

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

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

зі спеціальності

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

тема роботи:

*«Автоматизація спікання шихти на агломашині з розробкою
системи візуалізації процесу в умовах агломераційної
фабрики»*

Виконав ст. гр. АКІТР-24-2м _____ Мілов В. О.

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: Магістр

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри: к.т.н. Рубан С.А.

« 5 » липня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

студентові групи АКІТР-24-2м Мілову Вадиму Олександровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизація спікання шихти на
агломашині з розробкою системи візуалізації процесу в умовах
агломераційної фабрики»

затверджено наказом по університету № 258с від 13.05.2025 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 01.12.2025 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 95с.,
додатки, презентація у Microsoft PowerPoint (18 слайдів) в електронному та
друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-3

доц. Рубан С. А.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	30.05.25
2	<i>Розділ 1</i>	10.09.25
3	<i>Розділ 2</i>	15.10.25
4	<i>Розділ 3</i>	15.11.25
5	<i>Висновки</i>	20.11.25
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	30.11.25
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	07.12.25
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	07.12.25

6. Дата видачі завдання: 13.05.2025 р.

Керівник _____ /Рубан С. А./

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

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

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

Здобувач _____ /Мілов В. О./

АНОТАЦІЯ

Мілов В. О. «Автоматизація спікання шихти на агломашині з розробкою системи візуалізації процесу в умовах агломераційної фабрики».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеню вищої освіти магістр за освітньо-професійною програмою «Кіберфізичні системи у промисловості, бізнесі та транспорті» зі спеціальності 174 – Автоматизація, комп'ютерно – інтегровані технології та робототехніка. – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра присвячена розробці та дослідженню системи автоматичного керування процесом спікання шихти на агломераційній машині з використанням модельно-прогнозуючого керування та сучасних засобів візуалізації технологічного процесу. У роботі виконано аналіз технологічного процесу спікання шихти, розглянуто існуючі підходи до математичного моделювання та алгоритми керування агломераційним процесом. Особливу увагу приділено контролю температури точки прогару (Burn Through Point, ВТР) як ключового показника ефективності та стабільності процесу спікання.

Розроблено математичну модель процесу спікання з урахуванням теплових і газодинамічних характеристик агломераційної машини. Проведено імітаційне моделювання та порівняльний аналіз ефективності МРС- та класичного ПІД-регулювання, за результатами якого показано переваги МРС-керування.

Окремий розділ роботи присвячено вибору апаратно-програмних засобів автоматизації. Обґрунтовано використання контролера PLCnext від Phoenix Contact та середовища PLCnext Engineer для реалізації HMI-системи з веб-інтерфейсом, що забезпечує наочне відображення стану процесу та підтримку роботи оператора.

Ключові слова:

АВТОМАТИЗАЦІЯ, АГЛОМЕРАЦІЯ, ПРОЦЕС СПІКАННЯ, ФРОНТ ПОВНОГО ВИГОРАННЯ ПАЛИВА, МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗУЮЧЕ КЕРУВАННЯ, ПЛК, ЛЮДИНО-МАШИННИЙ ІНТЕРФЕЙС

ANNOTATION

Milov V. O. «Automation of the Sintering Process on a Sintering Machine with the Development of a Process Visualization System under Sinter Plant Conditions».

Master's qualification thesis for the educational and professional program «Cyber-physical systems in industry, business and transport» in specialty 174 – «Automation, computer-integrated technologies and robotics». – Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, 2025.

The master's qualification thesis is devoted to the development and investigation of an automatic control system for the sintering process on a sintering machine using model predictive control and modern process visualization tools. The work includes an analysis of the sintering process, a review of existing approaches to mathematical modeling, and control algorithms applied to the sintering process. Special attention is paid to the control of the Burn Through Point (BTP) temperature as a key indicator of process efficiency and stability.

A mathematical model of the sintering process has been developed, taking into account the thermal and gas-dynamic characteristics of the sintering machine. Simulation studies and a comparative analysis of the effectiveness of model predictive control and classical PID control have been carried out, demonstrating the advantages of MPC for this type of process.

A separate section of the thesis is devoted to the selection of hardware and software for automation. The use of the PLCnext controller by Phoenix Contact and the PLCnext Engineer environment is justified for the implementation of an HMI system with a web-based interface, providing clear visualization of the process state and effective operator support.

Keywords:

AUTOMATION, SINTERING, SINTERING PROCESS, BURN THROUGH POINT, MODEL PREDICTIVE CONTROL, PLC, HUMAN–MACHINE INTERFACE

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СПІКАННЯ ШИХТИ НА АГЛОМАШИНІ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ	10
1.1 Характеристика технологічного процесу спікання шихти з точки зору задач автоматизації	10
1.2 Аналіз існуючих підходів та рішень у галузі систем автоматизації процесу агломерації	18
1.3 Огляд математичних моделей процесу спікання шихти на агломераційній машині	24
1.4 Огляд існуючих та перспективних алгоритмів керування процесом спікання шихти на агломераційній машині	30
Висновки за розділом:	34
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СПІКАННЯ ШИХТИ НА АГЛОМЕРАЦІЙНІЙ МАШИНІ	35
2.1 Розробка математичної моделі процесу спікання шихти на агломашині	35
2.2 Моделювання системи керування процесом спікання агломерату на агломераційній машини	40
2.3 Інформаційне забезпечення системи автоматизації та формалізація вимог до засобів контролю і керування агломераційним процесом	60
2.3.1 Інформаційні канали системи автоматизації	
2.3.2 Основні вимірювальні сигнали та критерії вибору первинних перетворювачів.....	62
2.5.3 Генетичний алгоритм (GA)	67
2.5.4 Отримання лінійної моделі CARIMA.....	68
2.5.5 Результати моделювання.....	70
2.4 Вибір та обґрунтування засобів вимірювання та виконавчих механізмів для системи автоматизації процесу спікання	51

2.5 Вибір устаткування контролерного рівня	46
Висновки за розділом:	79
 РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ СПІКАННЯ ШИХТИ НА АГЛОМЕРАЦІЙНІЙ МАШИНІ.....	81
3.1 Обґрунтування вибору програмного забезпечення для реалізації системи керування та візуалізації процесу спікання	81
3.2 Програмна реалізація системи візуалізації процесу	85
Висновки за розділом	95
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	96
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	98

ВСТУП

Сучасний розвиток металургійної галузі характеризується зростанням вимог до енергоефективності, екологічної безпеки та стабільності якості продукції. Одним із ключових підготовчих процесів у доменному виробництві є спікання залізородної шихти на агломераційних машинах, від ефективності якого значною мірою залежать техніко-економічні показники подальшої плавки. Водночас процес агломерації є складним багатопараметричним об'єктом керування, що характеризується просторово-розподіленою структурою, значними інерційними властивостями, нелінійністю та наявністю зовнішніх збурень.

Особливу роль у забезпеченні стабільної якості агломерату відіграє контроль та регулювання температури точки горіння (Burn Through Point, ВТР), яка є інтегральним показником теплового стану шару шихти та завершеності процесу спікання. Відхилення положення ВТР від оптимального значення призводить до погіршення якості агломерату, перевитрати палива, зростання викидів та нестабільної роботи агломераційної машини.

Традиційні системи автоматичного керування, що базуються переважно на класичних ПІД-регуляторах, не завжди забезпечують необхідну якість регулювання в умовах багатовимірності, взаємозв'язаності керуючих дій та обмежень на керуючі дії. Це зумовлює актуальність застосування сучасних методів оптимального та прогнозного керування, зокрема модельно-прогнозного керування (Model Predictive Control, MPC), яке дозволяє враховувати динаміку об'єкта, прогноз поведінки процесу та технологічні обмеження.

Поряд із вдосконаленням алгоритмів керування важливим аспектом є створення ефективної системи візуалізації технологічного процесу. Сучасні НМІ-системи повинні не лише відображати поточні значення параметрів, а й забезпечувати підтримку прийняття рішень оператором, наочну інтерпретацію

складних динамічних процесів та інтеграцію з інтелектуальними алгоритмами керування.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та дослідження системи автоматичного керування процесом спікання шихти на агломераційній машині із застосуванням модельно-прогнозуючого керування та створення системи візуалізації технологічного процесу на базі сучасного програмно-апаратного комплексу.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі основні завдання:

- проаналізувати технологічний процес спікання шихти з точки зору задач автоматизації;
- виконати огляд існуючих систем автоматизації та алгоритмів керування агломераційним процесом;
- розробити математичну модель процесу спікання з урахуванням теплових і газодинамічних характеристик;
- реалізувати та дослідити систему модельно-прогнозуючого керування температурою точки прогару;
- виконати порівняльний аналіз ефективності MPC- та PID-регуляторів;
- обґрунтувати вибір програмного та апаратного забезпечення контролерного рівня;
- розробити структуру та інтерфейс системи візуалізації технологічного процесу;
- реалізувати НМІ-систему на базі середовища PLCnext Engineer з використанням веб-технологій.

Об'єктом дослідження є технологічний процес спікання залізорудної шихти на агломераційній машині.

Предметом дослідження є методи та алгоритми автоматичного керування температурним режимом процесу спікання, а також засоби візуалізації та інформаційної підтримки оператора.

У роботі використовуються методи математичного та імітаційного моделювання динамічних систем, теорії автоматичного керування, оптимального та модельно-прогнозуючого керування, комп'ютерного моделювання у середовищі MATLAB, інженерного проєктування НМІ-систем.

Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості використання розроблених моделей, алгоритмів керування та системи візуалізації при проєктуванні та модернізації систем автоматизації агломераційних фабрик, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців у галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СПІКАННЯ ШИХТИ НА АГЛОМАШИНІ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Характеристика технологічного процесу спікання шихти з точки зору задач автоматизації

Процес спікання залізорудної шихти на агломераційній машині є ключовою ланкою доменного переділу, оскільки саме агломерат визначає стабільність роботи доменних печей, їхню продуктивність, паливну економічність та екологічні показники. Технологічно процес являє собою безперервне спікання шарів дрібнозернистої сировини, укладеної на колосникові візки (палети), які рухаються по замкненому конвеєрному тракту.

Типова технологічна схема агломераційної фабрики включає такі основні стадії (рис. 1.1):

1. Підготовка шихти – дозування окатишів, концентратів, аглоруди, вапнякових і доломітових флюсів, коксового дрібняку, зворотів (некондиційного агломерату), зволоження і грануляція в мішалках та барабанах.

2. Укладання шару на палети – формування постелі, засипка та вирівнювання шару заданої висоти й гранулометричного складу на колосникових візках.

3. Запалювання і власне спікання – у зоні запалювального горна шар прогрівається до температур запалювання палива, після чого фронт горіння переміщується вниз по шару за рахунок протягування повітря вентиляторами розрідження.

4. Вивантаження й дроблення агломерату – на розвантажувальному кінці машини спечений шар сходить з палет, дробиться, просіюється; кондиційна фракція направляється в доменне виробництво, дрібна фракція повертається в шихту як оборотна складова.

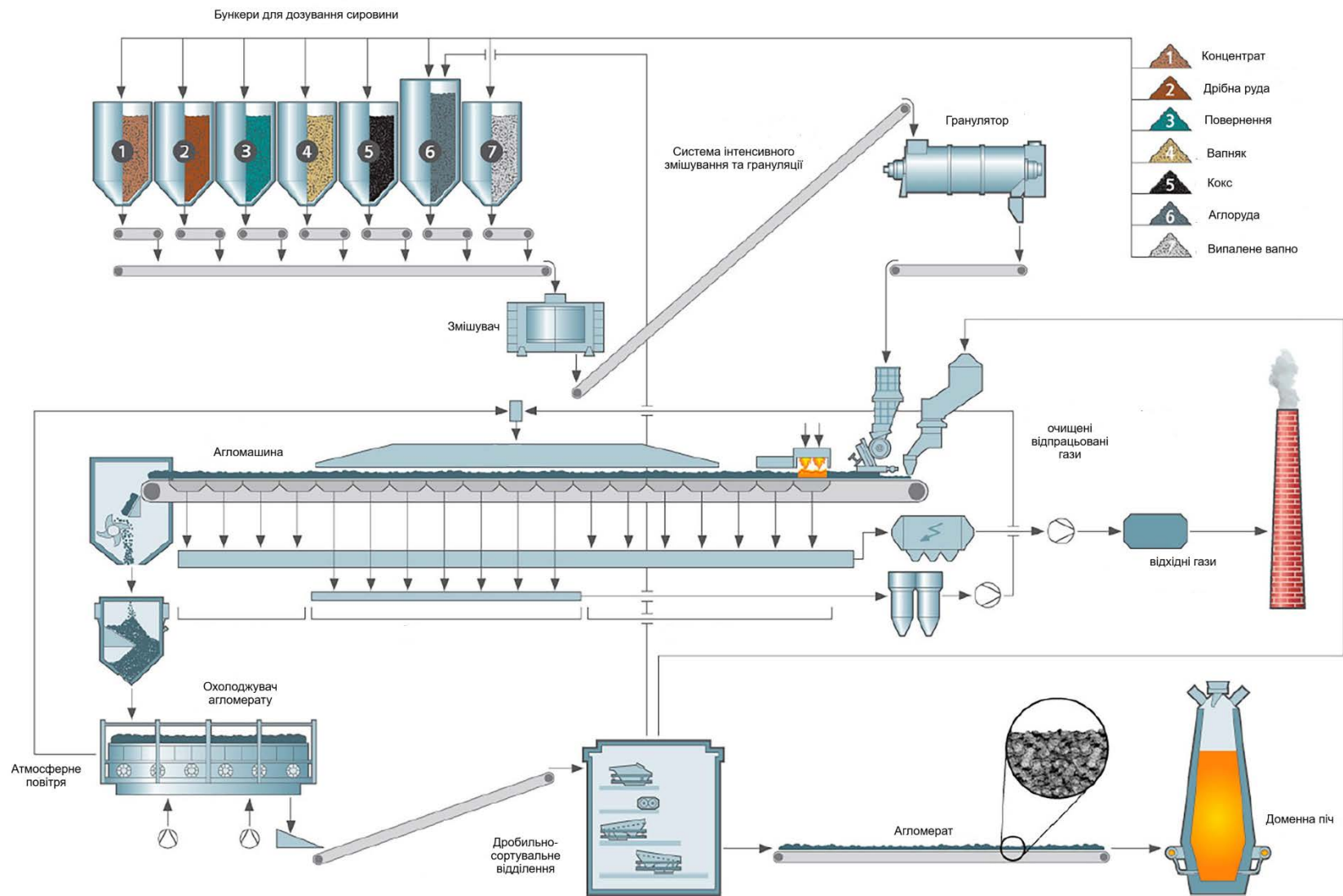


Рисунок 1.1 – Діаграма компонентів UML програмного забезпечення системи неперервного зважування

5. Охолодження агломерату та очищення газів – обробка гарячого агломерату в охолоджувачах, очищення відхідних газів у пиловловлювачах, електрофільтрах, установках десульфурзації та дезактивації діоксинів.

Критичною характеристикою процесу є положення фронту повного вигорання палива (так званий *burn-through point*, ВТР) по довжині машини [1]. Для забезпечення достатнього ступеня спікання ВТР має знаходитися поблизу розвантажувального кінця машини: якщо фронт вигорання приходить надто рано, частина довжини машини використовується неефективно; якщо надто пізно – агломерат не встигає якісно сформуватися.

З точки зору задач керування технологічний об'єкт «агломераційна машина» має низку особливостей:

1. Висока розмірність – на процес впливають десятки й сотні змінних: хімічний склад сировини, гранулометрія, вологість, витрата палива та повітря, розрідження в камерах, швидкість стрічки, температура газів і шихти по довжині машини, стан обладнання тощо [2, 3].

2. Сильна нелінійність і взаємозв'язок параметрів – зміна, наприклад, вологості або частки коксу в шихті одночасно впливає і на грануляцію, і на горіння, і на газодинаміку.

3. Просторово-розподілена динаміка – процес у шарі описується системою рівнянь тепло- та масообміну, що залежать від координати по довжині й висоті шару.

4. Великі запізнення – між моментом зміни керуючого впливу (наприклад, швидкості стрічки) і відповідною зміною положення ВТР проходить значний інтервал часу, пов'язаний з інерційністю об'єкту (значною тривалістю спікання шару).

5. Стохастичність і нестационарність – коливання властивостей сировини, зміна навантаження, старіння обладнання, засмічення газоходів тощо.

Ці фактори ускладнюють синтез класичних систем керування і стимулюють використання більш досконалих методів моделювання та оптимізації.

У сучасних публікаціях і промислових описах можна виділити такі ключові задачі автоматичного керування [4]:

1. Керування підготовкою та складом шихти.

Підсистема шихтопідготовки вирішує задачі:

- автоматичного дозування компонентів (руди, флюсів, коксового дрібняку, зворотів) за масою;
- регулювання вологості шихти на виході зі змішувачів;
- забезпечення необхідної гранулометрії після грануляції.

Як правило, реалізуються замкнені контури регулювання витрати матеріалів (за сигналами від стрічкових ваг) та вологості (за показаннями вологомірів, інколи з корекцією за непрямыми показниками – силою струму приводів мішалок, гранулометрією). Коливання складу сировини, запізнення вимірювання вологості й інерційність грануляції ускладнюють побудову адекватних регуляторів та вимагають застосування каскадних і адаптивних схем.

2. Керування висотою та рівномірністю шару на палетах.

Другий важливий блок – укладання шару шихти на палети. Основні задачі:

- підтримання заданої висоти шару на всій ширині конвеєра;
- компенсація нерівномірності завантаження по ширині та довжині;
- стабілізація витрати шихти з бункерів та живильників.

Вимірювання здійснюється контактними або безконтактними датчиками рівня, а також ваговими вимірювачами. Керуючими впливами виступають положення шибєрів, швидкість живильників, швидкість конвеєрів. Важливою особливістю є сильний вплив характеристик гранул (форма, міцність, вологість) на сипучість матеріалу, що призводить до нелінійності об'єкта керування.

3. Керування газодинамічним режимом та горінням.

Стабільність горіння по довжині машини залежить від режиму протягування газів та витрати палива. Тут реалізуються контури:

- регулювання розрідження в окремих камерах під палетами та в газоходах;
- регулювання витрати повітря й газу в запалювальній горні;

– стабілізація температурних профілів газів та шихти по довжині.

Вимірюються тиски, витрати, температури; керуючі впливи – частота обертання димососів, положення заслінок, витрата газу чи мазуту в горні. Коливання властивостей шихти й забруднення газоходів призводять до зміни гідравлічних опорів, що вимагає постійної адаптації налаштувань регуляторів.

4. Керування запалюванням горну і тепловим режимом

Запалювання горна забезпечує початковий прогрів шару до температури, за яких коксовий дрібняк запалюється. До типових задач відносяться:

- регулювання температури в зоні горна;
- підтримання стабільності полум'я;
- забезпечення безпечної експлуатації пальників і газопроводів.

Як правило, застосовуються каскадні контури з швидкими ПІД-регуляторами температури та алгоритмами верхнього рівня, що враховують стан об'єму шихти, витрату повітря та швидкість стрічки.

5. Керування швидкістю стрічки та burn-through point (ВТР).

Центральною технологічною задачею є керування положенням ВТР, яке тісно пов'язане зі швидкістю руху стрічки. Основна ідея полягає в тому, щоб при змінних умовах (склад шихти, вологість, режим горіння) забезпечити, аби фронт повного вигорання палива досягав дна шару саме поблизу розвантажувального кінця машини [4, 5].

Для реалізації цієї задачі застосовуються різні методи:

- непряме визначення ВТР за температурою газів у кінцевих камерах, розрідженням, вмістом O_2 та CO в газах;
- прямий візуальний контроль за допомогою інфрачервоних камер, що реєструють термограми шару на виході машини [2];
- побудова математичних моделей ВТР (лінійних, нелінійних, data-driven) і реалізація модельно-предиктивних регуляторів (ММГРС та ін.) [6, 7].

На практиці розробляються як класичні ПІД- та каскадні схеми керування швидкістю стрічки, так і інтелектуальні системи, що використовують нечітку

логіку, нейромережі, опорні вектори для прогнозування ВТР та розрахунку оптимальної швидкості конвеєра [8].

6. Керування охолодженням, газоочищенням та якістю агломерату

Завершальні стадії процесу також є об'єктом автоматизації:

- охолодження агломерату – регулювання витрати повітря через охолоджувачі, температури на виході, збирання тепла для утилізації;

- газоочищення – керування режимами роботи пиловловлювачів, електрофільтрів, установок очищення від SO_2 , NO_x , діоксинів, забезпечення нормативних меж викидів;

- оперативний контроль якості агломерату – автоматизований відбір проб, швидкі лабораторні аналізи, використання непрямих показників (щільність, електропровідність, міцність при дробленні).

Автоматичне керування цими підсистемами дозволяє не лише підвищити екологічну безпечність, а й зменшити втрати тепла та матеріалу.

1.2 Аналіз існуючих підходів та рішень у галузі систем автоматизації процесу агломерації

Сучасні системи автоматизації агломераційних фабрик, як правило, організовано у вигляді багаторівневої ієрархії [1, 3]:

1. Рівень 0 (польовий) – датчики тиску, температури, витрати, розрідження, газоаналізатори, термопари в шарі та газоходах, вагові дозатори, датчики рівня, інфрачервоні й відеокамери, виконавчі механізми (засувки, клапани, електроприводи).

2. Рівень 1 (локальна автоматизація) – програмовані логічні контролери (PLC) або розподілені системи керування (DCS), що реалізують базові контури регулювання (ПД, каскадні, співвідношення) та логіко-командні функції.

3. Рівень 2 (оптимізація процесу, APC) – спеціалізовані сервери і програмні комплекси, які реалізують моделі процесу, оптимізаційні алгоритми (зокрема.

MPC) та інтелектуальні системи керування ВТР, швидкістю стрічки, енергетичним балансом.

4. Рівень 3/4 (MES/ERP) – системи оперативного та виробничого планування, обліку, аналітики, інтегровані з ERP підприємства.

Такий підхід дозволяє розмежувати задачі швидкодіючого керування (на рівні PLC/DCS) і повільніших оптимізаційних розрахунків (на рівні APC/MES), забезпечуючи масштабованість і гнучкість.

На сучасних агломераційних фабриках застосовується широкий спектр засобів вимірювальної техніки:

- термопари й термоопори для вимірювання температур у шарі й газоходах;
- диференціальні перетворювачі тиску для вимірювання розрідження;
- газоаналізатори для O₂, CO, CO₂, NO_x, SO₂;
- масові та об'ємні витратоміри для повітря та газів;
- стрічкові ваги й дозатори для твердих матеріалів;
- безконтактні датчики рівня й профілю шару;
- інфрачервоні камери для реєстрації термограм шару в зоні ВТР [2].

Виконавча частина включає частотно-регульовані електроприводи димососів, конвеєрів, живильників; електроприводи шиберів і заслінок; регулюючі клапани систем подачі газу, повітря, води; пальникові пристрої запалювальної горна.

На рівнях 1–2 домінують промислові контролери та DCS провідних виробників, інтегровані з SCADA/HMI-системами, які забезпечують:

- візуалізацію технологічних схем;
- архівацію трендів, аварій, подій;
- налаштування параметрів регуляторів;
- формування звітів по продуктивності, якості, енерговитратах.

Паралельно впроваджуються історичні бази даних та аналітичні платформи, які акумулюють великі масиви експлуатаційних даних для

подальшого використання у data-driven моделях та системах підтримки прийняття рішень [1, 3].

Варто також зазначити, що на ринку представлені готові пакети оптимізації та APC-системи (Advanced Process Control), орієнтовані саме на агломераційні фабрики та фабрики збагачення.

Одним з таких пакетів є ABB Ability™ Expert Optimizer для металургії – комплексне рішення з розширеного процесного керування, яке застосовує модельно-предиктивні алгоритми для стабілізації процесів спікання та огрудкування, зменшення варіації якості, підвищення продуктивності й зниження енерговитрат і викидів [9-11].

Sinter Optimizer (Primetals Technologies) – система оптимізації процесу агломерації, інтегрована з рівнем 2 аглофабрики, яка реалізує замкнені контури керування ВТР, швидкістю стрічки, співвідношенням повітря/газ, а також модулі цифрової аналітики та інтеграції з SAP. Останні проєкти з цифровізації аглофабрик компанії Kardemir (Туреччина) демонструють тенденцію до впровадження AI-орієнтованого керування на основі реального часу та глибокої інтеграції з корпоративними інформаційними системами [12-13].

Одним із провідних промислових рішень для оптимізації процесу спікання є система Metso Optimus Sinter [14], призначена для автоматизованого керування тепловим та газодинамічним режимами агломераційної машини. Система базується на поєднанні математичних моделей, механізмів прогнозування ключових технологічних параметрів та адаптивних алгоритмів оптимізації. Її функціональність охоплює моніторинг формування зони горіння (рис. 1.2), підтримання стабільності показника ВТР, керування тепловим навантаженням та раціональний розподіл газових потоків уздовж агломашини. Завдяки комплексній оцінці стану процесу система здатна мінімізувати коливання якості продукції та підтримувати стабільність роботи обладнання.

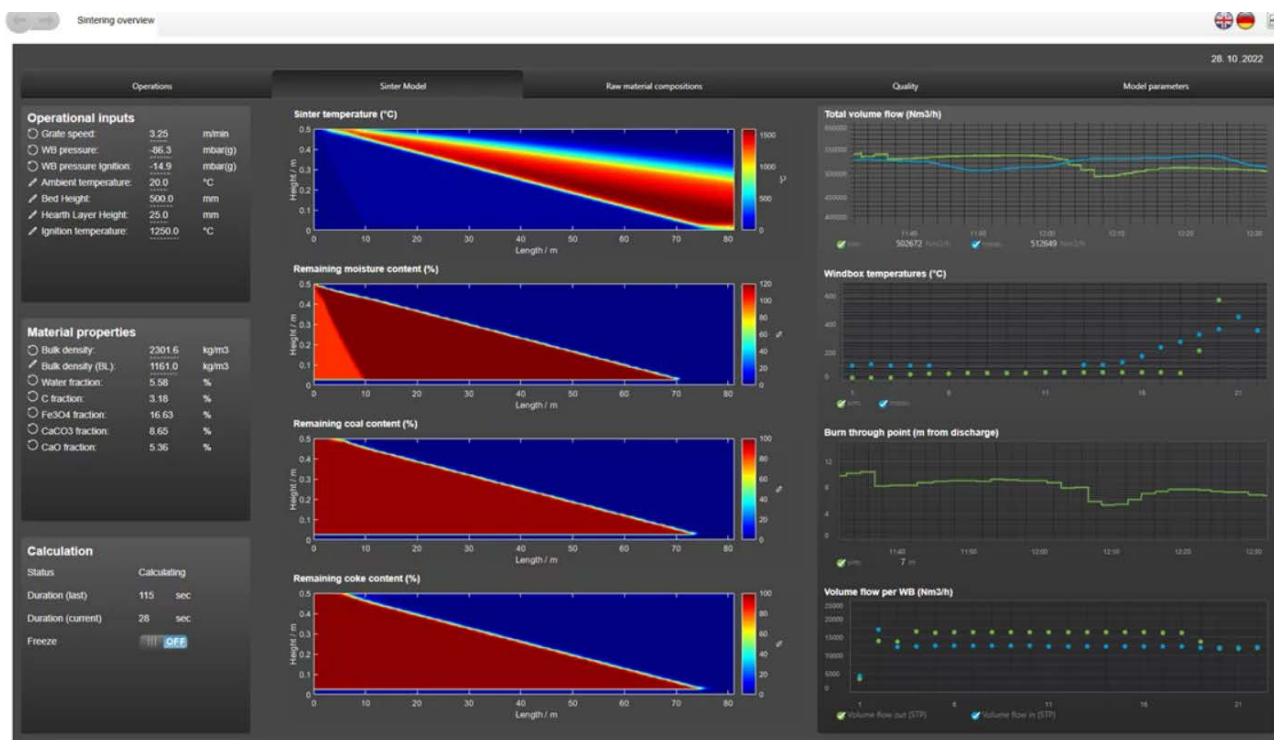


Рисунок 1.2 – Вікно перегляду основних показників процесу спікання шихти на агломащині

Важливою особливістю Optimus Sinter є використання моделей реального часу та інтелектуальних алгоритмів оптимізації, які коригують параметри технологічного режиму з урахуванням змін у складі шихти, якості палива, умов засмоктування газу та теплових збурень. Система інтегрується з наявними рівнями керування (PLC, DCS) і може працювати як у режимі підказок оператора, так і в автоматизованому режимі APC. За даними виробника, впровадження Optimus Sinter дозволяє підвищити продуктивність агломащини, стабілізувати температуру в зоні горіння, зменшити питомі витрати палива та покращити однорідність фізико-механічних властивостей агломерату.

Крім вказаних рішень, у наукових публікаціях міститься опис численних власних розробок металургійних комбінатів і науково-дослідних інститутів, що реалізують інтелектуальне керування ВТР, оптимізацію витрати палива, адаптивні регулятори шихтопідготовки тощо. Вони часто виступають базою для подальшого впровадження комерційних APC-платформ або стають прототипами для локальних рішень.

На основі аналізу сучасних публікацій та промислових проєктів можна виділити декілька ключових тенденцій розвитку автоматизації процесу спікання.

1. Перехід до інтегрованих APC-платформ і «автопілотів» для агломераційних фабрик.

Від локальних ПДД-контурів і окремих систем автоматичного регулювання галузь переходить до інтегрованих платформ розширеного процесного керування (APC), які працюють як «автопілот» агломераційної фабрики, координаційно впливаючи на швидкість стрічки, витрату палива, розрідження, ВТР, газоочищення тощо [9, 10, 15].

Такі системи орієнтовані на одночасну оптимізацію кількох критеріїв – продуктивності, якості, енерговитрат, викидів – та значно зменшують залежність результатів від досвіду операторів.

2. Широке застосування data-driven і AI-підходів.

Суттєво зростає роль моделей, побудованих на основі виробничих даних. Для моделювання ВТР, продуктивності й показників якості агломерату застосовуються:

- нейронні мережі (у т.ч. глибокі та рекурентні);
- метод опорних векторів (SVM) [7, 16];
- гібридні моделі, що поєднують BiLSTM, XGBoost та інші алгоритми для прогнозування ВТР за даними тепловізійних зображень і параметрів процесу [8].

На базі таких моделей розробляються інтелектуальні системи керування, де модуль прогнозу (soft-sensor) інтегрується у замкнений контур і формує оптимальні уставки для швидкості стрічки та розрідження [7, 8].

3. Розвиток систем вимірювання та комп'ютерного зору

Окремий тренд – впровадження оптичних і тепловізійних систем для прямого контролю стану шару і ВТР. Інфрачервоні камери, що знімають термограми на виході машини, дозволяють у реальному часі визначати положення фронту горіння та його рівномірність по ширині, що істотно підвищує точність керування в порівнянні з непрямими методами, заснованими лише на газоаналізі [2].

Це відкриває можливості для застосування методів комп'ютерного зору й глибокого навчання для аналізу зображень шару та раннього виявлення аномалій.

4. Цифровізація та інтеграція з MES/ERP, концепція «цифрового двійника».

Сучасні проекти модернізації агломераційних фабрик (зокрема, цифровізація аглофабрик Kardemir у співпраці з Primetals Technologies) демонструють рух до глибокої інтеграції систем автоматизації технологічного процесу із корпоративними MES/ERP-платформами: реальний час, наскрізна аналітика, автоматичний обмін даними з SAP тощо [13].

У межах концепції «цифрових двійників» розвиваються моделі агломераційного процесу, що використовуються для віртуальної наладки алгоритмів, перевірки сценаріїв керування, оптимізації режимів без ризику для реального виробництва.

5. Фокус на енергоефективності та екології

З посиленням екологічних вимог системи автоматизації орієнтуються не лише на продуктивність і якість, а й на мінімізацію викидів і ефективне використання енергії. APC-рішення враховують вартість енергоресурсів, штрафи за перевищення викидів, забезпечуючи оптимальний баланс між технологічними показниками та екологічними обмеженнями [9-11].

1.3 Огляд математичних моделей процесу спікання шихти на агломераційній машині

Ключовим технологічним параметром, який визначає якість і продуктивність процесу спікання є положення фронту повного вигорання палива (burn-through point, ВТР). Від того, наскільки точно система автоматизації може оцінювати, прогнозувати та стабілізувати ВТР, залежить ефективність роботи всієї агломераційної машини. Тому математичне моделювання динаміки ВТР та

розробка алгоритмів керування ним є одним із центральних напрямів досліджень у сфері автоматизації агломераційного процесу.

Формування ВТР є результатом складної взаємодії процесів:

- горіння коксового дрібняку в шарі;
- переміщення фронту гарячих газів по висоті шару;
- масо- та теплообміну в об'ємно-розподіленому середовищі;
- зміни газодинамічних умов у камерах розрідження;
- коливання вологості, гранулометрії та складу шихти.

Через таку складну природу процесу аналітичні моделі повної фізики процесу залежать від великої кількості важко вимірюваних параметрів і практично не застосовуються у промислових системах регулювання. Тому розвиваються два основні підходи:

- фізично-обґрунтовані спрощені математичні моделі, що описують ВТР через агреговані параметри;
- моделі на основі даних (data-driven), які формуються на основі експлуатаційних даних, тепловізійних зображень та історії параметрів процесу.

Традиційно положення ВТР визначається за даними:

- температури газів у кінцевих камерах;
- концентрацій $\text{CO}/\text{CO}_2/\text{O}_2$;
- розрідження та тиску;
- різниці температур у шарі по довжині машини.

Такі методи прості у впровадженні, але мають обмежену точність, оскільки опираються на непрямі показники, що сильно залежать від стану газоходів, забруднення фільтрів, зміни висоти шару тощо.

Сучасні рішення використовують інфрачервоні камери, які фіксують температурний профіль агломерату при сході з палет. За термограмами визначають:

- положення зони максимальних температур;
- контурування фронту горіння по ширині;
- параметри рівномірності та симетрії шару;

– ранні ознаки нестабільного горіння.

Це дає можливість будувати як класичні алгоритми (екстракція піку температури), так і глибокі моделі аналізу зображень (CNN, ResNet, автоенкодери).

Серед ранніх моделей ВТР застосовуються:

- лінійні регресійні моделі, де положення ВТР виражається через температуру кінцевих камер, розрідження та швидкість стрічки;
- моделі зі зворотними зв'язками та запізненнями (системи ЛПМ/ARX/ARMAX), що враховують інерційність процесу;
- каскадні моделі, що описують поверхневе та глибинне горіння окремо.

Найпростішою промисловою формою моделі ВТР є лінійна авторегресійна модель із зовнішнім входом (autoregressive with exogenous input):

$$y(t) = \sum_{i=1}^n a_i y(t-i) + \sum_{j=1}^m b_j u(t-j) + e(t), \quad (1.1)$$

де $y(t)$ – поточна оцінка ВТР; $u(t)$ – керуючі дії (швидкість стрічки, розрідження); $e(t)$ – шум.

Ці моделі добре працюють у квазілінійних діапазонах режимів, але погано описують переходи між режимами, особливо при різкій зміні складу шихти.

Фізично обґрунтовані моделі включають:

- енергетичні баланси шару;
- моделі поширення теплового фронту;
- моделювання проникнення повітря крізь шар;
- моделі горіння коксу з урахуванням зміни реакційної поверхні.

Так, з точки зору математичної фізики, положення фронту повного вигорання палива (burn-through point, ВТР) визначається взаємодією процесів тепломасообміну, горіння коксу, фільтрації повітря крізь шар шихти та динаміки руху палет. У загальному випадку процес у шарі описується системою рівнянь:

1. Рівняння теплопровідності з реакційним джерелом:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_r \cdot \omega(T, C_{O_2}) \quad (1.2)$$

де ρ – густина шару; c_p – теплоємність; λ – ефективна теплопровідність шару; $T(x,t)$ – температура по висоті шару; Q_r – теплота реакції окиснення коксу; $\omega(T, C_{O_2})$ – швидкість реакції горіння, залежна від температури і концентрації кисню.

Типовою апроксимацією швидкості реакції є кінетичне рівняння Арреніуса:

$$\omega = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) C_{O_2} \quad (1.3)$$

де k_0 – передекспоненціальний множник; E – енергія активації; R – газова стала.

2. Рівняння фільтрації газу через шар: фільтрація повітря описується законом Дарсі:

$$v_g = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1.4)$$

де v_g – швидкість газу в шарі, k – проникність шару, μ – в'язкість газу, P – тиск.

Ці рівняння демонструють складність фізичних моделей та обмежену можливість їх прямого застосування у реальному часі.

Тому у системах автоматизації частіше використовують спрощені емпіричні моделі. Так, спрощена модель фронту горіння подається через розповсюдження температурного піку:

$$\frac{dX_{\text{ВТР}}}{dt} = \frac{V_{\text{burn}}}{H}, \quad (1.5)$$

де $X_{\text{ВТР}}$ – координата ВТР; H – висота шару; V_{burn} – швидкість проникнення теплового фронту вниз.

Припускаючи, що V_{burn} залежить від розрідження ΔP , вологості та вмісту коксу, отримують емпіричну модель:

$$V_{\text{burn}} = k_1 (\Delta P)^\alpha C_{\text{coke}}^\beta (1 - W)^\gamma, \quad (1.6)$$

де W – вологість, α , β , γ – коефіцієнти регресії.

Їх часто використовують як частину АРС-систем рівня 2, але рідко як основу замкненого контуру.

У якості моделей, заснованих на даних (data-driven моделі), найчастіше використовують нейронні мережі, метод опорних векторів (SVM) та гібридні моделі штучного інтелекту.

Серед моделей на базі нейронних мереж застосовуються:

- багат шарові перцептрони (MLP);
- CNN для аналізу термограм;
- RNN/LSTM/BiLSTM для прогнозування ВТР як часової послідовності;
- автоенкодерів для виділення латентних ознак горіння.

Так, класична модель MLP для оцінки ВТР має вигляд:

$$\hat{y} = f(W_2 \cdot \sigma(W_1 X + b_1) + b_2), \quad (1.7)$$

де X – вектор вхідних параметрів (температура камер, розрідження, швидкість стрічки).

Для прогнозування часових рядів використовуються моделі LSTM:

$$h_t = \text{LSTM}(x_t, h_{t-1}, c_{t-1}), \quad (1.8)$$

$$\hat{y} = Wh_t + b. \quad (1.9)$$

Перевагами моделей на базі нейронних мереж є здатність враховувати нелінійності та складні залежності. Водночас, такі моделі вимагають великих датасетів та захисту від переобучення.

Метод опорних векторів SVM застосовується для:

- класифікації станів горіння (нормальне/нестабільне);
- регресійного прогнозування положення ВТР;
- побудови моделей з обмеженням на переобучення.

У промислових експериментах SVM демонструє високу стабільність при малих вибірках.

Сучасні дослідження пропонують також гібридні моделі типу:

- BiLSTM + XGBoost (часові ряди та бустинг);
- CNN + LSTM (аналіз зображення + прогнозування часу до вигорання);
- RL-моделі, де передбачувана позиція ВТР є ключовим параметром винагороди в системах підкріплювального навчання.

Такі моделі застосовуються у цифрових двійниках та АРС-рішеннях нового покоління.

Також останнім часом зростає доля рішень, які використовують гібридні моделі, такі як CNN + LSTM, BiLSTM + XGBoost, тощо.

Зокрема, при аналізі тепловізійних зображень використовується наступний підхід:

$$F = CNN(I), \quad (1.10)$$

$$\hat{y} = LSTM(F_1, F_2, \dots, F_T), \quad (1.11)$$

або

$$\hat{y} = XGBoost(F), \quad (1.12)$$

де F – отримані за допомогою CNN ознаки.

Так, у роботі [8] запропоновано гібридну модель прогнозування температури ВТР, яка об'єднує часові ряди технологічних параметрів та оброблену візуальну інформацію з поперечного перерізу агломації. Її архітектура містить модулі екстракції ознак зображень, глибоку нейронну мережу Bi-LSTM для часових даних, та механізм ансамблевого навчання (XGBoost) для побудови прогнозу.

Структура моделі (рис. 1.3) включає такі функціональні блоки:

1. Модуль обробки зображень (image-processing module): на основі відео/кадрів з камери на вихідному кінці агломації проводиться виділення характеристик поперечного фрейму, зокрема колірної температурної інформації. Кадри попередньо обробляються (фільтрація шумів і впливу пилу/вогню), після чого обчислюється середнє значення кольорових компонентів для визначення ознак, пов'язаних із температурою поверхні шихти.

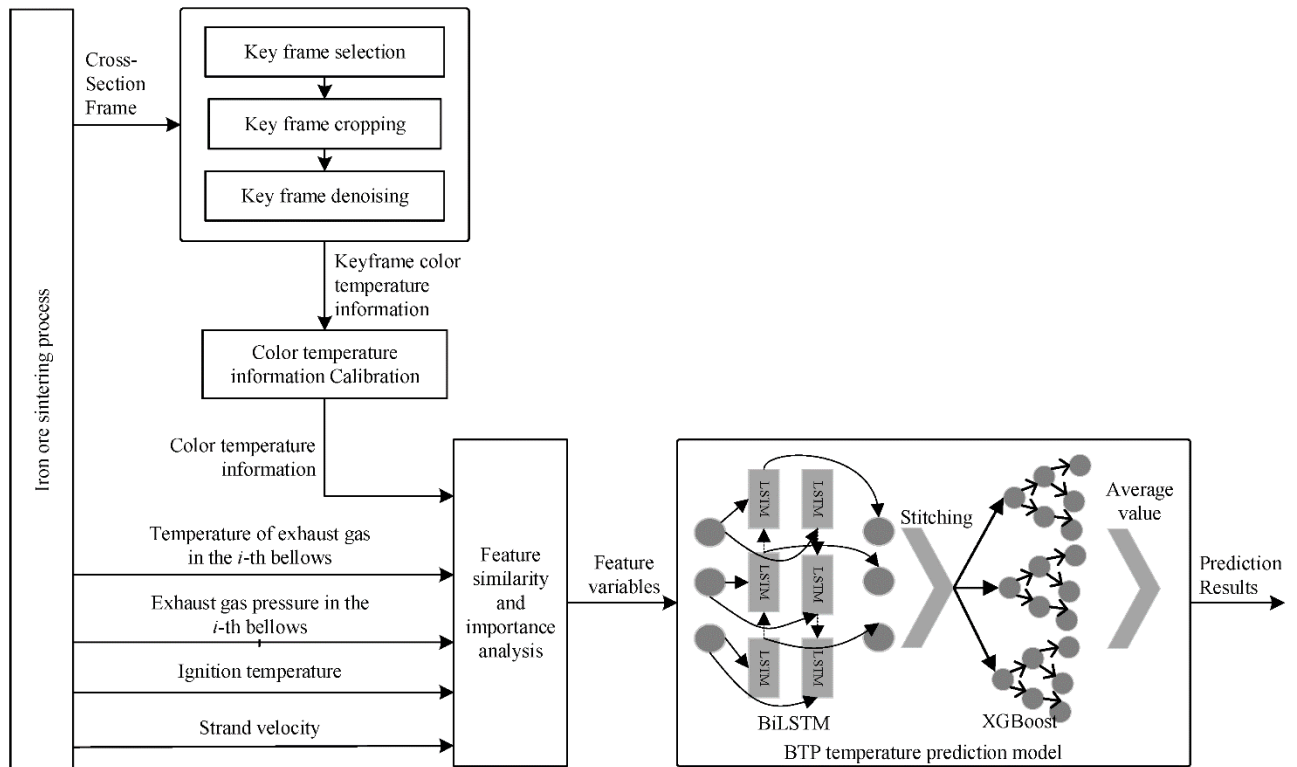


Рисунок 1.3 – Структура гібридної моделі прогнозування ВТР [8]

2. Модуль часових даних технологічного процесу: традиційні часові ряди параметрів – такі як температура в зоні ВТР, показання датчиків тиску, швидкість конвеєра тощо – використовуються як входні ознаки для прогнозування. Ці дані несуть важливу інформацію про динаміку процесу спікання.

3. Гібридний прогнозний блок. Основу моделі становить комбінація:

- Bidirectional Long Short-Term Memory (Bi-LSTM) – для обробки часових залежностей у часових рядах технологічних параметрів;
- Extreme Gradient Boosting (XGBoost) – для побудови ансамблевого дерева рішень, що добре працює з похідними ознаками з обробки зображень та частковими регресійними залежностями.

4. Механізм злиття інформації: входні дані з обох джерел (часові ряди та ознаки зображень) поєднуються у єдиному просторі ознак, що дозволяє використовувати як глибинні часові тенденції, так і візуальні інфрачервоні характеристики температури шихти.

Такий підхід дозволяє поєднати переваги глибинних часових моделей і методів ансамблевого навчання, що підвищує точність прогнозу ВТР порівняно з класичними методами регресії та часових рядів.

1.4 Огляд існуючих та перспективних алгоритмів керування процесом спікання шихти на агломераційній машині

Ефективність роботи агломераційної машини значною мірою визначається стабільністю температурного режиму та положенням зони горіння (burn-through zone), яке кількісно характеризується показником ВТР (Burn-Through Point). Оскільки процес спікання шихти має складну фізичну природу, високий ступінь інерційності, багатовимірність і наявність сильних перехресних зв'язків, вибір алгоритму керування є критичним завданням. Тому доцільно провести огляд та аналіз основних підходів до побудови систем керування ВТР, які використовуються як у промислових системах автоматизації, так і в сучасних дослідженнях.

ПІД-регулятори традиційно є основою промислових систем автоматизації теплових процесів завдяки простоті впровадження, зрозумілості та надійності. На більшості агломераційних фабрик застосовуються багатоконтурні каскадні ПІД -схеми, у яких:

- внутрішні контури регулюють розрідження в газоходах та температуру в кінцевих камерах;
- зовнішні контури стабілізують положення фронту горіння шляхом зміни швидкості стрічки;
- додаткові контури регулюють подачу палива та повітряного дуття.

Такі системи забезпечують базову стабілізацію режиму, проте мають низку суттєвих обмежень:

ПІД-регулятори працюють ефективно лише за умов слабкої взаємозалежності каналів, тоді як у агломерації зміна одного параметра (наприклад, витрати повітря) впливає на всю зону горіння.

Система належить до класу МІМО, але ПІД реалізує здебільшого SISO- або слабо зв'язані МІМО-алгоритми. Також ПІД не враховує майбутньої динаміки системи, що є критичним для процесів із великою інерційністю шару шихти.

Через ці обмеження навіть добре налаштовані ПІД -регулятори часто демонструють низьку точність стеження за ВТР, особливо при зміні складу шихти, вологості або теплової потужності.

Нечіткі регулятори (Fuzzy) набули поширення у 2000–2010-х роках завдяки здатності відтворювати логіку прийняття рішень досвідчених операторів. Fuzzy-алгоритми формалізують якісні правила, наприклад:

- «Якщо температура у кінцевій камері низька і розрідження високе, то потрібно зменшити швидкість стрічки»;
- «Якщо ВТР зміщується вперед, то зменшити подачу палива».

Основними перевагами нечітких регуляторів є можливість роботи з нечіткими, шумними та неповними даними, здатність враховувати експертні знання, а також робастність до зміни умов процесу.

Проте, як показує практика, Fuzzy-регулятори складно масштабуються до МІМО-систем, не забезпечують оптимальності керування, часто потребують ручного переналаштування.

Таким чином, fuzzy-системи є компромісним рішенням між традиційними PID і оптимізаційними методами.

У ряді сучасних робіт застосовуються адаптивні моделі, що автоматично налаштовують параметри регуляторів залежно від поточного стану процесу. Підходи включають:

- рекурсивну ідентифікацію моделі за поточними технологічними даними;
- адаптивне визначення підсилення регулятора;
- самоналаштовувані PID-контролери, що модифікують коефіцієнти залежно від динаміки похибки керування.

Перевагами такого підходу є покращена чутливість до збурень і зміни режимів. Головний же недолік полягає у тому, що адаптивні системи не

забезпечують оптимальний розподіл керувань між каналами та не враховують прогноз динаміки температурних профілів.

У сучасних комерційних промислових платформах застосовуються алгоритми Advanced Process Control (APC), які поєднують моделі реального часу, оптимізатори та предиктори. Типовими функціями APC є:

- пошук оптимального режиму подачі повітря й палива з урахуванням обмежень;
- мінімізація варіацій ВТР;
- зменшення питомих витрат палива;
- автоматичний розподіл газових потоків уздовж машини.

Один із типових прикладів – Metso Optimus Sinter [14], який застосовує комбіновані методи оптимізації, аналітичні та емпіричні моделі, а також інтелектуальні механізми налаштування режиму. Такі системи працюють як надбудова над базовими ПІД-регуляторами та можуть працювати у режимі підказок оператору або автоматичного коригування технологічних параметрів.

Моделно-прогнозне керування (MPC) є одним з найбільш прогресивних підходів до керування складними тепловими процесами та вважається перспективним напрямом у системах автоматизації агломерації. Особливості MPC:

1. Використання математичної моделі процесу: регулятор прогнозує динаміку температур і ВТР на горизонті прогнозування (наприклад, 20–30 секунд), що дозволяє враховувати інерційність шару шихти.
2. Оптимізація при наявності обмежень: MPC враховує технологічні обмеження на подачу палива, повітря та швидкість стрічки – те, з чим ПІД-регулятори природно не справляються.
3. Робота з МІМО-системами: MPC коректно розподіляє канали керування, забезпечуючи узгоджений вплив на всі зони процесу.

Основою алгоритму Model Predictive Control є використання математичної моделі об'єкта керування для прогнозування його поведінки на скінченному часовому інтервалі.

При використанні MPC-алгоритму керування найчастіше використовують лінійну дискретну модель процесу у просторі станів типу:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad (1.13)$$

$$y(k) = Cx(k). \quad (1.14)$$

де $x(k) \in \mathbb{R}^n$ – вектор станів об'єкта керування у дискретний момент часу k ; $u(k) \in \mathbb{R}^m$ – вектор керуючих дій; $y(k) \in \mathbb{R}^p$ – вектор вихідних змінних, що підлягають контролю та регулюванню; $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – матриця динаміки системи, яка описує внутрішні теплові та масо-обмінні процеси; $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ – матриця впливу керуючих дій; $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ – матриця виходів, яка визначає, які саме стани впливають на контрольовані величини.

Для процесу спікання шихти на агломераційній машині вектор станів $x(k)$ може включати температури шару шихти та газового потоку у відповідних зонах агломераційної машини; вектор керуючих дій $u(k)$ – відносну швидкість руху стрічки агломераційної машини v_b , відносний тепловий внесок повітря бути Q_{air} , відносний тепловий внесок палива Q_{fuel} ; вектор вихідних змінних – температуру зони горіння (ВТР) та температури газу у кінцевих зонах агломераційної машини.

На рис. 1.4 наведено структуру системи керування процесом спікання шихти при використанні регулятора на базі MPC-підходу та з урахуванням прив'язки до можливих керуючих впливів, контрольованих та керованих величин системи.

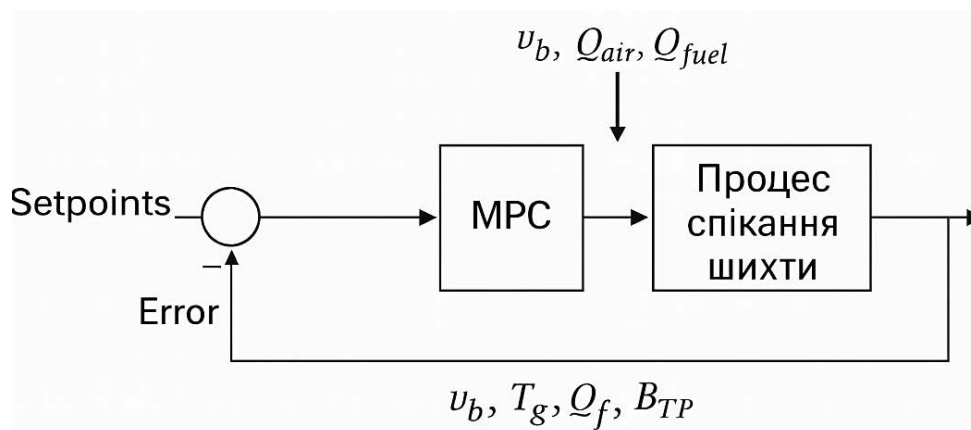


Рисунок 1.3 – Структурна схема системи MPC-керування процесом спікання шихти

Застосування дискретної моделі з фіксованим кроком дискретизації дозволяє реалізувати алгоритм MPC у цифровій системі керування та забезпечує узгодженість із вимірювальними каналами промислової автоматизації.

На кожному кроці дискретного часу MPC-контролер розв'язує оптимізаційну задачу, метою якої є мінімізація відхилення прогнозованих вихідних змінних від заданих уставок при одночасному обмеженні швидкості та амплітуди керуючих впливів.

Цільова функція має вигляд:

$$\min_U \left(\sum_{i=1}^{N_p} \|y(k+i) - y_{ref}\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta u(k+i)\|_R^2 \right), \quad (1.15)$$

де $U = \{\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+N_c-1)\}$ – послідовність змін керуючих дій; N_p – горизонт прогнозування, що у нашому випадку може визначати глибину передбачення динаміки процесу спікання; N_c – горизонт керування, протягом якого оптимізуються зміни керуючих дій; y_{ref} – вектор уставок для контрольованих величин; $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ – приріст керуючої дії; Q – симетрична додатньо визначена матриця вагових коефіцієнтів, що визначає пріоритет точності відстеження уставок; R – матриця ваг для штрафування швидких змін керування, яка забезпечує плавність та можливість фізичної реалізації регулювання.

Таким чином, перший доданок цільової функції відповідає за якість регулювання, тоді як другий – за енергетичну та технологічну доцільність керуючих дій.

Важливою перевагою MPC-алгоритму є можливість безпосереднього врахування обмежень, характерних для реального технологічного процесу спікання. У даній роботі введено обмеження на:

– керуючі дії:

$$u_{min} \leq u(k+i) \leq u_{max}, \quad (1.16)$$

– швидкість зміни керування:

$$\Delta u_{min} \leq \Delta u(k+i) \leq \Delta u_{max}, \quad (1.17)$$

де межі визначаються фізичними характеристиками виконавчих механізмів (для процесу спікання шихти на агломераційній машині це приводи стрічки, пальники, повітряні заслінки).

Завдяки цьому MPC-контролер формує такі керуючі сигнали, які можуть бути фізично реалізованими, не призводять до перенавантаження обладнання та відповідають вимогам промислової безпеки.

Алгоритм MPC реалізується за принципом ковзного горизонту. На кожному дискретному кроці часу:

1. Здійснюється вимірювання або оцінка поточного вектора станів $x(k)$;
2. За допомогою прогнозової моделі обчислюється майбутня поведінка системи на горизонті N_p ;
3. Розв'язується оптимізаційна задача;
4. До об'єкта керування прикладається лише перший елемент оптимальної послідовності $\Delta u(k)$;
5. Горизонт оптимізації зсувається на один крок уперед, і процедура повторюється.

Такий підхід дозволяє MPC-контролеру адаптуватися до змін режимів роботи агломераційної машини, збурень та неточностей моделі.

З урахуванням значної невизначеності параметрів процесу спікання (вологості шихти, хімічного складу, гранулометрії) можливим є застосування робастних модифікацій MPC, зокрема Min–Max Generalized Predictive Control (GPC):

$$\min_U \max_{\delta \in \Delta} J(U, \delta), \quad (1.17)$$

де δ описує множину допустимих збурень та невизначеностей моделі.

Такий підхід дозволяє гарантувати прийнятну якість регулювання навіть у найгірших можливих умовах експлуатації.

Водночас, до недоліків MPC-стратегії керування можна віднести, те що даний метод вимагає наявності адекватної моделі процесу та обчислювальних ресурсів контролера, однак сучасні промислові PLC та промислові комп'ютери цілком задовольняють ці вимоги.

Таким чином, сучасні тенденції розвитку систем керування агломераційним виробництвом спрямовані у бік інтеграції MPC, APC та інтелектуальних алгоритмів прогнозування, що забезпечують найвищий рівень автоматизації, точності та економічної ефективності.

Висновки за розділом:

У першому розділі було проведено комплексний аналіз технологічного процесу спікання залізорудної шихти на агломераційній машині та сучасних підходів до його автоматизації. Результати цього аналізу дозволили сформулювати повне уявлення про фізичну природу процесу, його ключові параметри, обмеження та вимоги до системи керування.

Визначено основні закономірності формування температурного поля та зони горіння шихти, що безпосередньо впливають на стабільність вихідного температурного режиму (ВТР) і якість кінцевого агломерату. Показано, що процес агломерації є високоінерційним, багатозв'язним і нелінійним, характеризується значним впливом збурень (коливання складу шихти, зміна температури дуття, різниця тяг у газоходах), що формує підвищені вимоги до систем керування.

Проведено аналіз існуючих підходів та промислових рішень у галузі автоматизації агломераційних процесів. Розглянуто архітектури сучасних систем моніторингу і керування, включно з рішеннями провідних виробників обладнання. Показано, що більшість традиційних систем автоматизації базуються на багатоконтурному PID-регулюванні та емпіричних алгоритмах підтримання теплового режиму, які мають обмежену ефективність на об'єктах із сильною взаємозалежністю параметрів. Окремо відзначено розвиток просунутих APC-рішень, зокрема таких як Metso Optimus Sinter, що використовують оптимізаційні алгоритми та моделі реального часу для підвищення стабільності ВТР та зменшення витрат палива.

Виконано огляд математичних моделей процесу спікання та підходів до їх побудови. Зокрема, проаналізовано класичні диференціальні моделі конвекційно-

теплообмінних процесів, дискретно-зонні моделі, моделі з ідентифікацією за технологічними даними, а також сучасні гібридні моделі на основі методів машинного навчання (Bi-LSTM, XGBoost), зокрема описані у сучасних дослідженнях (наприклад, гібридна модель прогнозування температури ВТР). Узагальнено, що адекватна математична модель агломераційного процесу має враховувати теплообмін шар–газ, конвекційні переноси, розподілену структуру зони горіння та вплив зовнішніх збурень.

Проаналізовано сучасні алгоритми керування процесом спікання, розглянуто їх переваги та обмеження: від класичних PID-контролерів до багатовимірних методів оптимізації та алгоритмів модельно-прогнозного керування (MPC). Висунуто гіпотезу, що алгоритми MPC мають демонструвати високу ефективність у задачах стабілізації ВТР, компенсації збурень та роботи в умовах обмежень на керуючі дії.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СПІКАННЯ ШИХТИ НА АГЛОМЕРАЦІЙНІЙ МАШИНІ

2.1 Розробка математичної моделі процесу спікання шихти на агломашині

Для реалізації системи керування процесом спікання шихти на агломераційній машині необхідно формалізувати математичну модель процесу. Оскільки в процесі дослідження вирішено випробувати методи формування модельно-предиктивного керування, то для побудови моделі у вигляді системи рівнянь стану зробимо стандартні спрощення:

1. Будемо розглядати одновимірний процес уздовж довжини машини (координата s), а розподіл по висоті шару враховуємо агреговано;
2. Шар шихти в кожній точці s описується усередненими параметрами:
 - температура твердого матеріалу T_s ;
 - температура газу T_g ;
 - ступінь вигорання палива (коксу) α ;
 - вологість шихти w .
3. Газодинаміка враховується через ефективну витрату газу та розрідження.
4. Агломераційна машина дискретизується на N зон (сегментів) уздовж довжини, що дає можливість перейти від диференційних рівнянь у часткових похідних (PDE) до систем ОДР.

Змінними стану, керуючими впливами та збуреннями є:

1. Стан $x(t)$ – вектор температур, ступеня вигорання, вологості тощо по зонах.
2. Керування $u(t)$ – швидкість стрічки, сумарна подача повітря/розрідження, витрата палива, вода на зволоження;
3. Збурення $d(t)$ – коливання складу шихти, зміна гранулометрії, зовнішні умови.

У найпростішому вигляді, якщо розглядати розподіл уздовж координати s

(довжина машини) та час t , можна записати баланси у вигляді:

1. Енергетичний баланс твердого шару:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} + \rho_s c_s v_b \frac{\partial T_s}{\partial s} = hA(T_g - T_s) + Q_r \omega(T_s, C_{O_2}) - q_{\text{втрати}}, \quad (2.1)$$

де ρ_s , c_s – густина та теплоємність твердого шару; v_b – швидкість руху стрічки; hA – коефіцієнт конвективного теплообміну «газ–шар»; $Q_r \omega$ – тепловиділення від горіння коксу; $q_{\text{втрати}}$ – питомі втрати тепла.

2. Енергетичний баланс газової фази:

$$\rho_g c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} + \rho_g c_g v_g \frac{\partial T_g}{\partial s} = -hA(T_g - T_s) + q_{\text{газ,ввод}}, \quad (2.2)$$

де v_g – ефективна швидкість руху газів уздовж каналу (або по тракту камери).

3. Баланс палива (коксу) в шарі.

Позначимо m_c – масу коксу в одиниці об'єму шару, α – ступінь вигорання ($\alpha=0$ – початковий стан, $\alpha=1$ – повне вигорання):

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + v_b \frac{\partial \alpha}{\partial s} = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right) (1 - \alpha) f(C_{O_2}), \quad (2.3)$$

де k_0 , E – кінетичні параметри, $f(\cdot)$ – функція доступності кисню.

4. Баланс вологи.

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + v_b \frac{\partial \omega}{\partial s} = -k_{\text{evap}}(T_s) \omega, \quad (2.4)$$

де k_{evap} – ефективний коефіцієнт випаровування.

Рівняння (2.1) – (2.4) уявляють фізичну модель процесу. Для формування керування необхідно виконати перехід до моделі у вигляді системи ОДР. Для цього виконаємо проводимо просторову дискретизацію, розбивши довжину машини L на N рівних сегментів з центрами s_i , $i = 1, \dots, N$.

Для кожної зони i вводимо усереднені:

– $T_{s,i}(t)$ – температура твердого шару;

– $T_{g,i}(t)$ – температура газу;

– $\alpha_i(t)$ – ступінь вигорання коксу;

– $\omega_i(t)$ – вологість шару.

Тоді рівняння (2.1) – (2.4) набувають вигляду:

1. Баланс енергії твердого шару в зоні i :

$$C_{s,i} \frac{dT_{s,i}}{dt} = \underbrace{\dot{m}_{s,i-1 \rightarrow i} c_s (T_{s,i-1} - T_{s,i})}_{\text{конвекція вздовж стрічки}} + \underbrace{h_i A_i (T_{g,i} - T_{s,i})}_{\text{теплообмін газ-шар}} + \underbrace{Q_r \omega_i}_{\text{горіння}} - Q_{\text{втрати},i}, \quad (2.5)$$

де $C_{s,i}$ – ефективна теплоємність зони; $\dot{m}_{s,i-1 \rightarrow i} \approx p_s A_{\text{переріз}} v_b$ – масовий потік шару між зонами; ω_i – швидкість реакції горіння в зоні i .

2. Баланс енергії газу в зоні i :

$$C_{g,i} \frac{dT_{g,i}}{dt} = \dot{m}_{g,i-1 \rightarrow i} c_g (T_{g,i-1} - T_{g,i}) - h_i A_i (T_{g,i} - T_{s,i}) + q_{\text{газ,ввод},i}, \quad (2.6)$$

де $\dot{m}_{g,i-1 \rightarrow i}$ пов'язаний із розрідженням та швидкістю роботи димососів; в найпростішому наближенні вважаємо його пропорційним до керуючої дії u_{air} .

3. Динаміка ступеня вигорання коксу

$$\frac{d\alpha_i}{dt} = k_{0,i} \exp\left(-\frac{E_i}{RT_{s,i}}\right) (1 - \alpha_i) f_i(C_{o_{2,i}}), \quad (2.7)$$

де $C_{o_{2,i}}$ залежить від витрати повітря й розрідження.

4. Динаміка вологості

$$\frac{dw_i}{dt} = -k_{\text{evap},i}(T_{s,i}) w_i + \delta_{i,\text{змоч}} \frac{1}{M_{s,i}} u_{\text{water}}, \quad (2.8)$$

де $\delta_{i,\text{змоч}} = 1$ тільки для початкових зон (де відбувається змочування/грануляція), u_{water} – витрата води.

На основі рівнянь (2.5) – (2.8) виконаємо перехід до моделі системи у просторі станів.

Об'єднаємо ключові показники процесу (температура твердого шару, температура газу, ступінь вигорання коксу, вологість шару) у один вектор стану:

$$x(t) = [T_{s,1} \quad \dots \quad T_{s,N} \quad T_{g,1} \quad \dots \quad T_{g,N} \quad \alpha_1 \quad \dots \quad \alpha_N \quad w_1 \quad \dots \quad w_N]^T, \quad (2.9)$$

розмірністю

$$\dim x = 4N.$$

Основними керуючими діями є:

– $u_1 = v_b$ – швидкість стрічки;

– $u_2 = Q_{air}$ – сумарна витрата повітря / розрідження (може бути кілька компонентів по секціях у агломераційних машинах з декількома колекторами);

– $u_3 = Q_{fuel}$ – витрата палива (газ/мазут у горні);

– $u_4 = Q_{water}$ – витрата води на зволоження.

Позначимо вектор керувань:

$$u(t) = [v_b \quad Q_{air} \quad Q_{fuel} \quad Q_{water}]^T. \quad (2.10)$$

Типовими вимірюваними величинами є:

– температури газів у кінцевих камерах ($T_{g,N-1}$, $T_{g,N}$);

– ВТР – координата зони, де α_i досягає порогу або де $T_{s,i}$ максимальна; сумарна витрата повітря / розрідження (може бути кілька компонентів по секціях у агломераційних машинах з декількома колекторами);

– продуктивність, інтегральний показник.

Таким чином, вектор виходів може мати наступний вигляд:

$$u(t) = [T_{g,N-1} \quad T_{g,N} \quad X_{BTP} \quad Prod]^T. \quad (2.11)$$

Для визначення координати ВТР як функцію стану можна використати два підходи:

– через розподіл ступеня вигорання;

– через максимум температури шару.

За першим способом визначимо поріг $\alpha^* \in (0, 1)$ (наприклад, 0.95). Тоді координату ВТР можна наближено записати як:

$$X_{BTP}(t) \approx \sum_{i=1}^N s_i \chi_i(t), \quad (2.12)$$

де

$$\chi_i(t) = \begin{cases} 0, & \alpha_i(t) < \alpha^* \\ 1, & \alpha_i(t) \geq \alpha^* \end{cases} \quad (2.13)$$

Для згладженого варіанту:

$$\chi_i(t) = \frac{1}{1 + \exp(-k_\chi(\alpha_i(t) - \alpha^*))}. \quad (2.14)$$

Альтернативно координата ВТР може бути визначена через максимум температури шару

$$X_{BTP}(t) = \arg \max_i T_{s,i}(t) \Delta s, \quad (2.15)$$

або усереднений варіант:

$$X_{BTP}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N s_i T_{s,i}(t)}{\sum_{i=1}^N T_{s,i}(t)}. \quad (2.16)$$

Після об'єднання рівнянь усіх N зон отримуємо векторну нелінійну модель:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), d(t)), \quad (2.17)$$

$$y(t) = g(x(t), u(t)) \quad (2.18)$$

де функція $f(\cdot)$ вміщує всі енергетичні, масові та кінетичні баланси (розписані вище для кожної зони); $d(t)$ – вектор збурень (коливання складу, вологість сировини, зміни вмісту коксу, зміни зовнішніх температур).

Для синтезу MPC, LQR, H_∞ або класичного лінійного регулятора зазвичай виконують лінеаризацію:

$$x(t) = x_0 + \Delta x(t), \quad u(t) = u_0 + \Delta u(t), \quad (2.19)$$

$$\dot{x}(t) = f(x, u, d) \Rightarrow \Delta \dot{x}(t) = A \Delta x(t) + B \Delta u(t) + E \Delta d(t), \quad (2.20)$$

$$y(t) = g(x(t), u(t)) \Rightarrow \Delta y(t) = C \Delta x(t) + D \Delta u(t), \quad (2.21)$$

де матриці:

$$A = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{x_0, u_0}, \quad B = \left(\frac{\partial f}{\partial u} \right)_{x_0, u_0}, \quad (2.22)$$

$$C = \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)_{x_0, u_0}, \quad D = \left(\frac{\partial g}{\partial u} \right)_{x_0, u_0}. \quad (2.23)$$

Робоча точка (x_0, u_0) – це стаціонарний режим агломераційної машини:

$$\dot{x} = 0 \Rightarrow f(x_0, u_0, d_0), \quad (2.24)$$

На практиці:

– x_0 береться з фактичних даних (усереднені температури по зонам, середні α_i в стабільному режимі);

– u_0 – середні значення швидкості стрічки, повітря та палива;

– d_0 – середній склад шихти, вологість, тощо.

Аналітично $f(x_0, u_0)$ розв'язувати не обов'язково; робоча точка задається

на основі технологічних даних та паспортної інформації, а лінеаризація моделі відбувається навколо цих значень.

Розглянемо, наприклад, рівняння для $T_{s,i}$:

$$C_{s,i} \frac{dT_{s,i}}{dt} = \dot{m}_{s,i-1 \rightarrow i} c_s (T_{s,i-1} - T_{s,i}) + h_i A_i (T_{g,i} - T_{s,i}) + Q_r \omega_i (T_{s,i}, \alpha_i) - q_{\text{втрати},i}. \quad (2.25)$$

Поділимо на

$$\frac{dT_{s,i}}{dt} = a_1 T_{s,i-1} + a_2 T_{s,i} + a_3 T_{g,i} + a_4 \omega_i (T_{s,i}, \alpha_i) + a_5, \quad (2.26)$$

де коефіцієнти a_k – це комбінації параметрів (масові потоки, теплоємність, площі, коефіцієнти теплообміну).

Тоді часткові похідні для А:

– по сусідній температурі шару:

$$\frac{\partial \dot{T}_{s,i}}{\partial T_{s,i-1}} = \frac{\dot{m}_{s,i-1 \rightarrow i} c_s}{C_{s,i}}, \quad (2.27)$$

– по власній температурі шару:

$$\frac{\partial \dot{T}_{s,i}}{\partial T_{s,i}} = -\frac{\dot{m}_{s,i-1 \rightarrow i} c_s}{C_{s,i}} - \frac{h_i A_i}{C_{s,i}} + \frac{Q_r}{C_{s,i}} \left(\frac{\partial \omega_i}{\partial T_{s,i}} \right) \Big|_0, \quad (2.28)$$

– по температурі газу:

$$\frac{\partial \dot{T}_{s,i}}{\partial T_{g,i}} = \frac{h_i A_i}{C_{s,i}}, \quad (2.29)$$

– по α_i (через залежність w_i):

$$\frac{\partial \dot{T}_{s,i}}{\partial \alpha_i} = \frac{Q_r}{C_{s,i}} \left(\frac{\partial \omega_i}{\partial \alpha_i} \right) \Big|_0. \quad (2.30)$$

Аналогічно для рівняння газової фази:

$$\frac{dT_{g,i}}{dt} = b_1 T_{g,i-1} + b_2 T_{g,i} + b_3 T_{s,i} + b_4. \quad (2.31)$$

дає елементи $\frac{\partial \dot{T}_{g,i}}{\partial T_{g,i-1}}, \frac{\partial \dot{T}_{g,i}}{\partial T_{g,i}}, \frac{\partial \dot{T}_{g,i}}{\partial T_{s,i}}$:

$$\frac{\partial \dot{T}_{g,i}}{\partial T_{g,i-1}} = \frac{\dot{m}_{g,i-1 \rightarrow i} c_g}{C_{g,i}}, \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial \dot{T}_{g,i}}{\partial T_{g,i}} = -\frac{\dot{m}_{g,i-1 \rightarrow i} c_g}{C_{g,i}} - \frac{h_i A_i}{C_{g,i}}, \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial T_{g,i}}{\partial T_{s,i}} = \frac{h_i A_i}{C_{g,i}}. \quad (2.34)$$

Для рівняння динаміки ступеня вигорання коксу:

$$\frac{d\alpha_i}{dt} = k_{0,i} \exp\left(-\frac{E_i}{RT_{s,i}}\right) (1 - \alpha_i) C_{O_2,i}. \quad (2.35)$$

З даного рівняння

$$\frac{\partial \dot{\alpha}_i}{\partial \alpha_i} = -k_{0,i} \exp\left(-\frac{E_i}{RT_{s,i}}\right) C_{O_2,i}. \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial \dot{\alpha}_i}{\partial T_{s,i}} = k_{0,i} (1 - \alpha_i) C_{O_2,i} \exp\left(-\frac{E_i}{RT_{s,i}}\right) \frac{E_i}{RT_{s,i}^2} (+1) \quad (2.37)$$

де знак правої частини визначається похідною експоненти.

У матриці А ці часткові похідні стають відповідними елементами.

Для формування матриці В виходимо з того, що кожне рівняння містить залежності від v_b , Q_{air} , Q_{fuel} :

– v_b впливає на масові потоки та конвективні члени $\dot{m}_{s,i-1 \rightarrow i}$ – через похідні $\partial f / \partial v_b$ формуються елементи стовпця $B_{i,1}$;

– Q_{air} впливає на $\dot{m}_{g,i-1 \rightarrow i}$, $C_{O_2,i}$;

– Q_{fuel} визначає $q_{газ,ввод,i}$ (у зонах підпалювача) і через температуру газу впливає на подальші зони.

Формально:

$$B = \left[\frac{\partial f}{\partial v_b} \quad \frac{\partial f}{\partial Q_{air}} \quad \frac{\partial f}{\partial Q_{fuel}} \right]_{(x_0, u_0)}. \quad (2.38)$$

Для формування матриці С виходимо з того, що $N=3$ і

$$C = [T_{g,2} \quad T_{g,3} \quad X_{ВТР}]^T. \quad (2.39)$$

Тоді матриця С буде мати наступний алгоритм заповнення:

- перший рядок С: одиниця на позиції, що відповідає $T_{g,2}$;
- другий рядок: одиниця на позиції для $T_{g,3}$;
- третій рядок: коефіцієнти для наближення ВТР як лінійної комбінації температур або α_i .

Наприклад, при використанні простого наближення:

$$X_{BTP}(t) \approx c_1 \alpha_1 + c_2 \alpha_2 + c_3 \alpha_3, \quad (2.40)$$

тоді третій рядок матриці C матиме нулі для температур i $[c_1, c_2, c_3]$.

Щодо матриці D , то у більшості випадків можна вважати, що вихід безпосередньо не залежить від керування, тож приймемо $D=0$.

2.2 Моделювання системи керування процесом спікання агломерату на агломераційній машині

Для реалізації системи керування процесом спікання агломерату необхідно розробити імітаційну модель процесу та дослідити ефективність можливих алгоритмів керування.

Процес агломерації характеризується інтенсивним теплообміном між газовим потоком та шаром шихти, що переміщується по машині з певною швидкістю. Температурний профіль формується унаслідок:

- конвекційного переносу тепла вздовж машини;
- теплообміну між фазами газ – шар;
- теплових джерел (вдування гарячого повітря та горіння палива);
- граничних умов на вході та виході газового тракту.

Для адекватного відтворення цих процесів модель було дискретизовано на 5 зон ($N = 5$), у кожній з яких описуються:

- $T_s[i]$ — температура шару;
- $T_g[i]$ — температура газу.

Таким чином формується вектор станів що має 10 компонент.

Змінні керування:

- $u_1 = v_b$ – нормована швидкість стрічки;
- $u_2 = Q_{air}$ – інтенсивність гарячого повітря;
- $u_3 = Q_{fuel}$ – внесок тепла від горіння палива.

На рис. 2.1 наведено фрагмент скрипта `build_sinter_model_N5_phys.m`, у якому реалізовано формування нелінійної моделі теплових процесів агломераційної машини при розбитті довжини на u п'ять зон.

```

22  %% Параметри моделі
23  N = 5;                % кількість зон шару та газу
24  nx = 2*N;            % 10 станів
25  nu = 3;
26
27  % Ефективні теплоємності
28  Cs = 1000*ones(1,N); % теплова інерція шару
29  Cg = 400*ones(1,N);  % теплова інерція газу
30
31  % Коефіцієнт теплообміну газ-шар:
32  h_sg = [400 900 1100 900 400];
33
34  % Конвекція вздовж машини
35  L_s = 5.0;
36  L_g = 5.0;
37  v_b0 = 0.05;          % номінальна "швидкість" шару
38  mdot_g0 = 0.80;
39
40  % Граничні умови
41  Ts_in = 900;           % вхідна температура шихти
42  Tg_out = 900;          % температура газу на виході
43
44  % Номінальні керування
45  u0 = [1.0; 1.0; 1.0]; % [v_b; Q_air; Q_fuel]

```

Рисунок 2.1 – Лістинг оголошення параметрів моделі

У даному фрагменті формуються основні параметри фізичної моделі.

Система містить 5 дискретних зон шару і 5 зон газу, у кожній з яких визначається температура шару у i -й зоні $T_s[i]$ та температура газу у i -й зоні $T_g[i]$. Таким чином, вектор станів має 10 компонент, що у першому наближенні може відповідати реальному просторовому розподілу тепла вздовж агломераційної машини.

Параметри теплоємності (C_s , C_g) та коефіцієнта теплообміну (h_{sg}) визначають інерційність та інтенсивність теплопередачі, а величини v_{b0} та $\dot{m}_{g0}$ характеризують швидкість руху шару та газового потоку, що є ключовими регульованими каналами у технологічному процесі.

Функція `sinter_ode_N5` (рис. 2.2) обчислює миттєві зміни температур у кожній зоні.

```

51 %% ОДУ: dx/dt = f_sinter(x,u)
52
53 odefun = @(t,x,u) sinter_ode_N5(t,x,u, ...
54     N, Cs, Cg, h_sg, v_b0, mdot_g0, L_s, L_g, Ts_in, Tg_out);
55

```

Рисунок 2.2 – Лістинг визначення правих частин диференціальних рівнянь

Фізично це включає:

- конвекційний перенос уздовж машини;
- теплообмін між газом та шаром;
- внесок теплових джерел (паливо та гаряче повітря);
- граничний вплив температури на вході та виході газу.

Таким чином модель відтворює фундаментальні закономірності теплових процесів у агломераційній стрічці.

Модель включає опис трьох основних фізичних механізмів:

- конвекція шару та газу забезпечує рух температурних фронтів уздовж машини;
- теплообмін між фазами вирівнює температури;
- теплові джерела (паливо, повітря) локально підвищують температуру.

Таким чином модель повністю відтворює реальний фізичний механізм формування температурного профілю.

З метою використання сучасних методів керування (зокрема, методів МРС-керування) нелінійна модель лінеаризується навколо усталеного режиму.

Матриці A та B визначаються чисельним диференціюванням (методом центральної різниці) – даний метод є достатньо точним і стійким навіть для складних систем.

```

67      %% 2. Чисельна лінеаризація (A, B)
68      A = zeros(nx);
69      B = zeros(nx,nu);
70      eps_x = 1e-3;
71      eps_u = 1e-3;
72      % A
73      for i = 1:nx
74          dx = zeros(nx,1); dx(i) = eps_x;
75          fp = odefun(0, x_ss + dx, u0);
76          fm = odefun(0, x_ss - dx, u0);
77          A(:,i) = (fp - fm)/(2*eps_x);
78      end
79      % B
80      for j = 1:nu
81          du = zeros(nu,1); du(j) = eps_u;
82          fp = odefun(0, x_ss, u0 + du);
83          fm = odefun(0, x_ss, u0 - du);
84          B(:,j) = (fp - fm)/(2*eps_u);
85      end
86      %% 3. Виходи C, D
87      ny = 3;
88      C = zeros(ny, nx);
89      D = zeros(ny, nu);

```

Рисунок 2.3 – Лістинг лінеаризації моделі

Отримана модель переводиться у дискретну форму (рис. 2.4) з періодом 1 с, що є прийнятним з урахуванням інерційності процесу та відповідає можливостям реалізації на типових промислових контролерах.

```

97      %% 4. Безперервна та дискретна модель
98
99      sys = ss(A,B,C,D);
100      Ts_d = 1.0;
101      sysd = c2d(sys, Ts_d);
102
103      disp('Лінеаризована дискретна модель sysd:');
104      disp(sysd);
105
106      assignin('base','sysd',sysd);
107      assignin('base','x_ss',x_ss);
108      assignin('base','u0',u0);
109

```

Рисунок 2.4 – Лістинг лінеаризації моделі

Для дослідження ефективності алгоритму модельно-предиктивного

керування (MPC) для керування процесом спікання шихти було виконано моделювання замкненої системи «MPC-регулятор – агломераційна машина» у середовищі MATLAB. Внутрішня модель об'єкта представлена лінеаризованою моделлю агломераційного процесу в просторі станів, що описують температури твердого шару в п'яти характерних зонах стрічки та температури газової фази в відповідних камерах. Параметр ВТР (Burn-Through Point) у моделі формується як зважена комбінація температур шару у зонах, що відображає положення фронту завершення горіння уздовж довжини машини.

Для реалізації замкненого контуру керування на наступному кроці було розроблено скрипт `setup_sinter_mpc.m`, у якому були визначені налаштування типів входів та виходів для отриманої дискретної моделі, сформовано MPC-регулятор, а також виконано його початкове налаштування (рис. 2.5).

```

9      %% 1. Побудова та лінеаризація фізичної моделі
10     build_sinter_model_N5_phys;    % створює sysd, x_ss, u0
11
12     plant = sysd;
13     Ts     = plant.Ts;
14
15     plant = setmpcsignals(plant, 'MV', 1:3, 'MO', 1:3);
16
17     %% 2. MPC-контролер
18
19     mpcobj = mpc(plant, Ts);
20
21     mpcobj.PredictionHorizon = 60;
22     mpcobj.ControlHorizon   = 10;
23
24     mpcobj.Weights.OutputVariables = [0.1 0.1 1];
25     mpcobj.Weights.ManipulatedVariables = [0 0 0];
26     mpcobj.Weights.ManipulatedVariablesRate = [0.2 0.05 0.02];
27
28     % Межі MB
29     mpcobj.MV(1).Min = 0.7; mpcobj.MV(1).Max = 1.3; % v_b
30     mpcobj.MV(2).Min = 0.8; mpcobj.MV(2).Max = 1.5; % Q_air
31     mpcobj.MV(3).Min = 0.8; mpcobj.MV(3).Max = 1.5; % Q_fuel

```

Рисунок 2.5 – Лістинг скрипту для формування MPC-контролера

При початковій ініціалізації MPC-контролера враховано, що ВТР (Burn-

Through Point) є основною контрольованою величиною, тому ваговий коефіцієнт у векторі вартості встановлено найбільшим. Ваги регулювання змінних керування обмежують агресивність регулятора. Накладені фізичні обмеження (0,7 – 1,3 для швидкості стрічки, 0,8 – 1,5 для Q_{air} , Q_{fuel}) відповідають реальним допустимим зміненням витрати повітря, палива та швидкості стрічки.

В якості тестового сценарію розглянуто ступінчасту зміну еталонного значення ВТР з номінального рівня до підвищеного значення, яке відповідає збільшенню продуктивності або зміні режиму роботи агломераційної машини. При цьому еталонні значення температур газу у кінцевих камерах також задавалися на рівні робочих температур, що забезпечують необхідну якість спікання.

На рисунку 2.6 наведено перехідний процес зміни ВТР під дією МРС-регулятора. Видно, що прогнозуючи поведінку об'єкта на заданому горизонті, МРС забезпечує досить швидке наближення ВТР до нового еталонного значення без перерегулювання та зі збереженням прийнятної плавності перехідного процесу.

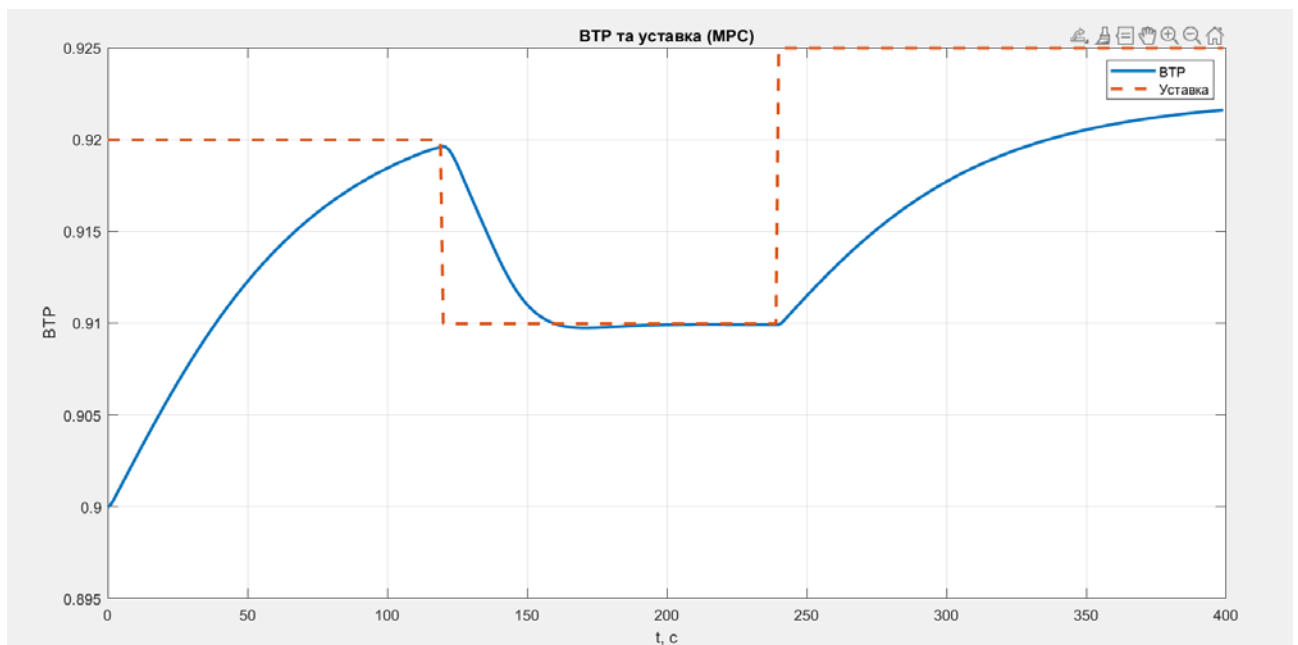


Рисунок 2.6 – Графік перехідного процесу зміни ВТС при МРС-керуванні

На рис. 2.7 наведено результати дослідження похибки відпрацювання

заданого значення ВТС при декількох ступінчастих змінах сигналу завдання (на 120 с та 240 с). Результати моделювання показують, що статичне відхилення практично відсутнє, що свідчить про високу точність підтримання положення фронту горіння.

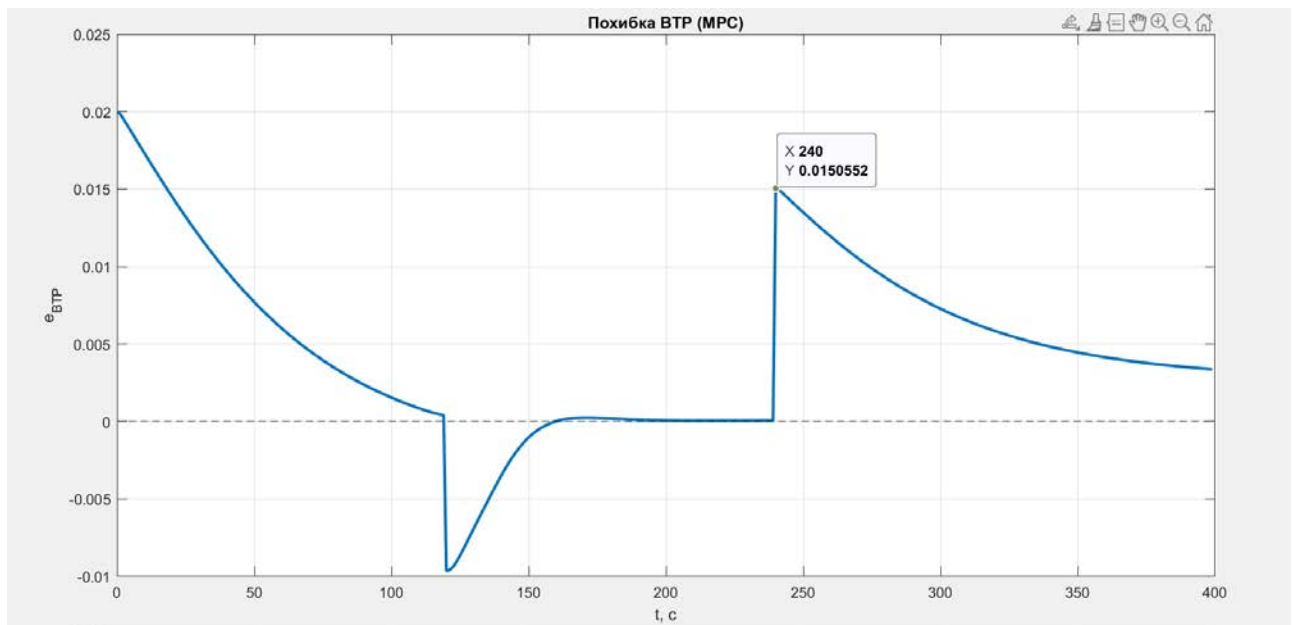


Рисунок 2.7 – Графік змінення похибки відпрацювання заданого значення ВТС при МРС-керуванні

На рисунку 2.8 наведено динаміку температур газу у кінцевих камерах, а також температурного індикатора шару, що використовується при формуванні ВТР. Результати моделювання свідчать, що МРС-регулятор забезпечує узгоджену зміну температури газової фази та температури шару, запобігаючи різким коливанням та перевищенням допустимих температур. Це, у свою чергу, сприяє стабільності процесу спікання та отриманню агломерату із заданими фізико-механічними властивостями.

У нижній частині рисунку 2.8 додатково показано динаміку зміни керуючих впливів: швидкості руху стрічки, витрати повітря та витрати палива. Характер зміни керувань відображає типову поведінку МРС-регулятора: на початку перехідного процесу керуючі дії змінюються активніше з метою швидкого наближення до нового режиму, надалі їх зміна стає більш пальною при

наближенні процесу до усталеного стану. При цьому всі керуючі сигнали залишаються в межах заданих обмежень, що особливо важливо для реального технологічного обладнання.

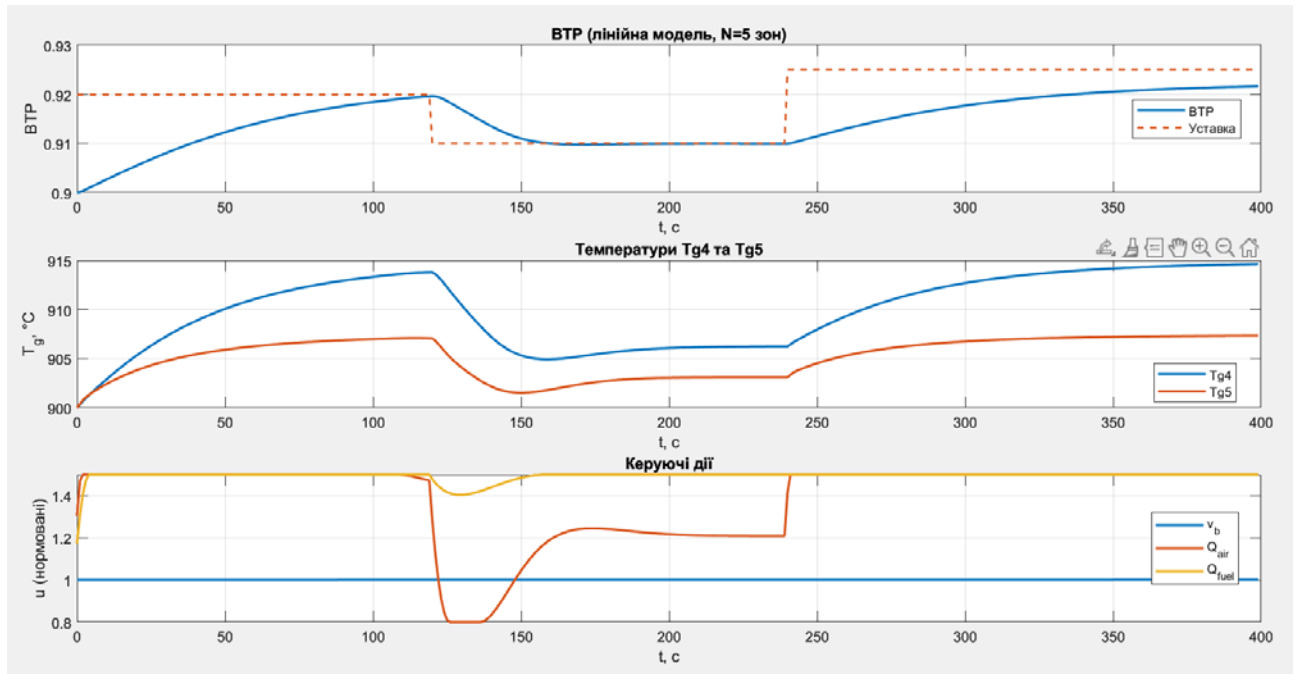


Рисунок 2.8 – Графік динаміки змінення ВТС, температур газу у кінцевих камерах та зміни керуючих впливів при МРС-керуванні

Також у роботі було реалізовано порівняння стратегії МРС-керування з класичним ПІД-регулятором, який було реалізовано для керування температурним профілем у різних точках агломераційної машини. На рис. 2.9 наведено результати виконаного дослідження. Аналіз отриманих результатів показує, що ПІД-регулятор не здатний стабілізувати ВТР у багатозонній тепловій моделі. Причини такої поведінки полягають у тому, що модель процесу уявляє собою складний МІМО-об'єкт з перехресними каналами, а профіль ВТР залежить від трьох регулюючих каналів одночасно, у той час як ПІД-регулятор має лише один сигнал зворотного зв'язку і не може комплексно врахувати динаміку температур у шарі та газі. Таким чином, ПІД-регулятор непридатний для керування ВТР у багатозонній моделі агломераційної машини.

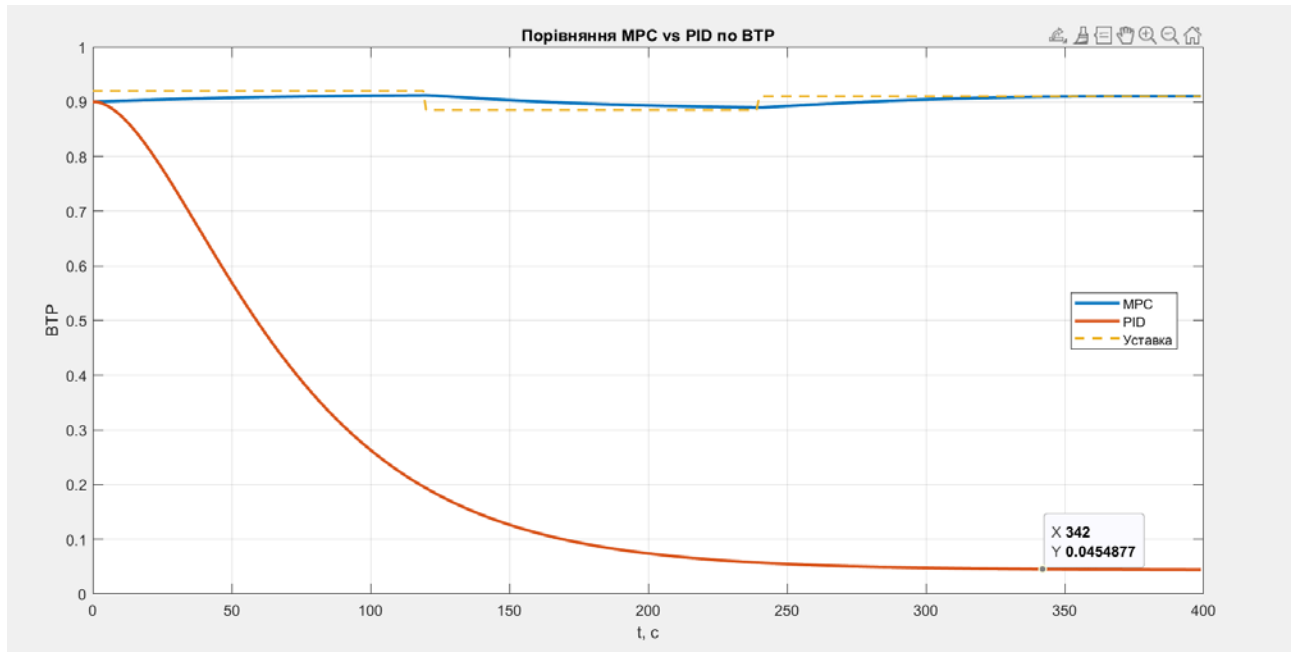


Рисунок 2.9 – Результати порівняння ПІД та МРС алгоритмів керування процесом спікання шихти

У той же час, МРС-керування враховує повну модель стану та обмеження на сигнали керування, тому забезпечує відпрацювання завдань та стійкість системи.

Таким чином, у результаті моделювання побудовано фізично обґрунтовану модель теплових процесів агломерації, виконано її лінеаризацію та сформовано дискретну МІМО-модель, придатну для використання у якості моделі процесу при формуванні МРС-керування. Реалізовано МРС-регулятор, який точно відпрацьовує зміну уставок ВТР, забезпечує фізично коректні керуючі дії з урахуванням обмежень, демонструє стійкість та високу якість перехідних процесів. Виконано порівняння з РІД-регулятором, який показав нестійку поведінку та відсутність здатності досягати заданого значення ВТР, оскільки не враховує складність та високу зв'язність процесу. Таким чином, результати моделювання підтверджують, що алгоритм МРС-керування є практично придатним методом автоматичного керування ВТР у складних теплових процесах агломераційної машини.

2.3 Інформаційне забезпечення системи автоматизації та формалізація вимог до засобів контролю і керування агломераційним процесом

2.3.1 Інформаційні канали системи автоматизації

Ефективне функціонування системи автоматичного керування процесом спікання шихти на агломераційній машині неможливе без належного формування інформаційних каналів, а також раціонального вибору засобів вимірювання та виконавчих механізмів. Тож необхідно дослідити і визначити перелік контрольованих і керованих величин, вимоги до первинних перетворювачів та обґрунтувати вибір основних елементів системи керування та візуалізації (SCADA) процесу спікання.

Інформаційні потоки в системі автоматичного керування агломераційною машиною охоплюють повний цикл технологічного процесу – від підготовки шихти до охолодження та транспортування готового агломерату. Вони включають:

1. Вимірювальні канали, які забезпечують надходження первинної технологічної інформації про стан процесу: температури у вакуум-камерах, розрідження, витрата повітря та газу, швидкість руху палет, вологість та витрата шихти тощо.

Джерелом цих сигналів є первинні перетворювачі, які передають інформацію на ПЛК або SCADA у вигляді аналогових (4–20 мА) або цифрових сигналів (польові шини Modbus, Profibus, Profinet).

2. Керуючі канали, що забезпечують вплив на технологічний об'єкт шляхом зміни положення регулюючих клапанів, керування частотними перетворювачами, електроприводами заслінок, шиберів та димососів, а також керування швидкістю руху палет.

3. Діагностичні та сервісні канали, які включають сигнали стану обладнання (справність датчиків, аварії приводів, стан електричних шаф, положення захисних кожухів), інформацію про деградацію або вихід з ладу первинних перетворювачів та попередження про небезпечні режими роботи.

4. Інтеграційні канали міжрівневої взаємодії, які забезпечують обмін даними між рівнем ПЛК та диспетчерською системою (SCADA). До них належить передавання трендів параметрів ВТР, температур та тисків у камерах, режимних параметрів горна, витрат, а також архівування значень з метою подальшої оптимізації технологічного процесу.

Таке структурування інформаційних каналів дає змогу побудувати узгоджену систему автоматизації, яка забезпечує повний контроль за процесом спікання та відповідає вимогам до алгоритмів стабілізації та оптимізації роботи агломераційної машини.

2.3.2 Основні вимірювальні сигнали та критерії вибору первинних перетворювачів

Для реалізації сучасної системи SCADA процесу спікання необхідно забезпечити вимірювання ключових технологічних параметрів, що визначають тепловий та газодинамічний режими спікання. До таких параметрів належать:

1. Температура газової фази у вакуум-камерах $T_{g,i}$ – основний показник для визначення положення фронту горіння (ВТР) та оцінки ходу процесу спікання.

Рекомендовані датчики та критерії їх вибору:

- термопари типу К або N у захисних кожухах із жаростійкої сталі;
- діапазон: 0–1300 °C;
- вихід: 4–20 мА через перетворювач термоЕРС → струм.

2. Температура у запалювальній горні – важлива для стабілізації процесу займання шихти.

Тип датчиків аналогічний попередньому, допускається використання ІЧ-пірометрів.

3. У вакуум-камерах підтримується розрідження, необхідне для протікання гарячих газів через шар шихти. Тому необхідно передбачити засоби вимірювання диференційного тиск у вакуум-камерах, для чого можуть бути використані дифманометри з мембранним чутливим елементом, тип сигналу: 4–20 мА, діапазон: –5...0 кПа.

4. Витрата повітря на димососах та у тракті охолодження – вимірюється

за допомогою вихрових витратомірів (Vortex) або диференційних витратомірів (діафрагма + Δp).

5. Витрата газу на запалювальний горн – зазвичай контролюється ротаметрами або сучасними масовими витратомірами (Coriolis/Vortex).

6. Параметри шихти:

- витрата шихти на живильнику;
- вологість шихти,
- рівень шихти в бункерах.

Для вимірювання параметрів шихти використовуються наступні типи датчиків:

- тензометричні вагові модулі;
- мікрохвильові або ІЧ-датчики вологості;
- радарні датчики рівня.

7. Швидкість руху палет – визначається або імпульсним енкодером, або зчитується з частотного перетворювача приводу.

2.3.3 Керуючі сигнали та вибір виконавчих механізмів

Система керування агломераційною машиною повинна забезпечувати формування наступних керуючих впливів:

1. Керування швидкістю руху палет. Здійснюється за допомогою асинхронного двигуна та частотного перетворювача з аналоговим (4–20 мА) або цифровим керуванням.

Цей канал визначає зміну часу перебування шихти у зоні спікання і прямо впливає на положення ВТР.

2. Керування витратою повітря та розрідженням.

Виконавчі механізми:

- електроприводні або електропневматичні заслінки/шибери;
- частотно-регульовані димососи та вентилятори.

Ці елементи формують газодинамічний режим і визначають інтенсивність протікання газів через шар.

3. Керування подачею палива у горн.

Для забезпечення стабільного займання та оптимальної температури у запалювальній горні застосовуються:

- регулюючі клапани з електропневматичними позиціонерами,
- пальникові пристрої з можливістю модуляції потужності.

Сигнал керування: 4–20 мА (позиційне регулювання).

4. Керування конвеєрами та допоміжними механізмами. Включає пуск/стоп конвеєрних ліній, керування транспортерами, охолоджувачами тощо.

Узагальнена інформація про канали введення-виведення системи автоматизації агломераційної машини представлені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Узагальнена таблиця сигналів системи автоматизації

№	Величина	Об'єкт	Тип сигналу	Діапазон	Призначення
1	Температура газів ($T_{\{g,i\}}$)	вакуум-камери	АІ 4–20 мА	0–1300 °С	контроль горіння та ВТР
2	Розрідження	вакуум-камери	АІ	–5...0 кПа	підтримання газодинаміки
3	Витрата повітря	димососи	АІ	10–100 %	керування тягою
4	Витрата газу	запалювальний горн	АІ	0–100 %	керування температурою
5	Швидкість палет v_b)	привід	АІ/мережевий	0–100 %	регулювання часу спікання
6	Вологість шихти	підготовка	АІ	5–15 %	стабілізація складу
7	Положення клапанів	повітря/газ	АО 4–20 мА	0–100 %	регулювання потоків
8	Стани приводів	обладнання	DI	–	діагностика

Проведений аналіз інформаційних каналів та вибір первинних перетворювачів дозволяє сформувати комплексну систему вимірювання та керування, що повністю забезпечує реалізацію SCADA-системи та алгоритмів автоматичного регулювання процесу спікання. Обрані типи датчиків та виконавчих механізмів відповідають технологічним вимогам процесу, умовам експлуатації та вимогам до точності й стійкості регуляторів, у тому числі MPC-

контролера, що розроблено в рамках даного проєкту.

2.4 Вибір та обґрунтування засобів вимірювання та виконавчих механізмів для системи автоматизації процесу спікання

Розробка сучасної системи автоматизації процесу спікання шихти на агломераційній машині потребує не лише визначення структури інформаційних каналів, а й обґрунтованого вибору конкретних засобів вимірювання та виконавчих механізмів. Вибір приладів має здійснюватися з урахуванням:

- діапазонів вимірювань (температура до 1200–1300 °С, розрідження у вакуум-камерах, витрата повітря та газу, витрата шихти);
- агресивності та запиленості середовища;
- необхідної точності та довготривалої стабільності;
- сумісності з обраною системою керування (інтерфейс 4–20 мА, HART, польові шини);
- наявності у модельному ряді виконання для вибухонебезпечних зон та вимог SIL.

1. Вимірювання температури газів і шару агломерату

Для контролю температурного режиму у вакуум-камерах та запальовальному горні доцільно застосовувати високотемпературні термопари у захисних гільзах.

Зокрема, у комплексі технічних засобів системи автоматизації агломераційної машини можна використати Endress+Hauser iTHERM FlameLine TAF16 – високотемпературний термометр із металевим або керамічним термокодолязем, який спеціально розроблено для цементних печей, сталеплавильних агрегатів, сміттєспальовальних установок і топок з киплячим шаром [17]. Заявлений діапазон температур становить до 1700 °С, що із запасом перекриває робочі значення для процесу спікання агломерату.

У поєднанні з цим типом термопар доцільно застосовувати універсальні температурні перетворювачі серії Endress+Hauser iTEMP (наприклад, TMT142B)

[18], які забезпечують перетворення сигналу термопары у стандартний сигнал 4–20 мА / HART і дозволяють реалізувати функції діагностики, лінеаризації та компенсації холодного спаю (рис. 2.10).



Рисунок 2.10 – Універсальний температурний перетворювач Endress+Hauser TMT142B

Таким чином, для каналів у вакуум-камерах і температури в горні доцільно прийняти комбінацію високотемпературна термопара (тип К/Н або платиноводієва) та головковий перетворювач 4–20 мА.

2. Вимірювання розрідження у вакуум-камерах

Для контролю розрідження у вакуум-камерах і газоходах слід застосовувати індустріальні перетворювачі тиску, придатні для роботи з газами та димовими газами у широкому діапазоні.

У комплексі технічних засобів системи автоматизації агломераційної машини у якості вимірювача абсолютного/надлишкового тиску можна використати цифровий перетворювач Cerabar PMP71 виробництва Endress+Hauser (рис. 2.11). Це прилад з металевою мембраною, призначений для вимірювання тиску у газах, парах та рідинах, із діапазоном до 700 бар, підтримкою SIL2/3 та інтерфейсами 4–20 мА/HART, PROFIBUS, Foundation Fieldbus [19].



Рисунок 2.11 – Вимірювач абсолютного/надлишкового тиску Endress+Hauser Cerabar PMP71

Для побудови контурів регулювання розрідження у вакуум-камерах у парі з дросельними елементами або заслінками доцільно застосовувати диференційні перетворювачі тиску типу Deltabar PMD75 (рис. 2.12), які забезпечують вимірювання різниці тиску в газах, парах та рідинах, також підтримують SIL2/3 та мають зручну трьохкнопокву локальну конфігурацію [20].



Рисунок 2.12 – Диференційний перетворювачі тиску Endress+Hauser Deltabar PMD75

Ці прилади можуть бути використані як для безпосереднього контролю

розрідження, так і в складі витратомірних вузлів (діафрагма + ΔP).

3. Витрата повітря (димососи, тяго-дутьєві вентилятори)

Для вимірювання витрати повітря у повітропроводах доцільним є застосування вихрових (vortex) витратомірів, які не мають рухомих частин і підходять для газів, пари та рідин. Характерним представником є Endress+Hauser Proline Prowirl F 200 (рис. 2.13) – вихровий витратомір із інтегрованим вимірюванням температури й тиску та можливістю енергетичних розрахунків, сертифікований відповідно до стандарту ISO для вихрових витратомірів [21].

Застосування таких приладів у контурі витрати повітря на димосос дозволяє отримати стабільний сигнал витрати без необхідності монтажу окремого дифманометра й первинного витратомірного елемента.

4. Витрата природного газу на запалювальний горн

Для вимірювання витрати газу може бути використаний той самий ряд Proline Prowirl F 200 у відповідному діаметрі трубопроводу, що забезпечить єдину платформу обслуговування й уніфікацію запасних частин.



Рисунок 2.13 – Вихровий витратомір із інтегрованим вимірюванням температури й тиску Endress+Hauser Proline Prowirl F 200

5. Витрата шихти (стрічкові ваги)

Для вимірювання витрати шихти на стрічкових конвеєрах широке

застосування у гірничо-металургійній галузі знайшли стрічкові ваги типу MULTIBELT® (Schenck Process). Зокрема, лінійка MULTIBELT BMP/BMC призначена для масових потоків до 15 000–20 000 т/год із точністю до $\pm 0,25$ % від миттєвої витрати, може інтегруватися в існуючі конвеєрні тракти та має низькі вимоги до обслуговування [22].

Застосування таких вагових конвеєрів дозволяє побудувати контур регулювання подачі шихти.

6. Онлайн-вимірювання вологості шихти на конвеєрі

Вологість шихти є одним із найважливіших параметрів, що впливають на гранулометрію та хід процесу спікання. Для її безперервного контролю доцільно застосовувати мікрохвильові датчики вологості для сипких матеріалів.

Як приклад можна розглянути ENVEA M-Sens 3 / M-Sens WR3 – мікрохвильові датчики для неперервного вимірювання вологості сипких матеріалів на конвеєрних стрічках, шнеках чи у бункерах. Датчик забезпечує діапазон вимірювання до 65 % вологості (залежно від матеріалу), точність до 0,1 %, інтегроване вимірювання температури та підтримує виходи 4–20 мА та цифрові інтерфейси [23, 24].

Альтернативно для гірничих застосувань (залізорудні суміші, агломераційні шихти) можуть використовуватися MoistScan MA-500/MA-500HDi – мікрохвильові аналізатори вологості для монтажу на конвеєр (рис. 2.14), спеціально орієнтовані на рудні та вугільні потоки, що монтуються безпосередньо над/під стрічкою та забезпечують безперервний контроль вологості в реальному часі [25].

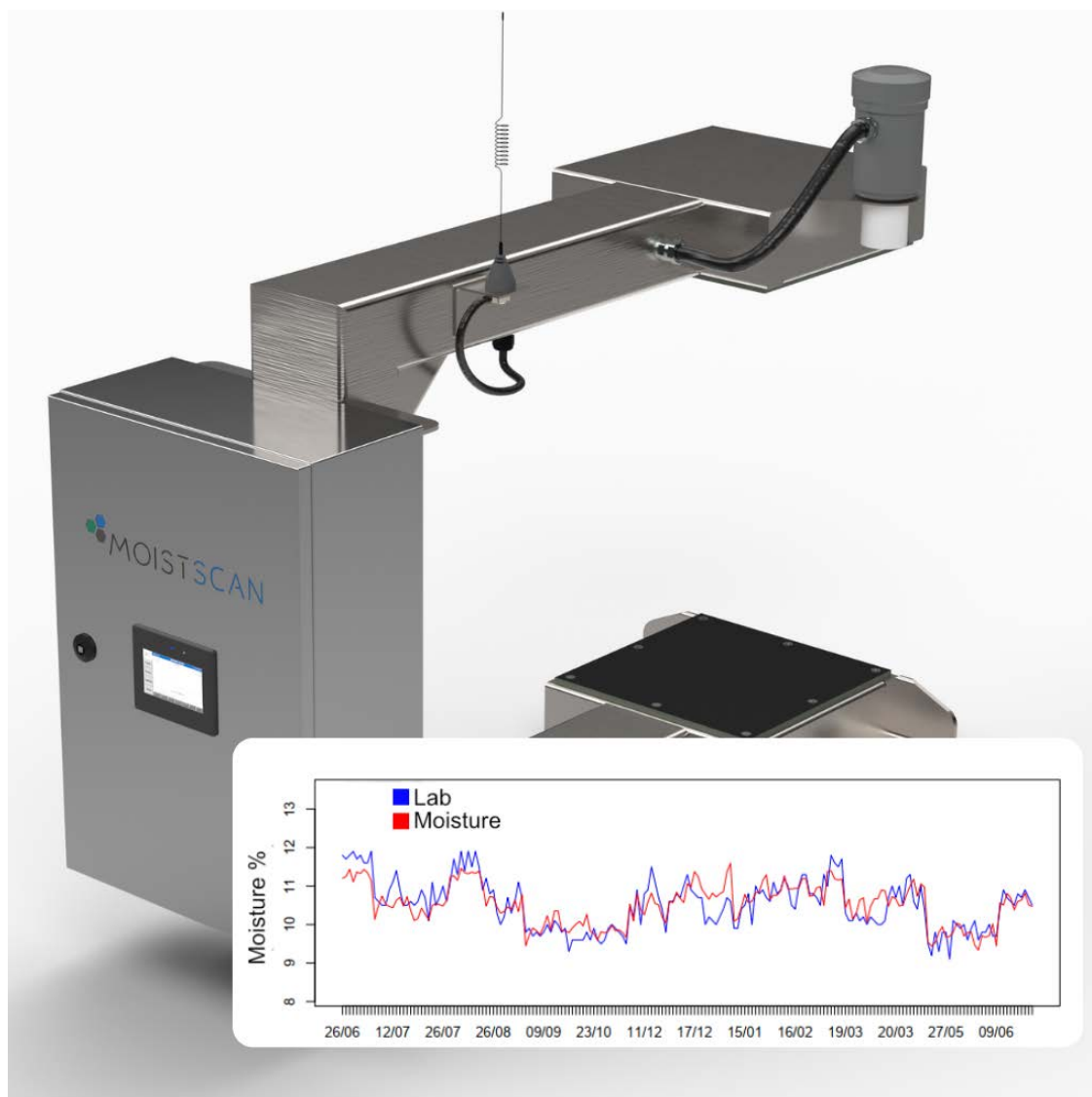


Рисунок 2.14 – Мікрохвильовий аналізатор вологості MoistScan MA-500

7. Рівень шихти у бункерах

Для контролю рівня шихти у високих бункерах і силосах доцільно застосовувати радарні рівнеміри для сипких продуктів, наприклад VEGA VEGAPULS 6X (рис. 2.15). Цей рівнемір працює на частотах 6, 26, 80 ГГц, забезпечує вузький кут спрямованості ($\approx 4^\circ$), може вимірювати рівень сипких матеріалів на висоту до 120 м та стійкий до пилу й налипання [26].



Рисунок 2.15 – Радарний вимірювач рівня VEGA VEGAPULS 6X

8. Швидкість стрічки агломашини та приводи

Рух палет агломераційної машини є одним із основних керуючих впливів на час спікання та положення ВТР. Доцільно застосувати наступну конфігурацію:

- асинхронний двигун серії ABB Process performance (M3BP) [27], розроблений для тяжких умов експлуатації, з високою надійністю та оптимізованою роботою з частотними перетворювачами в гірничій, цементній та подібних галузях;

- частотний перетворювач SINAMICS G120 (Siemens) – модульний перетворювач частоти, спеціально рекомендований для конвеєрних застосувань, з підтримкою енергоефективних режимів, інтегрованими функціями безпеки та можливістю взаємодії з ПЛК через Profinet/Profibus [28].

Вимірювання швидкості може здійснюватися або за даними енкодера на валу двигуна, або шляхом зчитування фактичної частоти/швидкості з перетворювача по мережевому протоколу.

9. Регулюючі клапани та позиціонери

Для регулювання витрати газу та повітря доцільно застосовувати високопродуктивні поворотні сегментні клапани з електропневматичними позиціонерами.

Сегментний V-подібний клапан Neles R-series (Valmet) є високоефективним регулюючим клапаном для рідин, газів, парів і суспензій, розрахованим на роботу в умовах високих витрат і широкого діапазону регулювання. Клапан постачається у діаметрах від 1" до 32", забезпечує легку установку та низький крутний момент, можливе оснащення шумогасним та антикавітаційним Q-Trim™ сегментом для газових і парових застосувань.

Для позиційного керування клапаном доцільно використати електропневматичний позиціонер SAMSON 3730-1, який приймає вхідний сигнал 4–20 мА, підтримує автоматичне калібрування, діапазон ходів 3,75–200 мм або кут повороту 24–100° та може монтуватися безпосередньо на лінійні або поворотні пневмоприводи згідно з NAMUR/VDI/VDE.

Така конфігурація (Neles R-series + SAMSON 3730-1) дозволяє реалізувати точне позиційне регулювання витрати газу й повітря для стабілізації температурного профілю та ВТР.

Таким чином, обрані засоби вимірювання та виконавчі механізми забезпечують повне покриття ключових параметрів агломераційного процесу (температура, тиск/розрідження, витрата газу й повітря, витрата шихти, вологість, рівень, швидкість стрічки); відповідають умовам експлуатації у гірничо-металургійному виробництві (високі температури, пил, агресивне середовище, безперервний режим роботи); підтримують стандартні інтерфейси сигналів 4–20 мА/HART та промислові шини, що забезпечує сумісність з сучасними ПЛК та SCADA-системами; мають виконання з підтримкою функціональної безпеки SIL2/3, що є важливим для реалізації захисту від аварійних режимів.

2.5 Вибір устаткування контролерного рівня

Контролерний рівень системи автоматизації процесу спікання шихти забезпечує збір інформації від первинних перетворювачів, формування керуючих впливів на виконавчі механізми, реалізацію алгоритмів регулювання (у тому числі MPC-керування) та інтеграцію з системами верхнього рівня (SCADA, MES, хмарні сервіси). З огляду на необхідність підтримки сучасних протоколів, можливість роботи з високорівневими мовами програмування та розширюваність за допомогою модулів вводу-виводу, у даному проєкті як базову платформу контролерного рівня обрано PLCnext Technology фірми Phoenix Contact.

Для реалізації функцій керування агломераційною машиною раціональним є використання контролера сімейства PLCnext Control AXC F для системи вводу-виводу Axioline F.

Контролер AXC F 2152 призначений для безпосереднього керування модулями Axioline F, має два Ethernet-інтерфейси та постачається у комплекті з конектором та базовим модулем локальної шини [29].

Він підтримує роботу в режимі PROFINET-контролера та PROFINET-пристрою, а також одночасне підключення до мережних та хмарних сервісів (PLCnext Engineer, інші інструменти).

Більш продуктивним варіантом є AXC F 3152, який, згідно з технічними даними, оснащено двоядерним процесором Intel® Atom® x5-E3930 (2×1,3 ГГц), працює під керуванням операційної системи реального часу на базі Linux (Yocto), підтримує програмування за стандартом IEC 61131-3 та на мовах високого рівня (C/C++, C#, MATLAB/Simulink), має до трьох незалежних Ethernet-інтерфейсів і допускає підключення до 63 модулів Axioline F по локальній шині [30].

Обидва контролери підтримують розширення за допомогою спеціалізованих модулів (модулі безпеки, додаткові Ethernet-інтерфейси, модулі ІІІ), що підключаються ліворуч від контролера, та дозволяють підключати до 63 модулів Axioline F на локальній шині.

У рамках даної роботи як основний процесорний модуль приймається PLCnext Control AXC F 2152, що забезпечує достатню продуктивність, підтримку

сучасних протоколів та можливість реалізації алгоритмів МРС-керування.

Обрана на попередньому етапі номенклатура засобів вимірювання передбачає, що основна частина вимірювальних каналів формує стандартні сигнали струму 4–20 мА (температура через перетворювачі, тиск/розрідження, витрати, вологість, рівень). Виконавчі механізми (частотні перетворювачі, позиціонери клапанів, приводи засувки) переважно керуються:

- аналоговими сигналами 4–20 мА (позиційні сигнали, завдання швидкості/витрати);
- дискретними сигналами 24 В DC (пуск/стоп, сигнали стану, аварійні сигнали).

Тому логічним є використання модульної системи Axioline F, яка забезпечує:

- єдину локальну шину з пропускнуою здатністю до 100 Мбіт/с;
- широкий асортимент модулів аналогового та дискретного вводу-виводу;
- можливість використання модулів з розширеним температурним діапазоном (ХС-версії) для монтажу у польових шафах.

Для підключення аналогових сигналів 4–20 мА від датчиків температури, тиску, витрати, вологості та рівня пропонується використати такі модулі Axioline F:

- AXL F AI8 XC 1F – модуль аналогового вводу на 8 каналів напруги/струму, призначений для використання в станції Axioline F, з розширеним температурним діапазоном (ХС-виконання) [31];
- AXL F AI4 I 1H – модуль аналогового вводу на 4 канали для сигналів струму (0/4–20 мА) [32].

Модуль AXL F AI8 XC 1F доцільно застосувати як універсальний для групи вимірювань (температури газів у вакуум-камерах, витрата повітря та газу, вологість шихти, рівень у бункерах), тоді як AXL F AI4 I 1H може бути використаний для окремих контурів, де потрібні тільки струмові входи (наприклад, трансмітери розрідження у декількох камерах).

Оскільки у попередньому підрозділі для високотемпературних вимірювань

були обрані терморпарі з головковими перетворювачами 4–20 мА, спеціалізовані терморезисторні/терморпарні модулі Axioline F (RTD/TC) у даному проєкті не є обов’язковими; однак у реальній промисловій реалізації можна розглянути застосування спеціалізованих температурних модулів Axioline F для підключення RTD/TC безпосередньо до ПЛК.

Для формування аналогових керуючих сигналів 4–20 мА (завдання положення регулюючих клапанів газу та повітря, завдання швидкості приводу палетної стрічки, завдання для частотно-регульованих вентиляторів) доцільно застосувати:

- AXL F AO4 1H – модуль аналогового виводу на 4 канали для вихідних сигналів напруги або струму [33].

Один модуль AO4 1H забезпечує до 4 незалежних аналогових виходів. У типовій конфігурації магістерського проєкту це дозволяє реалізувати:

- один вихід – завдання швидкості палет;
- один–два виходи – завдання витрати повітря та тиску/розрідження;
- один–два виходи – завдання витрати газу на запалювальний горн або положення додаткових заслінок.

За потреби кількість модулів AO4 1H може бути збільшено з кроком по 4 виходи.

Для підключення дискретних сигналів (стани кінцевих вимикачів, аварійні сигнали, сигнали «готовність», «пуск», «стоп», положення шиберів, тощо) пропонується використати:

- AXL F DI16/1 1H – модуль дискретного вводу на 16 входів 24 В DC, призначений для збору цифрових сигналів; модуль дозволяє змінювати час фільтрації входів, що підвищує завадостійкість та, за необхідності, дає змогу реалізувати лічильні функції при частоті до 5 кГц [34];

- AXL F DO16/1 1H – модуль дискретного виводу на 16 виходів 24 В DC, виходи захищені від короткого замикання та перевантаження [35].

Одна пара модулів DI16/1 1H + DO16/1 1H забезпечує до 16 дискретних входів та 16 дискретних виходів, що є достатнім для підключення:

- сигналів стану приводів конвеєрів, димососів, вентиляторів;
- сигналів від кінцевих вимикачів положення захисних кожухів, люків, дверей;
- дискретних команд «пуск/стоп», «аварійне вимкнення», «переведення у ручний/автоматичний режим»;
- сигналів стану клапанів (відкр./закр.) та шиберів.

У разі необхідності кількість цих модулів може бути масштабована відповідно до фактичної кількості дискретних каналів.

Запропонована конфігурація контролерного рівня (PLCnext AXC F 2152 + модулі Axioline F AI/ AO/DI/DO) повністю узгоджується з прийнятою на попередньому етапі номенклатурою засобів вимірювання та виконавчих механізмів:

- усі основні датчики (температура, тиск/розрідження, витрата, вологість, рівень) передають інформацію у стандартизованому сигналі 4–20 мА, сумісному з модулями AXL F AIx;
- регулюючі клапани та приводи (Neles, SAMSON, частотні перетворювачі тощо) сприймають керуючі сигнали у вигляді 4–20 мА, що забезпечується модулями AXL F AO4 1H;
- всі дискретні сигнали (кінцеві вимикачі, стан приводів, сигнали безпеки) обробляються модульною системою AXL F DI16/1 1H та AXL F DO16/1 1H;
- контролер AXC F 2152 забезпечує накопичення технологічних даних, реалізацію алгоритмів регулювання (у тому числі на основі математичних моделей у просторі станів) та обмін із системою SCADA і/або хмарними сервісами.

У таблиці 2.1 зведено інформацію про обрану конфігурацію ПЛК, типи та позиції розміщення модулів, а також підключені до модулів первинні перетворювачі та виконавчі механізми.

Таблиця 2.1 – Конфігурація ПЛК системи автоматизації процесу спікання шихти на агломераційній машині

№ модуля	Тип модуля Axioline F	Кількість та тип каналів	Підключені сигнали	Примітки
0	AXC F 2152	-	Центральний процесорний модуль	PROFINET/PLCnext, 2×ETH, керує всією станцією
1	AXL F AI8 XC 1F	8 AI (4–20 мА)	Температури газів у вакуум-камерах: – VC-TT-101 – Tg1; – VC-TT-102 – Tg2; – VC-TT-103 – Tg3; – VC-TT-104 – Tg4; – VC-TT-105 – Tg5; Температура горна: – IF-TT-301.	Термопари через перетворювачі 4–20 мА
2	AXL F AI8 XC 1F	8 AI (4–20 мА)	Тиск / розрідження: – VC-PT-401 – ΔP камера 1; – VC-PT-402 – ΔP камера 2; – VC-PT-403 – ΔP камера 3; Витрати: – SYS-FT-501 – витрата повітря; – IF-FT-601 – витрата газу.	ΔP -датчики та vortex-витратоміри
3	AXL F AI4 I 1H	4 AI (4–20 мА)	– RM-FT-801 – витрата шихти (стрічкові ваги); – RM-MT-802 – вологість шихти (мікрохвильовий датчик); – RM-LT-803 – рівень у бункері; – резерв для другого рівнеміра або датчика температури шару).	Струмові входи високої точності

Продовження табл. 2.1

4	AXL F AO4 1H	4 AO (4–20 мА)	Регулюючі впливи: – IF-FCV-601 – клапан подачі газу (позиціонер); – SYS-AOV-901 – клапан подачі повітря; – VC-DV-911 – заслінка вакуум-камери (позиційне регул.); – PS-ST-701 – завдання	Основні керуючі виходи
---	--------------	----------------	--	------------------------

			швидкості на ПЧ стрічки.	
5	AXL F DI16/1 1H	16 DI, 24 B	Сигнали стану: – PS-MTR-701-FB – стан приводу палетної машини – SYS-FAN-FB – стан вентилятора / димососа – VC-DV-911-ZSO – заслінка «відкрита» – VC-DV-911-ZSC – заслінка «закрита» – IF-FCV-601-ZSO/ZSC – стан газового клапана – датчики аварій/межових станів – двері/кожухи – кінцевики безпеки	Вхідні дискретні сигнали
6	AXL F DO16/1 1H	16 DO, 24 B	Керування обладнанням: – Команда PS-MTR-701 (пуск/стоп); – Пуск/стоп SYS-FAN-501 (димосос/вентилятор); – IF-BURN-ON – запалювання горна; – Управління допоміжними конвеєрами; – Аварійні команди.	Захищені транзисторні виходи
7	Резерв	-	Резерв для додаткових модулів	Розширення станції

Таким чином, запропонована архітектура контролерного рівня є узгодженою, модульною та розширюваною, забезпечує необхідну кількість каналів вводу-виводу для автоматизації процесу спікання шихти на агломераційній машині та створює основу для реалізації розроблених у роботі алгоритмів MPC-керування та візуалізації процесу у SCADA-системі.

Висновки за розділом:

У розділі проведено комплексне дослідження процесу спікання агломераційної шихти, що дозволило сформувати математично обґрунтовану

основу для подальшого аналізу та синтезу системи автоматизованого керування тепловим режимом агломераційної машини.

Розглянуто фізичну сутність теплових, масообмінних і газодинамічних процесів, що супроводжують рух газового потоку крізь шар шихти під час спікання. Встановлено основні залежності, які визначають динаміку температурного поля в шарі та газовому потоці, а також взаємозв'язки між технологічними параметрами – продуктивністю, витратою палива, інтенсивністю повітряного дуття та швидкістю переміщення стрічки. Сформовано систему рівнянь, яка достатньо точно відображає ключові закономірності перебігу теплового процесу.

Створено фізично обґрунтовану багатозонну модель агломераційної машини з урахуванням теплопровідності, конвекції та міжфазного теплообміну. Для зручності синтезу регуляторів модель було лінеаризовано навколо усталеного режиму та дискретизовано для подальшої роботи в контурі модельно-прогнозного керування (МРС). Проведено моделювання реакції системи на зміну уставок та збурень. Показано, що отримана модель адекватно відтворює реальні динамічні властивості теплового процесу: значну інерційність, сильні перехресні зв'язки між зонами та нерівномірність впливу різних керуючих дій.

Виконано формалізацію вимог до інформаційного забезпечення системи автоматизації, визначено перелік контрольованих та керованих параметрів, сформульовано вимоги до точності, швидкодії та діапазону вимірювання засобів контролю. Окреслено архітектуру інформаційних потоків у системі, визначено вимоги до збору, обробки та передачі технологічних даних для забезпечення надійної роботи системи керування. Особливу увагу приділено вимогам до достовірності вимірювання температурних характеристик та тиску газового потоку, оскільки ці параметри мають визначальний вплив на формування якісного ВТР (вихідного температурного режиму).

Проведено аналіз можливих типів первинних вимірювальних перетворювачів, температурних датчиків, витратомірів, тискомірів та аналізаторів складу газів. На основі порівняння метрологічних характеристик,

умов експлуатації та вимог до точності обрано оптимальні засоби контролю для агломераційного процесу. Виконано вибір виконавчих механізмів для регулювання витрати повітря, подачі палива та швидкості руху агломашини, з урахуванням їх динамічних характеристик та надійності роботи в умовах високих температур та запиленості.

На основі аналізу вимог до системи керування – потреби в обробці великої кількості вимірювальних сигналів, реалізації складних алгоритмів керування (зокрема MPC) – обґрунтовано вибір сучасних промислових програмованих логічних контролерів та засобів периферійного вводу/виводу. Обраний тип контролера Phoenix Contact PLCnext AXC F 2152 забезпечує необхідну продуктивність, мережеву взаємодію, можливість інтеграції з SCADA та системами верхнього рівня, а також відповідність умовам експлуатації агломераційних фабрик.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ СПІКАННЯ ШИХТИ НА АГЛОМЕРАЦІЙНІЙ МАШИНИ

3.1 Обґрунтування вибору програмного забезпечення для реалізації системи керування та візуалізації процесу спікання

Ефективна реалізація системи автоматизованого керування та візуалізації складного технологічного процесу спікання шихти на агломераційній машині потребує обґрунтованого вибору як апаратних, так і програмних засобів. З огляду на просторово-розподілений характер процесу, наявність значних теплових інерцій, взаємозв'язок між параметрами шару та газового потоку, а також вимоги до надійності, масштабованості та інтеграції сучасних алгоритмів керування (зокрема MPC), ключову роль відіграє програмне забезпечення контролерного та операторського рівнів.

У межах даної роботи у якості базової платформи автоматизації обрано програмно-апаратний комплекс PLCnext компанії Phoenix Contact. Даний вибір зумовлений поєднанням класичних функцій програмованих логічних контролерів з відкритою архітектурою, що відповідає концепціям Industry 4.0 та Industrial IoT. Контролери PLCnext забезпечують підтримку стандартів IEC 61131-3, а також можливість використання мов високого рівня (C/C++, Python), що є особливо актуальним для реалізації алгоритмів оптимального та прогнозуючого керування.

Для розробки прикладного програмного забезпечення контролерного рівня у роботі використовується середовище PLCnext Engineer, яке є основним інструментом програмування контролерів PLCnext. Дане середовище забезпечує:

- розробку програм керування відповідно до стандарту IEC 61131-3;
- конфігурацію апаратних ресурсів контролера та мережевих інтерфейсів;

- інтеграцію функціональних блоків для збору, обробки та передачі технологічних даних;

- підтримку обміну даними з системами верхнього рівня через промислові протоколи (OPC UA, MQTT, Modbus TCP).

Застосування PLCnext Engineer дозволяє реалізувати єдиний інформаційний простір для задач керування та візуалізації, що суттєво спрощує супровід і масштабування системи автоматизації.

Важливим аспектом розроблюваної системи є організація операторського інтерфейсу, який забезпечує відображення ключових технологічних параметрів процесу спікання, таких як температура газів у зонах агломераційної машини, положення фронту спікання (ВТР), а також поточні значення керуючих дій (швидкість стрічки, витрати повітря та палива). З цією метою у роботі використано вбудовані засоби розробки HMI, що входять до складу екосистеми PLCnext.

Однією з принципових переваг обраного підходу є можливість створення веб-орієнтованої системи візуалізації, доступної через стандартний браузер без необхідності встановлення спеціалізованого клієнтського програмного забезпечення. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям розвитку промислових HMI/SCADA-систем та забезпечує:

- платформну незалежність операторського інтерфейсу;
- зручність віддаленого доступу до системи керування;
- спрощення інтеграції з корпоративними інформаційними системами підприємства.

Крім того, використання вбудованих HMI-засобів PLCnext дозволяє безпосередньо пов'язати елементи візуалізації з внутрішніми змінними програми ПЛК, що мінімізує затримки при оновленні даних та підвищує достовірність відображення технологічного стану об'єкта керування.

Таким чином, вибір програмного забезпечення PLCnext Engineer у поєднанні з вбудованими веб-засобами розробки HMI є технічно та методологічно обґрунтованим для реалізації системи керування і візуалізації

процесу спікання шихти на агломераційній машині. Обрана платформа забезпечує необхідний функціонал для впровадження сучасних алгоритмів керування, зручний операторський інтерфейс та відповідає актуальним вимогам до промислових систем автоматизації.

3.2 Програмна реалізація системи візуалізації процесу керування спіканням шихти на агломашині

При розробці системи візуалізації технологічного процесу спікання шихти на агломераційній машині доцільно дотримуватися ієрархічного підходу до побудови НМІ-екранів. Такий підхід відповідає сучасним принципам людино-машинного інтерфейсу (HMI), рекомендаціям стандартів ISA-101 та забезпечує зручність сприйняття інформації, швидку орієнтацію оператора у стані технологічного процесу та можливість оперативного прийняття рішень.

З урахуванням складності та протяжності агломераційного процесу, а також особливостей реалізованої системи керування (у тому числі застосування МРС-алгоритму для стабілізації температури точки прогару ВТР), структура НМІ пропонується у вигляді кількох взаємопов'язаних екранів, кожен з яких виконує чітко визначену функцію.

Головний екран є центральним елементом системи візуалізації та призначений для узагальненого відображення стану всього технологічного процесу спікання шихти.

На даному екрані розміщено спрощену технологічну схему агломераційної фабрики, що відображає основні вузли процесу: дозування, змішування, грануляція, спікання, газоочищення, охолодження (рис. 3.1). На даному екрані відображаються ключові контрольовані параметри процесу, такі як подачі та вологість шихти, швидкість обертання гранулятора, характерні температури газового тракту (T_{g4} , T_{g5}), а також основні керуючі дії – витрата палива, витрата повітря (тяга), швидкість конвеєра агломашини.

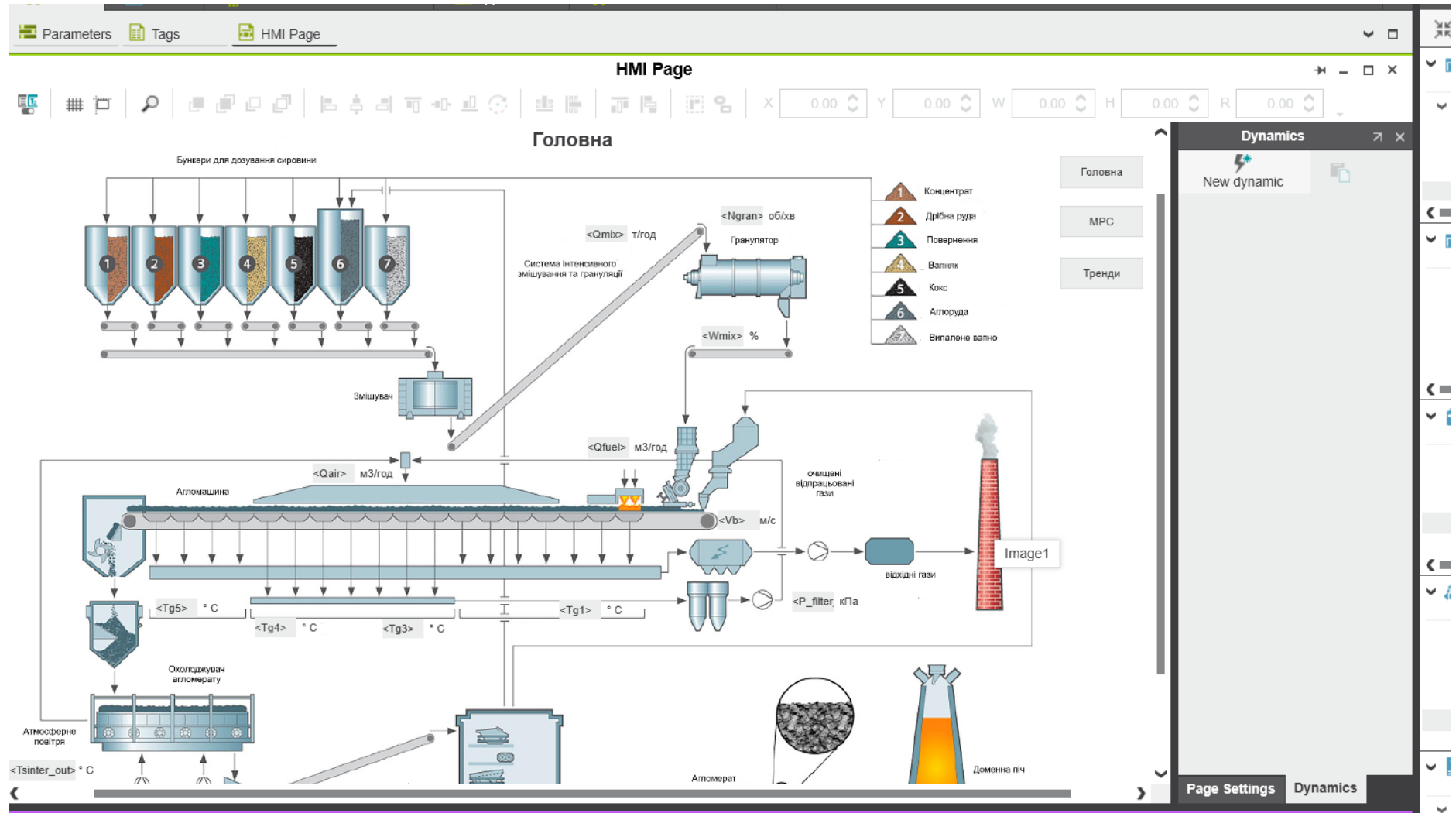


Рисунок 3.1 – Головний екран системи візуалізації процесу спікання шихти у режимі розробки

Також відображаються загальні повідомлення про аварійні або попереджувальні стани.

Головний екран орієнтований насамперед на оперативний контроль та використовується оператором у штатному режимі роботи.

Дана сторінка (рис. 3.1) встановлена як стартова сторінка проєкту (Startup Page) і відображається першою при запуску системи візуалізації.

Першим етапом процесу проєктування інтерфейсу системи візуалізації було визначення необхідних змінних з типом Usage = External (рис. 3.2) та зв'язування їх зі змінними у організаційних блоках програми (POU).

Variable (PLC)	Type	Usage	Comment	Init	Retain	Constant	OPC	HMI	IoT
Qmix	REAL	Global	Загальна витрата шихти	REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
Wmix	REAL	Global	Вологість шихти	REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
Ngran	REAL	Global	Швидкість обертання гранулятора	REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
BTP	REAL	Global	Положення BTP	REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
BTP_SP	REAL	Global	Уставка BTP	REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
BTP_delta	REAL	Global	Відхилення BTP від уставки	REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
Tg1	REAL	Global	Температура газового тракту т.1	REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
Tg2	REAL	Global	Температура газового тракту т.2	REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
Tg3	REAL	Global	Температура газового тракту т.3	REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
Tg4	REAL	Global	Температура газового тракту т.4	REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
Tg5	REAL	Global	Температура газового тракту т.1	REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
Vb	REAL	Global	Швидкість конвеєра машини	REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
Qair	REAL	Global	Витрата повітря	REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
Qfuel	REAL	Global	Витрата газу	REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
Tsinter_out	REAL	Global	Температура повітря на виході з...	REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
Fspeed	REAL	Global	Частота обертання екскаватора	REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
P_filter_delta	REAL	Global	Перепад тиску у газоочистці	REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
Filter_state	BOOL	Global	стан електрофільтру (робота / а...	FALSE	☐	☐	☐	☐	☐
Gran_state	BOOL	Global	стан гранулятора (робота / аварія)	FALSE	☐	☐	☐	☐	☐
Conveyor_state	BOOL	Global	стан приводу конвеєра (робота / ...	FALSE	☐	☐	☐	☐	☐
Cooler_state	BOOL	Global	стан охолодження (робота / аварія)	FALSE	☐	☐	☐	☐	☐

Рисунок 3.2 – Вікно визначення змінних проєкту

На наступному кроці для створення головної сторінки було завантажено зображення технологічної схеми процесу, яке використовується як фон, на якому розміщені усі основні HMI-елементи.

Для відображення поточних значень контрольованих параметрів використовуються елементи керування типу Text, які прив'язуються до відповідних змінних процесу з використанням налаштувань анімації на вкладці

Dynamics. Так, на рис. 3.3 наведено виконані налаштування елементу Text для відображення вологості шихти.

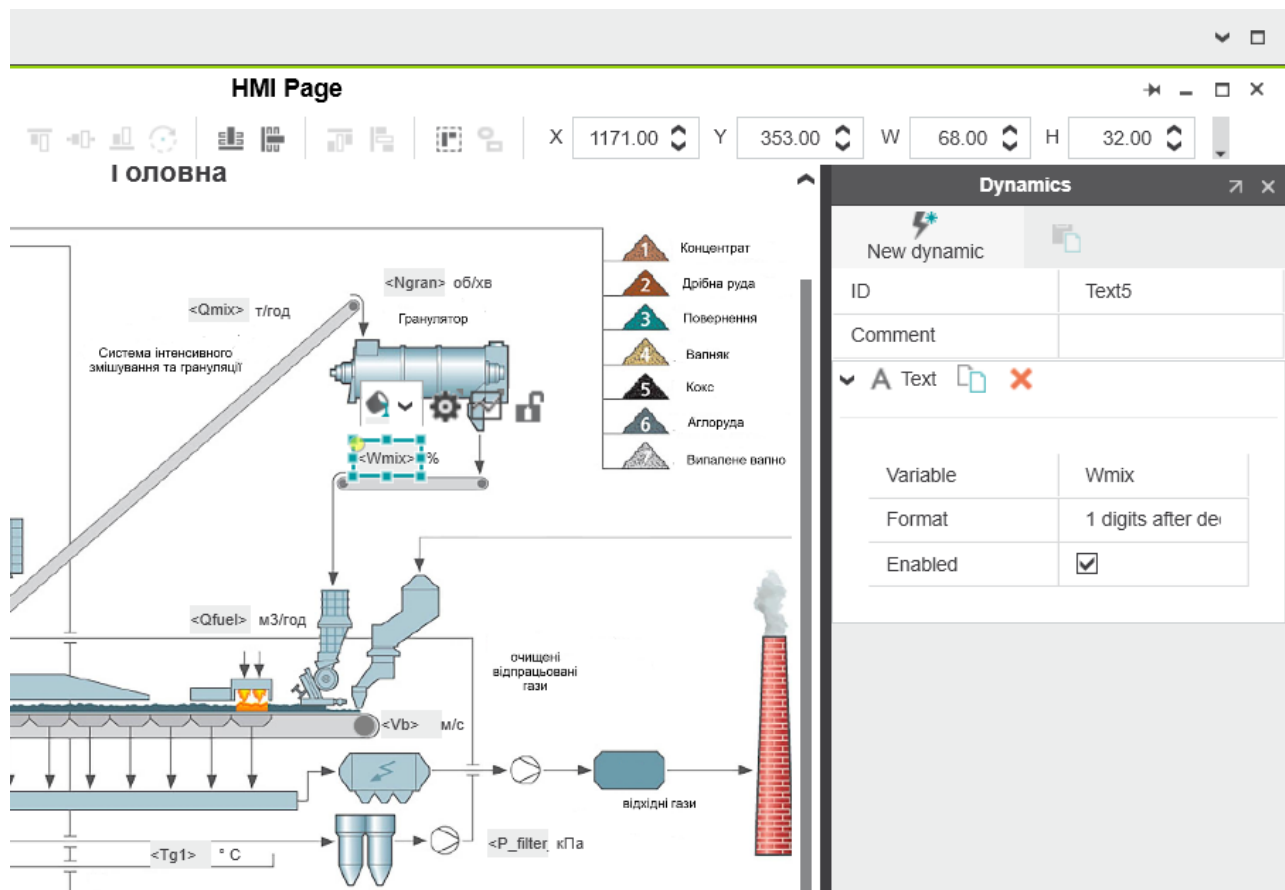


Рисунок 3.3 – Налаштування візуалізації числових значень змінних процесу

На рис. 3.11 відображається, зокрема, і прив'язка полів до змінних, визначених у блоках коду проєкту, тож можна встановити, які саме параметри будуть відображатися під час роботи системи SCADA у режимі виконання (у runtime). Для кожного числового значення, що відображається, також було додано одиниці вимірювання.

Для відображення дискретних тегів, що характеризують стан роботи устаткування, було використано елементи типу Ellipse, для яких виконано налаштування анімації типу Fill. Так, на рис. 3.4 наведено процес налаштування відповідної анімації для стану роботи привода головного конвеєра агломераційної машини.

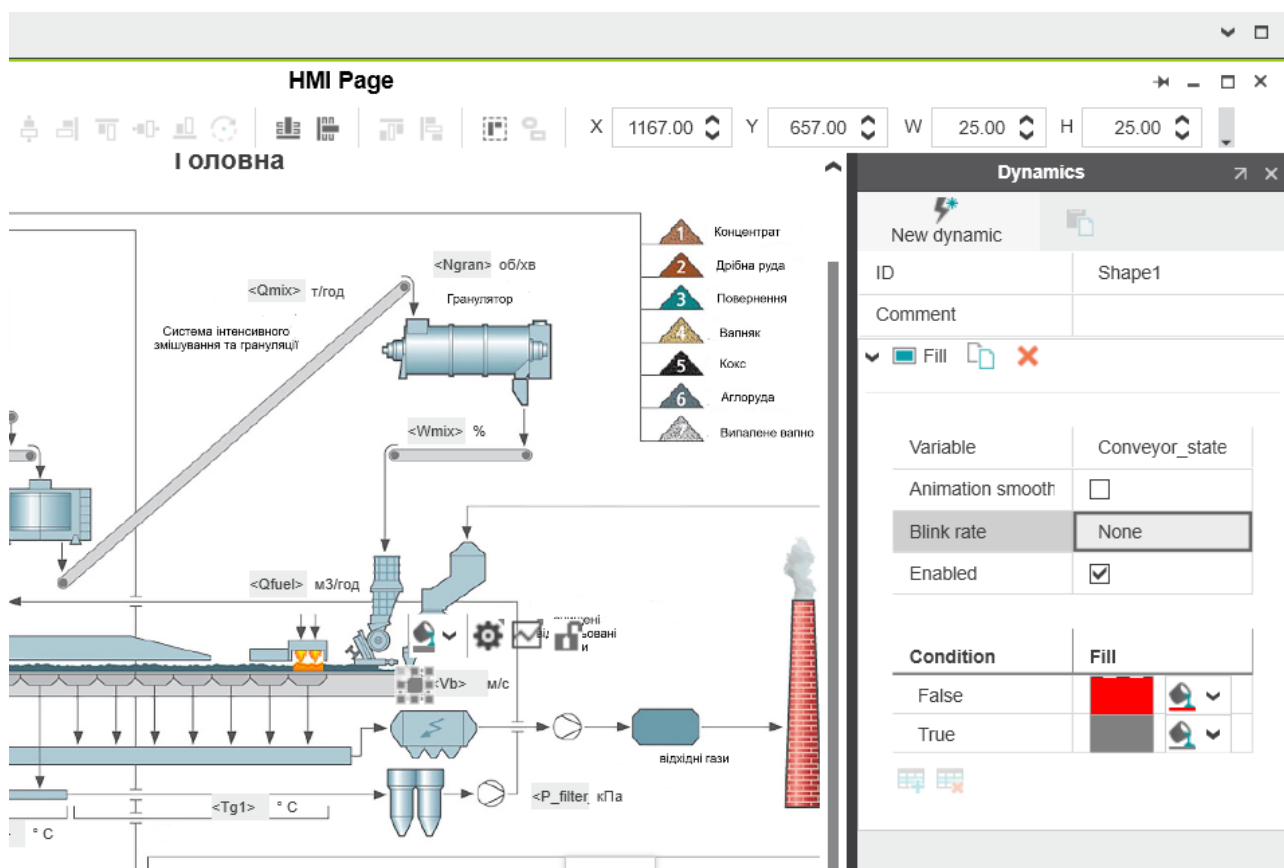


Рисунок 3.4 – Налаштування візуалізації стану роботи приводів механізмів

Для переходів між основними сторінками на кожній сторінці передбачено блок кнопок (елемент керування Button) з назвами відповідних сторінок. Для кожної кнопки на сторінці налаштовано дію Load Page, яка спрацьовує при натисканні (рис. 3.5). Для кнопки МРС, яка надає доступ до екрану налаштування параметрів МРС-регулятора, встановлено обмеження на рівень доступу користувача (рис. 3.6). Як видно на наведеному скріні, змінити параметри регулятора може тільки користувач, який має рівень прав більший за 1 (тобто, наприклад, інженер з автоматизації).

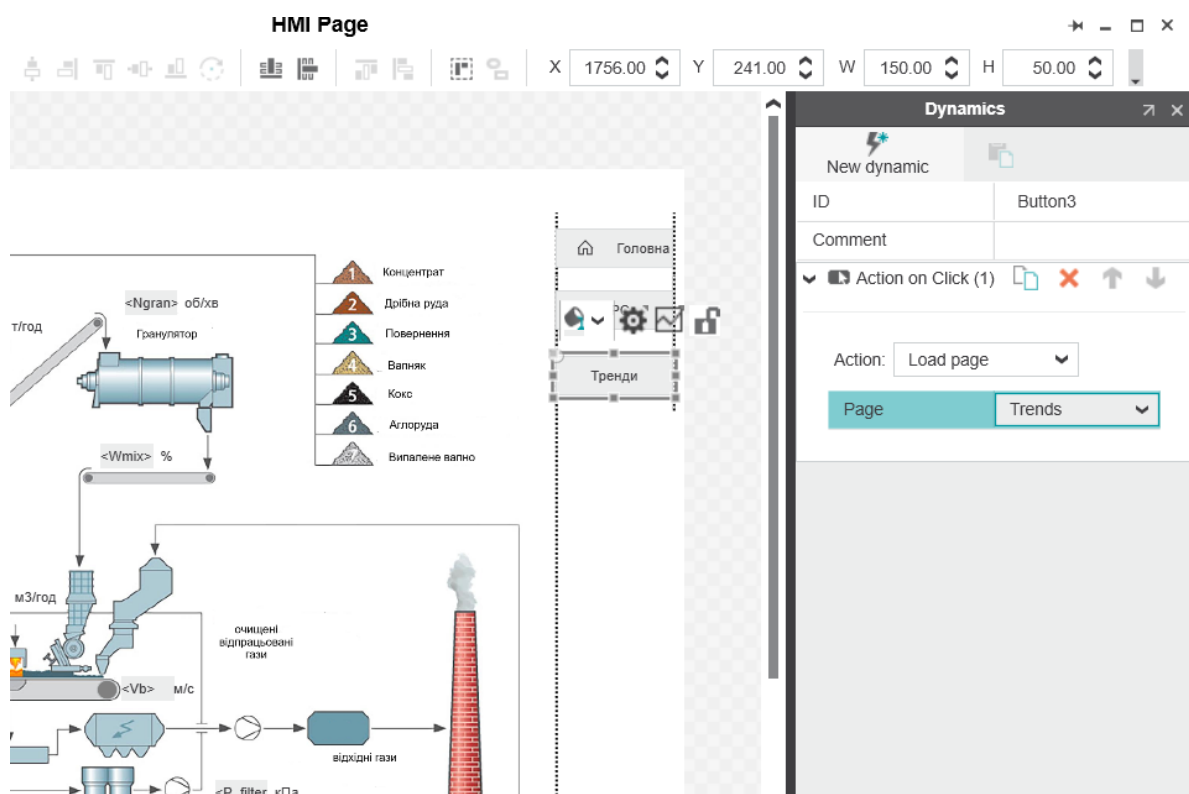


Рисунок 3.5 – Налаштування відкриття сторінки Трендів при натисканні на кнопку «Тренди»

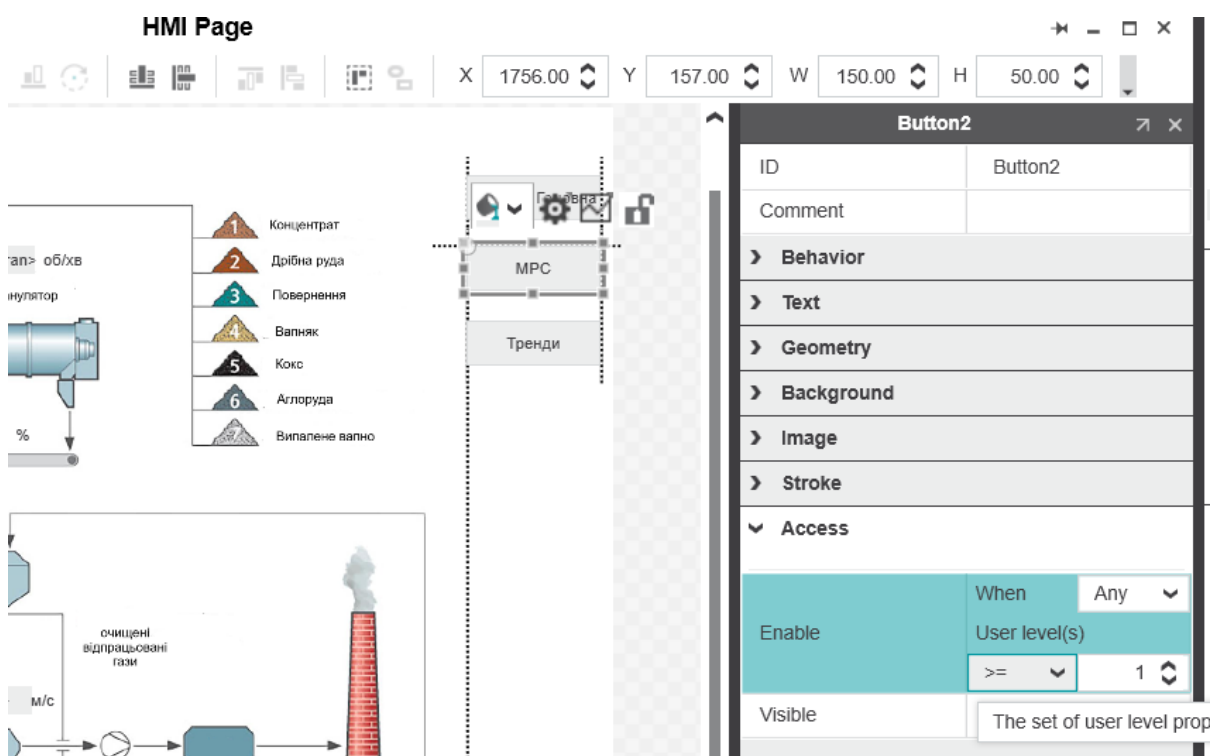


Рисунок 3.6 – Налаштування рівня доступу для кнопки «MPC»

Екран «МРС» орієнтований на контроль роботи алгоритмів автоматичного керування, зокрема МРС-контролера.

На ньому екрані розміщено (рис. 3.7):

- уставку по відносному положенню профілю вигорання палива;
- поточні значення регульованих параметрів (BTC, Tg4, Tg5);
- поля для налаштування горизонтів прогнозування та керування;
- поля для завдання значення пріоритетів точності відстеження уставок по всім керованим величинам;
- поля для завдання ваг штрафної функції по максимальним швидкостям зміни керуючих дій (швидкість стрічки, витрата повітря, витрата палива);

Цей екран використовується переважно інженерно-технічним персоналом під час налагодження та аналізу роботи системи керування, а також для оцінки ефективності МРС у порівнянні з класичними регуляторами.

Для введення даних від користувачів системи використовуються елементи TextInput. Для зв'язування елементів з тегами використовується анімація типу Text. На рис. 3.7 показано прив'язування змінної, що відповідає за налаштування горизонту прогнозування, до елемента TextInput.

Для забезпечення можливості змінення уставки по відносному положенню точки повного вигорання палива (ВТР) використано елемент керування Slider Horizontal, для якого встановлено параметр «SliderValue». Зв'язок з конкретним тегом забезпечується за рахунок визначення параметру «Source Value» (рис. 3.8).

Для відображення поточних значень основних керованих параметрів використано елементи керування Bar Graph Horizontal. На вкладці Settings даного елемента встановлені значення одиниць вимірювання, мінімальне та максимальне значення шкали, а також виконано прив'язку до відповідних керованих змінних (рис. 3.9). На вкладці Parameters елемента керування виконано прив'язку до відповідної змінної.

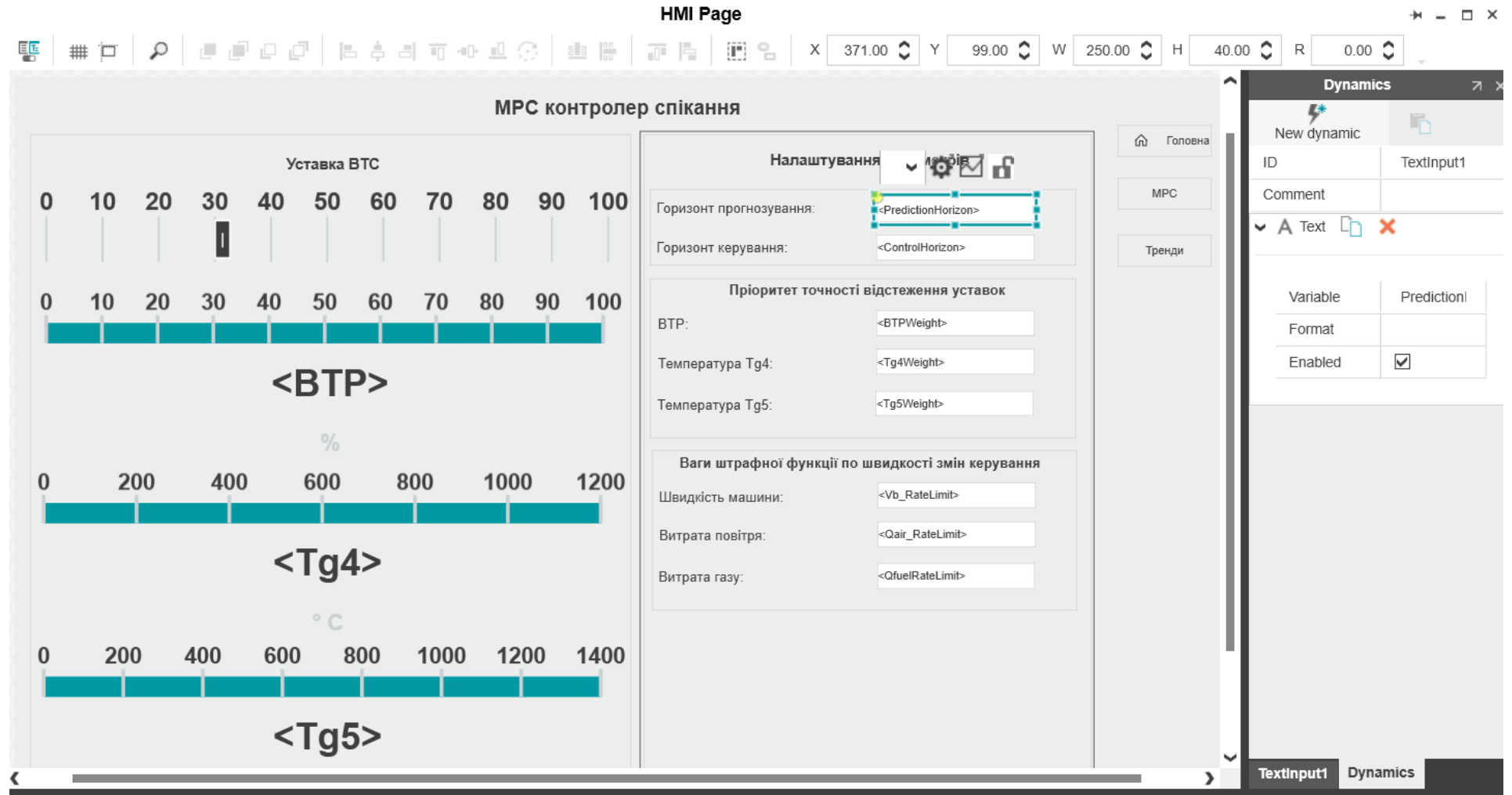


Рисунок 3.7 – Екран налаштування параметрів MPC-регулятора

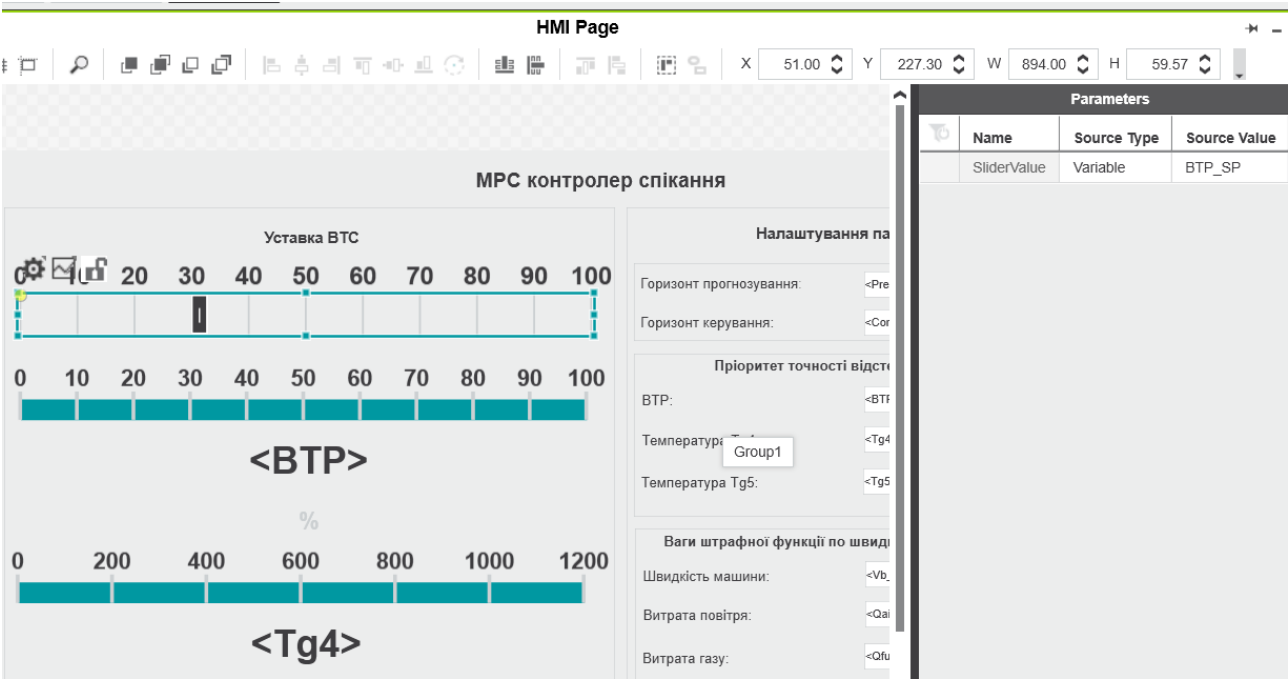


Рисунок 3.8 – Налаштування елемента керування Slider Horizontal для встановлення уставки по параметру BTC

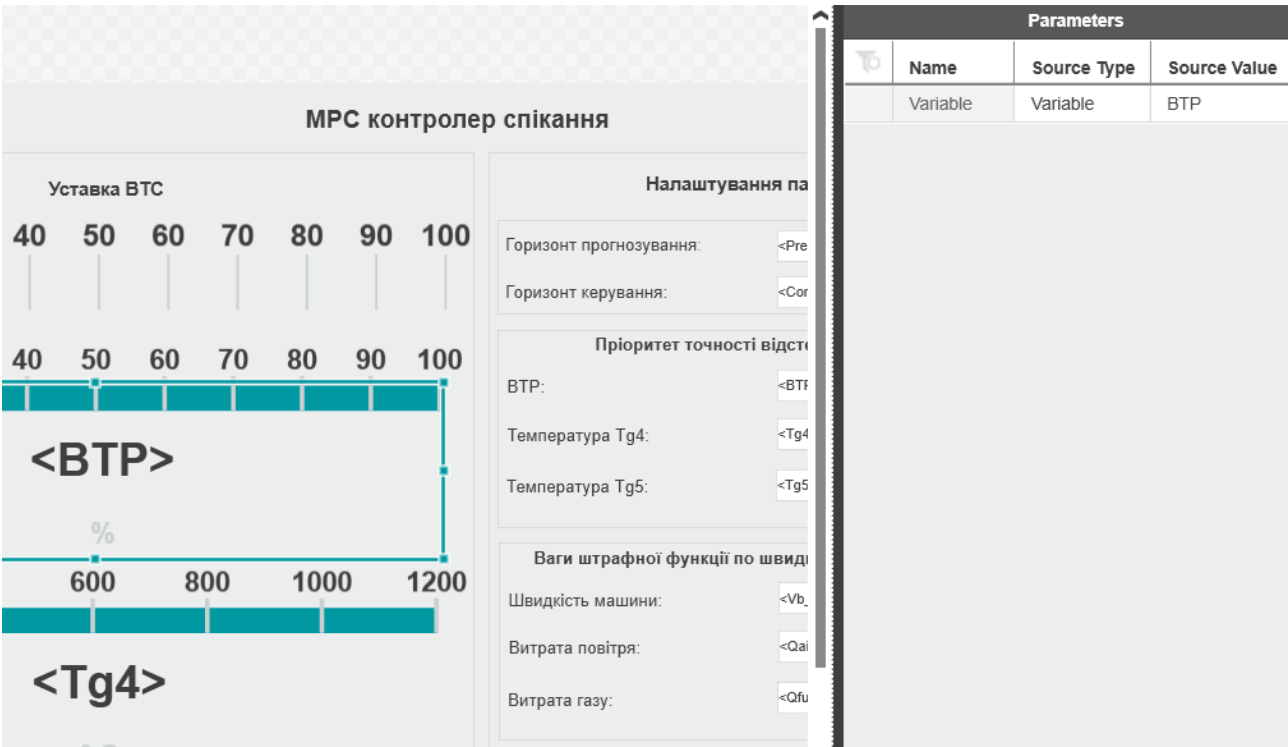


Рисунок 3.9 – Налаштування елемента керування Bar Graph Horizontal для відображення основних керованих параметрів процесу

Отже, аналіз розробленої системи візуалізації показує, що запропонована структура HMI-екранів забезпечує:

- логічне розділення інформації за функціональним призначенням;
- зменшення інформаційного навантаження на оператора;
- підтримку як оперативного керування, так і глибокого аналізу процесу.

Така організація інтерфейсу є добре узгодженою з можливостями PLCnext Engineer та вбудованих веб-HMI-засобів і створює зручну основу для подальшої реалізації та розширення системи візуалізації. Структура екранів відповідає сучасним вимогам виробництва та стандарту ISA-101.

Висновки за розділом

У третьому розділі кваліфікаційної роботи було розглянуто питання розробки системи візуалізації технологічного процесу спікання шихти на агломераційній машині як важливої складової сучасної системи автоматизації агломераційної фабрики. Основна увага була зосереджена на забезпеченні наочності відображення складного багатопараметричного процесу та підтримці ефективної роботи оператора.

У ході виконання розділу обґрунтовано вибір апаратно-програмної платформи для реалізації системи керування та візуалізації. Показано доцільність використання програмно-апаратного комплексу PLCnext компанії Phoenix Contact та середовища PLCnext Engineer, які забезпечують поєднання класичних функцій програмованого логічного контролера з сучасними можливостями інтеграції, відкритої архітектури та підтримки веб-орієнтованих HMI-рішень.

Розроблено концепцію структури HMI-системи, що базується на ієрархічному поділі операторських екранів за функціональним призначенням. Запропонована структура включає головний оглядовий екран, екран налаштувань MPC-регулятора, а також екран аналізу трендів. Такий підхід дозволяє зменшити

інформаційне навантаження на оператора та забезпечити швидку орієнтацію у стані технологічного процесу.

Особливу увагу приділено побудові головного НМІ-екрана у вигляді інтерактивної технологічної мнемосхеми агломераційної фабрики. Відображення основних параметрів процесу здійснюється безпосередньо у прив'язці до відповідних технологічних механізмів, що підвищує інтуїтивність сприйняття інформації та дозволяє оперативно оцінювати вплив керуючих дій на перебіг процесу спікання.

Реалізована система візуалізації забезпечує відображення поточних значень технологічних параметрів, станів виконавчих механізмів, режимів роботи алгоритмів керування, а також підтримує побудову трендів і аналіз динаміки процесу. Використання веб-орієнтованого НМІ дозволяє забезпечити платформну незалежність операторського інтерфейсу та можливість віддаленого доступу до системи керування.

Таким чином, у третьому розділі розроблено та обґрунтовано структуру системи візуалізації, яка відповідає сучасним вимогам до промислових НМІ-систем, узгоджується з реалізованою системою автоматичного керування та створює передумови для підвищення ефективності, надійності та безпеки керування процесом спікання шихти на агломераційній машині.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У кваліфікаційній роботі магістра розглянуто та вирішено комплекс науково-практичних задач, пов'язаних з автоматизацією процесу спікання шихти на агломераційній машині, розробкою алгоритмів керування та створенням системи візуалізації технологічного процесу з використанням сучасних програмно-апаратних засобів.

Проаналізовано технологічний процес спікання шихти з точки зору задач автоматизації та керування. Встановлено, що агломераційний процес є складним багатозонним об'єктом із просторово-розподіленими параметрами, значною тепловою інерційністю, нелінійністю та наявністю взаємопов'язаних керуючих дій. Показано, що фронт вигорання палива (Burn Through Point, ВТР) є інтегральним показником, який визначає ефективність та стабільність процесу спікання і безпосередньо впливає на якість готового агломерату.

Виконано огляд існуючих рішень та підходів до автоматизації агломераційних машин, включаючи традиційні системи керування на базі традиційних ПІДР-регуляторів та сучасні АРС-рішення. Визначено обмеження класичних методів регулювання при керуванні складними МІМО-об'єктами, що обґрунтовує доцільність застосування сучасних оптимізаційних алгоритмів, зокрема модельно-прогнозуючого керування.

Розроблено математичну модель процесу спікання шихти, яка враховує теплові та газодинамічні характеристики агломераційної машини, а також зональну структуру процесу. На основі моделі виконано імітаційне моделювання, що дозволило дослідити динамічні властивості процесу та вплив керуючих дій на положення фронту спікання.

Реалізовано систему модельно-прогнозуючого керування температурою точки прогару, яка забезпечує врахування багатовимірності процесу, обмежень на керувальні сигнали та прогнозування майбутньої поведінки об'єкта керування. Проведено порівняльний аналіз МРС- та класичного ПІД-регулювання, за

результатами якого підтверджено переваги MPC у задачах стабілізації ВТР та координації керуючих дій у складному технологічному процесі.

Обґрунтовано вибір програмно-апаратних засобів автоматизації та реалізації системи візуалізації. Показано доцільність використання контролера PLCnext компанії Phoenix Contact та середовища PLCnext Engineer, які забезпечують підтримку сучасних алгоритмів керування, відкриту архітектуру та можливість інтеграції з веб-орієнтованими HMI-системами.

Розроблено структуру та концепцію системи візуалізації технологічного процесу спікання, що базується на ієрархічній організації HMI-екранів та використанні інтерактивної технологічної мнемосхеми. Запропонована система візуалізації забезпечує наочне відображення стану процесу, ключових технологічних параметрів і керуючих дій, а також підтримує аналіз динаміки процесу та ефективну роботу оператора.

Отримані у роботі результати підтверджують доцільність застосування модельно-прогнозуючого керування та сучасних засобів візуалізації для автоматизації процесу спікання шихти на агломераційних машинах. Розроблені математичні моделі, алгоритми керування та HMI-рішення можуть бути використані при проєктуванні й модернізації систем автоматизації агломераційних фабрик, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців у галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій..

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Automation and Control System of Sinter Plant. URL: <https://www.ispatguru.com/automation-and-control-system-of-sinter-plant> (дата звернення: 05.11.2025).
2. Monitoring Sintering Burn-Through Point Using Infrared Thermography / R. Usamentiaga та ін. Sensors. 2013. Т. 13, № 8. С. 10287–10305. URL: <https://doi.org/10.3390/s130810287> (дата звернення: 05.11.2025).
3. Mohit D K., Pavan N P., Tanvi N C. Concept of Sinter Plant Using Automation. International Journal of Advanced Research. 2014. Т. 2, № 4. С. 196–198. URL: https://www.journalijar.com/uploads/2014/04/583_IJAR-3059.pdf (дата звернення: 05.11.2025).
4. Myllymäki P., Poutiainen J. Sintering machine burn-through management by fuzzy speed control. IFAC Proceedings Volumes. 2000. Т. 33, № 22. С. 161–165. URL: [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)36985-9](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)36985-9) (дата звернення: 05.11.2025).
5. Iron ore sintering. Part 3: Automatic and control systems / A. Cores та ін. DYNA. 2015. Т. 82, № 190. С. 227–236. URL: <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n190.44054> (дата звернення: 05.11.2025).
6. Kim Y. H., Kwon W. H. An application of min–max generalized predictive control to sintering processes. Control Engineering Practice. 1998. Т. 6, № 8. С. 999–1007. URL: [https://doi.org/10.1016/s0967-0661\(98\)00097-5](https://doi.org/10.1016/s0967-0661(98)00097-5) (дата звернення: 06.11.2025).
7. An intelligent control system based on prediction of the burn-through point for the sintering process of an iron and steel plant / M. Wu та ін. Expert Systems with Applications. 2012. Т. 39, № 5. С. 5971–5981. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.11.118> (дата звернення: 06.11.2025).
8. Hybrid Prediction Model of Burn-Through Point Temperature with Color Temperature Information from Cross-Sectional Frame at Discharge End / M. Zhao та

ін. Energies. 2025. Т. 18, № 14. С. 3595. URL: <https://doi.org/10.3390/en18143595> (дата звернення: 06.11.2025).

9. ABB Ability™ Expert Optimizer. Metals. URL: <https://new.abb.com/metals/digital-transformation-in-metals/abb-ability-expert-optimizer-for-metals> (дата звернення: 06.11.2025).

10. ABB landscapes. URL: https://landscapes.abb.com/steel/home/Sinter_pellet_plant (дата звернення: 06.11.2025).

11. Increase productivity, reduce energy. Metals. URL: <https://new.abb.com/metals/digital-transformation-in-metals/increase-productivity-reduce-energy> (дата звернення: 06.11.2025).

12. VAiron Sinter Optimizer: Maximize Sinter Plant Efficiency & Quality. Primetals. URL: <https://www.primetals.com/en/portfolio/solutions/agglomeration/sintering/vairon-sinter-optimizer/> (дата звернення: 06.11.2025).

13. Primetals Technologies Digitalizes Kardemir Sinter Plants. Primetals. URL: <https://www.primetals.com/en/news/primetals-technologies-enhances-digitalization-at-kardemir-s-sinter-plants-in-karab-k> (дата звернення: 06.11.2025).

14. Optimus Sinter - Metso. URL: <https://www.metso.com/portfolio/optimus-sinter/> (дата звернення: 09.11.2025).

15. Kronberger T., Schaler M., Schönegger C. Latest Generation Sinter Process Optimization Systems. Sintering - Methods and Products / ред. V. Shatokha. 2012. С. 3–22. URL: <https://www.intechopen.com/books/2132>.

16. Prediction of Sinter Burn-Through Point Based on Support Vector Machines / X. Wu та ін. Intelligent Control and Automation. Lecture Notes in Control and Information Sciences : курс лекцій / ред.: D. Huang, K. Li, G. Irwin. 344-те вид. Berlin, Heidelberg, 2006. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-37256-1_88 (дата звернення: 09.11.2025).

17. iTHERM FlameLine TAF16 High temperature thermometer. Endress+Hauser. URL: <https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/temperature-measurement-thermometers-transmitters/high-temperature-thermocouple-taf16> (дата звернення: 09.11.2025).

18. iTEMP TMT142B temperature transmitter. Endress+Hauser. URL: <https://www.casc.endress.com/ru/Tailor-made-field-instrumentation/Temperature-measurement-thermometers-transmitters/iTEMP-TMT142B-temperature-transmitter> (дата звернення: 09.11.2025).

19. Absolute and gauge pressure Cerabar PMP71. Endress+Hauser. URL: <https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/pressure/Absolute-Gauge-Cerabar-PMP71> (дата звернення: 09.11.2025).

20. Differential pressure Deltabar PMD75. Endress+Hauser. URL: <https://www.eus.endress.com/en/field-instruments-overview/pressure/Differential-Pressure-Deltabar-PMD75> (дата звернення: 09.11.2025).

21. Proline Prowirl F 200 vortex flowmeter. Endress+Hauser. URL: <https://www.eus.endress.com/en/field-instruments-overview/flow-measurement-product-overview/vortex-flowmeter-prowirl-f200-7f2c> (дата звернення: 09.11.2025).

22. Belt weigher – MULTIBELT. Qlar. URL: <https://www.qlar.com/technologies/weighing/mass-flow-meters/multibelt-belt-weighers> (дата звернення: 09.11.2025).

23. M-Sens 3. Envea – Monitoring Solutions for Industries and Environment. URL: <https://envea.global/product/m-sens-3> (дата звернення: 09.11.2025).

24. Envea – Monitoring Solutions for Industries and Environment. URL: <https://envea.global/wp-content/uploads/2025/01/envea-m-sens-3-moisture-measurement-temperature-flow-pi-en.pdf> (дата звернення: 09.11.2025).

25. MOISTSCAN MA-500HDi On Belt Microwave Moisture Analyser for sale from Callidan Instruments - IndustrySearch Australia. IndustrySearch. URL: <https://www.industrysearch.com.au/moistscan-ma-500hdi-on-belt-microwave-moisture-analyser/p/36102> (дата звернення: 09.11.2025).

26. Radar level sensor THE 6X®. VEGA. URL: <https://www.vega.com/en/products/product-catalog/level/radar/vegapuls-6x> (дата звернення: 09.11.2025).

27. Process performance induction motors | ABB. ABB Group. URL: <https://www.abb.com/global/en/areas/motion/motors-generators/low-voltage-motors/iec-low-voltage-motors/process-performance-motors/process-performance-induction-motors> (дата звернення: 09.11.2025).

28. Модульний багатофункціональний перетворювач частоти SINAMICS G120. Siemens. URL: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/tekhnolohiyi-pryvodiv/sinamics/peretvoryuvachi-nyzkoyi-napruhy-sinamics/standartni-peretvoryuvachi-chastoty-sinamics/sinamics-g120.html> (дата звернення: 10.12.2025).

29. AXC F 2152 – Controller. PHOENIX CONTACT. URL: <https://www.phoenixcontact.com/uk-ua/produkcija/controller-axc-f-2152-2404267> (дата звернення: 11.11.2025).

30. AXC F 3152 – Controller. PHOENIX CONTACT. URL: <https://www.phoenixcontact.com/uk-ua/produkcija/controller-axc-f-3152-1069208> (дата звернення: 11.11.2025).

31. AXL F AI8 XC 1F - Analog module. PHOENIX CONTACT. URL: <https://www.phoenixcontact.com/uk-ua/produkcija/analog-module-axl-f-ai8-xc-1f-2701232> (дата звернення: 11.11.2025).

32. AXL F DI16/1 1H – Digital module. PHOENIX CONTACT. URL: <https://www.phoenixcontact.com/en-pc/products/i-o-module-axl-f-di16-1-1h-2688310> (дата звернення: 11.11.2025).

33. AXL F AO4 1H – Analog module. PHOENIX CONTACT. URL: <https://www.phoenixcontact.com/uk-ua/produkcija/analog-module-axl-f-ao4-1h-2688527> (дата звернення: 11.11.2025).

34. AXL F DI16/1 1H – Digital module. PHOENIX CONTACT. URL: <https://www.phoenixcontact.com/uk-ua/produkcija/digital-module-axl-f-di16-1-1h-2688310> (дата звернення: 11.11.2025).
35. AXL F DO16/1 1H - Digital module. PHOENIX CONTACT. URL: <https://www.phoenixcontact.com/uk-ua/produkcija/digital-module-axl-f-do16-1-1h-2688349> (дата звернення: 11.11.2025).
36. PLCnext Engineer online help. PLCnext Engineer online help. URL: <https://engineer.plcnext.help/> (дата звернення: 16.11.2025).
37. Маринич І. А., Тронь В. В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2022. 50 с.
38. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).
39. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).
40. 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)
41. 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)