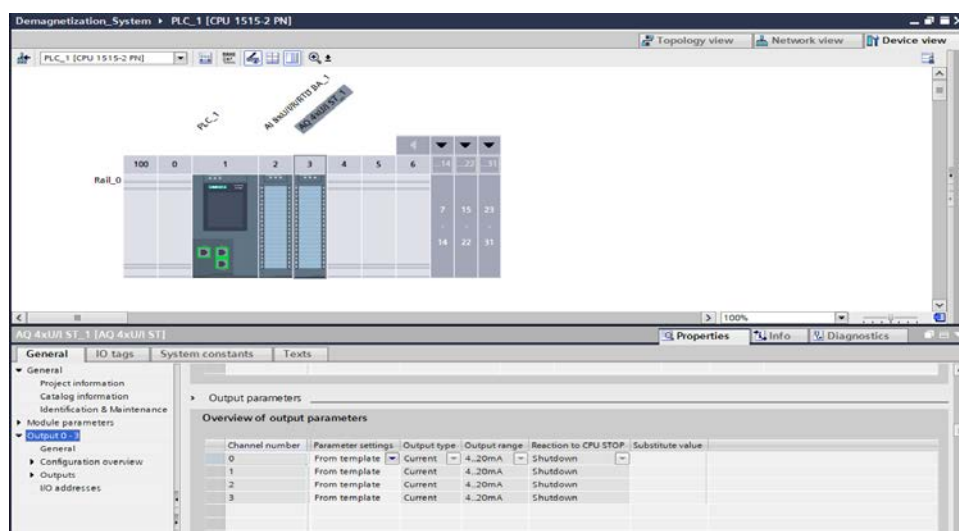


Рисунок 3.12 – Конфігурування CPU

Виконую налаштування змінних. Додаю змінні для виходів. Переходжу у вкладку «PLC Tags» → «Add New Table». Створюю змінні для вихідних сигналів:

1. Auma_Control (тип: Real) — для керування клапаном.
2. PowerBlock_Control (тип: Real) — для керування струмом силового блоку.

Призначаю адреси:

Auma_Control → %QW64 (канал 0 модуля AQ).

PowerBlock_Control → %QW66 (канал 1 модуля AQ).

3.4.2 Розробка ПЗ для серверного ПК

На серверному ПК Siemens SIMATIC IPC547G, який виконує роль центрального елемента системи керування, розробляється програмне забезпечення мовою програмування Python, [23], [24]. Цей програмний код інтегрує технологію нейро-нечіткої логіки (ANFIS) з даними, що надходять від контролера Siemens S7-1500. Зв'язок між контролером і серверним ПК здійснюється по мережі за протоколом OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture), який забезпечує незалежну від платформи, надійну та безпечну передачу даних. Це дозволяє центральному ПК отримувати оперативну інформацію про технологічні параметри процесу, зокрема про струм розмагнічування та витрати пульпи.

Основне завдання програмного забезпечення на Python – застосувати алгоритм ANFIS для визначення оптимальних параметрів керування розмагнічуванням пульпи. ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) поєднує можливості нечіткої логіки та штучних нейронних мереж, що дозволяє адаптивно налаштовувати правила керування. Програма завантажує попередньо навчену ANFIS-модель (FIS-файл), або ж проводить навчання на основі доступних історичних даних, які характеризують залежність між формою струму (зокрема його частотою, амплітудою та швидкістю згасання) та вихідними

характеристиками – обсягами підрешітки (годного класу) та надрешітки (повернення).

Форма струму котушки розмагнічування є ключовим чинником у визначенні ефективності процесу. Алгоритм ANFIS у реальному часі оцінює вхідні сигнали: чим частіше й швидше струм переходить через нуль (висока частота коливань з поступовим затуханням амплітуди), тим ефективніше розмагнічуються феромагнітні включення, що містяться в пульпі. Це приводить до більш інтенсивного відділення підрешітки як годного продукту та зменшення частки надрешітки (повернення). Тобто, ANFIS безпосередньо впливає на кінцеву якість та склад продукту, оскільки його вихідні дані можуть коригувати параметри ШІМ (duty cycle), частоту та амплітуду струму.

Програмний код на Python регулярно опитує OPC UA-сервер, зв'язаний із S7-1500, отримуючи поточні виміряні значення: струм, значення датчиків Холла, витрати надрешітки та підрешітки. Оскільки загальний потік пульпи становить приблизно 600 м³/год, при цьому співвідношення між надрешіткою та підрешіткою залежить від успішності розмагнічування, алгоритм корегує параметри струму в режимі реального часу. За допомогою вбудованих бібліотек Python для OPC UA зчитуються теги контролера, перетворюються у відповідний формат для ANFIS-моделі та подаються на вхід нейро-нечіткої системи.

Результат обробки ANFIS – це оптимізовані значення керуючих змінних, що можуть включати оновлення параметрів ШІМ (заповнення імпульсів), коригування частоти та амплітуди сигналу розмагнічування. Програмне забезпечення на Python використовує ці результати для формування вихідних сигналів, які, у свою чергу, через OPC UA можуть бути надіслані назад до S7-1500 або до відповідних проміжних модулів керування IGBT-транзисторами. Таким чином, забезпечується замкнене контурне регулювання: дані з поля (струм та витрати), надходять на серверний ПК, де обробляються ANFIS-моделлю, а результати впливають на процес генерації сигналів управління в режимі реального часу.

У Python можна легко інтегрувати математичні пакети, такі як NumPy, SciPy, scikit-fuzzy або сторонні реалізації ANFIS, що прискорює розробку та налагодження. Крім того, візуалізація даних можлива за допомогою matplotlib або Plotly, що дозволяє інженерам спостерігати тенденції зміни струму, перевіряти форму сигналу, оцінювати співвідношення надрешітки/підрешітки та ефективність роботи алгоритму. Інтерфейси можуть бути реалізовані як локально (на моніторах операторської станції), так і віддалено (через веб-додатки).

Таким чином, розробка ПЗ на Python для серверного ПК Siemens SIMATIC IPC547G є гнучким та потужним інструментом, який поєднує у собі передові методи інтелектуального управління (ANFIS) із сучасними комунікаційними протоколами (OPC UA), та надійну промислову апаратну базу (S7-1500). Це забезпечує адаптивне керування процесом розмагнічування пульпи, оптимізацію кінцевого продукту (підрешітки) та підвищену ефективність у промислових умовах. Структура показана на (Рис. 3.13).



Рисунок 3.13 – Структурна схема нейромережевого регулятора

Інформація про процес збирається з датчиків, включає впливи збурень і задані параметри, після чого передається на нейронну мережу, яка моделює поведінку оператора. Нейронна мережа (НМ-Р) формує керуючий сигнал і передає його на виконавчий механізм для стабілізації контрольованого процесу.

Розроблений нейромережевий регулятор реалізовано у вигляді інформаційно-обчислювального комплексу, що включає чотири основні блоки:

1. База даних — для зберігання інформації про стан процесу та історичних даних.
2. Нейронна мережа — для аналізу даних і генерації керуючого сигналу.
3. Модуль навчання — для адаптації нейронної мережі до змін у процесі.
4. Модуль прийняття рішень — для формування оптимального керуючого впливу.

Налаштовую мережу. Забезпечую щоб серверний ПК і S7-1500 підключені до однієї локальної мережі. Назначаю серверному ПК статичну IP-адресу 192.168.0.2).

Завантажую Python із офіційного сайту.

Після цього перевіряю чи встановлений Python, виконавши в терміналі команду, як показано на (Рис. 3.14).

```
Windows PowerShell
(C) Корпорація Майкрософт (Microsoft Corporation). Все права захищені.
Попробуйте нову кроссплатформенну оболочку PowerShell (https://aka.ms/pscore6)
PS C:\Users\Home> python --version
>>
Python 3.12.1
```

Рисунок 3.14 – Перевірка версії Python

Після цього встановлюю основні бібліотеки.

`numpy` та `scipy` — для математичних обчислень.

`matplotlib` — для візуалізації.

`scikit-fuzzy` — для нечіткої логіки.

`dash` та `flask` — для створення інтерфейсу.

`pyModbus` та `орсуа` — для зв'язку з PLC.

Завантажую IDE для розробки, а саме VS Code із офіційного сайту. Та встановлюю розширення Python.

Платформу для моделювання я використовую Jupyter Notebook (встановив через `pip install jupyter`).

Для тестування протоколів використовую OPC UA — клієнт UaExpert.

Розробка базового коду

1. Зв'язок із датчиками:

Встановлюю бібліотеку OPC UA через термінал, виконавши цей код «`pip install opcua`».

Створюю файл `opc_ua_reader.py`, який буде модулем для роботи з OPC UA.

Створюю окремий модуль Python для читання даних із датчиків через OPC UA.

2. Алгоритми нечіткої логіки:

ANFIS поєднує нейронні мережі та нечіткі логічні системи, що дозволяє моделювати складні нелінійні залежності між вхідними та вихідними параметрами. У цьому випадку ANFIS буде аналізувати форму струму і визначати оптимальні параметри розмагнічування.

У Python немає прямої підтримки ANFIS, проте існують бібліотеки та реалізації, які можуть бути використані або адаптовані для цієї мети, такі як `anfis` або `scikit-fuzzy` разом з власними розширеннями. 3. Інтеграція з PLC:

Створюю функції для надсилання керуючих команд через `pyModbus`.

Код реалізації.

```
import numpy as np
import skfuzzy as fuzz
from opcua import Client
import time

# Параметри системи
Fs = 1000 # Частота дискретизації (Гц)
```

```

Tsim = 0.1 # Час симуляції (сек)
dt = 1 / Fs
num_steps = int(Tsim * Fs)
t = np.linspace(0, Tsim, num_steps)

# Параметри затухаючих коливань
I0 = 50 # Початкова амплітуда струму (А)
alpha = 50 # Коефіцієнт затухання

# Частота коливань
f = 300 # Гц

# Струм котушки (затухаючі коливання)
iL = I0 * np.exp(-alpha * t) * np.cos(2 * np.pi * f * t)

# Вихідні витрати без обмеження
over_screen_flow_raw = 250 + 50 * np.sin(2 * np.pi * 0.1 * t)
under_screen_flow_raw = (350 + 100 * np.cos(2 * np.pi * 0.05 * t)) * (1 + f /
200)

# Розрахунок співвідношення
R_raw = under_screen_flow_raw / over_screen_flow_raw

# Масштабування так, щоб сумарні витрати ≤ 600 м³/год
total_flow_raw = over_screen_flow_raw + under_screen_flow_raw
scale_factor = 600 / total_flow_raw
over_screen_flow = over_screen_flow_raw * scale_factor
under_screen_flow = under_screen_flow_raw * scale_factor

# Перераховуємо кінцеве співвідношення R

```

```

R = under_screen_flow / over_screen_flow

# Ініціалізація ШІМ
pwm_signal = np.zeros_like(t)
duty_cycle = np.zeros_like(t)

# Логіка зміни ШІМ
for k in range(len(t)):
    if R[k] > 1:
        duty_cycle[k] = 0.6 + 0.2 * np.sin(2 * np.pi * 0.1 * t[k]) # ~60%-80%
    else:
        duty_cycle[k] = 0.3 + 0.2 * np.sin(2 * np.pi * 0.1 * t[k]) # ~30%-50%
# Генерація ШІМ-сигналу
pwm_signal[k] = 1 if (int(t[k] * Fs) % int(1 / duty_cycle[k] * Fs)) <
duty_cycle[k] * Fs else 0

# Моделювання датчика Холла (шум)
hall_sensor_output = iL + 0.01 * np.random.randn(len(iL))

# Візуалізація результатів
import matplotlib.pyplot as plt

plt.figure(figsize=(12, 15))

# 1) Витрати
plt.subplot(5, 1, 1)
plt.plot(t, over_screen_flow, label='Надрешітка')
plt.plot(t, under_screen_flow, label='Підрешітка')
plt.title('Витрати пульпи (загалом не більше 600 м³/год)')
plt.legend()

```

```
plt.xlabel('Час, с')
plt.ylabel('Витрати (м³/год)')
plt.grid(True)
```

2) Співвідношення R

```
plt.subplot(5, 1, 2)
plt.plot(t, R, 'k')
plt.title('Співвідношення підрешітка/надрешітка (R)')
plt.xlabel('Час, с')
plt.ylabel('R')
plt.grid(True)
```

3) ШІМ-заповнення

```
plt.subplot(5, 1, 3)
plt.plot(t, duty_cycle, 'm')
plt.title('ШІМ-заповнення (Duty Cycle)')
plt.xlabel('Час, с')
plt.ylabel('Заповнення')
plt.grid(True)
```

4) ШІМ-сигнал

```
plt.subplot(5, 1, 4)
plt.plot(t, pwm_signal, 'g')
plt.title('ШІМ-сигнал')
plt.xlabel('Час, с')
plt.ylabel('ШІМ')
plt.grid(True)
```

5) Струм котушки розмагнічування та сигнал з датчика Холла

```
plt.subplot(5, 1, 5)
```

```
plt.plot(t, iL, label='Струм котушки')
plt.plot(t, hall_sensor_output, '--', label='Датчик Холла')
plt.title('Струм котушки та сигнал з датчика Холла')
plt.legend()
plt.xlabel('Час, с')
plt.ylabel('Струм (А)')
plt.grid(True)

plt.tight_layout()
plt.show()
```

```
# Підключення до OPC UA серверу
client = Client("opc.tcp://<IP_ADDRESS>:4840") # Замість <IP_ADDRESS>
вставте IP контролера S7-1500
```

```
try:
```

```
    client.connect()
    print("Підключено до OPC UA серверу")
```

```
# Підключення до необхідних змінних
```

```
# Замініть NodeId на відповідні вашій системі
```

```
current_node = client.get_node("ns=2;s=Machine1/Current")
```

```
flow_node = client.get_node("ns=2;s=Machine1/Flow")
```

```
for k in range(len(t)):
```

```
    # Зчитування поточних значень
```

```
    current_value = current_node.get_value()
```

```
    flow_value = flow_node.get_value()
```

```
# Обробка даних через ANFIS (потрібно реалізувати модель ANFIS)
```

```
# Приклад: output = ANFIS(current_value, flow_value)
```



```
# output = anfis_model.predict([current_value, flow_value])

# Регулювання витрат на основі ANFIS виходу
# Тут можна встановити нові значення витрат через OPC UA або інші
методи
# Наприклад:
# flow_node.set_value(new_flow_value)

# Затримка відповідно до частоти дискретизації
time.sleep(dt)

finally:
    client.disconnect()
    print("Відключено від OPC UA серверу")
```

Встановлення бібліотеки ANFIS

```
pip install anfis
```

Приклад реалізації

```
import anfis
import membership # Це залежить від конкретної бібліотеки ANFIS
from sklearn.model_selection import train_test_split

# Припустимо, що у вас є навчальні дані
X = np.column_stack((iL, R)) # Вхідні дані: струм та співвідношення
Y = under_screen_flow # Вихідні дані: витрати підрешітки

# Розділення даних на навчальні та тестові
```

```
X_train, X_test, Y_train, Y_test = train_test_split(X, Y, test_size=0.3,  
random_state=42)
```

```
# Створення ANFIS-моделі  
model = anfis.ANFIS(X_train, Y_train, m=3) # m - кількість членських  
функцій
```

```
# Тренування моделі  
model.trainHybridJangOffLine(epochs=10)
```

```
# Прогноз на тестових даних  
Y_pred = model.predict(X_test)
```

```
# Оцінка моделі  
mse = np.mean((Y_test - Y_pred)**2)  
rmse = np.sqrt(mse)  
print(f"MSE: {mse:.4f}, RMSE: {rmse:.4f}")
```

Після тренування моделі ANFIS її можна зберегти та використовувати для прогнозування в режимі реального часу.

```
import joblib
```

```
# Збереження моделі  
joblib.dump(model, 'anfis_model.pkl')
```

```
# Завантаження моделі для використання  
model = joblib.load('anfis_model.pkl')
```

```
# Використання моделі для прогнозування
```

```
current_value = hall_sensor_output[k]
flow_ratio = R[k]
Y_output = model.predict([current_value, flow_ratio])

# Регулювання витрат підрешітки на основі ANFIS виходу
under_screen_flow[k] = Y_output
over_screen_flow[k] = 600 - Y_output
```

3.5 Висновки до розділу

У рамках виконання дипломної роботи було здійснено розробку структурної, функціональної та принципової схем проекту, що забезпечують базу для побудови комплексної системи адаптивного керування процесом розмагнічування залізородної пульпи. Кожен із цих підрозділів зробив внесок у загальну концепцію автоматизації, враховуючи вимоги до надійності, ефективності та гнучкості системи.

Структурна схема проекту визначила основні компоненти системи, їх взаємозв'язок і розподіл функцій між апаратними та програмними елементами. Базуючись на використанні сучасного обладнання, таких як контролери S7-1500, сенсорні пристрої та серверний ПК, схема дозволила окреслити загальний підхід до побудови інтегрованої системи керування.

Функціональна схема проекту деталізувала роботу кожного компонента системи. Зокрема, вона визначила функції збору даних із датчиків, передачі їх на серверний ПК, обробки інформації за допомогою нейромережевих та нечітких алгоритмів, а також передачі керуючих сигналів назад до виконуючих механізмів. Це забезпечило точне розуміння роботи всієї системи в динамічному режимі.

Принципова схема проекту відобразила детальний технічний опис підключення обладнання. Особлива увага приділялася підключенню датчиків, модулів аналогового вводу/виводу, системам живлення та зв'язку між

компонентами. Це дало змогу забезпечити стабільну роботу системи та її адаптивність до змін у технологічному процесі.

Розробка програмного забезпечення системи адаптивного керування забезпечила ключовий інтелектуальний блок проекту. Використання алгоритмів нейромереж та нечіткої логіки дозволило створити адаптивну систему, яка автоматично оптимізує параметри розмагнічування залежно від стану пульпи. Це забезпечило ефективне використання ресурсів та покращення якості технологічного процесу..

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі виконано всебічне дослідження задачі підвищення ефективності керування процесом розмагнічування залізорудної пульпи, розроблено систему автоматизації цього процесу та здійснено її практичну реалізацію з апробацією у лабораторних і модельних умовах.

На етапі аналізу задачі підвищення ефективності керування процесом було детально вивчено існуючі технологічні підходи, технічні рішення та методи автоматизації, які застосовуються на сучасних гірничо-збагачувальних комбінатах. Показано основні недоліки цих систем, такі як низька енергетична ефективність та недостатня адаптивність до змін параметрів пульпи. Це стало основою для формулювання завдання розробки адаптивної системи керування, яка могла б автоматично підлаштовуватися під змінні умови процесу.

На етапі розробки та дослідження системи автоматизації створено структурну та функціональну архітектуру системи, яка поєднує в собі сучасне обладнання, включаючи контролер S7-1500, сенсори щільності концентрату, витрат і струму, а також алгоритми обробки даних, що базуються на нейромережах. Було розроблено математичну модель процесу розмагнічування, яка враховує змінні характеристики пульпи та магнітного поля. На основі цієї моделі побудовано алгоритми адаптивного керування, які забезпечують оптимальну роботу системи навіть за умов значних коливань технологічних параметрів.

На етапі реалізації та апробації системи адаптивного керування здійснено інтеграцію розробленої системи в середовище промислової автоматизації. Використання протоколу OPC UA забезпечило зручний обмін даними між PLC і серверним ПК, де виконувалися обчислення алгоритмів керування. У SCADA-системі реалізовано інтерфейс візуалізації процесу, який дозволяє оператору в реальному часі відслідковувати параметри пульпи та керуючі дії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Березняк А.А. Экспериментальные результаты классификации размагниченного магнетита / А.А. Березняк, Е.А. Березняк, А. Алмейда // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк : ДонНТУ – 2013. – №2(33). – С. 219-223.

2. Березняк А.А. Размагничивание ферромагнитных частиц в пульпе / А.А. Березняк, И.К. Младецкий, Э.М. Пайва // Збагачення корисних копалин: Науковотехнічний збірник. – Дніпропетровськ: ДВНЗ «НГУ». – 2014. – Вип. 57(98). – С.130-137.

3. Захарова Л.А. Промышленные испытания технологии получения высококачественных концентратов на РУ им. Ф.Э. Дзержинского / Л.А. Захарова, Н.А. Гонтаренко, Б.М. Малый и др. // Особенности обогащения тонковкрапленных руд черных металлов. – М.: Надра, 1985. – С. 6–10.

4. Младецкий І.К., Березняк О.О., Куваєв В.М., Куваєв Я.Г., Березняк О.О. 3-69 Змінні магнітні поля в сепарації і розмагнічуванні тонких ферромагнітних матеріалів: [Монографія.] — Дніпро: Середняк Т. К., 2019, — 128 с.

5. Моркун В.С. Адаптивные системы оптимального управления технологическими процессами / В.С. Моркун, А.А. Цокурченко, И.А. Луценко. Кривой Рог: Минерал, 2005. 261 с.

6. Навчальний посібник Автоматизація технологічних процесів і систем автоматичного керування (частина 1) (kyrator.com.ua)(studme.org).

7. Білецький В.С. Феноменологічний метод дослідження технологічних процесів у гірництві // *Донецьк. Вісті Донецького гірничого інституту*. 2013.№2. С. 149–152.

8. Купін А.І. Обґрунтування використання технологій штучного інтелекту для управління технологічним процесом збагачення магнетитових кварцитів / А.І. Купін // Вісник Криворізького технічного університету. 2003. №1. – С. 51 – 55.

9. Субботін С. О. Нейронні мережі: теорія та практика: навч. посіб. Житомир: Вид. 2020. 184 с.

10. Заявка 1783829. 18.05.1972. КРИВОРОЖСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОРНОРУДНЫЙ ИНСТИТУТ. ЧАЙКО Н. Н., ФАЙНШТЕЙН Э. Г., ТОЛМАЧЕВ С. Т., ТКАЧ В. И. Устройство для размагничивания пульпы ферромагнитных материалов.

11. Заявка 1875611. 25.01.1973. ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ГОРНООБОГАТИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНАТ ИМ. 50-ЛЕТИЯ СОВЕТСКОЙ УКРАИНЫ. ХАРИТОНЕНКО А. Ф., ФРОЛОВ Н. Т., ДУДКА Д. К. Устройство для размагничивания пульпы ферромагнитных материалов с различной коэрцитивной силой.

12. Сучасна теорія керування: навч. посіб. / І.В. Новицький, С.А. Ус, м-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро : НГУ, 2017. – 263 с.

13. Чорний, А. Машинне навчання з Python. Навчальний посібник. Київ: Видавництво «Буква», 2020. 352 с

14. Ємець В.О., Першаков Ю.В., Сенів А.М. Оптимальні системи керування: навчальний посібник. К.: НТУУ "КПІ", 2014. 258 с

15. Автоматизація та комп'ютерні технології систем управління : наук.-допом. бібліогр. покажч. / [упоряд.О. В. Олабоді] ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. – Київ, 2021. – 171 с.

16. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Човнюк Ю.В. Мехатроніка. Навчальний посібник. – К., 2012. - 357 с.

17. Керівництво з експлуатації Rhosonics SDM – SLURRY DENSITY METER.

18. Керівництво з експлуатації Siemens SITRANS FM MAGFLO.

19. Керівництво з експлуатації AUMA SQ 05.2 – SQ 14.2/ SQR 05.2 – SQR 14.2.

20. SIMATIC S7-1500, ET 200MP Automation system System Manual 05/2021, 11737 p.

21. Керівництво з експлуатації SIMATIC IPC547G.

22. SIMATIC STEP 7 Basic/Professional V16 и SIMATIC WinCC V16.
23. Юрченко, І. В. Прикладний статистичний аналіз з використанням Python: навч. посібник / І. В. Юрченко. – вид. 3-тє, допов. – Чернівці: Чернівецький нац. ун-т, 2021. – 108 с.
24. Основи програмування. Python. Частина 1 [Електронний ресурс]: підручник для студ. спеціальності 122 «Комп'ютерні науки», спеціалізації «Інформаційні технології в біології та медицині» / А. В. Яковенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,59 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 195 с.
25. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).
26. Маринич І. А., Тронь В. В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Кривий Ріг: Видавничий центр КНУ, 2022. 50с.
27. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).
28. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).
29. 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).
30. 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).