

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

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр  
за освітньо-професійною програмою  
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

зі спеціальності  
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

тема роботи:

***«Автоматизація процесу виготовлення сирих котунів з розробкою  
системи візуалізації»***

Виконав студент гр. АКІТ-20 \_\_\_\_\_ Клименко Р.Б.

Керівник \_\_\_\_\_ Рубан С. А.

Нормоконтроль \_\_\_\_\_ Маринич І. А.

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ Рубан С. А.

# КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Зав. кафедри: к.т.н. Рубан С.А.

« 10 » червня 2024 р.

## ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТ-20 Клименку Роману Борисовичу

**1. Тема кваліфікаційної роботи:** «Автоматизація процесу виготовлення сирих котунів з розробкою системи візуалізації»

затверджено наказом по університету № 231с від 25.03.2024 р.

**2. Термін здачі кваліфікаційної роботи:** 10.06.2024 р.

**3. Склад кваліфікаційної роботи:** Пояснювальна записка обсягом 71 с., презентація у Microsoft PowerPoint (21 слайд) 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>01.04.24</i>  |
| 2 | <i>Розділ 1</i>                                       | <i>07.04.24</i>  |
| 3 | <i>Розділ 2</i>                                       | <i>30.04.24</i>  |
| 4 | <i>Висновки</i>                                       | <i>21.05.24</i>  |
| 5 | <i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>              | <i>29.05.24</i>  |
| 6 | <i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i> | <i>20.05.24</i>  |
| 7 | <i>Підготовка доповіді до захисту</i>                 | <i>05.06.24</i>  |

6. Дата видачі завдання: 27.02.2024р.

Керівник \_\_\_\_\_ / Рубан С. А./

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

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

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

Студент \_\_\_\_\_ / Клименко Р. Б./

/

## АНОТАЦІЯ

Клименко Р. Б. *Автоматизація процесу виготовлення сирих котунів з розробкою системи візуалізації.*

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеню вищої освіти – бакалавр, за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2024.

Робота складається зі вступу, двох розділів, висновків, списку літератури з 26 позицій. Загальний обсяг роботи становить 71 сторінки, з яких основний зміст роботи викладено на 68 сторінках, робота включає 3 таблиці і 35 рисунків.

Об'єктом керування є технологічний процес виготовлення сирих котунів на фабриці огрудкування гірничо-збагачувального комбінату.

Метою роботи є вдосконалення системи автоматичного керування технологічним процесом виготовлення сирих котунів за рахунок впровадження новітніх апаратних та програмних засобів автоматизації, що дозволить підвищити ефективність процесу, зокрема збільшити продуктивність грануляторів за виходом фракції товарного розміру.

Перший розділ роботи присвячений аналізу існуючого стану автоматизації процесу виготовлення сирих котунів, у результаті чого сформульовано завдання реалізації системи візуалізації технологічного процесу.

У другому розділі обрано технічні засоби для реалізації системи, розроблено проєкт веб-інтерфейсу системи візуалізації з використанням програмного забезпечення PLCnext.

*Ключові слова:*

ОГРУДКУВАННЯ, КОТУН, ГРАНУЛЯТОР, АВТОМАТИЗАЦІЯ, КЕРУВАННЯ, SCADA, PLCNEXT

|                  |             |                      |               |             |                                |             |                |
|------------------|-------------|----------------------|---------------|-------------|--------------------------------|-------------|----------------|
|                  |             |                      |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> |             |                |
| <i>Змн.</i>      | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i>      | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | <i>АНОТАЦІЯ</i>                |             |                |
| <i>Розроб.</i>   |             | <i>Клименко Р.Б.</i> |               |             |                                |             |                |
| <i>Перевір.</i>  |             | <i>Рубан С.А.</i>    |               |             |                                |             |                |
| <i>Н. Контр.</i> |             | <i>Маринич І.А.</i>  |               |             |                                |             |                |
| <i>Затверд.</i>  |             | <i>Рубан С.А.</i>    |               |             |                                |             |                |
|                  |             |                      |               |             | <i>Літ.</i>                    | <i>Арк.</i> | <i>Аркушів</i> |
|                  |             |                      |               |             |                                | 3           | 1              |
|                  |             |                      |               |             | <i>КНУ АКІТ-20</i>             |             |                |

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП.....  | 6  |
| РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЗАВДАННЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ<br>ВИГОТОВЛЕННЯ СИРИХ КОТУНІВ .....   | 7  |
| 1.1 Аналіз технологічного процесу виготовлення сирих котунів на фабриці<br>огрудкування.....                              | 7  |
| 1.2 Аналіз існуючих способів та технічних засобів автоматичного<br>контролю процесу грануляції .....                      | 13 |
| 1.3 Аналіз існуючих способів керування процесом виготовлення сирих<br>котунів .....                                       | 20 |
| 1.4 Аналіз існуючих систем керування та візуалізації технологічного<br>процесу виготовлення сирих котунів.....            | 26 |
| Висновки до розділу: .....  | 29 |
| РОЗДІЛ 2 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ<br>ПРОЦЕСОМ ВИГОТОВЛЕННЯ СИРИХ КОТУНІВ.....                               | 30 |
| 2.1 Розробка математичної моделі процесу виготовлення сирих котунів на<br>фабриці огрудкування.....                       | 30 |
| 2.2 Вибір та обґрунтування апаратних засобів реалізації системи<br>автоматизації процесу виготовлення сирих котунів ..... | 36 |
| 2.3 Комп'ютерне моделювання САК виготовленням сирих котунів на<br>фабриці огрудкування.....                               | 47 |
| 2.4 Розробка програмного забезпечення системи автоматизації процесу<br>виготовлення сирих котунів.....                    | 51 |
| 2.5 Реалізація програмного забезпечення системи візуалізації процесу<br>виготовлення сирих котунів.....                   | 55 |
| 2.6 Апробація програмного забезпечення системи візуалізації процесу<br>виготовлення сирих котунів.....                    | 62 |
| Висновки до розділу: .....  | 64 |
| ВИСНОВКИ.....   | 66 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....  | 68 |

|           |      |               |        |      |                                |      |         |
|-----------|------|---------------|--------|------|--------------------------------|------|---------|
|           |      |               |        |      | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> |      |         |
| Змн.      | Арк. | № докум.      | Підпис | Дата | <i>ЗМІСТ</i>                   |      |         |
| Розроб.   |      | Клименко Р.Б. |        |      |                                |      |         |
| Перевір.  |      | Рубан С.А.    |        |      |                                |      |         |
| Н. Контр. |      | Маринич І.А.  |        |      |                                |      |         |
| Затверд.  |      | Рубан С.А.    |        |      |                                |      |         |
|           |      |               |        |      | Літ.                           | Арк. | Аркушів |
|           |      |               |        |      | 5                              | 1    |         |
|           |      |               |        |      | <i>КНУ АКІТ-20</i>             |      |         |

## ВСТУП

Відомо, що функціонування грануляторів фабрик огрудкування характеризується цілим рядом збурень, викликаних з нестабільністю фізико-хімічних характеристик шихти, що надходить на огрудкування. Даний фактор призводить до коливання якості сирих котунів, що негативно відображається як на якості готової продукції, так і на продуктивності фабрики огрудкування. Порушення оптимального перебігу процесу також призводить до збільшення виходу некондиційної фракції котунів, які доводиться повертати у процес після грохочення. Це, у свою чергу, призводить до перевитрати енергетичних ресурсів.

Вирішення вказаних проблем можна досягти за рахунок впровадження сучасних систем контролю та керування. Реалізації системи автоматизації дозволяє контролювати ключові параметри процесу, такі як подача сировини, швидкість обертання гранулятора, вологість та розмір часток, що суттєво впливає на якість кінцевого продукту.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка системи автоматизації процесу виготовлення сирих котунів, що дозволить підвищити ефективність технологічного процесу.

Для досягнення поставленої мети у кваліфікаційній роботі потрібно вирішити наступні завдання:

- виконати аналіз існуючих способів та підходів до реалізації керування процесом виготовлення сирих котунів;
- виконати математичний опис процесу формування керування виготовленням сирих котунів та виконати його комп'ютерне моделювання;
- обґрунтувати вибір комплексу технічних засобів для реалізації системи;
- розробити програмне забезпечення для реалізації алгоритмів керування та системи візуалізації технологічного процесу.

|                  |             |                      |               |             |                                |                    |             |                |
|------------------|-------------|----------------------|---------------|-------------|--------------------------------|--------------------|-------------|----------------|
|                  |             |                      |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> |                    |             |                |
| <i>Змн.</i>      | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i>      | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                |                    |             |                |
| <i>Розроб.</i>   |             | <i>Клименко Р.Б.</i> |               |             | <i>ВСТУП</i>                   | <i>Літ.</i>        | <i>Арк.</i> | <i>Аркушів</i> |
| <i>Перевір.</i>  |             | <i>Рубан С.А.</i>    |               |             |                                |                    | <i>6</i>    | <i>1</i>       |
| <i>Н. Контр.</i> |             | <i>Маринич І.А.</i>  |               |             |                                | <i>КНУ АКІТ-20</i> |             |                |
| <i>Затверд.</i>  |             | <i>Рубан С.А.</i>    |               |             |                                |                    |             |                |

РОЗДІЛ 1  
АНАЛІЗ ЗАВДАННЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИГОТОВЛЕННЯ СИРИХ  
КОТУНІВ

1.1 Аналіз технологічного процесу виготовлення сирих котунів на фабриці огрудкування

На сучасних фабриках огрудкування можна виділити наступні технологічні етапи:

1. Підготовка шихтових матеріалів.
2. Дозування та приготування шихти для виготовлення сирих котунів.
3. Виготовлення сирих котунів (огрудкування).
4. Високотемпературна обробка котунів на конвеєрній випалювальній машині.

З корпусу підготовки шихти (де відбуваються перші 2 етапи технологічного процесу) змішана шихта надходить у завантажувальні бункери грануляторів. На кожний гранулятор передбачено по два бункери.

Гранулятор зазвичай завантажується одним із живильників, інший у цей момент простоює. У грануляторі відбувається процес утворення сирих котунів. Якість котунів і гранулометричний склад залежить від фізико-хімічного складу шихти, її маси у грануляторі, швидкості обертання та кута нахилу (найчастіше приймається постійним) чаші, а також кількості води, що додається у гранулятор. Нормальне значенням вологості шихти в процесу огрудкування становить близько 9,5%.

Сирі залізорудні котуни отримують в основному при огрудкуванні шихти у тарілчастих або барабанних грануляторах.

|                  |             |                      |               |             |                                |                    |             |                |
|------------------|-------------|----------------------|---------------|-------------|--------------------------------|--------------------|-------------|----------------|
|                  |             |                      |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.01.ПЗ</i> |                    |             |                |
| <i>Змн.</i>      | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i>      | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                |                    |             |                |
| <i>Розроб.</i>   |             | <i>Клименко Р.Б.</i> |               |             | <i>РОЗДІЛ 1</i>                | <i>Лім.</i>        | <i>Арк.</i> | <i>Аркушів</i> |
| <i>Перевір.</i>  |             | <i>Рубан С.А.</i>    |               |             |                                |                    | 7           | 27             |
|                  |             |                      |               |             |                                | <i>КНУ АКІТ-20</i> |             |                |
| <i>Н. Контр.</i> |             | <i>Маринич І.А.</i>  |               |             |                                |                    |             |                |
| <i>Затверд.</i>  |             | <i>Рубан С.А.</i>    |               |             |                                |                    |             |                |

Тарілчастий гранулятор уявляє собою плоску таріль з бортом, встановлену похило до горизонтальної площини (рис. 1.1). Гранулятор облаштований регульованим приводом обертання та механізмом нахилу тарелі. На днищі та бортах тарелі створюється шар неогрудкованого матеріалу – гарнісаж, що запобігає їх від стирання та сприяє огрудкуванню шихти. Над таріллю встановлені форсунки, які подають воду на матеріал, що огрудковується.

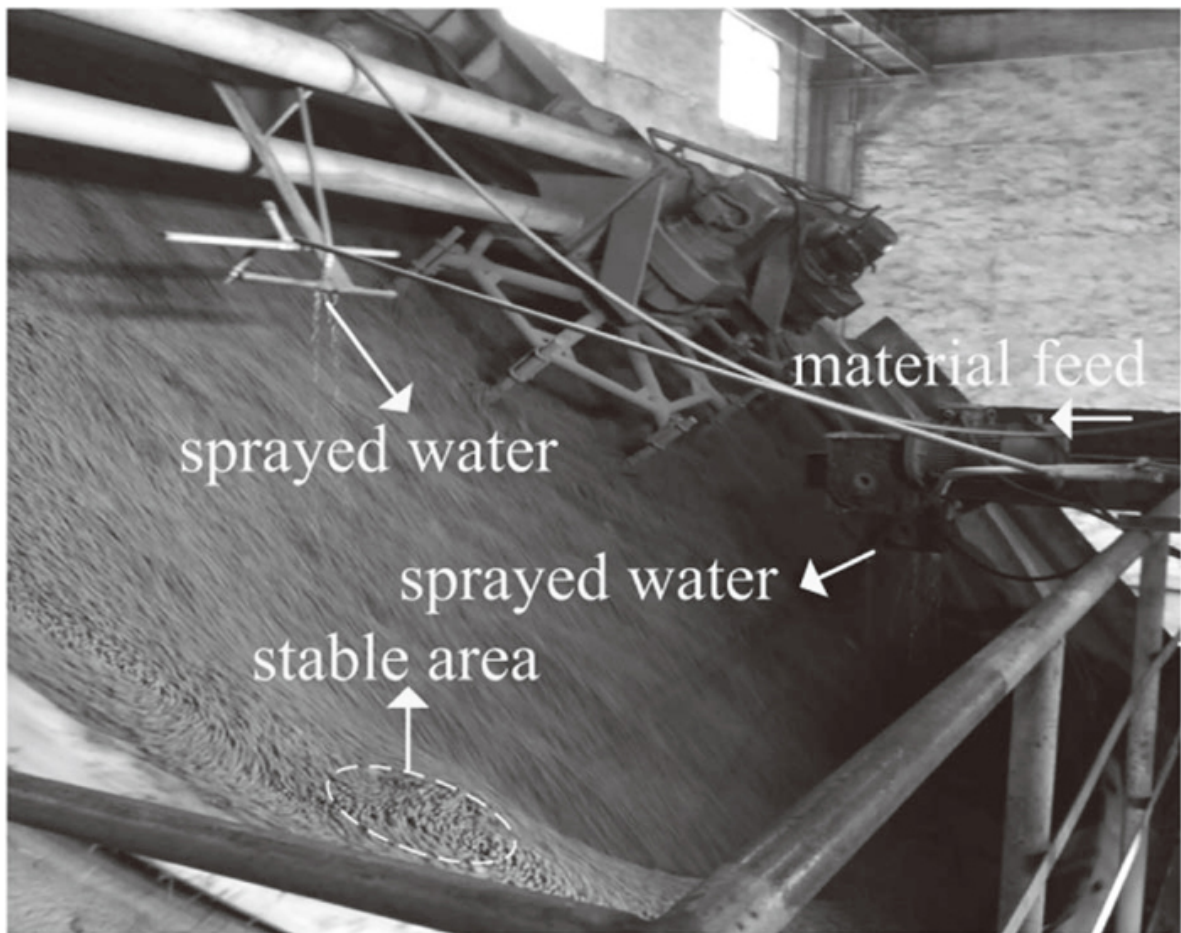


Рисунок 1.1 – Тарілчастий гранулятор

Найчастіше на гірничо-збагачувальних комбінатах Кривого Рогу використовуються дискові гранулятори (їх також називають чашові огрудковувачі) ОЧ-7500 діаметром 7500 мм (табл. 1.1).

|      |      |          |        |      |                                |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>КНУ КРБ.151.24.02.01.ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                | 8    |



Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики дискового гранулятора ОЧ-7500

| № з/п | Назва параметру                                  | Од. вим. | Значення  |
|-------|--|----------|-----------|
| 1.    | Діаметр чаші                                     | мм       | 7500      |
| 2.    | Висота борту чаші                                | мм       | 470       |
| 3.    | Частота обертання чаші                           | об/хв    | 4 – 8     |
| 4.    | Продуктивність                                   | т/год    | 120 – 140 |
| 5.    | Кут нахилу чаші                                  | град     | 45 – 50   |
| 6.    | Потужність електродвигуна приводу обертання чаші | кВт      | 132       |
| 7.    | Габаритні розміри                                | мм       |           |
|       | – довжина  |          | 6400      |
|       | – ширина   |          | 8900      |
|       | – висота   |          | 7000      |
| 8.    | Орієнтовна маса                                  | т        | 58        |

Також протягом останніх років на Центральному ГЗК та Полтавському ГЗК були встановлені дискові гранулятори HAVER SCARABAEUS 7500 виробництва німецької компанії HAVER NIAGARA [10-13].

Готові котуни, в яких клас 8-16 мм складає не менше 88%, за допомогою конвеєрного транспорту від гранулятора надходять на збиральний конвеєр.

Зі збирального конвеєра укладачем човникового типу котуни розсипаються на роликівий укладальник, де відбувається відділення просипу сирих котунів. Просип котунів (фракція менше 8 мм) повертається на повторне огрудкування.

Регульовані параметрами в процесі огрудкування є:

- кількість шихти у огрудковувачі;
- кількість води у огрудковувачі;
- швидкість обертання чаші окомкователя;

|      |      |          |        |      |                                |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>КНУ КРБ.151.24.02.01.ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                |      |

У ході технологічного процесу грудки матеріалу по мірі їх укрупнення рухаються в тарелі по витках спіралі, що звужуються до борту, та одночасно віддаляються від днища тарелі. Такий характер руху визначається сукупним впливом відцентрових сил, що притискають грудки до борту тарелі, маси грудок, сил реакції борта та сил тертя. При збільшенні діаметра грудки співвідношення між прикладеними до нього силами змінюється. Більш крупні грудки відриваються від борта та починають скочуватися вниз раніше, ніж дрібні. Кут відриву грудки (кут між радіусом тарелі, приведеним до грудки в момент її відриву, та вертикальним діаметром тарелі), як показує аналіз, дорівнює [1]:

$$\beta = \arccos \left[ \frac{R_T n_T^2}{900 (\sin \alpha_T - K_{TP} \cos \alpha_T)} \right] \quad (1.1)$$

де  $R_m$  – радіус тарелі, м;  $n_m$  – швидкість обертання тарелі, об/хв;  $\alpha_m$  – кут нахилу тарелі, град;  $K_{mp}$  – коефіцієнт тертя грудок даної крупності.

Таким чином, видно, що основними параметрами, які визначають поведінку грудок в процесі грануляції, є кут нахилу та швидкість обертання тарелі, а також коефіцієнт тертя. Якщо при певному куті нахилу тарелі швидкість її обертання недостатньо висока, то кут відриву виявляється більшим і грудки матеріалу піднімаються на малу висоту. При надмірно високій швидкості тарелі кут  $\beta$  є малим, значна частина матеріалу притискається відцентровою силою до борту та захоплюється до скребка, що відбиває. У обох випадках гранулятор використовують недостатньо ефективно, оскільки активною фазою процесу огрудкування є саме скачування матеріалу вниз по робочій площині тарелі. Схожим за характером (але зворотним за знаком) є вплив на процес грануляції кута нахилу тарелі. Зниження  $\alpha_m$  при певній швидкості призводить до зменшення кута відриву  $\beta$  і навпаки. Але кут нахилу тарелі, як параметр процесу, має і свою специфіку. Від величини нахилу тарелі залежить, з одного боку, сила нормального тиску грудок на шар матеріалу, що сприяє їх збільшенню при скачуванні, а з іншого боку – сила удару грудок в кінці їх падіння. При відносно малому  $\alpha_m$  відбувається збільшення розміру

|      |      |          |        |      |                                |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------------|------|
|      |      |          |        |      |                                | Арк. |
|      |      |          |        |      | <i>КНУ КРБ.151.24.02.01.ПЗ</i> | 10   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                |      |

котунів, але знижується продуктивність гранулятора. Надмірне збільшення  $\alpha_m$  призводить до збільшення висоти скачування грудок та до їх руйнування від ударів [1].

Перевагами тарілчастого гранулятора у порівнянні з барабанним є більш висока питома продуктивність, менші габарити та можливість роботи без грохочення. Продуктивність тарілчастого гранулятора виражається у вигляді суми витрат кондиційної та некондиційної фракції у готових котунах. З іншого боку, тарілчасті гранулятори вимагають забезпечення більш високої стабільності складу та вологості вихідної шихти. Але, разом з тим, тарілчасті гранулятори мають більш широкі можливості для оперативного керування процесом огрудкування [1].

Сирі котуни повинні відповідати ряду вимог стосовно хімічного складу (вміст заліза, основності) та фізичних властивостей. Огрудковані частинки повинні володіти достатньою міцністю та не руйнуватися при транспортуванні до випалювальної машини. Однією з основних вимог є забезпечення необхідної (за умовами випалювання) крупності котунів. Для подальшого аналізу процесу огрудкування як об'єкту керування необхідно розглянути їх основні показники.

Так, характеристика розподілу вагових виходів за крупністю  $q(d)$ , %, надає уявлення про вміст у суміші різних фракцій крупності та може бути представлена у вигляді таблиці, гістограми або кривої розподілу.

Сумарна (кумулятивна) характеристика крупності процесу за мінусом [1]

$$q_{\text{сум}} = \int_0^d q(d)d(d) \quad (1.2)$$

показує, яка доля частинок у суміші менша даного розміру, та виражається у вигляді таблиці або графіка. Аналогічно може бути представлена сумарна характеристика за плюсом.

Вихід кондиції визначають відношенням витрати (або маси) кондиційної фракції  $Q_{\text{к.ок}}$  до загальної витрати (або масі) матеріалу  $Q_{\text{ок}}$ :

$$q_{\text{к}} = Q_{\text{к.ок}}/Q_{\text{ок}} \cdot \quad (1.3)$$

Середній діаметр котунів  $\alpha_{ок}$  може визначатися або як середнє арифметичне з діаметрів фракцій  $d_i$ , зважене за ваговими виходами  $q_i$

$$d_{ca} = \sum q_i \cdot d_i / \sum q_i, \quad (1.4)$$

або як середнє медіанне  $d_{cm}$ , яке визначається діаметром, що відповідає 50% значень кумулятивної характеристики крупності [1].

Показник компактності гранулометричного складу  $\Delta d_{(95-5\%)}$  уявляє собою діапазон крупності, обмежений між 5 та 95 % значень кумулятивної характеристики крупності.

При аналізі статичних залежностей процесу грануляції у якості показників крупності котунів доцільно розглядати здебільшого два параметри - вихід кондиції  $q_k$  та середній діаметр котунів  $\alpha_{ок}$ . Кожний із цих показників має свої специфічні особливості з точки зору можливості використання для контролю та регулювання процесу огрудкування.

Тарілчастий гранулятор як об'єкт регулювання представлено на рис. 1.2.

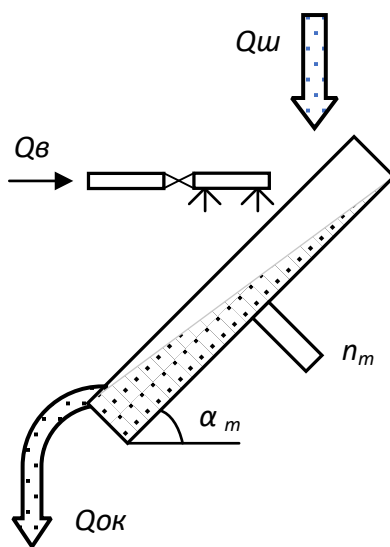


Рисунок 1.2 – Схема тарілчастого гранулятора як об'єкту керування

Результати процесу грануляції залежать від багатьох факторів, зокрема від хімічного складу та фізичних властивостей шихти, швидкості обертання, кута нахилу, продуктивності гранулятора, якості гарнісажу тощо. Основна складність при дослідженні статичних характеристик процесу полягає у

|      |      |          |        |      |                                |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>КНУ КРБ.151.24.02.01.ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                | 12   |

відсутності їх аналітичних виразів, тому основні закономірності намагаються визначити на основі дослідних даних на конкретних машинах [1-3].

## 1.2 Аналіз існуючих способів та технічних засобів автоматичного контролю процесу грануляції

Для оцінювання ефективності процесів огрудкування важливу роль відіграє вимірювання крупності матеріалів. Результати гранулометричного контролю матеріалів можуть бути використані при регулювання та оптимізації процесів огрудкування. Для контролю крупності шихти та огрудкованих шихтових матеріалів у промисловості часто використовують так званий ситовий аналіз, який полягає у розділенні проби на класи крупності (фракції) за допомогою набору сит з отворами різного діаметру. Процес відбору та розсіву проб уявляє собою достатньо трудомістку операцію та у більшості випадків виконується вручну або за допомогою напівавтоматичних лабораторних установок.

Останній час отримали розвиток безперервні автоматичні методи контролю. До таких засобів вимірювання висувають високі вимоги щодо точності вимірювання та надійності [1-2]. Обов'язковою умовою є забезпечення неруйнівного контролю, а також достатня швидкодія.

Вимірювачі крупності будують на базі різних принципів вимірювання, вони можуть відрізнитися за вимірюваною фізичною величиною та способам сприйняття та перетворення сигналу.

Іноді у промислових умовах крупність котунів оцінюють за ваговими виходами мілкового та дрібного класів при грохоченні. Водночас, такий спосіб не підходить для тарілчастих грануляторів, оскільки у технологічній схемі відсутня операція грохочення [1].

Для контролю крупності залізородних котунів розроблені [1-2] вимірювачі, що базуються на магнітному методі вимірювання. Під час лабораторних досліджень встановлено, що оцінка діаметру котунів може

|             |             |                 |               |             |                                |             |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------------|-------------|
|             |             |                 |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.01.ПЗ</i> | <i>Арк.</i> |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                | 13          |

здійснюватися за їх об'ємною магнітною проникністю  $\mu_v$  за формулою

$$d_{ок} = a\sqrt{\mu_v/0,52 \cdot \mu \cdot \gamma} \quad (1.5)$$

де  $\mu$  – відносна магнітна проникність,  $\gamma$  – об'ємна маса матеріалу.

Чутливим елементом диференційно-трансформаторного вимірювача середньої крупності котунів (рис. 1.3) слугує диференційно-трансформаторний датчик ДТ, виконаний у вигляді котушки, що охоплює лоток електровібраційного живильника ЕВЖ. Вихідний сигнал датчика через перетворювач надходить на вхід вторинного приладу ВП. Принцип вимірювання оснований на оцінці діаметру окремих котунів за величиною їх об'ємної магнітної проникності. Середньо-квадратична похибка вимірювання складає 0,4 мм. Котуни з бункера рівномірним потоком надходять по лотку віброживильника до датчика. Вихідний сигнал датчика, що відповідає середньому діаметру котунів, що знаходяться у його полі, після посилення та перетворення реєструється вторинним приладом.

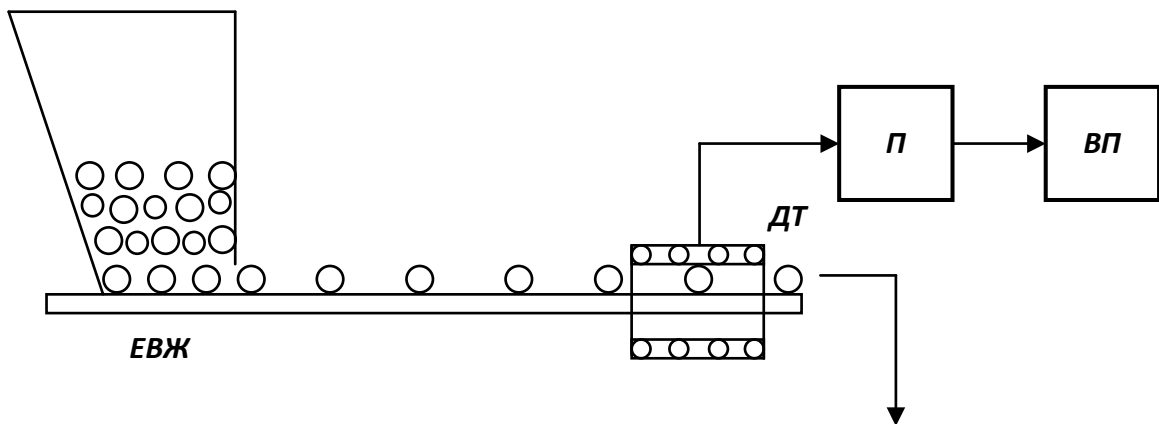


Рисунок 1.3 – Функціональна схема диференційно-трансформаторного датчика середньої крупності котунів

Диференційно-трансформаторний вимірювач гранулометричного складу котунів (рис. 1.4) складається з диференційно-трансформаторного датчика ДТ, підсилювача П, амплітудного селектора АС, лічильників імпульсів ЛІ<sub>1</sub> – ЛІ<sub>5</sub>, обчислювального пристрою ОП та індикаторів І<sub>1</sub> – І<sub>5</sub>. Принцип дії оснований на амплітудній селекції імпульсів датчика ДТ. Амплітудним селектором АС здійснюється розділення імпульсів на декілька класів, кожний з яких

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ КРБ.151.24.02.01.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 14   |

враховується відповідним лічильником імпульсів. Обчислювальний пристрій визначає вміст кожного класу крупності, а також середній діаметр котунів.

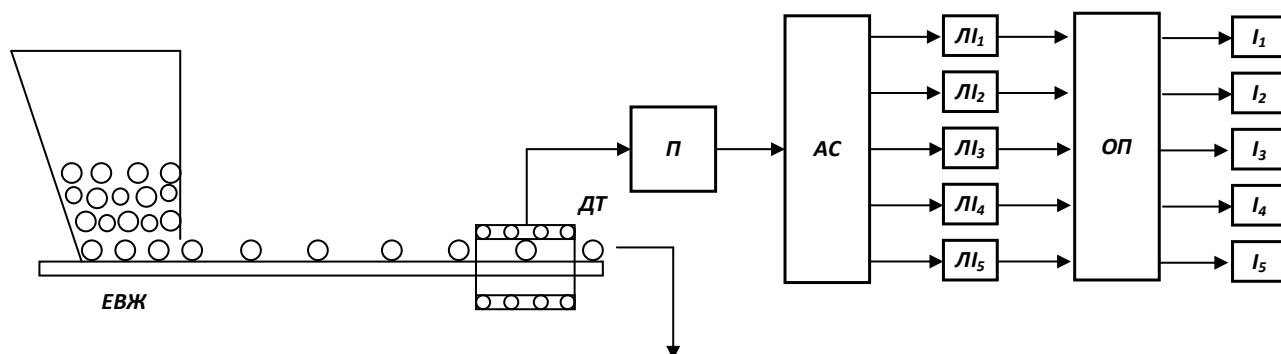


Рисунок 1.4 – Функціональна схема диференційно-трансформаторного датчика гранулометричного складу котунів

Водночас, використання магнітного способу вимірювання потребує використання спеціальних відбірних та дозуючих пристроїв, які виключають можливість одночасного потрапляння у магнітне поле декількох котунів. Точність вимірювання залежить від стабільності фізико-хімічного складу котунів.

У НДІАчормет був розроблений вимірювач середньої крупності сирих котунів, що базується на контролі імпульсів світла, відбитих від поверхні котунів (рис. 1.5). Контроль здійснюється за рахунок сканування фотоприймачем котунів, що рухаються на стрічковому конвеєрі з постійною швидкістю [1, 4]. До складу вимірювача входять освітлювач О та фотоприймач ФП, встановлені над шаром котунів, що переміщуються транспортером Т, а також перетворювач П та вторинний прилад ВП. Фотоприймач складається з фотоелементу та оптичної системи. Світловий потік освітлювача створює на поверхні шару світловий рельєф, що залежить від шару котунів. Під час руху котунів фотоприймач здійснює сканування поверхні шару по лінії, паралельній напрямку руху матеріалу. При цьому вихідний сигнал фотоелементу виявляється модульованим по частоті, що залежить від крупності котунів.

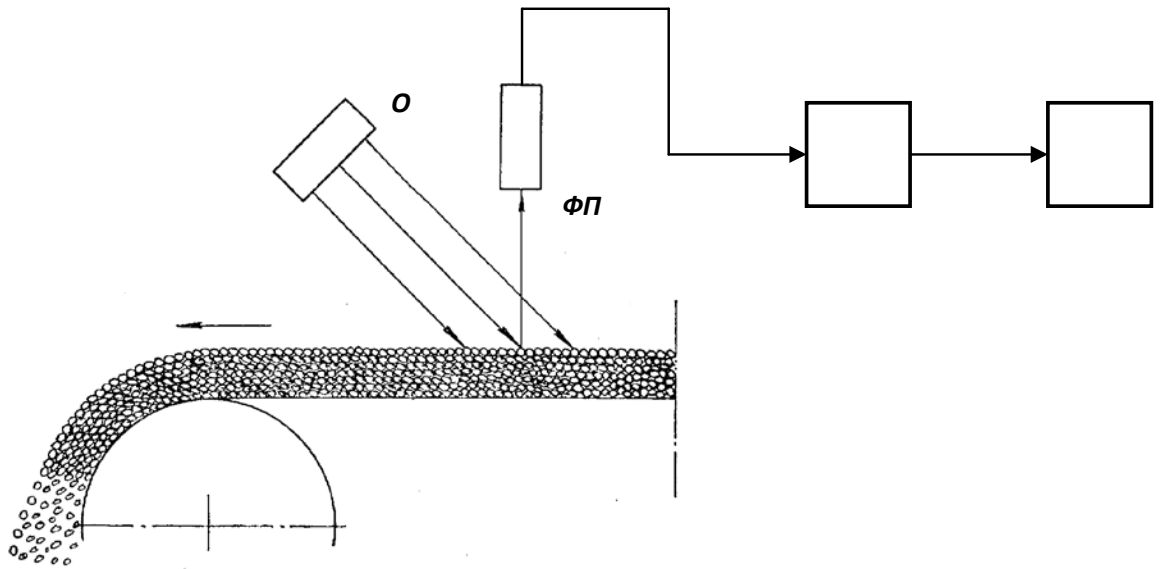


Рисунок 1.5 – Функціональна схема фоточастотного вимірювача середньої крупності котунів

Після підсилення, амплітудного обмеження та частотного детектування у перетворювачі сигнал реєструється вторинним приладом [1, 4]. Фотоприймач для збільшення роздільної здатності візується на елементарну площадку поверхні шару, величина якої на порядок менше мінімального контрольованого діаметру котунів. З огляду на те, що сканування здійснюється по лінії, однієї з основних умов використання даного способу вимірювання є відсутність сегрегації котунів за крупністю як за шириною, так і за глибиною шару. Другою умовою є одноманітність форми котунів. При визначенні статичної характеристики вимірювача враховано вплив гранулометричного складу котунів, характеру їх розміщення на поверхні шару, а також діаметру скануючої плями  $d_n$ . Для швидкості транспортеру  $v_T = 1,376$  м/с і контрольованого частотного діапазону від 50 до 130 Гц покази вторинного приладу (% від максимального значення) пов'язані з середнім діаметром котунів рівнянням

$$N = 162,5 \left[ 1 - \frac{12,3(d_{ок} - 2d_n)}{d_{ок}^2} \right]. \quad (1.6)$$

Даний спосіб забезпечує достатню точність вимірювання тільки при незмінній швидкості переміщення котунів. Для виключення впливу коливань швидкості транспортеру розроблено імпульсний вимірювач середньої



швидкості котунів, у якому підвищення точності досягається тим, що сумарна тривалість імпульсів  $t_i$  співставляється не з часовим проміжком, а з сумарною кількістю імпульсів  $n_i$ , що дорівнює кількості котунів, зафіксованим датчиком за час такту  $\tau$ . Покази вторинного приладу при цьому відповідають середній крупності контрольованих котунів

$$d_{ок} = K \frac{\sum_0^{\tau} t_i}{\sum_0^{\tau} n_i} . \quad (1.7)$$

Імпульсний вимірювач середньої крупності котунів (рис. 1.6) складається з імпульсного датчика ІД, формувача прямокутних імпульсів ФІ, суматорів тривалості СТ та кількості СК імпульсів, генератора тактових імпульсів ГТІ, блоку ділення БД та вторинного приладу ВП.

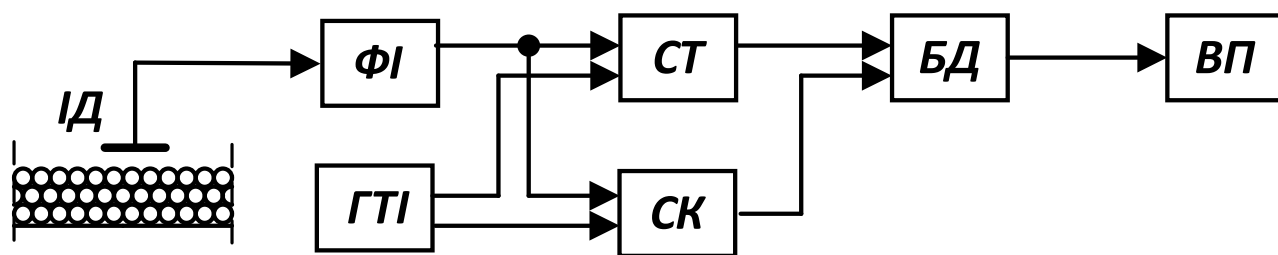


Рисунок 1.6 – Функціональна схема імпульсного вимірювача середньої крупності котунів

Сигнали імпульсного датчику, тривалість яких відповідає розмірам котунів, що переміщуються під ним, у формувачі перетворюються на прямокутні імпульси постійної амплітуди, і далі надходять на вхід суматорів. У блоці ділення розраховується відношення сумарної тривалості імпульсів до їх сумарної кількості. Результуючий сигнал, пропорційний середній крупності котунів, реєструється вторинним приладом. Генератор тактових імпульсів періодично здійснює скидання сигналів суматорів до нульових значень.

Для вимірювання вмісту кондиційної фракції у потоці сирих котунів у НДІАчормет було розроблено імпульсний вимірювач, що здійснює селекцію імпульсів за їх тривалістю. У якості імпульсного датчика (чутливий елемент) використано фоточастотний вимірювач (рис. 1.5). У відповідності зі схемою

(рис. 1.7) показує вторинного приладу пропорційні вмісту кондиційної фракції, що автоматично розраховують у вигляді

$$q_k = [n - (n_m + n_k)]/n, \quad (1.5)$$

де  $n$  – загальна кількість імпульсів;  $n_m$ ,  $n_k$  – кількість імпульсів від котунів відповідно дрібної та крупної фракцій.

Імпульсний вимірювач вмісту кондиційних котунів (рис. 1.7) складається з імпульсного датчика ІД, формувача прямокутних імпульсів ФІ, часових селекторів дрібної СМФ та крупної СКФ фракцій, частотних детекторів ЧД<sub>1</sub>, ЧД<sub>2</sub>, ЧД<sub>3</sub>, блоку ділення БД та вторинного приладу ВП.

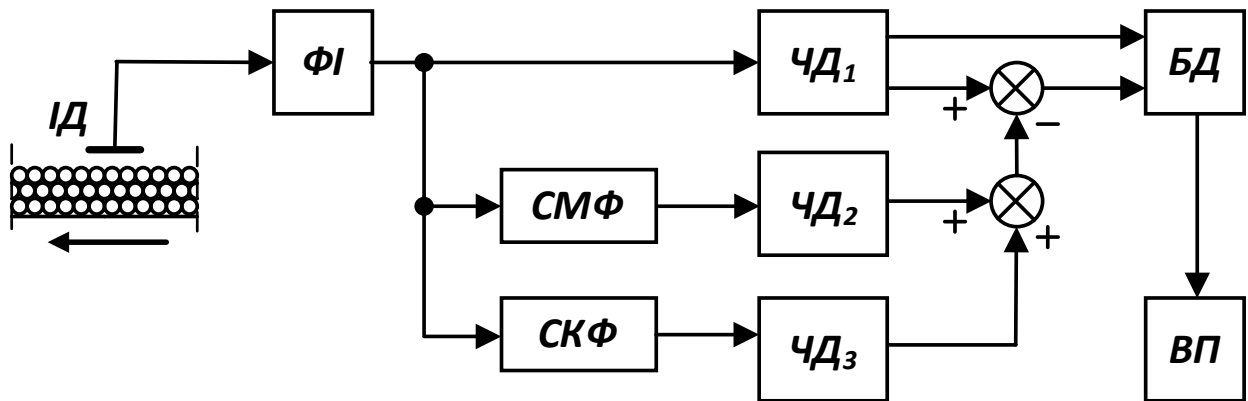


Рисунок 1.7 – Функціональна схема імпульсного вимірювача вмісту кондиційних котунів

Сигнали імпульсного датчика, тривалість яких пропорційна розмірам котунів, що переміщуються під ним, після формування і селекції проходять операцію детектування у трьох окремих каналах. Після детектування здійснюється підсумовування сигналів, пропорційних кількості дрібної та крупної фракції, та віднімання цієї суми із сигналу, пропорційному загальній кількості котунів. Результуючий сигнал, пропорційний кількості кондиційних котунів, надходить у блок ділення, де співставляється з сигналом, що відповідає загальній кількості котунів. Сигнал, пропорційний вмісту кондиції, реєструється вторинним приладом. Перевагою селектора імпульсів за тривалістю, у порівнянні з амплітудними селекторами, є незалежність контролю

від таких факторів, як стан оптики, змінення відбивної здатності котунів тоо.

Протягом останніх років для оцінки розподілу котунів за розміром розвиваються рішення, що базуються на технологіях машинного зору [5-7]. Для цього встановлюються промислові камери високої чіткості, які використовуються для отримання зображень місця виготовлення котунів (рис. 1.8). Далі використовується алгоритм сегментації зображення для відділення гранул від фону, і підраховується розмір кожної гранули на зображенні та загальний розподіл розмірів. Однак, оскільки гранули не відокремлюються одна від одної під час фактичного виробництва, точність даного методу знижується через адгезію та перекриття котунів між собою, тож велика кількість досліджень присвячена вирішенню даної проблеми [5-7].

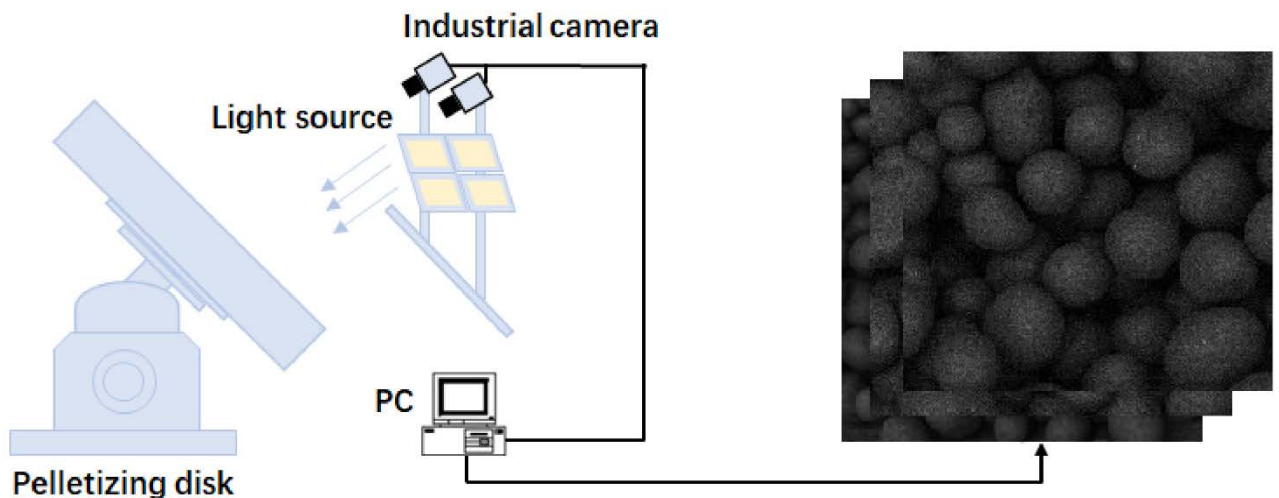


Рисунок 1.8 – Схема отримання та обробки зображення котунів для тарілчастого гранулятора

Варто відзначити, що відомі світові виробники гірничо-збагачувального устаткування мають власні рішення щодо візуальних засобів контролю гранулометричного складу сирих котунів. Так, компанія Metso має рішення під назвою Metso Outotec VisioPellet, яке уявляє собою систему контролю розміру котунів, що вимірює розмір сирих котунів за допомогою перевіреної технології на базі промислової камери, встановленої на диску або барабані для гранулювання.

На основі даних вимірювань система керування технологічним процесом може здійснювати оптимізацію швидкості обертання дискових або барабанних грануляторів і швидкість подачі шихти в режимі реального часу.

Metso Outotec VisioPellet має підтверджену історію впровадженні і ефективного використання на численних фабриках огрудкування по всьому світу. Компанія пропонує також готове рішення з модернізації дискових або барабанних грануляторів з керованим приводом кута нахилу, що додатково оптимізує процес огрудкування, дозволяючи контролеру регулювати швидкість подачі, швидкість диска та кут нахилу [12].

### 1.3 Аналіз існуючих способів керування процесом виготовлення сирих котунів

Для керування процесом грануляції часто пропонують різні регулюючі впливи – від традиційних (змінення витрати шихти, швидкості та кута нахилу гранулятора, витрати води) до таких, наприклад, як змінення місця подачі шихти у гранулятор. Всі впливи доцільно звести до двох класів. Регулюючі впливи (такі, як змінення швидкості обертання гранулятора, витрата води) повинні здійснюватися оперативно і безпосередньо під час процесу грануляції. За більш тривалі періоди часу повинні здійснюватися впливи, що забезпечують оптимізацію процесу (наприклад, за рахунок змінення кута нахилу гранулятора, вмісту бентоніту у шихті тощо). Як відзначають автори [1], на поточний момент відсутні обґрунтовані на достатньому рівні і практично підтверджені алгоритми керування процесом грануляції. Керування грануляторами здійснюється найчастіше на базі досвіду роботи технологів. Так, наприклад, при підвищенні вологості вихідної шихти рекомендують знизити швидкість обертання, збільшити кут нахилу гранулятора, підвищити вміст бентоніту у шихті. Для збільшення крупності окатишів рекомендують збільшити швидкість обертання, зменшити кут нахилу гранулятора, збільшити витрату води.

|             |             |                 |               |             |                                |             |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------------|-------------|
|             |             |                 |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.01.ПЗ</i> | <i>Арк.</i> |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                | 20          |

Розглянемо деякі з відомих насьогодні алгоритмів керування процесом грануляції.

Зокрема, у відповідності до [1], основним співвідношенням для тарілчастого гранулятора є:

$$n_T = \sqrt{\frac{\sin \alpha_T^{\text{опт}} - K_{\text{тр.ш}} \cos \alpha_T^{\text{опт}}}{0,56 \cdot 10^{-3} D_T}} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (1.8)$$

де  $n_m$  – швидкість обертання тарілчастого гранулятора, об/хв;  $\alpha_m^{\text{опт}}$  – оптимальний кут нахилу тарелі, град;  $K_{\text{тр.ш}}$  – коефіцієнт тертя шихти;  $D_m$  – діаметр тарелі, м.

Дане співвідношення встановлює відповідність між швидкістю обертання та кутами нахилу тарілчастого гранулятора, при якому забезпечується найбільш повне використання площі тарелі. Дана залежність встановлена на основі (2.1) при умові, що в процесі грануляції кут відриву самих дрібних частинок шихти  $\beta$  дорівнює нулю, тобто вони починають рухатися вниз після досягнення верхньої точки вертикального діаметру тарелі.

В цілому, з рівняння (1.8) видно, що дана умова може бути забезпечена при різних поєднаннях  $n_m$  та  $\alpha_m$ . Але оптимальний характер процесу (наприклад, за критерієм максимізації виходу кондиції  $q_k$ ) може бути досягнутий тільки при цілком визначених  $n_m$  та  $\alpha_m$ . У даному алгоритмі з цих двох параметрів ведучим є кут нахилу тарелі, який потрібно обирати оптимальним: в залежності від діаметру гранулятора та властивостей шихти, тобто дослідним шляхом. Перевагою розглянутого алгоритму є те, що він відображає фізичну сутність процесу грануляції, але безпосередньо для керування використовувати його важко через відсутність засобів вимірювання  $K_{\text{тр.ш}}$  та відсутності критерію для вибору  $\alpha_m^{\text{опт}}$ .

Близьким до попереднього є спосіб керування процесом грануляції, що передбачає вплив на швидкість обертання або кут нахилу тарілчастого гранулятора за відхиленням від заданого значення товщини шару шихти у секторі, протилежному сектору вивантаження готових котунів:

$$n_T = f_1(H_{шз} - H_{ш}), \quad (1.9)$$

або

$$\alpha_T = f_2(H_{шз} - H_{ш}), \quad (1.10)$$

де  $f_1, f_2$  – функції, що визначають інтенсивність змінення регульованого параметру;  $H_{шз}, H_{ш}$  – задане та поточне значення товщини шару шихти в секторі тарелі, протилежному секторі вивантаження готових котунів.

Спосіб базується на тому, що при незмінних  $n_m$  та  $\alpha_m$  кут відриву від борту частинок шихти змінюється при змінні фізичних властивостей шихти, зокрема  $K_{тр.ш}$ . При цьому змінюється ступінь заповнення гранулятора, а також відбувається перерозподіл висоти шару матеріалу по днищу тарелі, у тому числі і в місці вимірювання. Але при такому способі регулювання, як вказано в [1], необхідно здійснювати корекцію заданого значення висоти шару в залежності від витрати шихти у гранулятор.

У роботі [14] використано алгоритм, розроблений на базі експериментальних даних, отриманих при дослідженні роботи тарілчастого гранулятора на Центральному ГЗК. У якості моделі були прийняті рівняння регресії, що пов'язують показники міцності котунів та виходу кондиційної фракції з вхідними параметрами процесу  $Q_{ш}$ ,  $\varphi_{ш}$  та  $F_e$ . Алгоритм було знайдено шляхом спільного вирішення рівнянь на випалювальній машині та передбачає встановлення такої швидкості  $n_m$ , яка повинна забезпечити максимальний вихід годних котунів при задовільній міцності:

$$n_T = -k_1 - k_2 \cdot \varphi_{ш} + k_3 \cdot Q_{ш} + k_4 \cdot F_e + k_5 \cdot \varphi_{ш} \cdot F_e + k_6 \cdot \varphi_{ш}^2 - k_7 \cdot F_e^2, \quad (1.11)$$

при  $q_k = q_k^{max}$ ;  $N_{ск} \in [10, 22]$ ;  $Q_{ш}^{min} \leq Q_{ш} \leq Q_{ш}^{max}$ ;  $\varphi_{ш}^{min} \leq \varphi_{ш} \leq \varphi_{ш}^{max}$ ;  $F_e^{min} \leq F_e \leq F_e^{max}$ , де  $q_k$  – вихід кондиційної фракції,  $N_{ск}$  – міцність котунів на скидання;  $F_e$  – вміст заліза у шихті;  $k_1 \dots k_7$  – коефіцієнти.

Як вказано у [1, 14], даний підхід базується на залежності, отриманої тільки для дослідженого технологічного об'єкту, але не дозволяє отримати узагальнений результат. Коефіцієнти рівняння можуть виявитися різними навіть при зміннях режиму навіть одного і того ж гранулятора.

У роботі Ксендзовського В.Р. запропоновано алгоритм екстремального керування тарілчастим гранулятором [3].

$$n_T = f_3(Q_{ш}, Q_{ок}, d_{ок}), \quad (1.12)$$

$$\alpha_T = f_4(Q_{ш}, Q_{ок}, d_{ок}),$$

$$Q_{в2} = Q_{в3} - [f_5(Q_{ш}, Q_{ок}, d_{ок}) + Q_{в1}],$$

при  $Q_{ш} = Q_{ш3}$ ;  $Q_{в1} = Q_{в13}$ , де  $f_3$ ,  $f_4$  – функції, що забезпечують задану крупність котунів під час екстремального пошуку;  $f_5$  – функція, що визначає кількість води у шихті до огрудкування;  $d_{ок}$  – середня крупність котунів;  $Q_{ш3}$ ,  $Q_{в1}$ ,  $Q_{в13}$  – задані значення витрати шихти, загальної витрати води та витрати води на матеріал, що обробляється;  $Q_{в2}$  – витрата води, що надходить в шихту при її завантаженні в гранулятор.

Даний алгоритм передбачає керування процесом грануляції шляхом автоматичного пошуку та встановлення таких значень  $n_m$  та  $\alpha_m$ , які забезпечують отримання котунів заданої якості. Одночасно передбачено стабілізацію вологості матеріалу за рахунок регулювання витрати води у тарілчастий гранулятор. Як відзначено у [1], раціональним у даному способі є принцип автоматичного екстремального пошуку оптимального режиму. Але, автори також відзначають необхідність доопрацювання як у відношенні критерію оптимальності, так і вибору регулюючих впливів.

У найпростішому випадку витрату води  $Q_e$  при огрудкуванні змінюють пропорційно витраті шихти  $Q_{ш}$ , що надходить у огрудковувач. Коефіцієнт співвідношення шихта-вода приймають таким, щоб забезпечити потрібне значення вологості шихти незалежно від її витрати. У зв'язку з тим, що передавальні функції процесу відносно витрати шихти і води не ідентичні, сигнал, пропорційний витраті шихти, повинен демпфуватися.

Наведений алгоритм доцільно використовувати тільки при незмінній початковій вологості шихти. Якщо початкова вологість змінюється, то виникає необхідність відповідним чином змінювати коефіцієнт співвідношення між витратами шихти та води. Алгоритм стабілізації співвідношення шихта-вода з корекцією за початковою вологістю шихти можна отримати, розв'язавши

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ КРБ.151.24.02.01.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 23   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

рівняння статичної характеристики процесу відносно витрати води при умові, що кінцева вологість шихти підтримується на заданому рівні, тобто . У відповідності із даним алгоритмом, витрата води повинна змінюватися пропорційно витраті шихти і різниці між заданим на початковим значенням вологості.

Система екстремального регулювання тарілчастим гранулятором (рис. 1.9) призначена для здійснення алгоритму (1.11) – (1.12). Система забезпечує задану продуктивність гранулятора (у відповідності до технологічних потреб з щодо завантаження випалювальної машини). Задана крупність котунів забезпечується контуром екстремального керування зміненням швидкості обертання та куту нахилу гранулятора у допустимих межах [1].

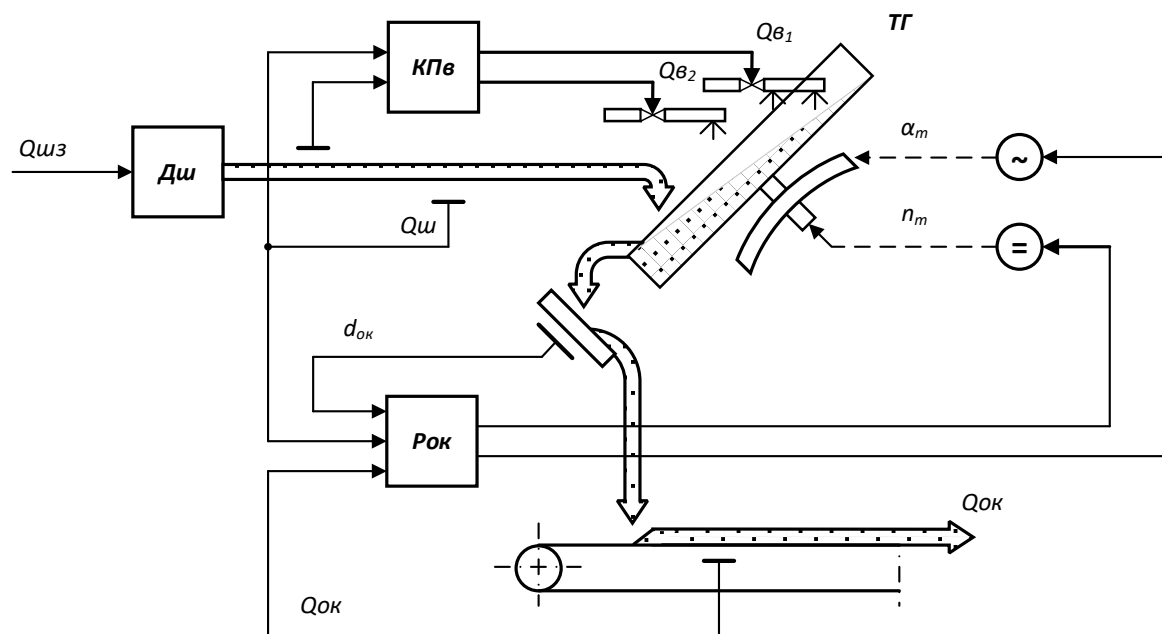


Рисунок 1.9 – Структура системи екстремального регулювання тарілчастим гранулятором

До складу системи входять дозатор шихти  $D_{ш}$ , керуючий пристрій  $KП_{в}$ , який керує витратою води  $Q_{в}$ , що надходить на поверхню котунів і на шихту при її завантаженні в гранулятор  $TГ$ , а також екстремальний регулятор  $EP_{ок}$  з двоканальним виходом.



Дозатор Дш підтримує витрату шихти, що надходить у гранулятор  $Q_{ш}$  на заданому рівні  $Q_{шз}$ . Керуючий пристрій КПв забезпечує стабілізацію витрат води  $Q_{в1}$  і шляхом впливу на  $Q_{в2}$  – змінення загальної витрати води пропорційно витраті шихти  $Q_{ш}$  з корекцією за її вологістю  $\mu_{ш}$ . Регулювання процесу грануляції здійснюється регулятором  $EP_{ок}$  шляхом автоматичного пошуку та встановлення таких значень куту нахилу тарелі  $\alpha_r$  та швидкості її обертання  $n_r$ , які забезпечують потрібну крупність котунів. На вхід регулятора надходять сигнали  $d_{ср}$ , пропорційні крупності котунів, витраті шихти  $Q_{ш}$  та витраті котунів  $Q_{ок}$ .

Також варто відзначити розроблену НДІАчормет дослідну систему регулювання процесом грануляції (рис. 1.10), що передбачає стабілізацію вологості та крупності котунів регулюванням загальної витрати води (на шихту та на матеріал, що формує грудки) та швидкості обертання гранулятора у відповідності із алгоритмом (1.11).

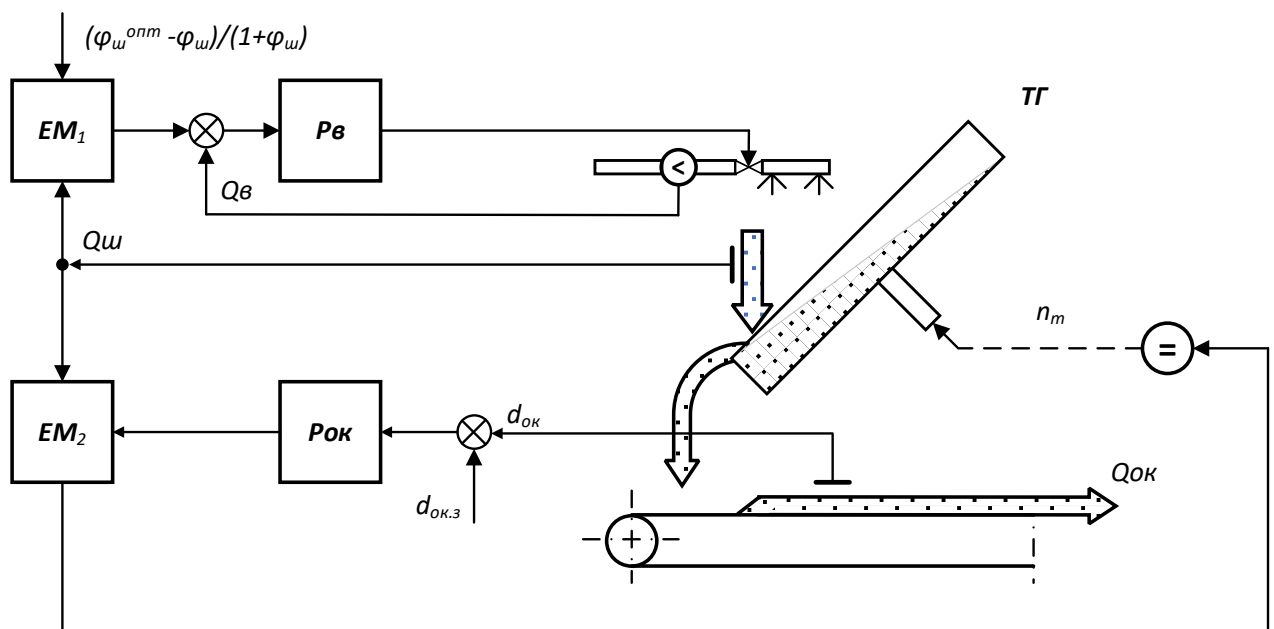


Рисунок 1.10 – Структура системи стабілізації вологості та крупності котунів регулюванням загальної витрати води та швидкості обертання гранулятора

АСК грануляції складається з двох у значній мірі незалежних систем. Система регулювання витрати води є двоконтурною. Перший контур, що

містить регулятор  $P_v$ , здійснює стабілізацію витрати води незалежно від тиску у водопроводі та люфтів виконавчого механізму. Задане значення витрати води формується у другому контурі за допомогою елементу множення  $EM_1$  пропорційно витраті шихти  $Q_{ш}$ . Система регулювання швидкості обертання гранулятора містить елемент множення  $EM_2$  та регулятор  $P_{ок}$ .

#### 1.4 Аналіз існуючих систем керування та візуалізації технологічного процесу виготовлення сирих котунів

Казахтанська компанія ТОВ «Системотехніка» у 2017 році виконала комплексний проєкт модернізації АСУ ТП випалювальної машина ВМ-7 (корисна площа 116 м<sup>2</sup>), включно з механізмами дільниці огрудкування та поточно транспортної системи.

Розроблена система складається з трьох наступних підсистем:

- керування термообробкою котунів на випалювальній машині (підсистема «випалювання»);
- керування процесом виробництва сирих котунів (огрудкування);
- керування потоково-транспортною системою (ПТС).

На технологічному рівні використовуються дві дубльовані мікропроцесорні інтелектуальні системи на основі програмованих логічних контролерів з пристроями зв'язку з об'єктом на базі модулів віддаленого введення-виведення ET200M та цифрових систем регулювання електроприводів, що керують технологічним процесом та взаємодіють з іншими рівнями керування з використанням локальних обчислювальних мереж Ethernet та Profibus DP. Проєкт було реалізовано на базі мікропроцесорних засобів керування виробництва компанії Siemens, зокрема з використанням двох ПЛК Simatic S7-400. Один з ПЛК (модель CPU 417-5H PN/DP) вирішує завдання керування електроприводами поточно-транспортної системи лінії огрудкування, а другий (модель CPU S7-414-5H PN/DP) – реалізує керування випалювальною

|             |             |                 |               |             |                                |             |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------------|-------------|
|             |             |                 |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.01.ПЗ</i> | <i>Арк.</i> |
|             |             |                 |               |             |                                | 26          |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                |             |

машиною та допоміжним обладнанням, що забезпечує її працездатність (димососи, вентилятори, екстаустери).

Для регулювання швидкості дискових грануляторів застосовується частотно-регульовані приводи (ЧРП) Sinamics G150 шафового виконання.

Для реалізації диспетчерського рівня системи, зокрема системи людино-машинного інтерфейсу, використано програмне забезпечення SCADA WinCC від компанії Siemens. Для реалізації функцій АРМ фахівців у складі комплексу технічних засобів диспетчерського рівня передбачено 4 робочі станції – оператора-технолога, чергового спеціаліста КВПіА, чергового електрика. Крім того, для забезпечення програмного супроводу та налаштування АСУ ТП на цьому рівні передбачено інженерну станцію з відповідною ліцензією [15].

У складі сервера використано промислову робочу станцію Simatic S7 PCS47C, для АРМ оператора-технолога та інших користувачів АСУ ТП використано промислові робочі станції Simatic PCS7 IPC547C [1]. Для побудови промислової мережі Industrial Ethernet використані комутатори типу SCALANCE X208.

Структура екранних форм інтерфейсу користувача АСУ ТП ОМ №7 на прикладі відео-кадру «Поточно-транспортна система» (рис. 1.11), включає наступні чотири сегменти:

1. Головне меню.
2. Вікно процесу.
3. Область аварійних повідомлень.
4. Панель функціональних кнопок.

У робочій області (Вікно процесу) відображається графічне зображення процесу, що називається мнемосхемою. На мнемосхемі при натисканні мишею на інтерактивних елементах можуть відкриватися вторинні вікна. Вони призначені для введення необхідних даних для керування процесом за допомогою вікон для введення операторських даних або лицьових панелей (так званих faceplate). Вторинні вікна системи найчастіше відкриваються у діалоговому (модальному) режимі та використовуються для введення параметрів

|             |             |                 |               |             |                                |             |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------------|-------------|
|             |             |                 |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.01.ПЗ</i> | <i>Арк.</i> |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                | 27          |

процесу, налаштувань регуляторів та передачі команд впливу на об'єкт керування.

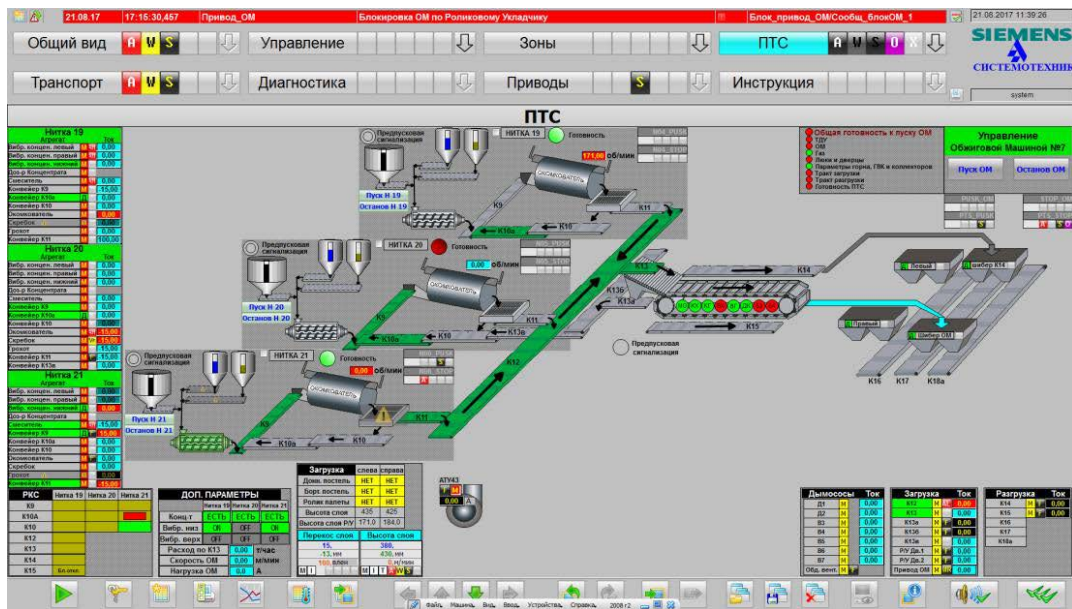


Рисунок 1.11 –Екранна форма вікна відображення стану поточно-транспортної системи та грануляторів

Також серед мнемосхем можна виділити окремі екранні форми для окремих ниток (за технологічною схемою вони мають номери 19, 20, 21) огрудкування (рис. 1.12).

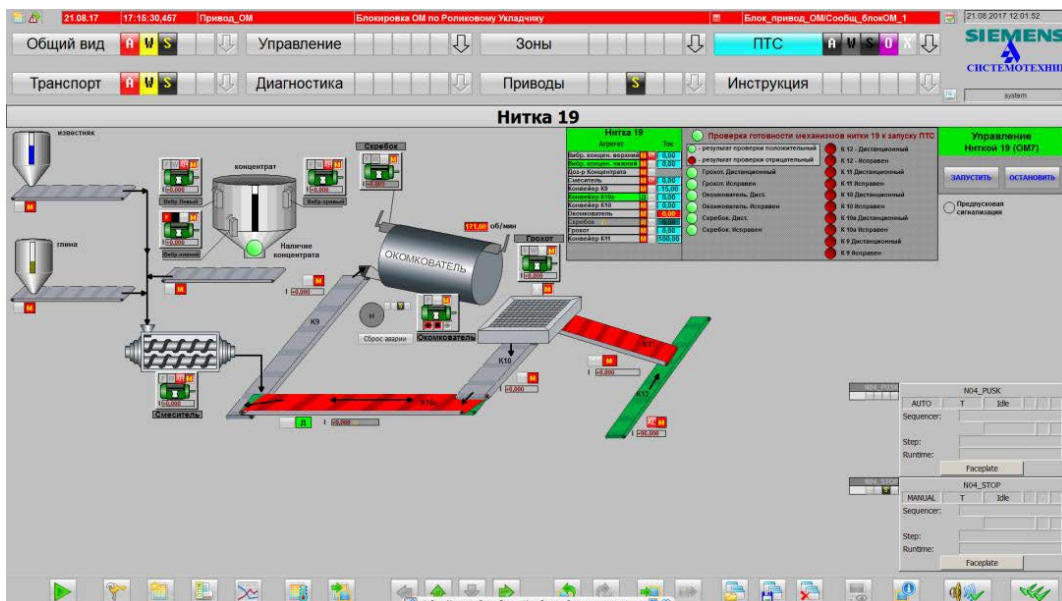


Рисунок 1.12 –Екранна форма вікна основних параметрів процесу виготовлення сирих котунів

До недоліків розглянутої системи візуалізації можна віднести недотримання вимог стандарту ISA101 та концепції ситуаційної обізнаності оператора. Тож, постає завдання розробки системи автоматизації процесу виготовлення сирих котунів з особливим фокусом на розробку системи візуалізації з дотриманням вимог щодо побудови вискоефективного людино-машинного інтерфейсу на базі стандарту ISA101. Також доцільно розглянути можливість реалізувати систему візуалізації як веб-орієнтовану систему.

Висновки до розділу:

У розділі розглянуто особливості технологічного процесу виготовлення сирих залізородних котунів на фабриці огрудкування основні характеристики технологічного устаткування, що використовується на вітчизняних ГЗК, зокрема дискових грануляторів.

Проаналізовано існуючі способи та підходи до реалізації керування процесом виготовлення сирих котунів. Виконаний аналіз показав перспективність підходу на базі стабілізації вологості та крупності котунів регулюванням загальної витрати води та швидкості обертання гранулятора.

Розглянуті існуючі та перспективні підходи щодо оперативного визначення гранулометричного складу сирих котунів на виході з дискового гранулятора.

Виконано аналіз існуючих систем автоматизації технологічного процесу, зокрема у контексті використовуваного комплексу технічних засобів та особливостей реалізації засобів людино-машинного інтерфейсу. Запропоновано концепцію подальшої модернізації системи, зокрема шляхом удосконалення системи візуалізації з орієнтацією на можливість доступу до сторінок оператора з використанням веб-інтерфейсу.

|      |      |          |        |      |                                |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>КНУ КРБ.151.24.02.01.ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                | 29   |

РОЗДІЛ 2  
ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ  
ВИГОТОВЛЕННЯ СИРИХ КОТУНІВ

2.1 Розробка математичної моделі процесу виготовлення сирих котунів на фабриці огрудкування

Математичний опис процесу виготовлення сирих котунів на промисловому дисковому грануляторі з урахуванням фізико-хімічного складу шихт в умовах Криворізького Центрального гірничозбагачувального комбінату, у відповідності до [1], має наступний вигляд:

$$y_1 = 159,631 - 0,4085x_1 - 16,5373x_2 - 50,3241x_3 + 0,7603x_4 - 0,5670x_3^3 - 0,0577x_4^2 + 10,831x_3^2 - 0,02787x_1x_2 - 0,0201x_1x_4 - 1,3664x_2x_3 + 0,6592x_2x_4 + 0,1964x_1x_3 - 0,2309x_2^2, \quad (2.1)$$

$$y_2 = -430,0085 - 0,4534x_1 + 23,7471x_2 + 9,1809x_3 + 10,607x_4 - 0,6057x_2^2 - 0,0946x_4^2 - 0,0575x_1x_2 + 0,0172x_1x_4 - 0,768x_2x_3 - 0,0575x_2x_4. \quad (2.2)$$

де  $y_1$  – різниця виходів котунів кондиційного розміру (10-20 мм) та крупної фракції (більше 20 мм);  $y_2$  – міцність котунів на скидання;  $x_1$  – продуктивність гранулятора, т/год;  $x_2$  – швидкість обертання чаші, об/хв;  $x_3$  – вологість шихти, %;  $x_4$  – вміст заліза у шихті, %.

Для знаходження оптимальних значень параметрів, при яких досягається максимум шуканого показника якості, у роботі [8] запропоновано використовувати метод статистичного градієнта. Сутність даного методу полягає в тому, що відшукується максимально можливе значення показника якості  $y_1$ , шляхом відповідного вибору векторів контрольованих параметрів  $x_1, x_2, x_3, x_4$ , що задовольняють технологічним обмеженням.

|                  |             |                      |               |             |                                |             |                |
|------------------|-------------|----------------------|---------------|-------------|--------------------------------|-------------|----------------|
|                  |             |                      |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.02.ПЗ</i> |             |                |
| <i>Змн.</i>      | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i>      | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                |             |                |
| <i>Розроб.</i>   |             | <i>Клименко Р.Б.</i> |               |             | <i>Лім.</i>                    | <i>Арк.</i> | <i>Аркушів</i> |
| <i>Перевір.</i>  |             | <i>Рубан С.А.</i>    |               |             |                                | 34          | 37             |
| <i>Н. Контр.</i> |             | <i>Маринич І.А.</i>  |               |             | <i>КНУ АКІТ-20</i>             |             |                |
| <i>Затверд.</i>  |             | <i>Рубан С.А.</i>    |               |             | <i>РОЗДІЛ 2</i>                |             |                |

Для пошуку максимуму  $y_1$  було запропоновано наступну методику [8]:

1. При наявних  $n$  змінних параметрах визначаються поодинокі випадкові вектори, рівномірно розподілені по всіх напрямках простору параметрів (за виразами (2.1) та (2.2):

а) визначається рівномірно розподілена випадкова величина  $\varepsilon_1$  в інтервалі  $[0, 1]$  координати  $x_{1-1}$ ;

б) визначається наступна рівномірно розподілена в інтервалі  $[0, 1]$  випадкова величину  $\varepsilon_2$  за координатою  $x_{1-2}$ ;

в) виконується перевірка нерівності:

$$\sqrt{1 - \varepsilon_1^2} > \varepsilon_2, \quad (2.3)$$

г) якщо нерівність (2.3) виконується, маємо одиничний вектор, що показує напрям до області оптимуму, якщо ні – то знаходимо наступну рівномірно розподілену випадкову величину по координаті  $x_{1-3}$  і т.д.

2. Визначивши  $m$  одиничних випадкових векторів, знайдемо векторну суму, застосувавши вираз:

$$y_m = \sum_{j=1}^m E_j [Q(X + qE_j) - Q(X)],$$

або у скалярній формі

$$y_1 = \sum_{j=1}^m \varepsilon_{1j} [Q(x_1 + q\varepsilon_j) - Q(x_1)], \quad (2.4)$$

тощо для  $n$  параметрів,

де  $y_m$  – векторна сума, що є статичною оцінкою градієнтного напрямку;  $E_j$  – вектор пробного кроку, рух яким призводить до збільшення функції якості;  $Q(x_j)$  – найбільше значення функції якості за  $i$  попередніх кроків.

Напрямок робочого кроку у скалярній формі

$$\Delta x_1 = \frac{ay_1}{|y_m|},$$

де  $a$  – постійний коефіцієнт;  $y_1$  – значення функції якості у точці  $\max$ ;  $y_m$  – максимальне значення функції якості ( $y_m = 100\%$ ).

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 31   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

Ці вирази були використані при побудові алгоритму з метою автоматизації дискових грануляторів [8].

Величини  $x_1, x_3, x_4$ , задані в інтервалах відповідно  $[x_{1min}, \dots x_{1max}]$ ,  $[x_{3min}, \dots x_{3max}]$ ,  $[x_{4min}, \dots x_{4max}]$ .

1. Для рівномірного перегляду інтервалів визначення величин  $x_1, x_3, x_4$  необхідно згенерувати випадкове число  $I_i$  з інтервалу  $[0, 1]$ , потім перерахувати у задані інтервали  $[a, b]$  за виразом:

$$x_i = (b - a)I_i + a. \quad (2.5)$$

2. Вирахувати значення  $y_1$  та  $y_2$  для вихідних точок  $x_{1i}, x_{3i}$  та  $x_{4i}$ .

3. Якщо значення ( $x_{1i}, x_{3i}$  та  $x_{4i}$ ) не задовольняють умові:

$$y_2(x_{1i}, x_{3i}, x_{4i}) \in [y_{2min}, y_{2max}]. \quad (2.6)$$

генерували нову трійку чисел  $x_{1i}, x_{3i}$  та  $x_{4i}$ .

4. Якщо умова (2.5) задовольнялася, то вираховували таке значення, для якого виконується

$$y_1 = y_{1max}(x_1, x_2, x_4). \quad (2.7)$$

Далі з використанням методу найменших квадратів було отримано рівняння регресії вигляду

$$x_2 = a_0 + a_1 x_3 + a_2 x_4 + a_3 x_1 + a_4 x_3 x_4 + a_5 x_3^2 + a_6 x_4^2. \quad (2.8)$$

Для умов Центрального ГЗК у роботі [8] були отримані наступні коефіцієнти рівняння регресії:

$$x_2 = -14,2738 - 2,4965x_3 + 0,1011x_1 + 1,093x_4 - 0,01x_3x_4 + 0,023x_3^2 - 0,008x_4^2. \quad (2.9)$$

Аналіз отриманого виразу (2.9) дозволяє оцінити можливі стратегії реалізації оптимального керування процесом. При збільшенні вологості шихти, що надходить на огрудкування (фактор  $x_3$ ) необхідно знижувати швидкість обертання чаші, або збільшувати продуктивність гранулятора (фактор  $x_1$ ).

Зі зростанням вмісту добавок (зменшення вмісту заліза) умови огрудкування покращуються і, для отримання гранул заданого розміру, за інших оптимальних умов, необхідно знижувати швидкість обертання чаші. З (2.9) видно, що продуктивність по вихідному живленню (фактор  $x_1$ ) значно впливає

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 32   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |



на положення статичної характеристики об'єкта, тому при розробці системи автоматичного регулювання роботою дискового гранулятора необхідна стабілізація цього параметра на оптимальному рівні. Тобто, вираз (2.9) є алгоритмом оптимального ведення процесу огрудкування, оскільки дозволяє підібрати таке значення швидкості обертання чаші  $x_2$ , яке забезпечує максимально можливий вихід котунів при даній вхідній ситуації, що визначається факторами  $x_1, x_3, x_4$ . Для перевірки вище наведеного алгоритму у роботі [8] було знято також залежність зміни параметрів шихти та продуктів огрудкування в часі при налаштуванні процесу на максимальний вихід котунів.

Результати досліджень підтверджують, що при отриманому алгоритмі оптимальності керування дійсно забезпечується швидкість обертання чаші, що дозволяє підтримувати вихідну величину у зоні оптимуму ( $y_1 = y_{1max}$ ).

Алгоритм оптимальності процесу (2.9) є статичною характеристикою дискового гранулятора, тобто уявляє собою геометричне місце точок, яке визначає вершину «пагорба» показника якості при різних значеннях збурень за вологістю та вмісту заліза у шихті. Вираз (2.9) може бути записаний як

$$n_{ш} = f(Q_{ш}, \varphi_{ш}, F_e). \quad (2.10)$$

при  $q_k = q_k^{max}$ ; де  $q_k$  – вихід кондиційної фракції.

У цьому випадку задача оптимізації процесу огрудкування може бути зведена до завдання підтримки швидкості обертання чаші, яка відповідає вихідній величині пристрою, що реалізує наведений вище алгоритм. Інакше кажучи, автоматичне керування огрудкуванням здійснюється з використанням слідкуючої системи, на вхід якої надходить випадкове збурення (оптимальне значення швидкості обертання чаші).

Розрахунок слідкуючої системи зводиться до визначення передавальної функції об'єкту, вибору та розрахунку налаштувань регулятора, які б задовольняли певним показникам якості.

При розрахунку слідкуючої системи врахування динамічних властивостей об'єкта зводиться до врахування сталих часу, визначених кривою розгону чи розрахунковим шляхом [8].

|             |             |                 |               |             |                                |             |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------------|-------------|
|             |             |                 |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> | <i>Арк.</i> |
|             |             |                 |               |             |                                | 33          |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                |             |

На рис. 2.1 наведено структурну схему системи автоматичного керування швидкістю обертання дискового гранулятора, де  $W_p(s)$  – передавальна функція регулятора;  $W_{вп}(s)$  – передавальна функція підсилювача;  $W_3(s)$  – передавальна функція ланцюга збудження;  $W_{дв}(s)$  – передавальна функція механічної частини приводного двигуна з приведеним механізмом;  $W_{дш}(s)$  – передавальна функція датчика швидкості.

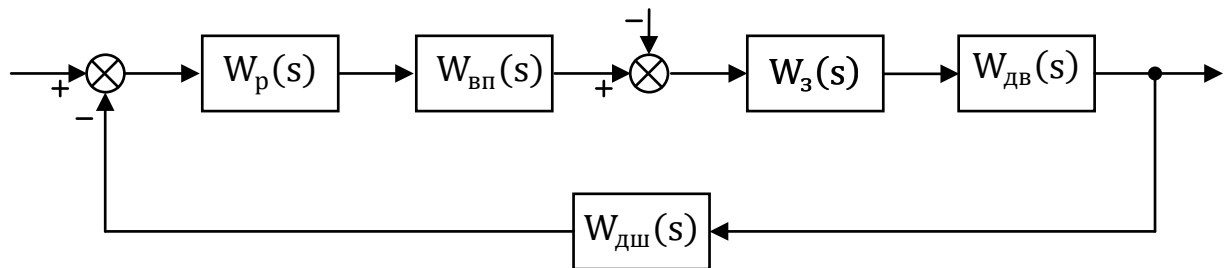


Рисунок 2.1 – Структурна схема САК швидкістю обертання дискового гранулятора

Для визначення сталих часу ланцюга збудження  $T_в$ , електромеханічної сталої часу  $T_м$  у роботі [8] виконано розрахунок параметрів приводу дискового гранулятора.

Так, передавальна функція ланцюга збудження має вигляд інерційної ланки 1-го порядку

$$W_3(s) = \frac{K_3}{T_3s + 1} \quad (2.11)$$

де, згідно [8],  $K_3 = 2$ ,  $T_3 = 2$ .

Передавальна функція механічної частини приводного двигуна з приведеним механізмом уявляє собою ланку 2-го порядку

$$W_{дв}(s) = \frac{K_д}{T_яT_мs^2 + T_мс + 1} \quad (2.12)$$

де, згідно [8], коефіцієнт підсилення  $K_д = 0,17$ , стала часу якірної обмотки  $T_я = 0,06$ , стала часу механічної частини привода  $T_м = 0,18$ .

Оскільки у якості датчика швидкості використовується тахогенератор, то передавальну функцію датчика швидкості у першому наближенні можна апроксимувати пропорційною ланкою

$$W_{дш}(s) = K_{ТГ}. \quad (2.13)$$

З урахуванням високої швидкої підсилювача, його передавальна функція також може бути апроксимована пропорційною ланкою

$$W_{ВП}(s) = K_{ВП}. \quad (2.14)$$

Підставивши передавальні функції (2.11) – (2.14) до структурної схеми на рис. 2.1, отримаємо алгоритмічну структурну схему САК швидкістю обертання дискового гранулятора (рис. 2.2).

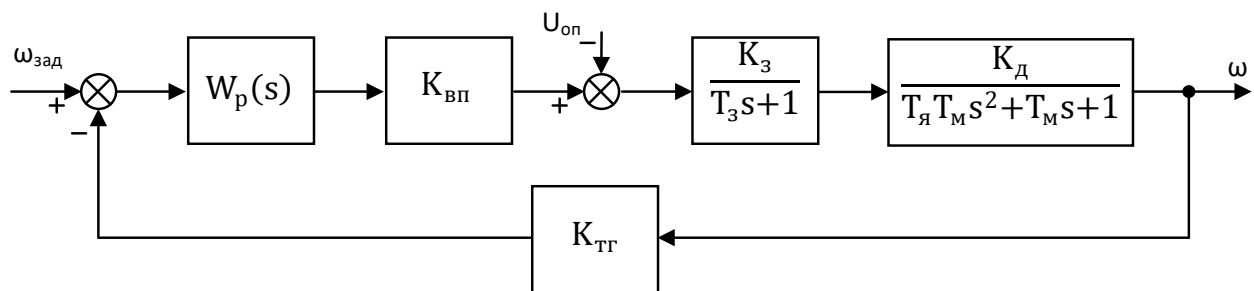


Рисунок 2.2 – Структурна алгоритмічна схема САК швидкістю обертання дискового гранулятора

Як зазначено у [8], вихідні параметри процесу огрудкування (вологість шихти  $\varphi_{ш}$  і вміст у ній заліза  $F_e$ ) є випадковими величинами, тобто необхідна швидкість обертання чаші  $n_{ш.зад}$  за виразом (2.9) також є випадковою величиною. Проходження випадкових сигналів через САК висуває певні вимоги до останніх. Головною із цих вимог є те, що система керування на виході повинна відтворювати вхідний сигнал з якомога більшою точністю. Ця вимога особливо жорстка, якщо зміни випадкового сигналу на вході можна порівняти за часом з тривалістю перехідного процесу в системі керування. У цьому випадку в систему повинні бути введені коригувальні ланки для зменшення середньоквадратичної похибки виходу при відтворенні вхідного сигналу.

Для визначення точності відтворення вхідного сигналу на виході системи у роботі [8] були зняті залежності вологості  $\varphi_{ш}$  та вмісту заліза  $F_e$  в шихті протягом тривалого проміжку часу. За результатами дослідження було з'ясовано, що параметри  $\varphi_{ш}$  і  $F_e$  істотно змінюються протягом щонайменше 60 - 80 с, тобто час перехідного процесу у системі керування швидкістю обертання гранулятора  $t_{рег}$  у декілька разів менше, ніж суттєві зміни параметрів фізико-хімічного складу шихти. Значення  $\varphi_{ш}$  та  $F_e$  при змінах можуть вводитися у ПЛК, що реалізує алгоритм (2.9), і після розрахунків можна отримати криву оптимальної швидкості обертання чаші.

Таким чином, динамічні характеристики дискового гранулятора в системі, що розглядається, можуть не враховуватися і об'єкт за по прийнятим каналом керування може бути представлений пропорційною ланкою.

## 2.2 Вибір та обґрунтування апаратних засобів реалізації системи автоматизації процесу виготовлення сирих котунів

### Датчик вологості шихти

Аналіз досвіду створення систем автоматизації процесу виготовлення сирих котунів показав, що для контролю вологості шихти, яка надходить на грануляцію, доцільно використати мікрохвильовий потоковий датчик вологості Microradar 113A [16].

Даний прилад широко використовується у промисловості для вимірювання вологості піску, рудних концентратів, каоліну, оксиду алюмінію, вугілля та інших матеріалів. Вологомір призначений для монтування на стрічкових конвеєрах та бункерах. Може застосовуватися в умовах високих температур, при високій абразивності та агресивності матеріалу, високого рівня пилу.

Принцип дії вимірювача ґрунтується на вимірюванні величини поглинання високочастотної енергії вологим матеріалом і перетворенні цієї величини в цифровий код, що відповідає вологості матеріалу.

|             |             |                 |               |             |                                |             |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------------|-------------|
|             |             |                 |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> | <i>Арк.</i> |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                | 36          |



Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд датчика Microradar 113А

Сигнал від чутливих елементів надходить в мікропроцесорний блок обробки, в якому відбувається обчислення вологості. Розрахована величина вологості відображається на індикаторі мікропроцесорного блоку, та перетворюється в аналогові виходи 4 – 20 мА (або 0 – 5 В) для подальшого використання для керування технологічним процесом. Також прилад має можливість передавати значення вологості та температури по інтерфейсу RS-485.

Прилад додатково реалізує автоматичну корекцію результатів вимірювання при зміні температури матеріалу.

Комплект поставки приладу включає програмне забезпечення, що реалізує функції накопичення та відображення вологості в реальному масштабі часу, що дозволяє записувати дану інформацію на комп'ютер з можливістю її подальшої обробки.

Основні технічні характеристики датчика наведені у табл. 2.1.

|             |             |                 |               |             |                                |             |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------------|-------------|
|             |             |                 |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> | <i>Арк.</i> |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                | 37          |

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики мікрохвильового потокового датчика вологості Microradar 113A

| № з/п | Параметр  | Од. вим. | Значення                      |
|-------|---|----------|-------------------------------|
| 1     | Діапазон вимірювання вологості  | %        | 0-60                          |
| 2     | Навантажувальна здатність струмового виходу   | Ом       | <500                          |
| 3     | Тип вихідного сигналу   |          | 0 – 20 мА, 4 – 20 мА, 0 – 5 В |
| 4     | Підтримка польових інтерфейсів  |          | RS-485                        |
| 5     | Похибка при діапазоні вимірювання вологості:<br>– 0,5 – 3<br>– 3 – 15<br>– 15 – 30<br>– 30 – 60 | %        | 0,15<br>0,5<br>1,0<br>2,0     |
| 6     | Напруга живлення  |          | 220 VAC / 50 Гц               |
| 7     | Рівень захисту  |          | IP54                          |
| 8     | Споживана потужність, макс  | ВА       | 50                            |

#### Датчик витрати рідини у гранулятор

Для вимірювання витрати рідини у гранулятор доцільно використати вимірювальний перетворювач OPTIFLUX 5300 виробництва компанії KROHNE, що уявляє собою електромагнітний витратомір з вимірювальною трубкою з високотехнологічної кераміки для високоагресивних і абразивних середовищ, в тому числі з високим вмістом твердих включень (до 70%) (рис. 2.6). Цей високопродуктивний вимірювач призначений для технологічних процесів у хімічній та обробній промисловості, а також у гірничорудному та гірничодобувному секторах [18]. Має дуже високу точність (похибка

|      |      |          |        |      |                                |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                | 38   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                |      |

вимірювання тільки  $\pm 0,15\%$ ), він є одним з найбільш точних електромагнітних витратомірів, доступних на ринку. Пристрій поставляється з різними варіантами комунікаційних інтерфейсів.



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд витратоміру KROHNE OPTIFLUX 5300

Таблиця 2.2 – Основні технічні характеристики витратоміра KROHNE OPTIFLUX 5300

| № з/п | Параметр                     | Од. вим. | Значення   |
|-------|------------------------------|----------|--|
| 1     | Принцип вимірювання          |          | Електромагнітний                                     |
| 2     | Аналоговий вихідний сигнал   | мА       | 0 – 20   |
| 3     | Первинна вимірювана величина |          | Швидкість потоку                                     |
| 4     | Вторинна вимірювана величина |          | Об'ємна витрата                                      |
| 5     | Комунікаційні інтерфейси     |          | HART, PROFINET, Profibus-DP, Profibus-PA, Modbus RTU |
| 6     | Діапазон робочих температур  | °C       | -40...+180   |
| 7     | Ступені захисту              |          | IP66/67, NEMA 4/4X/6                                 |

## Перетворювач частоти

Виконаний у першому розділі аналіз існуючих систем і рішень у галузі автоматизації процесу огрудкування, для реалізації керування швидкістю чаші дискового гранулятора при реалізації оптимального керування виготовленням сирих котунів доцільно використати перетворювач частоти Sinamics G150 шафового виконання. Оскільки на грануляторі встановлено асинхронний двигун потужністю 132 кВт, то доцільно обирати перетворювач, виходячи з потужності двигуна, тому обираємо модель з каталожним номером 6SL3710-1GE32-6AA3.

ПЧ Sinamics G150 в шафовому виконанні має компактну модульну конструкцію, оптимальну і просту в обслуговуванні, а також широкий набір додаткових компонентів (опцій), що дозволяє оптимально адаптувати комплектний привід до вимог конкретного об'єкта [17].



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд перетворювача частоти Sinamics G150

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 40   |



Перетворювач поставляється з панеллю керування і налаштування, що вбудована у двері шафи. Панель має графічний рідкокристалічний дисплей з підсвіткою для відображення інформації в текстовому режимі. Також виведені світлодіоди для швидкої діагностики поточного стану перетворювача. Додатково є перемикач місцевого або дистанційного режиму для швидкого вибору входу сигналу керування.

Пристрій реалізує стратегію дворівневої безпеки для запобігання випадковій або не авторизованій зміні параметрів. Керування роботою приводу з пульта може бути заблоковано за допомогою пароля, і в цьому випадку на панелі буде можливе лише відображення даних і змінних параметрів. Клавiша OFF (викл) має заводську настройку «активовано», але вона також може бути заблокована. Пароль також може бути використаний для блокування неавторизованих змін параметрів перетворювача.

Таблиця 2.2 – Основні технічні характеристики перетворювача частоти Sinamics G120 моделі 6SL3710-1GE32-6AA3

| № з/п | Параметр                                   | Од. вим. | Значення |
|-------|--|----------|----------|
| 1     | Частота живлення                           | Гц       | 47 – 63  |
| 2     | Напруга живлення                           | В        | 400 ±10% |
| 3     | Номінальний вхідний струм                  | А        | 284      |
| 4     | Максимальний струм                         | А        | 410      |
| 5     | Номінальний вихідний струм                 | А        | 260      |
| 6     | Частота імпульсів (заводське налаштування) | кГц      | 2        |
| 7     | Втрати потужності                          | кВт      | 3,72     |
| 8     | Рівень звукового тиску на відстані 1 м     | дБ       | 69       |
| 9     | Вага                                       | кг       | 460      |
| 10    | Ступені захисту                            |          | IP20     |

## Вибір контролера та модулів введення-виведення

Для реалізації контролерного рівня системи в першу чергу треба орієнтуватися на програмно-апаратні рішення та платформи, які є лідерами у сфері рішень у галузі автоматизації.

Тому доцільно порівняти продукти 3 найбільших гравців на ринку автоматизації в Україні – компаній Siemens, Schneider Electric та Phoenix Contact, а також їх найперспективніших та сучасних продуктів. Вибір з цих продуктів також обґрунтований з тієї точки зору, що вони розглядалися та вивчалися в процесі навчання.

У першу чергу розглянемо родину ПЛК S7-1200/1500 виробництва компанії Siemens. Основними перевагами даної платформи автоматизації є:

- надійність і продуктивність: висока швидкість обробки даних і надійність роботи, особливо у моделях S7-1500.

- уніфікована платформа полягає у тісній інтеграції з іншими продуктами Siemens, такими як приводна техніка, інтелектуальні вимірювальні пристрої, ПЗ TIA Portal, HMI, SCADA, що спрощує створення комплексних систем автоматизації;

- великий вибір моделей для різних завдань, від простих до високопродуктивних систем;

- можливості симуляції і тестування без реального обладнання, навіть складних мережевих функцій та протоколів;

- вбудовані функції для забезпечення кібербезпеки та захисту даних.

Водночас, існує цілий ряд недоліків даної платформи:

- екосистема продуктів є достатньо закритою, високий рівень інтеграції в рамках екосистеми Siemens може обмежувати можливості інтеграції з сторонніми продуктами;

- висока ціна як на контролери, так і на програмне забезпечення та ліцензії;

- складність вивчення та навчання персоналу: висока функціональність може бути складною для освоєння, особливо для новачків.

|             |             |                 |               |             |                                |             |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------------|-------------|
|             |             |                 |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> | <i>Арк.</i> |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                | 42          |

З урахуванням комплексу завдань системи автоматизації виробництва сирих котунів, також можливим рішенням може бути використання ПЛК M580 виробництва компанії Schneider Electric. Перевагами даної лінійки ПЛК є:

- розширюваність і модульність, тобто можливість легкого розширення та модернізації системи завдяки модульній архітектурі;
- гарна інтеграція з іншими продуктами: добре інтегрується з HMI, SCADA та іншими рішеннями як від Schneider Electric, так і від інших вендорів;
- висока продуктивність: підтримка складних задач та висока швидкість обробки даних;
- надійні функції захисту даних та резервного копіювання.

До недоліків можна також віднести закритість частини компонентів платформи, що може обмежувати можливості інтеграції з сторонніми продуктами; а також висока вартість та складність навчання.

На поточний момент на ринку промислової автоматизації України набирає популярність родина ПЛК PLCnext від Phoenix Contact. Головними перевагами, що забезпечують зростання популярності та кількості інсталяцій, є [19]:

- підтримка стандартних мов програмування IEC 61131-3 та мов високого рівня (C++, C#, Python), що дозволяє розробляти та інтегрувати різні сторонні додатки та сервіси;
- завдяки гнучкості і масштабованості легко адаптується до різних задач, підтримуючи просте розширення і модернізацію системи;
- легкість налаштуванні підключення та інтеграції до хмарних платформ для збору та аналізу даних;
- вбудовані функції захисту даних та мережі забезпечують високий рівень безпеки;
- підтримка концепції Edge Computing, тобто виконання частини обчислень безпосередньо на контролері, що знижує затримки і підвищує ефективність.

Водночас, варто відмітити і ряд існуючих недоліків:

|             |             |                 |               |             |                                |             |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------------|-------------|
|             |             |                 |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> | <i>Арк.</i> |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                | 43          |

- через відносно нещодавню появу на ринку, продукт є відносно «молодим», що може впливати на підтримку та наявність додаткових ресурсів;
- ціна: деякі конфігурації можуть бути дорожчими у порівнянні з конкурентами через інноваційні функції та гнучкість;
- висока функціональність може вимагати більше часу на освоєння та налаштування.

Таким чином, можна зробити висновок, що з точки зору інноваційної та перспектив розвитку доцільно зупинити свій вибір на ПЛК родини PLCnext, оскільки від найбільше підходить для проектів, де важлива гнучкість, відкритість та інтеграція з сучасними технологіями, такими як хмарні сервіси та IoT.

Враховуючи вимоги щодо кількості каналів введення-виведення та їх швидкодії, обсягу доступної пам'яті та комунікаційних можливостей для реалізації системи автоматизації процесу виготовлення сирих котунів у якості пристроїв контролерного рівня було вирішено використати ПЛК PLCnext виробництва компанії Phoenix Contact серії АХС F 1152 (рис. 2.9) [19].

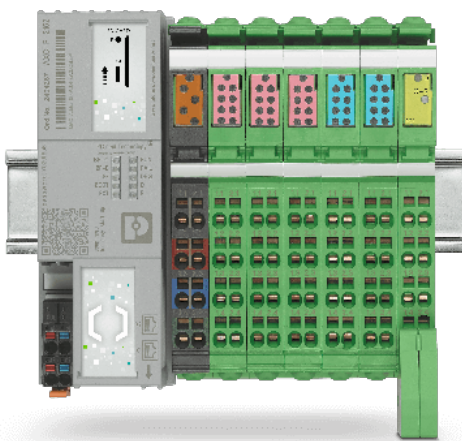


Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд ПЛК серії PLCnext

Процесорний модуль АХС F 1152 є наймолодшим у лінійці ПЛК PLCnext, що є однією з найперспективніших рішень на ринку автоматизації та є складовою екосистеми PLCnext Technology. Окремо варто відмітити, що дане рішення побудовано на базі відкритого дистрибутиву ядра Linux, що надає йому переваги

|             |             |                 |               |             |                                |             |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------------|-------------|
|             |             |                 |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> | <i>Арк.</i> |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                | 44          |

та можливості реалізації алгоритмів формування керуючих впливів у режимі, максимально наближеному до режиму реального часу. Одночасно з уже звичною для інших ПЛК підтримкою мов стандарту IEC 61131-3, ПЛК серії PLCnext і має можливості програмування на мовах високого рівня, зокрема C/C++, C# Matlab, Simulink. Така можливість надає можливості до швидкого освоєння платформи програмування, а також забезпечує практично необмежені можливості щодо розширення функціоналу за рахунок використання широкого спектра мов програмування, існуючих бібліотек та ІТ-інструментів у своїх проєктах [19].

У сучасних умовах одним з пріоритетів при побудові систем автоматизації для критичних галузей економіки країни є дотримання вимог щодо кібербезпеки та захисту інформації. Це є однією з найвагоміших причин обрати ПЛК серії PLCnext для побудови системи автоматизації процесу огрудкування, оскільки даний ПЛК базується на перевірених роками практичного застосування підходах, що лежать у основі функціонування Linux-подібних ОС. Компанія Phoenix Contact декларує дотримання концепції проєктування рішення на засадах забезпечення захисту від несанкціонованого доступу у відповідності до міжнародного стандарту безпеки IEC 62443.

Однією із ключових переваг ПЛК PLCnext є широкі інтеграційні можливості, зокрема за рахунок підтримки сучасних технологій та стандартів, таких як OPC UA, REST API, TSN, 5G. За рахунок того, що ядро системи реалізовано на базі ОС та має можливості підтримки контейнерів, програмні можливості системи можна розширювати у відповідь на нові виклики та появу нових інтерфейсів та протоколів зв'язку. Таким чином, система є максимально відкритою для нарощування функціональних можливостей [19].

Варто також відзначити наявність у компанії Phoenix Contact власної хмарної платформи ProfiCloud, а також підтримку інструментів швидкого підключення ПЛК серії PLCnext до даної платформи. Це дозволяє накопичувати великі обсяги даних про перебіг процесу, застосовувати потужні серверні можливості, зокрема і щодо застосування інструментів машинного навчання,

|             |             |                 |               |             |                                |             |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------------|-------------|
|             |             |                 |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> | <i>Арк.</i> |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                | 45          |

аналізу даних, а отже, вирішувати завдання оптимізації технологічного процесу та алгоритмів керування.

Для повноцінної реалізації збору інформації про хід технологічного процесу та видачі команд керування на виконавчі механізми, необхідно центральний процесор ПЛК доповнити модулями дискретних та аналогових входів/виходів у кількості, що визначається інформаційним забезпечення системи автоматизації.

Оскільки для реалізації алгоритму екстремального керування процесом виготовлення сирих котунів необхідна інформація про витрату шихти у гранулятор, витрату води, поточну швидкість обертання та кут нахилу чаші огрудковувача, доцільно обрати модуль введення аналогових сигналів AXL F AI8 I 1F на 8 аналогових входів (рис. 2.10) [20].

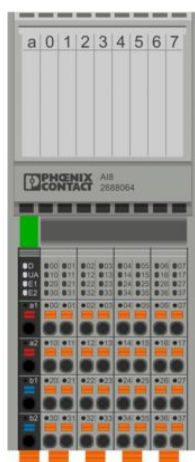


Рисунок 2.10 – Зовнішній вигляд модуля аналогових входів AXL F AI8 I 1F

Модуль містить 8 аналогових входи з діапазонами вхідного сигналу 0 – 5 В, -5 – 5 В, 0 – 10 В, -10 – 10 В, 4 – 20 мА, 0 – 20 мА, -20 – 20 мА, схема підключення – двохпровідна. Головними перевагами даного модуля є підтримка практично всіх існуючих діапазонів уніфікованих аналогових сигналів, висока швидкість внутрішньої шини 100 Мбіт/с, зручність монтажу за рахунок штекерів AxioLine F [20].

Для видачі аналогових сигналів керування на виконавчі механізми шасі ПЛК також потрібно розширити за рахунок модуля аналогових виходів. Враховуючи необхідність видачі сигналів завдання за подачею шихти у

|      |      |          |        |      |                                |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                | 46   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                |      |

гранулятор, витрати води, швидкості обертання та кута нахилу чаші гранулятора, а також з урахуванням необхідності мати резерв, доцільно обрати модуль AXLF AO8 1F з 8 аналоговими виходами, що підтримують наступні діапазони вихідного сигналу: 0 – 20 мА, 4 – 20 мА 0 – 5 В, -5 – 5 В, 0 – 10 В, -10 – 10 В. Основні переваги модуля – це швидкість передачі даних за внутрішньою шиною (100 Мбіт/с), наявність захистів від КЗ, від стрибків струму у перехідних процесах та перевантаження [21].

### 2.3 Комп'ютерне моделювання САК виготовленням сирих котунів на фабриці огрудкування

Як було зазначено у п.2.1, задачу оптимізації процесу огрудкування можна звести до завдання підтримки швидкості обертання чаші гранулятора, яка забезпечує підтримку заданої продуктивності за виходом котунів товарного класу. Для дослідження динаміки та розрахунку параметрів регулятора для розглянутої у п. 2.1 системи автоматичного керування швидкістю обертання дискового гранулятора (рис. 2.1) було використано пакет моделювання динамічних систем Simulink системи MATLAB R2022b.

Для цього за алгоритмічною структурною схемою системи (рис. 2.1) було побудовано модель для випробування запропонованого підходу та дослідження динамічних характеристик процесу керування швидкістю чаші гранулятора (рис. 2.4).

Розробка даної моделі у пакеті Simulink дозволила дослідити та перевірити адекватність представлених у роботах [1-3, 8] результатів, а також вирішувати завдання розробки та практичного випробування способів та алгоритмів керування процесом десульфурзації димових газів.

|             |             |                 |               |             |                                |             |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------------|-------------|
|             |             |                 |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> | <i>Арк.</i> |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                | 47          |

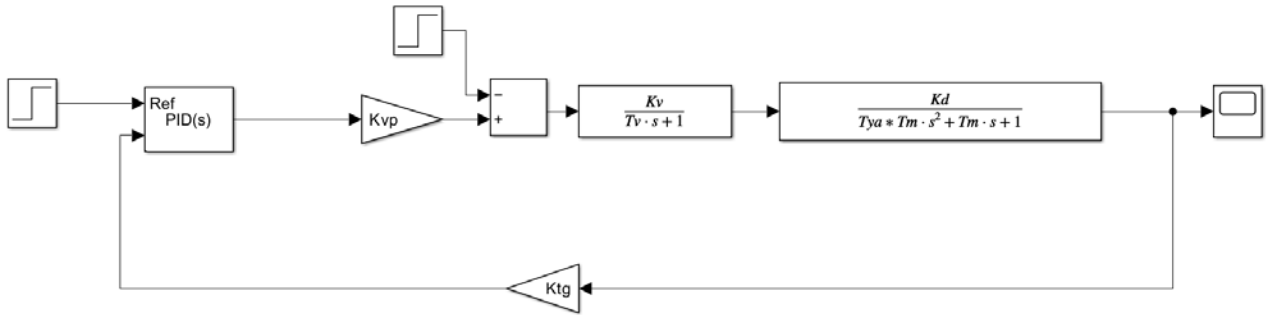


Рисунок 2.4 – Simulink-модель САК швидкістю чаші гранулятора

Параметри моделі задавалися через функцію зворотного виклику InitFcn, що виконується при ініціалізації моделі. Скрипт для визначення основних параметрів наведений на рис. 2.5.

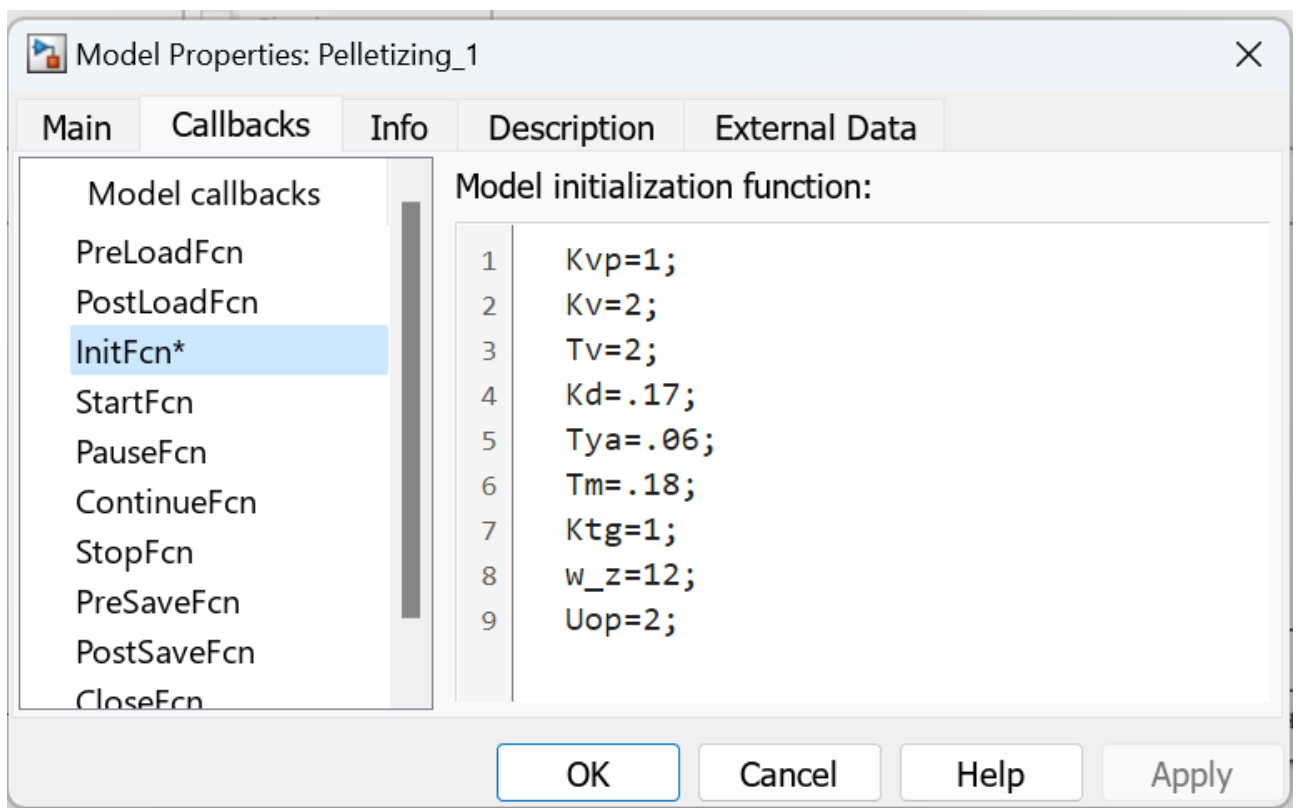


Рисунок 2.5 – Код функції InitFcn з основними параметрами САК швидкістю чаші гранулятора



Наявність адекватної моделі САК швидкістю чаші гранулятора дозволяє здійснити експериментальне визначення параметрів регулятора (ПІ, ПІД), які забезпечать досягнення бажаних з технологічної точки зору показників якості керування.

З урахуванням наявності у складі об'єкту керування інерційної ланки другого порядку, було вирішено використати ПІД-регулятор, пошук оптимальних параметрів якого здійснювався з використанням вбудованих інструментів блоку PID Controller (2DOF). Перед запуском процедури пошуку значень параметрів було обрано бажаний метод автоматичного налаштування у полі Automated Tuning – Transfer Function Based (на базі передавальної функції).

На рис. 2.6 наведено зовнішній вигляд вікна параметрів ПІД-регулятора з можливістю автоматичного тюнінгу.

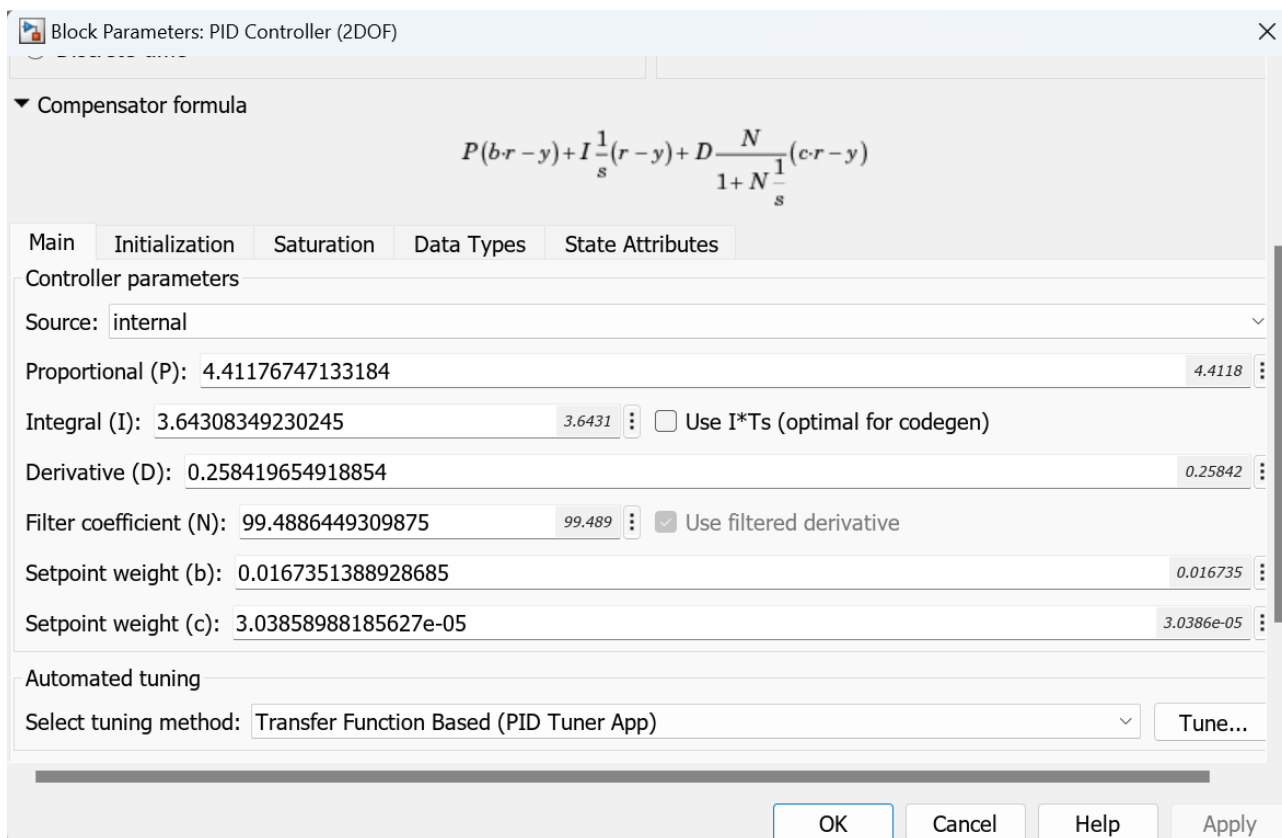


Рисунок 2.6 – Вікно налаштування параметрів блоку PID Controller (2DOF)

На наступному кроці було обрано кнопку Tune, яка відкриває вікно дослідження впливу параметрів регулятора на динамічний характер перехідних процесів у системі. Шляхом перетягування повзунків Response Time та Transient Behavior користувач має можливість налаштувати параметри ПІД-регулятора як компроміс між заданою швидкістю та характером перерегулювання. У нижній частині вікна налаштувань відображаються поточні параметри ПІД-регулятора. При виборі кнопки Update Block поточні налаштування регулятора будуть застосовані для блоку PID Controller (2DOF). Як видно на рис. 2.7, у процесі налаштувань було забезпечено досягнення тривалості перехідного процесу  $t_{per} = 6$  с та перерегулювання  $\sigma$  на рівні 10%. При цьому отримані наступні параметри регулятора: коефіцієнт підсилення пропорційної складової  $P = 4,412$ , стала часу інтегрування  $I = 3,643$ , стала часу диференціювання  $D = 0,2584$ .

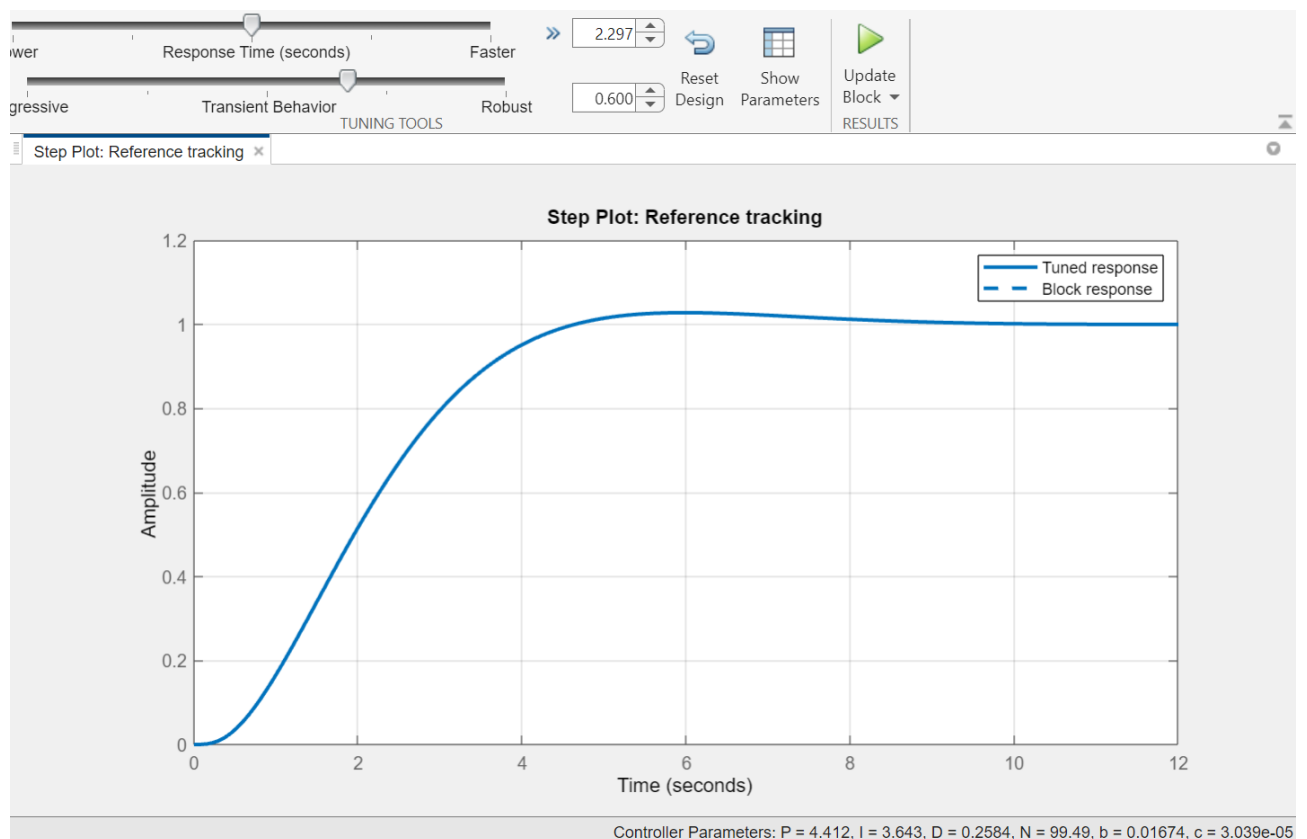


Рисунок 2.7 – Вікно налаштування параметрів ПІД-регулятора для умов досліджуваної САК швидкістю чаші гранулятора

З урахуванням отриманих параметрів налаштувань ПІД-регулятора на базі імітаційної моделі на рис. 2.4 було проведено серію експериментів з метою

|      |      |          |        |      |                                |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                | 50   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                |      |

підтвердження ефективності розробленої системи. Під час експериментів модель також було випробувано в умовах дії збурень (у момент часу  $t = 10$  с). Отримані результати проведених експериментів наведено на рис. 2.8.

Як показує аналіз отриманих результатів, система автоматичного керування швидкістю чаші гранулятора забезпечує тривалість перехідного процесу  $t_{пер} = 6$  с при невеликому перерегулюванні (менше 20%). Статична похибка відпрацювання сигналу завдання у системі відсутня, тобто система може функціонувати у режимі слідкуючої системи у відповідності до алгоритму оптимального керування процесом грануляції (2.9). Розроблена система в цілому забезпечує виконання усіх вимог, що висуваються до подібних систем.

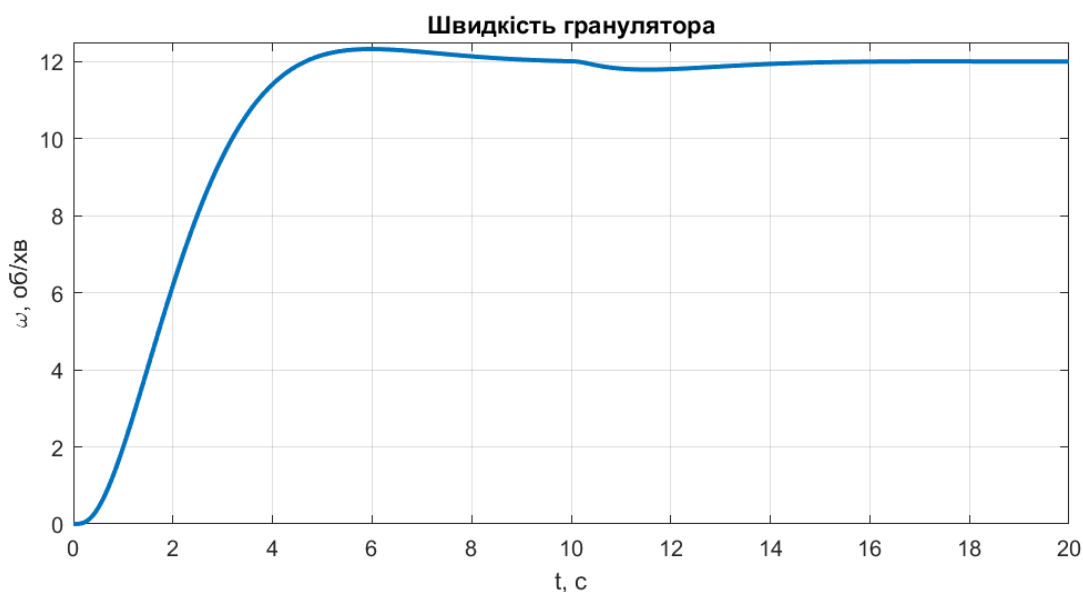


Рисунок 2.8 – Результати дослідження динамічної моделі процесу десульфурації димових газів

#### 2.4 Розробка програмного забезпечення системи автоматизації процесу виготовлення сирих котунів

Для реалізації програмного забезпечення системи автоматизації процесу виготовлення сирих котунів контролерного рівня та рівня SCADA/HMI використано використано ПЗ PLCnext Engineer виробництва Phoenix Contact.

Даний програмний продукт дозволяє виконувати одночасну розробку керуючої програми для ПЛК та системи людино-машинного інтерфейсу.

Розробка програми розпочинається з конфігурування апаратного забезпечення, під час якого у розділ Axioline вікна Plant (рис. 2.9), що відображає структуру проєкту, були додані всі обрані у попередніх розділах модулі дискретних та аналогових входів та виходів:

- процесорного модуля АХС F 1152;
- модуля дискретних входів АХL F DI32/1 1F;
- модуля дискретних виходів АХL F DO32/1 1F;
- модуля аналогових входів АХL F AI8 1F;
- модуля аналогових виходів АХL F AO8 1F.

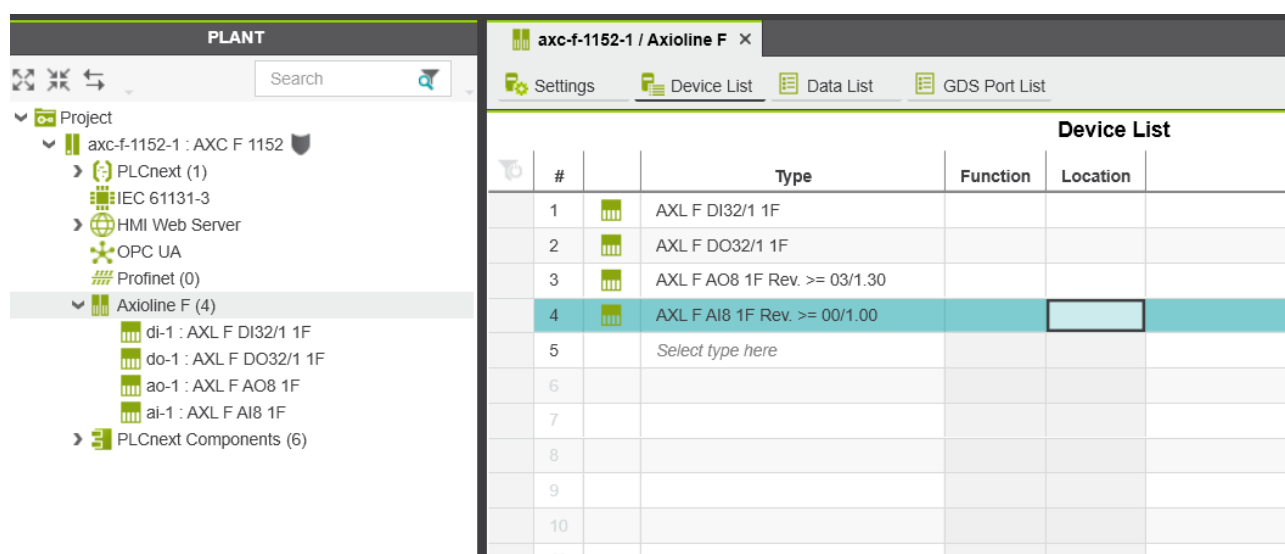


Рисунок 2.9 – Вікно конфігурування апаратної частини проєкту у PLCnext Engineer

Наступний крок полягає у додаванні задачі, для якої можна визначити періодичність виконання та в якій будуть виконуватися програмні інструкції автоматичного керування процесом виготовлення сирих котунів.

Після створенні задачі та вибору однієї з мов програмування стандарту IEC 61131-3 необхідно створити всі необхідні для реалізації керування процесом змінні (рис. 2.10).

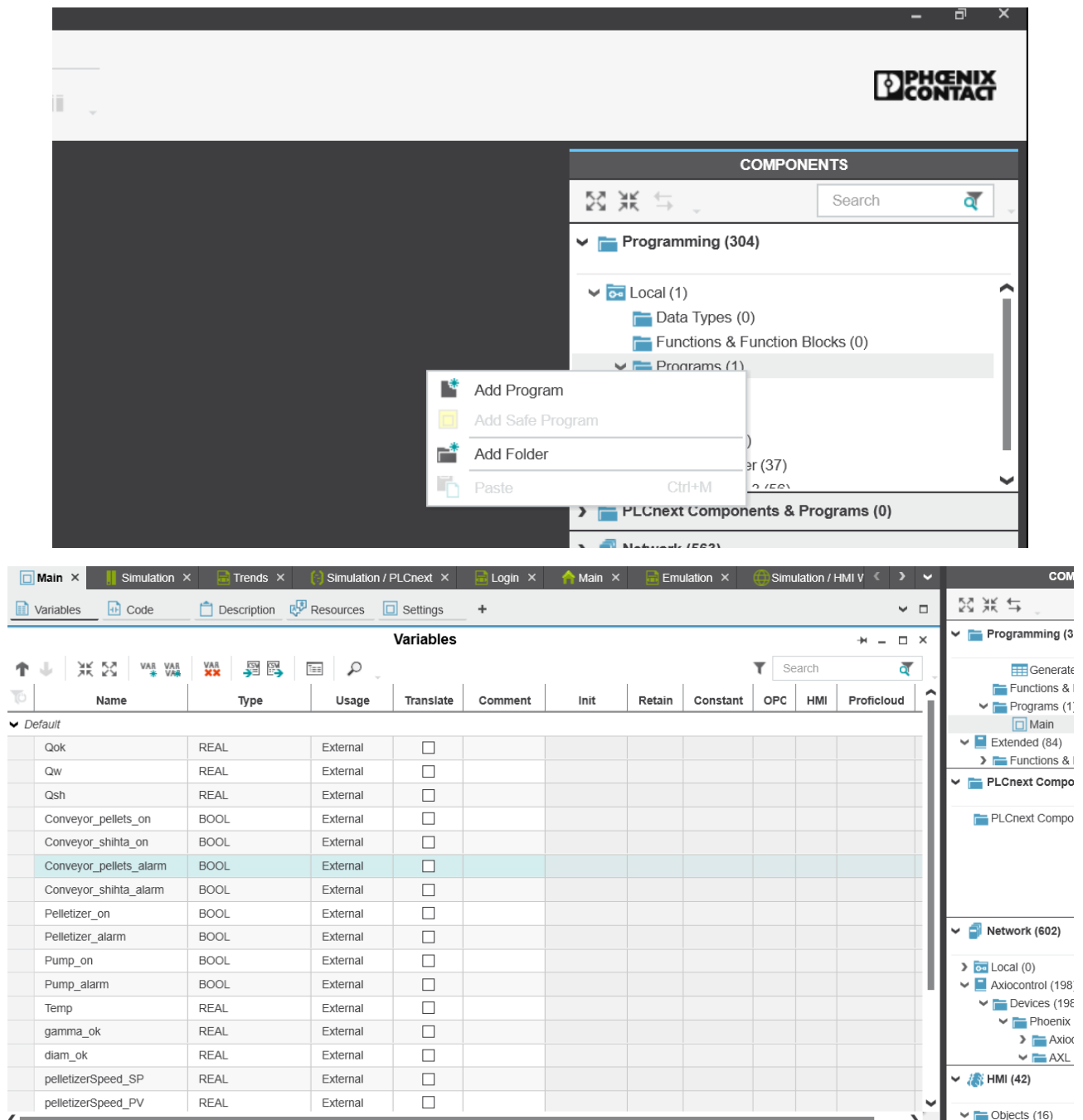


Рисунок 2.10 – Вікно редагування змінних

Далі на закладці Code необхідно реалізувати логіку функціонування системи автоматичного керування виготовленням сирих котунів.

Так, на рис. 2.11 наведено коду блок ПІД-регулятора, який формує керуючу дію завдання частоти обертання приводного двигуна дискового гранулятора. ПІД-регулятор реалізовано з використанням блоку PID бібліотеки «Loop Controller».

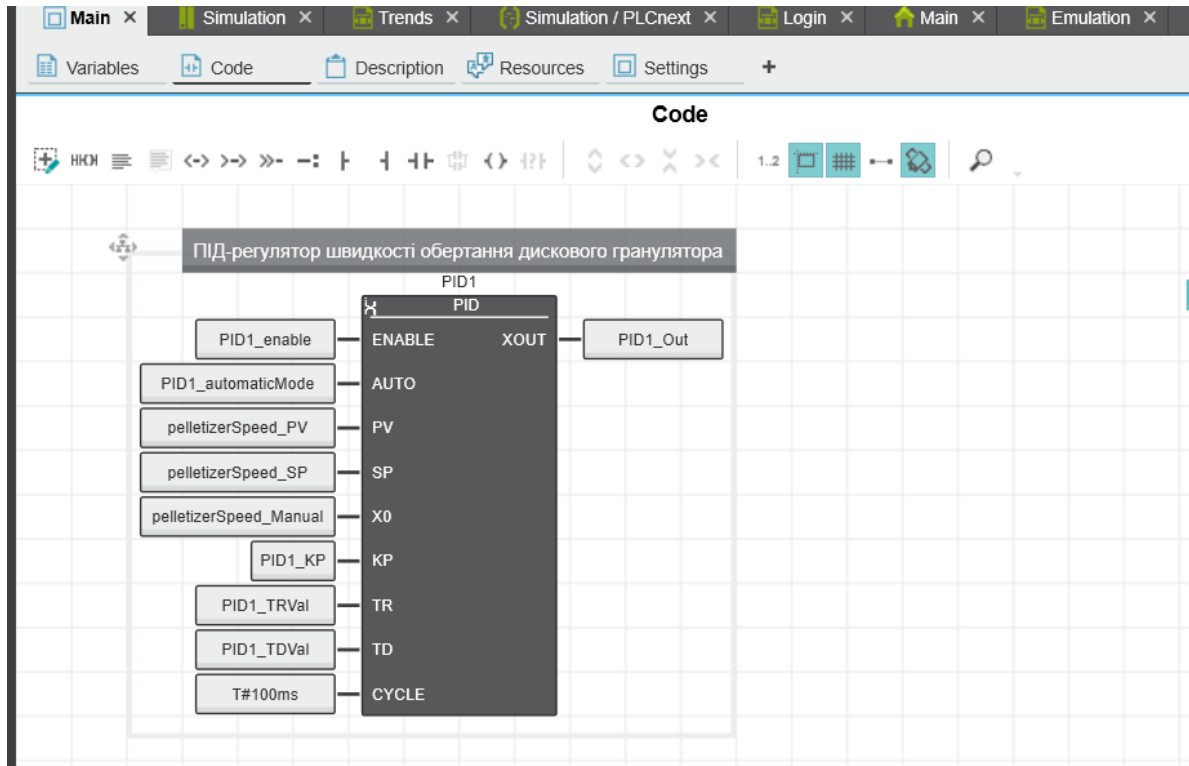


Рисунок 2.11 – Код блоку ПІД-регулятора для керування швидкістю обертання дискового гранулятора

Для завдання початкових налаштувань параметрів ПІД-регуляторів та інших констант у проєкті необхідно додати до структури програмного забезпечення ПЛК блок, що буде виконуватися при «гарячому» перезавантаженні ПЛК (рис. 2.12).

| Name                             | Task type   | Event name | Program type             |
|----------------------------------|-------------|------------|--------------------------|
| ESM1                             |             |            |                          |
| Cyclic100                        | Cyclic task |            |                          |
| MainInstance                     |             |            | Main                     |
| Enter program instance name here |             |            | Select program type here |
| OnWarmRestart                    | Event task  | Warm start | WarmRestartHandler       |
| OnWarmRestartInstance            |             |            | WarmRestartHandler       |
| Enter program instance name here |             |            | Select program type here |
| Enter task name here             |             |            |                          |

Рисунок 2.12 – Додавання блоку обробки «гарячого перезавантаження»

Для цього у вікні Tasks and Events необхідно додати новий розділ задач та встановити для нього тип задачі (Task Type) у значення Event Task, та у полі Event name обрати Warm Restart, а потім створити нову задачу (на рис. 2.12 під назвою OnWarmRestartInstance) та пов'язати її з раніше створеним блоком коду для реалізації задачі (у нашому випадку WarmRestartHandler).

На рис. 2.13 наведено код блоку , що реалізує початкову ініціалізацію параметрів ПІД-регулятора контуру швидкості обертання дискового гранулятора та режиму роботи системи.

```

Code
1  PID1_KP           := 4.412;
2  PID1_TRVal       := 3.643;
3  PID1_TDVal       := 0.2584;
4  PID1_automaticMode := TRUE;
5  PID1_enable      := TRUE;
6

```

Рисунок 2.13 – Реалізація коду початкової ініціалізації параметрів регулятора при «гарячому» рестарті

## 2.5 Реалізація програмного забезпечення системи візуалізації процесу виготовлення сирих котунів

Для розробки системи візуалізації технологічного процесу виготовлення сирих котунів було вирішено використати вбудовані можливості системи PLCnext Engineer, оскільки вони є достатньо функціональними, гнучкими, а також орієнтованими на розробки веб-орієнтованого людино-машинного інтерфейсу з вбудованими інструментами аутентифікації та авторизації.

Для відображення стану виконавчих механізмів у проєкті системи візуалізації використано підхід, що базується на принципах ситуаційної обізнаності, визначених у стандарті ISA 101. Так, відображення стану приводу конвеєрів відображається за допомогою двох кіл, поєднаних та згрупованих у один об'єкт. Перше коло (ID графічного об'єкту Conveyor\_shihta\_drive) реалізує відображення стану ввімкнення або вимкнення приводу конвеєра (рис. 2.14). Для цього створено налаштування динамізації (New Dynamics) типу Fill з прив'язкою до відповідної змінної conveyor\_shihta\_on. У стані False налаштовано заливку у вигляді темно-сірого кольору (16тирічне значення #FF696969), у стані True – світло-сірого (#FFFEDEDED). Для того, щоб у стані тривоги (наприклад, аварія даного механізму) цей механізм відображався жовтим кольором, передбачено також зникнення об'єкту Conveyor\_shihta\_drive при переході тегу Conveyor\_shihta\_alarm у стан True. Для цього додано також налаштування динамізації (New Dynamics) типу Visibility з прив'язкою до тегу conveyor\_shihta\_alarm.

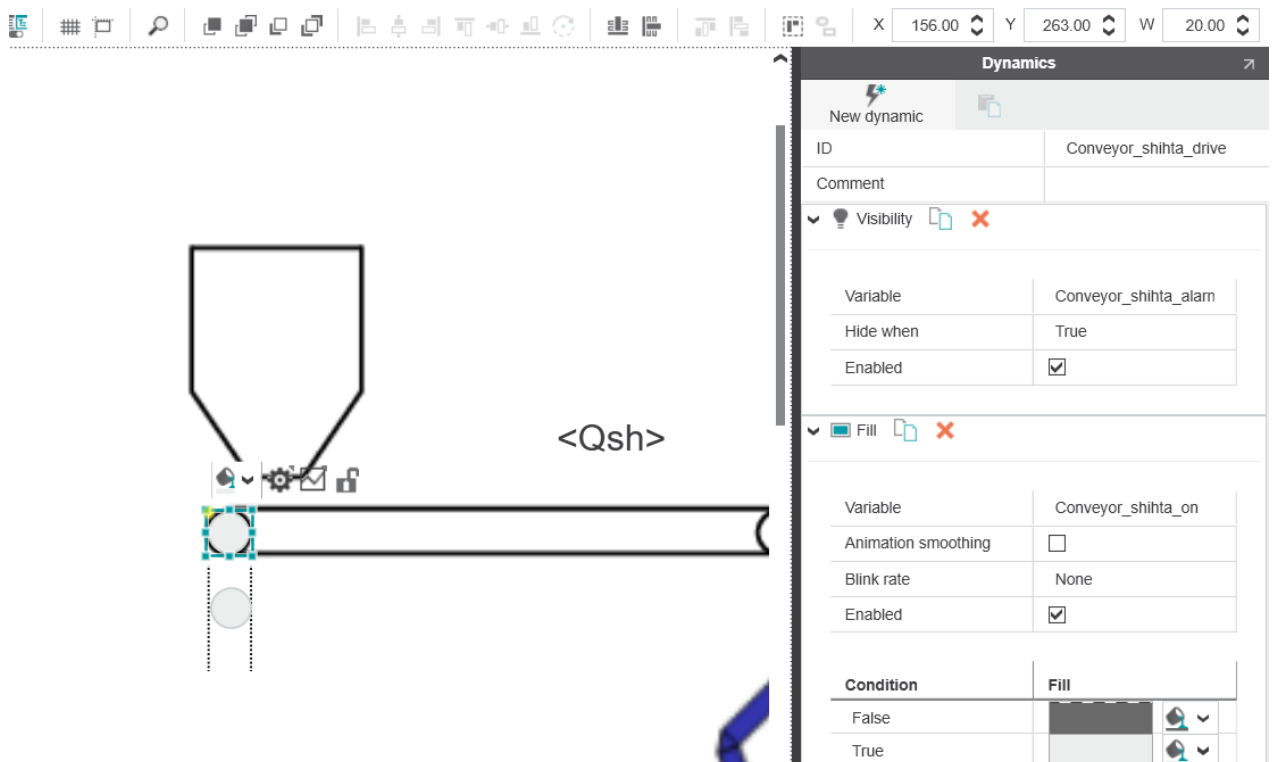


Рисунок 2.14 – Вікно налаштування відображення стану увімкнення/вимкнення конвеєру



Друге кола (ID графічного об'єкту Conveyor\_shihta\_state) призначене для відображення виникнення аварії. Для цього створено нову анімацію типу Fill, яка пов'язана зі змінною Conveyor\_shihta\_alarm. У стані False налаштовано заливку у вигляді прозорого кольору (16тиричне значення #00FFFFFF), у стані True – жовтого (#FFFFFF00). Таким чином, при відсутності тривоги об'єкт Conveyor\_shihta\_state не відображається (прозорий). Також для значення True встановлено прапорець Blink, що забезпечує блимання у випадку тривоги, пов'язаної зі станом даного механізму.

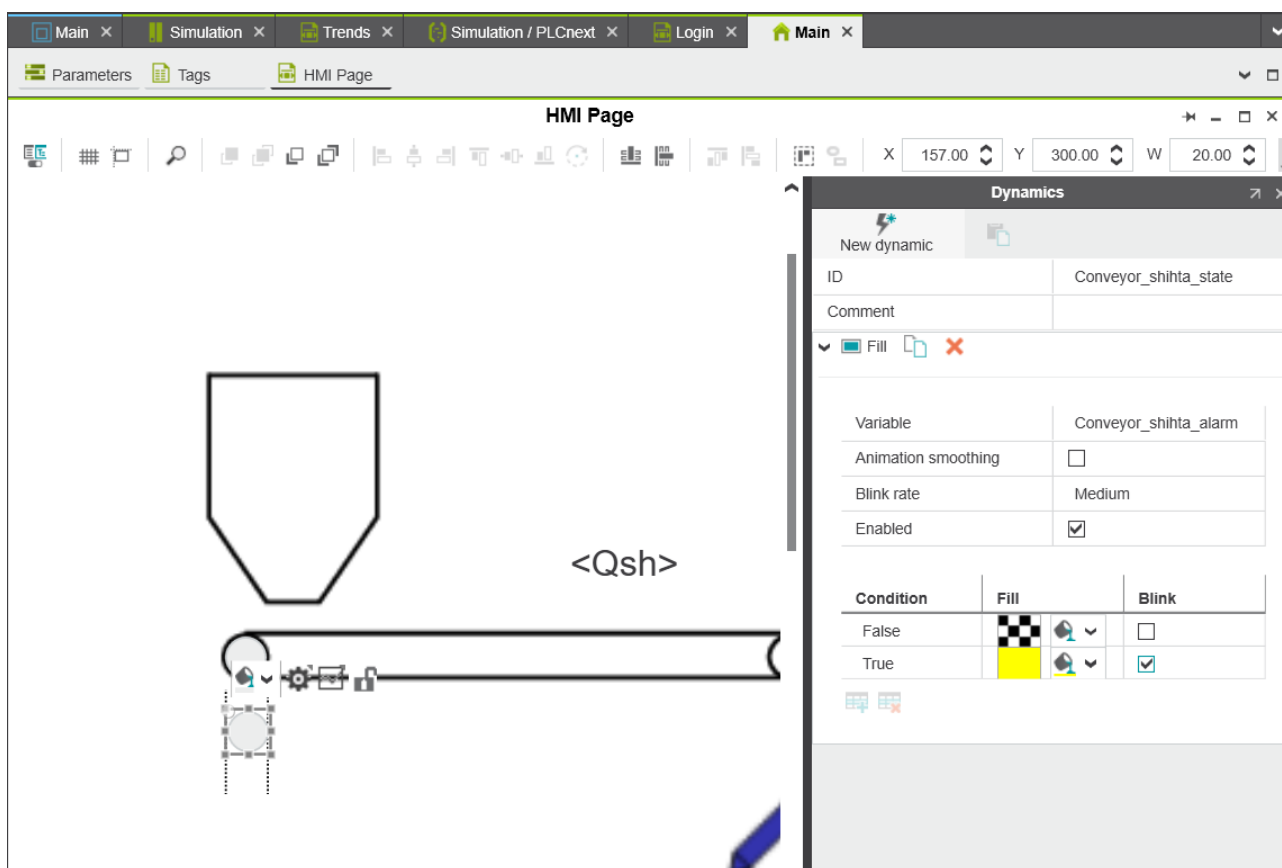


Рисунок 2.15 – Вікно налаштування відображення стану тривоги для конвеєра подачі шихти у гранулятор

Після виконаних налаштувань об'єкти Conveyor\_shihta\_drive та Conveyor\_shihta\_state були вирівнянні по горизонталі та вертикалі (Align the selected object on the top, ... on the left) та згруповані (рис. 2.16).



Рисунок 2.16 – Групування графічних примітивів для анімації стану конвеєра подачі шихти у гранулятор

Аналогічні операції було виконано також для реалізації відображення стану приводу гранулятора, приводу кута нахилу гранулятора, конвеєра сирих котунів після грануляції та насосу подачі рідини у гранулятор.

Для реалізації можливості імітації зміни значень даних та перевірки роботи системи візуалізації також було розроблено додаткову сторінку Emulation, на якій надано можливості у річному режимі включати на виключати основні виконавчі механізми (конвеєри шихти та сирих котунів, гранулятор, насос). Зовнішній вигляд даної сторінки наведено на рис. 2.17.

Можливість змінення стану виконавчих механізмів реалізовано за рахунок додавання обробника події натискання на кнопку (Action on Click) на вкладці Dynamics кнопки, де обрано дію інвертування поточного значення дискретної змінної (Toggle value). Аналогічним чином також реалізовано можливість імітації виникнення тривоги, пов'язаної з певним механізмом.

Для задання значення аналогової змінної використано графічний елемент Slider з палітри НМІ-компонентів Symbols. Для зв'язування слайдеру з відповідною змінною використовується вкладка Parameters, де для SliderValue

вказується цільова змінна (Source Value) – для даного прикладу це витрата шихти у гранулятор Qsh (рис. 2.18).

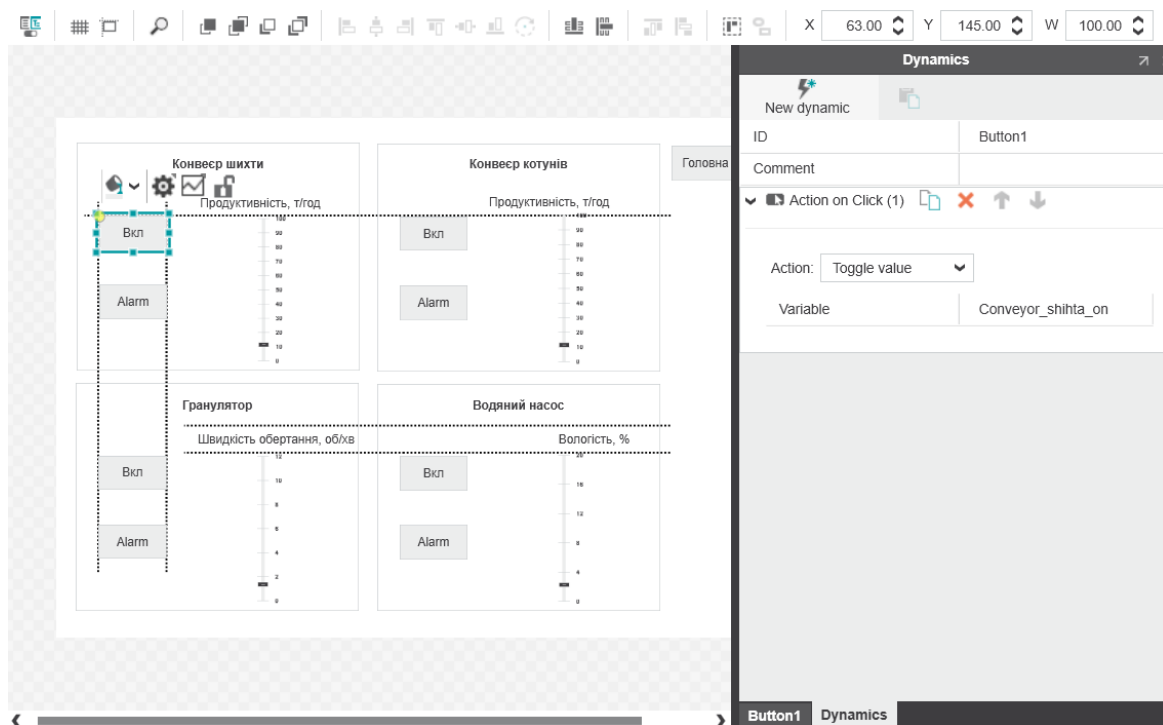


Рисунок 2.17 – Зовнішній вигляд вікна Emulation у редакторі HMI сторінок

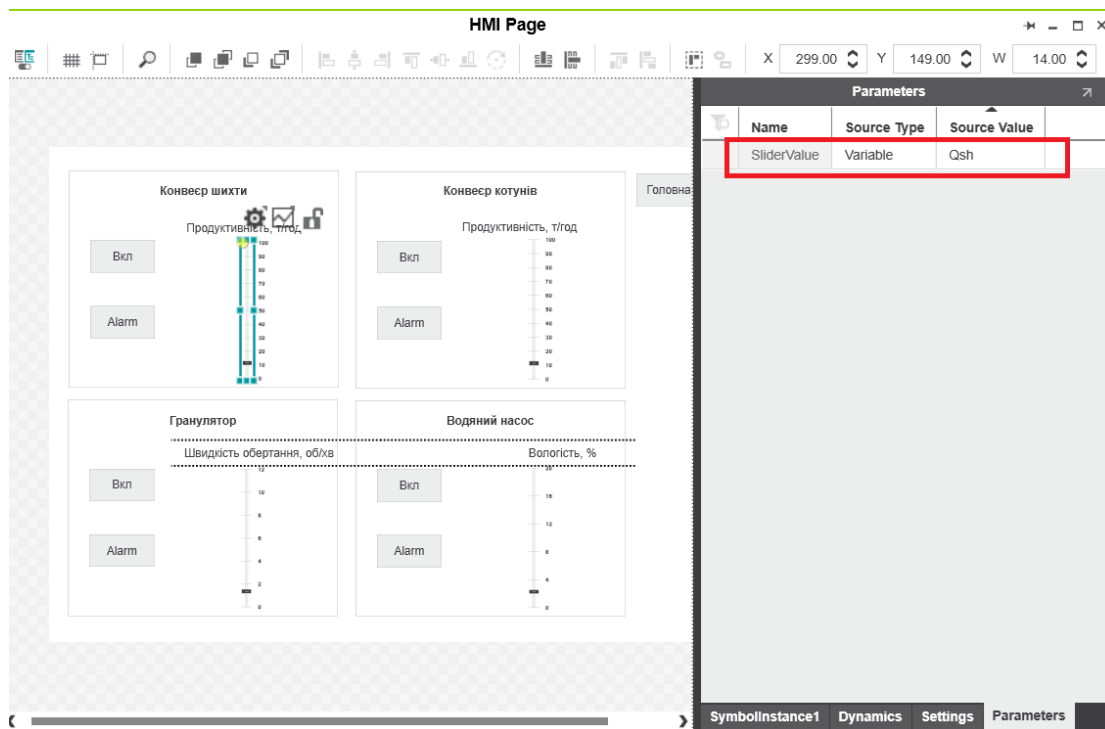


Рисунок 2.18 – Налаштування зв'язку між слайдером та контрольованою змінною

На вкладці Settings графічного елемента Slider (рис. 2.19) були налаштовані діапазони змінення величини (Scale minimum, Scale maximum), а також основний інтервал між пунктами шкали (Major tick interval).

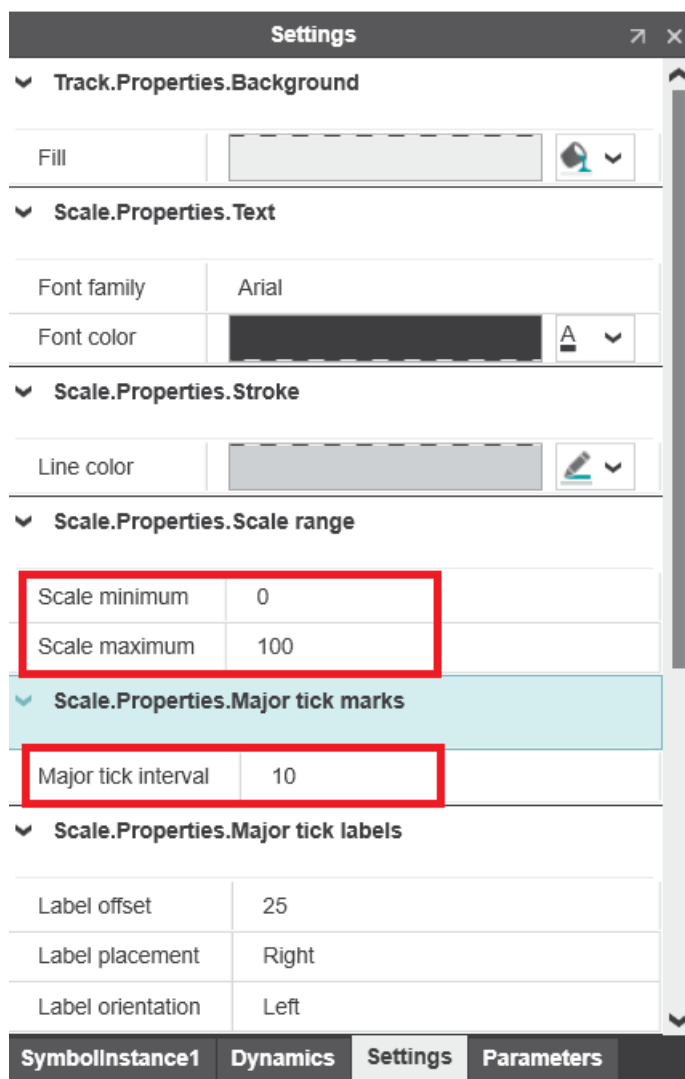


Рисунок 2.18 – Налаштування основних параметрів слайдеру

Для реалізації можливості відображення трендів необхідно налаштувати сесію запису логу даних. Для цього необхідно обрати вузол ПЛК PLCnext, та на вкладці Data Logger Sessions додати нову сесію (рис. 2.19). Для створеної секції необхідно виконати базові налаштування, зокрема обрати місце зберігання даних (Type, для даного проекту було обрано базу даних Database), інтервал логування (Sampling Interval), та кількість записів у БД (Write Interval) [21, 22]. Після

налаштування основних параметрів ведення логу необхідно зберегти створену сесію (у даному проєкті під ім'ям MySession). Якщо потрібно записувати дані з різною частотою, то необхідно створити декілька сесій з різними значеннями параметру Sampling Interval.

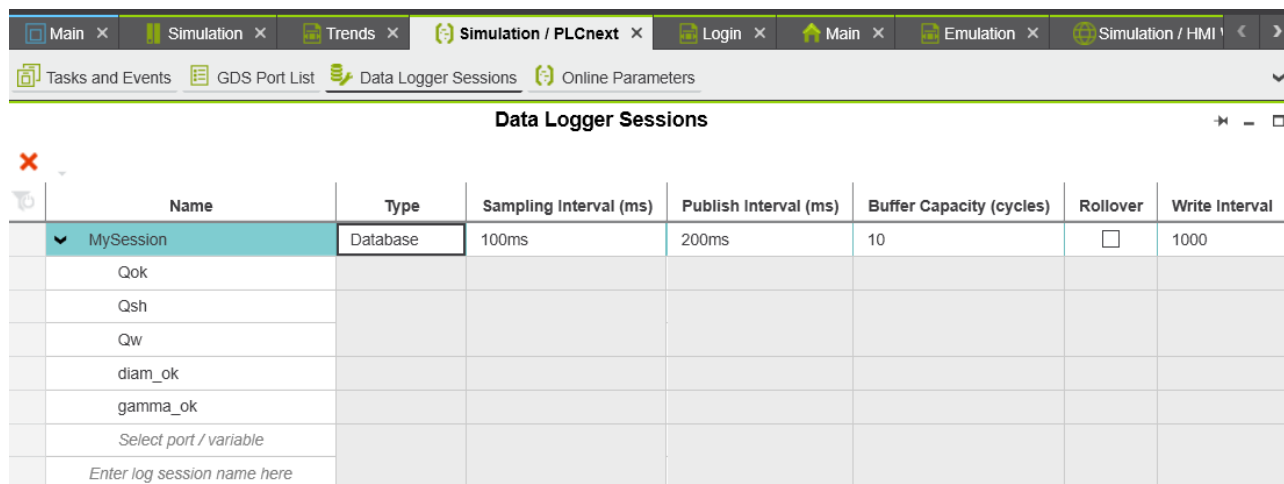


Рисунок 2.19 – Налаштування сесії логування даних у PLCnext Engineer

На наступному етапі необхідно пов'язати елементи для відображення трендів Chart з зареєстрованою сесією логування даних (рис. 2.20). Для цього у налаштуваннях компоненту у полі Data logger session треба обрати потрібну сесію (у нашому випадку це MySession).

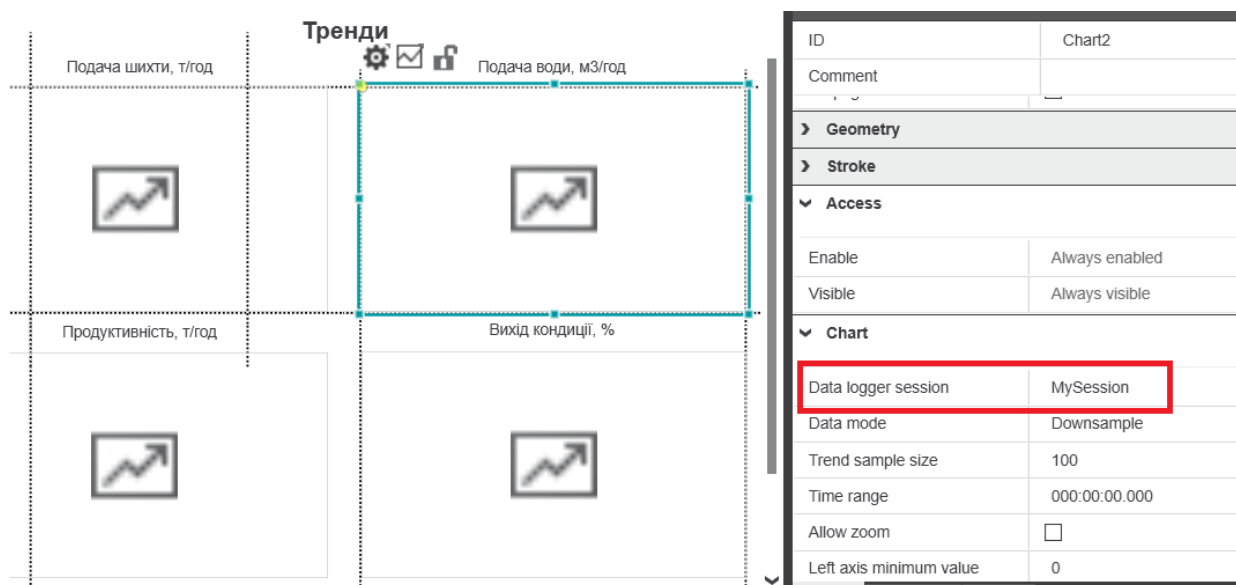


Рисунок 2.20 – Налаштування зв'язку між компонентом для відображення тренду та сесією логування

## 2.6 Апробація програмного забезпечення системи візуалізації процесу виготовлення сирих котунів

На наступному етапі було виконано апробацію розробленої системи візуалізації процесу виготовлення сирих котунів. На першому етапі на сторінці емуляції з використанням розроблених інструментів керування були задані імітовані значення основних технологічних показників (рис. 2.21).

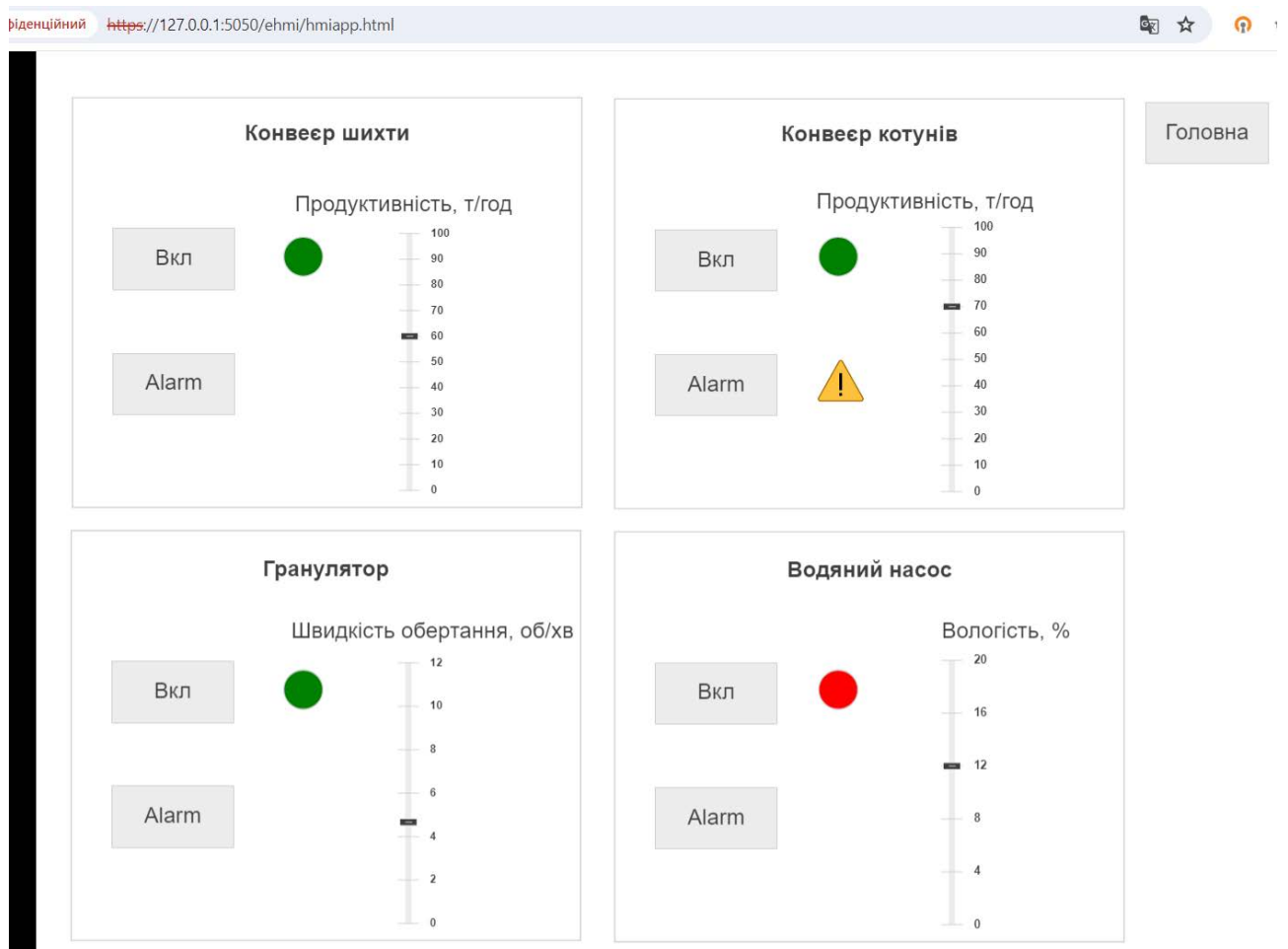


Рисунок 2.21 – Видяг екрону емуляції та задання значень основних параметрів процесу та стану механізмів

На рис. 2.22 наведено головний екран системи візуалізації, що відображає стан основних механізмів технологічного процесу.

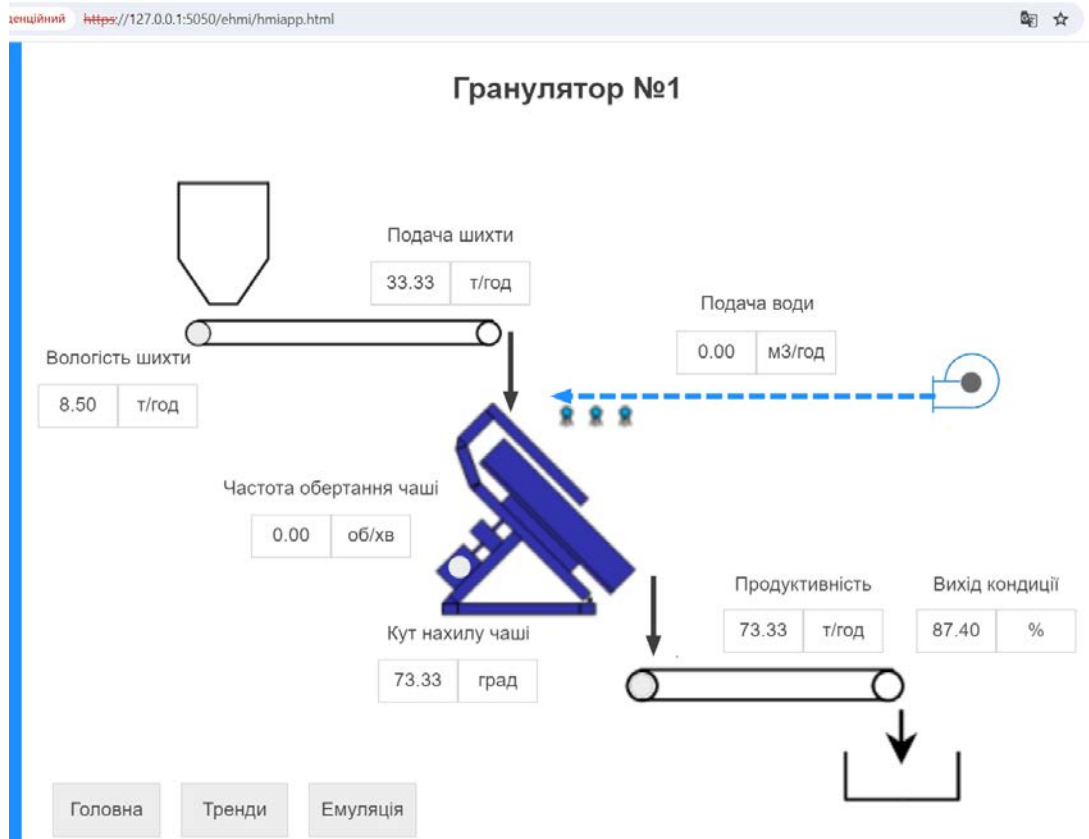


Рисунок 2.22 – Вигляд головного екрану системи візуалізації процесу виготовлення сирих котунів

На рис. 2.22 видно, що на поточний момент включеними є: електропривід гранулятора, електроприводи конвеєрів подачі сирової шихти та огрунтованих сирих котунів. Водночас, насос подачі води не працює (символ відображається темно-сірим), а також значення витрати води дорівнює 0.

Також було виконано апробацію функціонування системи зберігання даних (сесії логування), а також реалізованих трендів (рис. 2.23).

Як показали результати проведеної апробації, розроблена система візуалізації відрізняється зручністю за рахунок дотримання концепції ситуаційної обізнаності оператора та можливості доступу з використанням веб-інтерфейсу, що забезпечує автоматичний доступ до системи усім авторизованим користувачам, які мають мережевий доступ до веб-серверу ПЛК. Система забезпечує зручну навігацію, високу швидкодію та відповідає усім вимогам, що висуваються до подібних систем.

## Тренди



Рисунок 2.23 – Вигляд екрану трендів основних технологічних параметрів процесу виготовлення сирих котунів

### Висновки до розділу:

У розділі розглянуто алгоритм формування оптимального керування процесом виготовлення сирих котунів на грануляторі. На основі літературного аналізу результатів досліджень визначено, що найбільш ефективним підходом до оптимізації процесу огрудкування є реалізація підтримки швидкості обертання чаші, що визначається на базі математичної моделі у вигляді статичної характеристики процесу. Використання такої стратегії керування забезпечує максимізацію різниці виходів котунів кондиційного розміру та крупної фракції.

Виконано комп'ютерне моделювання досліджуваної системи, за результатами якого визначено оптимальні значення параметрів налаштувань регулятора швидкості обертання чаші дискового гранулятора.

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |



Розглянуто питання вибору комплексу технічних засобів для реалізації системи керування. Запропоновано низку технічних рішень, що складаються з датчика KROHNE OPTIFLUX 5300 витрати води у гранулятор, датчика вологості шихти Microradar 113A, перетворювача частоти шафового виконання Sinamics G150 виробництва компанії Siemens. У якості апаратних рішень контролерного рівня системи автоматизації процесу виготовлення сирих котунів обґрунтовано застосування ПЛК Phoenix Contact PLCnext у складі шасі та процесорного модуля АХС F 1152, сигнальних модулів серії Axioline AXL F DI32/1 1F, AXL F DO32/1 1F, AXL F AI8 1F, AXL F AO8 1F. Дане рішення спрямоване на забезпечення можливості реалізації ефективної системи керування на принципах високої надійності, зручності та відкритості до подальшого удосконалення, у тому числі шляхом інтеграції з сучасними хмарними сервісами аналітики та технологій Industry 4.0.

На базі програмного забезпечення PLCnext Engineer розроблено керуючу програму для ПЛК та проєкт системи візуалізації, що відображає стан технологічного процесу огрудкування шихти у дисковому грануляторі та містить основні інструменти по контролю та керування процесом для оператора..

|             |             |                 |               |             |                                |             |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------------|-------------|
|             |             |                 |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> | <i>Арк.</i> |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                | 65          |

## ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота присвячена автоматизації процесу виготовлення сирих котунів на фабриці огрудкування гірничо-збагачувального комбінату, Дослідження спрямовані на досягнення мети вдосконалення системи автоматичного керування процесом виготовлення сирих котунів за рахунок впровадження сучасних апаратних та програмних рішень автоматизації, що дозволить підвищити ефективність процесу, збільшити продуктивність за рахунок збільшення долі виходу кондиційної фракції котунів.

В першому розділі виконано опис особливостей технологічного процесу виготовлення сирих котунів. Розглянуто існуючі математичні моделі та результати досліджень закономірностей формування сирих котунів, основні способи та підходи до реалізації систем автоматичного керування процесом. Виконано аналіз результатів розробки та впровадженнь систем автоматизації технологічного процесу за останні роки, зокрема у контексті використовуваного комплексу технічних засобів та особливостей реалізації засобів людино-машинного інтерфейсу. Як результат, запропоновано концепцію подальшої модернізації системи, зокрема шляхом удосконалення системи візуалізації з орієнтацією на можливість доступу до сторінок оператора з використанням веб-інтерфейсу.

У другому розділі виконано дослідження відомого підходу щодо формування оптимального керування процесом на основі емпіричної моделі, що описує залежність продуктивності гранулятора за виходом заданої фракції крупності котунів від основних параметрів процесу – швидкості та кута нахилу чаші гранулятора, витрати шихтових матеріалів та води. Розроблено структуру системи автоматичного керування швидкістю дискового гранулятора та виконано комп'ютерне моделювання розробленої системи.

|                  |             |                      |               |             |                                |  |  |                    |             |                |
|------------------|-------------|----------------------|---------------|-------------|--------------------------------|--|--|--------------------|-------------|----------------|
|                  |             |                      |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> |  |  |                    |             |                |
| <i>Змн.</i>      | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i>      | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | <i>ВИСНОВКИ</i>                |  |  |                    |             |                |
| <i>Розроб.</i>   |             | <i>Клименко Р.Б.</i> |               |             |                                |  |  | <i>Літ.</i>        | <i>Арк.</i> | <i>Аркушів</i> |
| <i>Перевір.</i>  |             | <i>Рубан С.А.</i>    |               |             |                                |  |  |                    | 71          | 22             |
| <i>Н. Контр.</i> |             | <i>Маринич І.А.</i>  |               |             |                                |  |  | <i>КНУ АКІТ-20</i> |             |                |
| <i>Затверд.</i>  |             | <i>Тронь В.В.</i>    |               |             |                                |  |  |                    |             |                |

За результатами моделювання визначені параметри налаштування ПІД-регулятора, що забезпечують досягнення заданих показників якості керування швидкістю гранулятора.

Для практичної реалізації системи керування процесом виготовлення котунів запропоновано можливий варіант комплексу технічних засобів – зокрема на польовому рівні датчиків витрати води у гранулятор, вологості шихти, а також перетворювача частоти Sinamics G150 у якості виконавчого механізму. Для реалізації контролерного рівня обґрунтовано вибір ПЛК АХС F 1152 серії PLCnext компанії Phoenix Contact. Реалізацію верхнього рівня покладено на підсистему людино-машинного інтерфейсу, що працює як веб-інтерфейс на базі розробленого у системі PLCnext Engineer програмного забезпечення диспетчерського контролю та керування SCADA/HMI.

Отже, у випускній роботі реалізовано та здійснено апробацію проєктних рішень, спрямованих на практичне вирішення актуального завдання підвищення ефективності керування процесом виготовлення сирих котунів, що відповідають сучасним вимогам до систем автоматизації огрудкування котунів і можуть використовуватися при впровадженні відповідних систем на виробництві.

|             |             |                 |               |             |                                |             |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|--------------------------------|-------------|
|             |             |                 |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> | <i>Арк.</i> |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                | 67          |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гончаров Ю., Дримбо А., Ищенко А. Автоматизация процессов окускования железных руд. Москва : Металлургия, 1983. 190 с.
2. Автоматизация фабрик окускования железных руд и концентратов / Н. Федоровский та ін. Москва : Металлургия, 1986. 206 с.
3. Ксендзовский В. Автоматизация процессов производства окатышей. Москва : Металлургия, 1971. 216 с.
4. Импульсный датчик крупности гранулированных материалов, перемещаемых конвейером : пат. 744284 : G 01 N 15/02. № 2524662/18-25 ; заявл. 12.09.1977 ; опубл. 30.06.1980, Бюл. № 24. 3 с.
5. Overlapping pellet size detection method based on marker watershed and GMM image segmentation / W. Ma та ін. Metals. 2023. Т. 13, № 2. С. 327. URL: <https://doi.org/10.3390/met13020327> (дата звернення: 18.04.2024).
6. Image-based method for measuring pellet size distribution in the stable area of disc pelletizer / X. Liu та ін. ISIJ international. 2018. Т. 58, № 11. С. 2088–2094. URL: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.isijint-2018-384> (дата звернення: 18.04.2024).
7. Image analysis of pellet size for a control system in industrial feed production / M. G. Ljungqvist та ін. PLoS ONE. 2011. Т. 6, № 10. С. e26492. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0026492> (дата звернення: 18.04.2024).
8. Чернецкая И., Исаев Е., Лебеденко Ю. Система автоматической оптимизации окомкования железорудного концентрата в условиях ЦГОКа. Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. 2004. Т. 2, № 14. С. 193–200. URL: [https://aaecs.org/img/content//25f8c63da6057517f1ab16f43d8ac492\\_2004-2.pdf](https://aaecs.org/img/content//25f8c63da6057517f1ab16f43d8ac492_2004-2.pdf) (дата звернення: 03.05.2024).

|                  |             |                      |               |             |                                |             |                |
|------------------|-------------|----------------------|---------------|-------------|--------------------------------|-------------|----------------|
|                  |             |                      |               |             | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> |             |                |
| <i>Змн.</i>      | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i>      | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                |             |                |
| <i>Розроб.</i>   |             | <i>Клименко Р.Б.</i> |               |             | <i>Літ.</i>                    | <i>Арк.</i> | <i>Аркушів</i> |
| <i>Перевір.</i>  |             | <i>Рубан С.А.</i>    |               |             |                                | 73          | 3              |
| <i>Н. Контр.</i> |             | <i>Маринич І.А.</i>  |               |             | <i>КНУ АКІТ-20</i>             |             |                |
| <i>Затвердив</i> |             | <i>Тронь В.В.</i>    |               |             |                                |             |                |

*СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ*

9. Мошенський С. Автоматизована система керування технологічними процесами огрудкування металургійної сировини : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07. Київ, 2006.

10. На ЦГЗК нова чаша HAVER SCARABAEUS. Медіапортал Групи Метінвест. URL: <https://metinvest.media/ua/page/na-cgoke-novaya-chasha-haver-scarabaeus> (дата звернення: 18.04.2024).

11. Контрольне збирання тарілчастого огрудковувача SCARABAEUS 7500 - ТОВ "НВО "РАКУРС". ТОВ "НВО "РАКУРС". URL: <https://pro-rakurs.com/2022/07/26/kontrolne-zbyrannya/> (дата звернення: 16.06.2024).

12. Digital Solutions for Iron Ore Pelletizing Plants. Metso - Partner for positive change. URL: [https://www.metso.com/globalassets/saleshub/documents---episerver/digital-solutions-for-pelletizing-plants\\_final\\_lowres.pdf](https://www.metso.com/globalassets/saleshub/documents---episerver/digital-solutions-for-pelletizing-plants_final_lowres.pdf) (дата звернення: 16.06.2024).

13. The SCARABAEUS® 7500 pelletizing disc – sustainable and efficient production of iron ore pellets. HAVER & BOECKER NIAGARA. URL: [https://haverniagara.com/wp-content/uploads/2020/03/PM-416-E-Scarab\\_7500\\_iron-ore.pdf](https://haverniagara.com/wp-content/uploads/2020/03/PM-416-E-Scarab_7500_iron-ore.pdf) (date of access: 16.04.2024).

14. Базуткин В. В., Исаев Е.В. Проблемы автоматизации агломерационного производства : Науч. тр. / Ин-т автоматизи. К. : Ин-т автоматизи, 1973, с. 310 – 313.

15. Автоматизированная система управления технологическим процессом термообработки железорудных окатышей на обжиговой конвейерной машине ОК-124 №5 ССГПО. URL: [https://www.syst.kz/aocms/index.php?option=com\\_content&task=view&id=34&Itemid=35](https://www.syst.kz/aocms/index.php?option=com_content&task=view&id=34&Itemid=35) (дата звернення: 16.06.2024).

16. Мікрохвильовий датчик вологості Microradar 113А, потоковий (Microradar). ТОВ Інтеравтоматика. URL: <https://inav.com.ua/ua/shop/mikrovolnovyy-datchik-vlazhnosti-microradar-113a-potochnyy-microradar> (дата звернення: 06.05.2024).

|      |      |          |        |      |                                |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                | 69   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                |      |

17. Перетворювач частоти Sinamics G150 132кВт 3-ф/380 6SL3710-1GE32-6CA0. URL: <https://chastotnik.ua/Siemens-r-6SL3710-1GE32-6CA0> (дата звернення: 07.05.2024).

18. OPTIFLUX 5300 - Electromagnetic flowmeter for advanced process and master meter applications. Krohne. URL: <https://ua.krohne.com/en/products/flow-measurement/flowmeters/electromagnetic-flowmeters/optiflux-5300> (дата звернення: 16.06.2024).

19. Контролер АХС F 1152. url: <https://www.phoenixcontact.com/ru-рc/produkty/kontroller-ахс-f-1152-1151412> (дата звернення 23.04.2024).

20 AXL F AI8 1F - Analog module. Phoenix Contact. URL: <https://www.phoenixcontact.com/uk-ua/produkcija/analog-module-axl-f-ai8-1f-2688064> (дата звернення: 06.05.2024).

21. AXL F AO8 1F - Analog module. Phoenix Contact. URL: <https://www.phoenixcontact.com/uk-ua/produkcija/analog-module-axl-f-ao8-1f-2688080> (дата звернення: 06.05.2024).

22. Data Logger Configuration. PLCnext Engineer online help. URL: [https://engineer.plcnext.help/2023.6\\_en/Commissioning\\_DataLogger.htm](https://engineer.plcnext.help/2023.6_en/Commissioning_DataLogger.htm) (дата звернення: 22.05.2024).

23. PLCnext Engineer eHMI (EN). PLCnext Technology e-learning content. URL: [https://elearning.plcnext.help/PLCnEng\\_eHMI/story\\_html5.html?lms=1](https://elearning.plcnext.help/PLCnEng_eHMI/story_html5.html?lms=1) (дата звернення: 15.05.2024).

24. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавру для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2019. 50 с.

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

|      |      |          |        |      |                                |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                | 70   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                |      |

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

27. 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)

28. 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).

|      |      |          |        |      |                                |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>КНУ КРБ.151.24.02.00.ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                | 71   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                |      |