МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проєкт)

другого (магістерського) рівня освіти
(рівень вищої освіти)

на тему Комплексна модернізація автоматизованої системи управління технологічними процесами доменної печі

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1744
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Рапота М.О.

Керівник проф., док. т. н. Пазюк М.Ю.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент директор ТОВ «Електротехмаш»
Курілець І. А.

Запоріжжя 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю. М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
(другий (магістерський) рівень)
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно- інтегровані технології та робототехніка
(код та назва)
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(назва)
Спеціалізація
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
"____" _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ
Рапоте Максиму Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Комплексна модернізація автоматизованої системи управління технологічними процесами доменної печі
керівник роботи Пазюк Михайло Юрійович, професор, доктор наук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від від «27» вересня 2025 року № 313-с
2. Строк подання студентом роботи 01 грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: технічна документація, технологічні інструкції, дані, отримані під час проходження виробничої практики
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)Аналіз об'єкта автоматизації та стану існуючої системи керування. Розробка технічного забезпечення модернізації АСУ ТП на базі промислових контролерів. Математичне моделювання динамічних процесів та синтез алгоритмів керування. Розробка інформаційно-моделюючої системи оптимізації доменної плавки. Тестування програмного комплексу
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) презентація роботи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Пазюк М.Ю.		
2	Пазюк М.Ю.		
3	Пазюк М.Ю.		
4	Пазюк М.Ю.		
5	Пазюк М.Ю.		

7. Дата видачі завдання 26 травня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану автоматизації доменного виробництва та виявлення недоліків існуючої АСУТП	01.03.2025	
2	Розробка концепції комплексної модернізації	01.04.2025	
3	Математичне моделювання динаміки турбокомпресорного агрегату та системи випарного охолодження шахти печі.	01.05.2025	
4	Розробка алгоритмів прецизійного регулювання витрати повітря	01.06.2025	
5	Проектування автоматизованої системи контролю температури (АСК)	15.07.2025	
6	Розробка інформаційно-моделюючої системи в середовищі Matlab/Simulink	01.08.2025	
7	Оцінка економічної ефективності модернізації	15.09.2025	
8	Розробка презентації роботи, проходження нормконтролю	26.11.2025	
9	Підготовка доповіді	01.12.2025	

Студент _____ Максим Рапота
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ Михайло Пазюк
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Віктор Коваленко
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Рапота М.О. Комплексна модернізація автоматизованої системи управління технологічними процесами доменної печі.

Кваліфікаційна робота магістра на здобуття вищої освіти за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, науковий керівник Пазюк М.Ю., Запорізький національний університет, Інженерний науково-навчальний інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем. Запоріжжя, 2025.

У кваліфікаційній роботі виконано комплекс досліджень, спрямованих на підвищення ефективності та надійності функціонування технологічного комплексу доменної печі ПАТ «Запоріжсталь» шляхом модернізації АСУ ТП. Проведено детальний аналіз існуючих засобів автоматизації, який виявив критичний рівень фізичного та морального зносу обладнання, що призводить до високої похибки вимірювань та аварійності. Обґрунтовано впровадження сучасної мікропроцесорної техніки на базі контролерів. Унікальність роботи полягає у розробці математичної моделі турбокомпресорного агрегату, що враховує нелінійні динамічні зв'язки, та застосуванні фільтра Калмана-Бюси для прецизійної обробки сигналів витрати повітря. Розроблено автоматизовану систему контролю температури охолодження шахти печі з інтегрованою функцією діагностики прогарів холодильників. Запропоновано інформаційно-моделюючу систему для оптимізації газодинамічного режиму, яка дозволяє мінімізувати питому витрату коксу за допомогою алгоритмів лінійного програмування. Реалізація запропонованих рішень забезпечує підвищення якості чавуну, зниження собівартості виробництва та покращення екологічних показників.

ДОМЕННЕ ВИРОБНИЦТВО АСУ ТП, МОДЕРНІЗАЦІЯ ОПТИМІЗАЦІЯ ПЛАВКИ ТУРБОКОМПРЕСОРНИЙ АГРЕГАТ СИСТЕМА ОХОЛОДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ КОНТРОЛЛЕР МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

ABSTRACT

Rapota M.O. Comprehensive modernization of the automated process control system for a blast furnace.

Master's qualification thesis in specialty 174 «Automation, Computer-Integrated Technologies, and Robotics». Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, 2025.

In this qualification thesis, a comprehensive set of studies aimed at increasing the efficiency and reliability of the blast furnace technological complex at Public Limited Company «Zaporizhstal» through the modernization of the Automated Process Control System has been performed. A detailed analysis of existing automation tools was conducted, revealing a critical level of physical and moral obsolescence of equipment, leading to high measurement errors and increased accident rates.

The implementation of modern microprocessor technology based on industrial controllers is justified. The uniqueness of the work lies in the development of a mathematical model for the turbocompressor unit that accounts for non-linear dynamic relationships, and the application of the Kalman-Bucy filter for precision processing of air flow signals. An automated temperature control system for the furnace shaft cooling with an integrated function for diagnosing cooler burnouts has been developed.

An information-modeling system for optimizing the gas-dynamic regime is proposed, which allows for minimizing specific coke consumption using linear programming algorithms. The implementation of the proposed solutions ensures an increase in pig iron quality, a reduction in production costs, and an improvement in environmental performance indicators.

BLAST FURNACE PRODUCTION APCS MODERNIZATION, SMELTING OPTIMIZATION TURBOCOMPRESSOR UNIT COOLING SYSTEM ENERGY EFFICIENCY CONTROLLER MATHEMATICAL MODEL KALMAN-BUCY FILTER

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСУПТ – автоматизована система управління технологічними процесами;

АРМ БЩУ – автоматизоване робоче місце блокового щита управління;

АРМ ІС – автоматизоване робоче місце інструментальної системи;

БРУ – блок ручного управління;

БЩУ – блоковий щит управління;

ВР – верхній рівень;

ВМ – виконавчий механізм;

ВП – вимірювальний перетворювач;

ДП – доменна піч;

ЕГСР – електрогідравлічною системою автоматичного регулювання;

МК – мікропроцесор;

ПЛК – програмований логічний контролер;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПЕОМ – персональна електронно-обчислювальна машина;

РК – регулюючий клапан;

РО – регулюючий орган;

САР – система автоматичного регулювання;

СУ – система управління;

УОС – управляюча обчислювальна система;

УКТС – уніфікований комплекс технічних засобів;

УП – покажчик положення;

УЗО – пристрій зв'язку з об'єктом;

ЦР – цифрові регулятори;

ШУ – шафа управління.

ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ 2
АНОТАЦІЯ 4
ABSTRACT 5
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ 6
ВСТУП 8
1 ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ 15
1.1 Загальна характеристика доменного процесу 15
1.2 Аналіз існуючого рівня автоматизації на діючому виробництві 23
1.3 Постановка задачі і розробка технічного завдання 26
2 КОМПЛЕКСНА МОДЕРНІЗАЦІЯ АСУ ТП ДОМЕНОЇ ПЕЧІ 28
2.1 Модернізація САР системи охолодження доменної печі 28
2.3 Модернізація САР частоти обертання турбокомпресорного агрегату 31
3 РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-МОДУЛЮЮЧОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ РЕЖИМАМИ ВИПЛАВКИ 44
3.1 Структура АСУ ТП доменної плавки 44
3.2 Функціональна модель автоматизованої інформаційної системи аналізу і прогнозування виробничих ситуацій 46
3.3 Розробка структури системи обробки даних 49
3.4 Розробка структури підсистем підтримки прийняття рішень 52
3.5 Розробка математичної моделі системі аналізу і прогнозування виробничих ситуацій 57
4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ 64
5 РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ 68
ВИСНОВКИ 85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 87
ДОДАТКИ 90

ВСТУП

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

Чорна металургія поряд з іншими базовими галузями промисловості відіграє визначальну роль у формуванні науково-технічного прогресу та розвитку національної економіки. Періоди економічної нестабільності супроводжуються коливаннями попиту на металопродукцію, зміною умов постачання залізорудної сировини й коксу, а також зростанням цін на енергоресурси та транспортні послуги. У 2022 році вартість сировини, електроенергії та пального для підприємств чорної металургії досягла максимальних значень за останні роки, що було зумовлено сукупністю факторів, зокрема торговельними обмеженнями, скороченням обсягів виробництва в Китаї та інших країнах світу внаслідок пандемії COVID-19, природними катаклізмами й військовими діями.

У науково-технічному аспекті для доменного виробництва найбільш актуальними залишаються завдання раціональної організації та глибокої автоматизації технологічного процесу, підвищення якості виплавленого чавуну, а також зниження енергетичних і паливних витрат на виробництво продукції. У зв’язку з цим пошук шляхів модернізації та вдосконалення сучасних систем автоматизації доменного процесу, з урахуванням екологічних вимог, є актуальним і перспективним напрямом наукових досліджень.

Якість чавуну, інтенсивність і ефективність доменної плавки значною мірою визначаються стабільністю подачі дуття турбокомпресорними агрегатами на колошники доменних печей, а також безперервністю та надійністю роботи системи випарного охолодження шахти печі. Сучасний доменний цех ПАТ «Запоріжсталь» щодоби споживає понад 50 тис. т різноманітних матеріалів, близько 100 млн м³ повітря, майже 2 млн т води та більше 20 тис. кВт·год електроенергії. За таких умов істотно ускладнилося управління доменним виробництвом, зросли обсяги інформації, необхідної для прийняття ефективних

управлінських рішень, а також кількість керуючих впливів на технологічний процес.

Чинна на ПАТ «Запоріжсталь» система автоматизованого керування технологічними процесами не забезпечує у повному обсязі зростання продуктивності доменних печей, підвищення якості та зниження собівартості чавуну, а також необхідний рівень надійності функціонування технологічного комплексу. Це проявляється у недостатньому зниженні кількості аварійних ситуацій та обмежених можливостях покращення екологічних показників доменного виробництва.

За таких умов виникає нагальна потреба у впровадженні сучасних високоефективних систем контролю й управління. Розв’язання зазначених завдань значною мірою залежить від розробки нових та модернізації існуючих технологій, процесів і систем автоматизованого управління. Саме тому комплексна модернізація системи автоматизованого керування технологічними процесами доменної печі в умовах ПАТ «Запоріжсталь» обрана темою кваліфікаційної роботи магістра.

МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження полягає у здійсненні комплексного вдосконалення автоматизованої системи керування технологічними процесами доменної печі з метою підвищення ефективності її функціонування.

Об’єктом дослідження є технологічні процеси, що відбуваються в доменній печі під час виплавки чавуну.

Предметом дослідження є автоматизована система управління технологічними процесами доменної печі та методи її модернізації.

Для досягнення поставленої мети у роботі визначено та послідовно розв’язано такі основні завдання:

– здійснити аналітичний огляд чинної системи автоматизованого керування технологічними процесами доменної печі;

– виявити основні недоліки функціонування існуючої системи керування та обґрунтувати напрями її подальшого вдосконалення;

– розробити математичний опис доменного процесу для подальшого використання в системах управління;

– виконати розрахунок параметрів налаштування регуляторів у контурі керування частотою обертання турбокомпресорного агрегату;

– визначити оптимальні параметри налаштування регуляторів для системи керування охолодженням доменної печі;

– дослідити сучасні підходи та тенденції розвитку комп'ютеризованих систем підтримки прийняття управлінських рішень;

– спроєктувати інформаційно-моделюючу систему керування технологічними режимами виплавки чавуну;

– розробити програмне забезпечення автоматизованої системи регулювання;

– обґрунтувати вибір та здійснити підбір технічних засобів автоматизації;

– опрацювати питання забезпечення безпечних умов праці та охорони праці персоналу;

– виконати економічне обґрунтування запропонованого проєкту та оцінити економічну ефективність модернізації автоматизованої системи регулювання.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

Метою вдосконалення наявної системи автоматизації технологічного процесу є досягнення таких результатів:

– розширення переліку параметрів доменної печі, що перебувають під безперервним контролем;

– скорочення часу реагування системи управління під час прийняття рішень щодо коригування режимів роботи печі;

– покращення якісних показників виплавленого чавуну шляхом забезпечення стабільного дотримання заданих технологічних умов;

– суттєве зменшення кількості приладів контрольно-вимірювальної та автоматики у диспетчерському пункті, а також зниження обсягів робіт з їх технічного обслуговування;

– підвищення надійності та безперервності функціонування інформаційно-керуючих систем;

– створення інформаційно-моделюючої системи керування технологічними режимами процесу виплавки чавуну.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Математичне моделювання, використане в дослідженні, ґрунтується на аналізі принципів функціонування турбокомпресорного агрегату, системи охолодження доменної печі та підсистеми подачі палива. При цьому враховано специфічні особливості теплових, газодинамічних і шлакових процесів, що відбуваються під час роботи доменних печей, а також їх конструктивні характеристики й робочі режими. Застосування зазначених методів дозволяє адекватно описати поведінку технологічного процесу та забезпечити підвищення точності розрахунків при розробці систем автоматизованого управління.

НАУКОВА НОВИЗНА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

1. У магістерській кваліфікаційній роботі виконано комплексне оновлення автоматизованої системи керування технологічними процесами доменної печі, зокрема підсистем охолодження шахти печі, подачі дуття турбокомпресорним агрегатом та керування технологічними режимами виплавки чавуну.

Забезпечення стабільної роботи зазначених підсистем створює умови для ефективного керування тепловими, газодинамічними та шлаковими режимами доменного процесу.

2. Сформовано функціональну модель та здійснено структурну декомпозицію автоматизованої інформаційної системи, призначеної для аналізу поточного стану й прогнозування виробничих ситуацій у доменному цеху.

3. Для підвищення точності регулювання турбокомпресорного агрегату за основним керованим параметром — витратою повітря — запропоновано електронний метод корекції систематичних похибок вимірювання. Метод базується на зіставленні фактичних значень витрати з еталонною градуювальною характеристикою та введенні відповідної коригувальної поправки у вимірювальний сигнал.

4. З метою спрощення процедур структурного синтезу, практичного впровадження та налагодження розроблено структуру чотириконтурного мультиплікативного регулятора, який включає незалежні контури керування положенням золотника сервоклапана, гідроприводу, частотою обертання турбіни та продуктивністю турбокомпресора.

5. Для підвищення надійності та стабільності функціонування системи охолодження шахти доменної печі створено автоматизовану систему контролю температури, що забезпечує реєстрацію температурних параметрів, аналіз тенденцій їх змін та інтегровану оцінку ефективності відбору тепла. Реалізовано діагностику метрологічних характеристик системи шляхом циклічного опитування датчиків з формуванням попереджувальних і аварійних повідомлень, а також візуалізацію параметрів у вигляді мнемосхем і гістограм на робочій станції технолога.

6. З метою підвищення економічної ефективності процесу виплавки чавуну шляхом забезпечення своєчасного та обґрунтованого управління доменною плавкою розроблено інформаційно-моделюючу систему та відповідне

програмне забезпечення для оцінювання газодинамічного режиму доменного процесу.

7. Запропоновано метод компенсації похибок системи автоматичного регулювання, зумовлених статичними нелінійностями виконавчих механізмів (зони нечутливості, сухе тертя, люфти), шляхом застосування змінного коефіцієнта підсилення з так званою «горизонтальною зоною стабілізації» у контурі керування.

8. Реалізовано SCADA-систему з використанням програмного комплексу InTouch, що забезпечує візуалізацію, моніторинг і оперативне керування основними параметрами технологічного процесу доменної печі.

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ

Сукупність виконаних науково-технічних розробок створює підґрунтя для формування сучасних високоточних систем автоматичного керування продуктивністю доменних виробництв, що сприяють підвищенню ефективності та якості перебігу технологічних процесів у різних галузях промисловості. Запропоновані архітектурні рішення та структура програмних модулів забезпечують можливість формування повного комплексу звітних показників роботи доменних печей і доменного цеху, а також реалізацію комплексного управління тепловими, газодинамічними та шлаковими режимами доменної плавки.

Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості використання виконаних чисельних досліджень і розробленої комплексної методики розрахунку автоматизованої системи керування технологічним процесом доменної печі ПАТ «Запоріжсталь» при проєктуванні та модернізації аналогічних доменних печей на інших металургійних підприємствах.

ОСОБИСТИЙ ВНЕСОК

Теоретичні дослідження в межах кваліфікаційної роботи виконано автором особисто. Особистий внесок полягає у розробленні автоматизованої системи керування технологічним процесом охолодження доменної печі з урахуванням виробничих умов ПАТ «Запоріжсталь».

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Основні результати кваліфікаційної роботи магістра були представлені і оформлені в тезах та опубліковані в електронному виданні матеріалів наукових конференцій та обговорені на наукових конференціях, що проводилися на базі ІННІ ім. Потебні ЗНУ, м. Запоріжжя.

СТРУКТУРА МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

Магістерська робота складається з вступу, семи розділів, загальних висновків, списку літератури із 32 найменуваня і вміщує 84 сторінок основного тексту, 9 таблиць, 34 рисунка, 1 додатка, усього 90 сторінок.

1 ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Загальна характеристика доменного процесу

Доменне виробництво є початковою стадією технологічного циклу металургійного заводу з повним виробничим циклом та металургійного комбінату. Його основним призначенням є отримання чавуну, виплавка якого здійснюється у доменній печі. Технологічні основи доменного виробництва ґрунтуються на теорії доменного процесу.

Доменний процес (рис. 1.1) включає сукупність основних стадій, до яких належать підготовка та завантаження шихтових матеріалів, безпосередньо процес плавки, а також відведення та обробка продуктів плавлення.

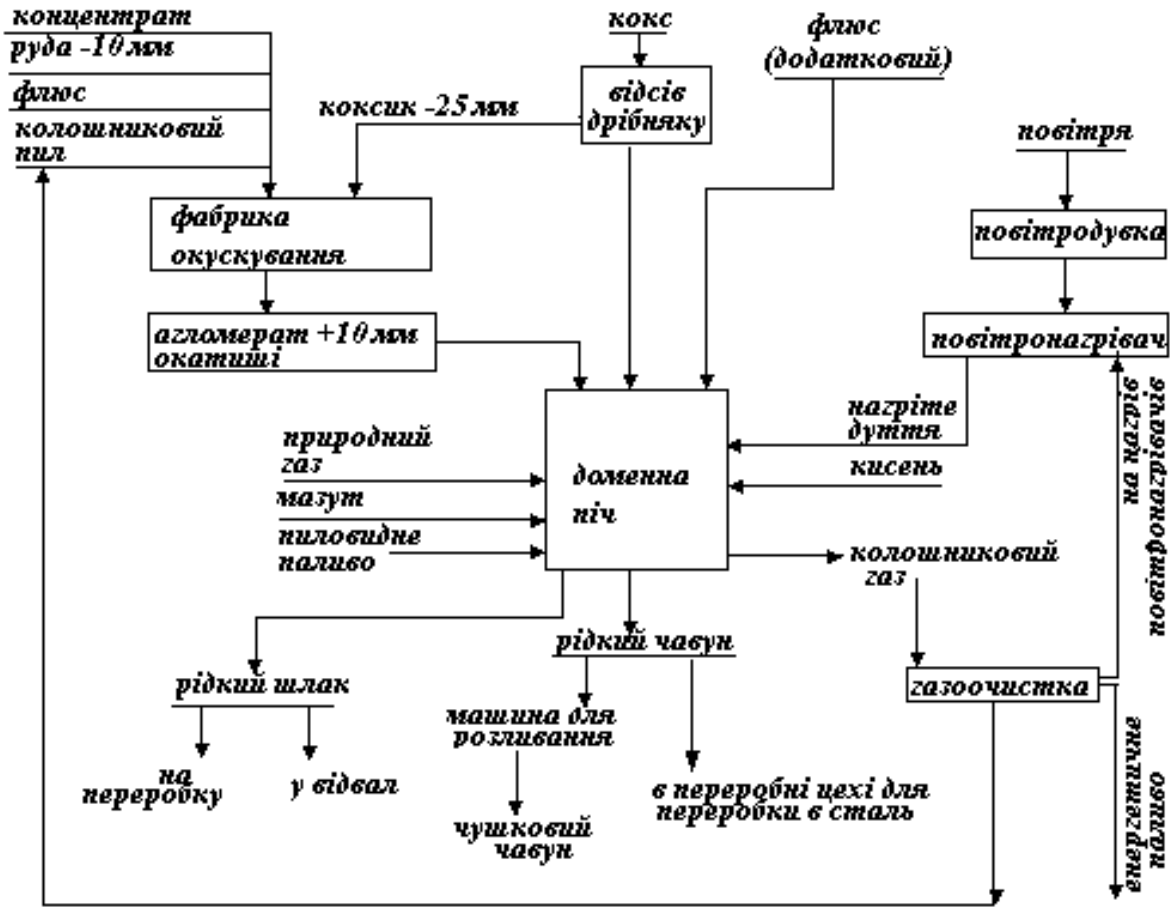


Рисунок 1.1 – Схема доменного процесу [1]

Виплавка чавуну є пірометалургійним процесом, що здійснюється в доменній печі за високих температур, досягаючи близько 1900 °C. Основним завданням доменної плавки є відновлення заліза з його оксидів, які складають рудну частину шихти.

При подачі гарячого дуття в доменну піч відбувається спалювання коксу з утворенням діоксиду вуглецю (CO_2), який у контактній зоні з розпеченим коксом за температури 1800–1900 °C перетворюється на окис вуглецю (CO):

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

$$CO_2 + C \rightarrow 2\ CO.$$

Оксид вуглецю (CO) при проходженні через стовп шихти з низу печі догори відновлює залізо з рудних оксидів, також відновлення заліза відбувається при контакті руди з розпеченим коксом. Спрощена схема відновлення є такою:

$$Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$$

Залізо, яке утворюється в процесі відновлення руди, перебуває в твердому стані у вигляді губчастої маси. При контакті з оксидом вуглецю та розпеченим коксом воно насичується вуглецем, утворюючи цементит (Fe_3C).

Внаслідок навуглецювання температура плавлення заліза знижується, що дозволяє йому швидко переходити у рідкий стан і стікати краплями в горно доменної печі. Під час руху крапель металу відбувається додаткове насичення заліза вуглецем, внаслідок чого його вміст у металі зростає. Таким чином, через постійний контакт відновленого заліза з вуглецем отримати чисте залізо без розчиненого в ньому вуглецю неможливо, і кінцевим продуктом доменної плавки завжди є залізовуглецевий сплав – чавун.

Паралельно у доменній печі відбувається відновлення оксидів інших елементів, що містяться в шихті, таких як марганець, кремній і фосфор, за відповідною схемою:

$$MnO_2 \rightarrow Mn_2O_3 \rightarrow Mn_3O_4 \rightarrow MnO \rightarrow Mn.$$

Відновлений марганець переходить у чавун, сприяючи хімічному зв’язуванню заліза з вуглецем та утворенню цементиту (Fe_3C). Крім того,

марганець має високу спорідненість із сіркою, внаслідок чого вона виводиться з чавуну у вигляді MnS, який переходить у шлак.

Пуста порода, зола коксу та флюс містять кремнезем (SiO_2), який під час плавки частково відновлюється та потрапляє в чавун. Фосфор, що є шкідливою домішкою у деяких рудах, також відновлюється в присутності вуглецю та кремнезему і надходить до чавуну. Невелика частина сірки, яка міститься у руді та коксі, згорає під час плавки, проте основна її частина переходить у чавун. Для видалення сірки необхідно досягти високих температур та забезпечити надлишок вапна, яке зв'язує сірку у нерозчинний сульфід кальцію (CaS), що переходить у шлак. Джерелом вапна є $CaCO_3$, який при нагріванні розкладається на CaO і CO_2.

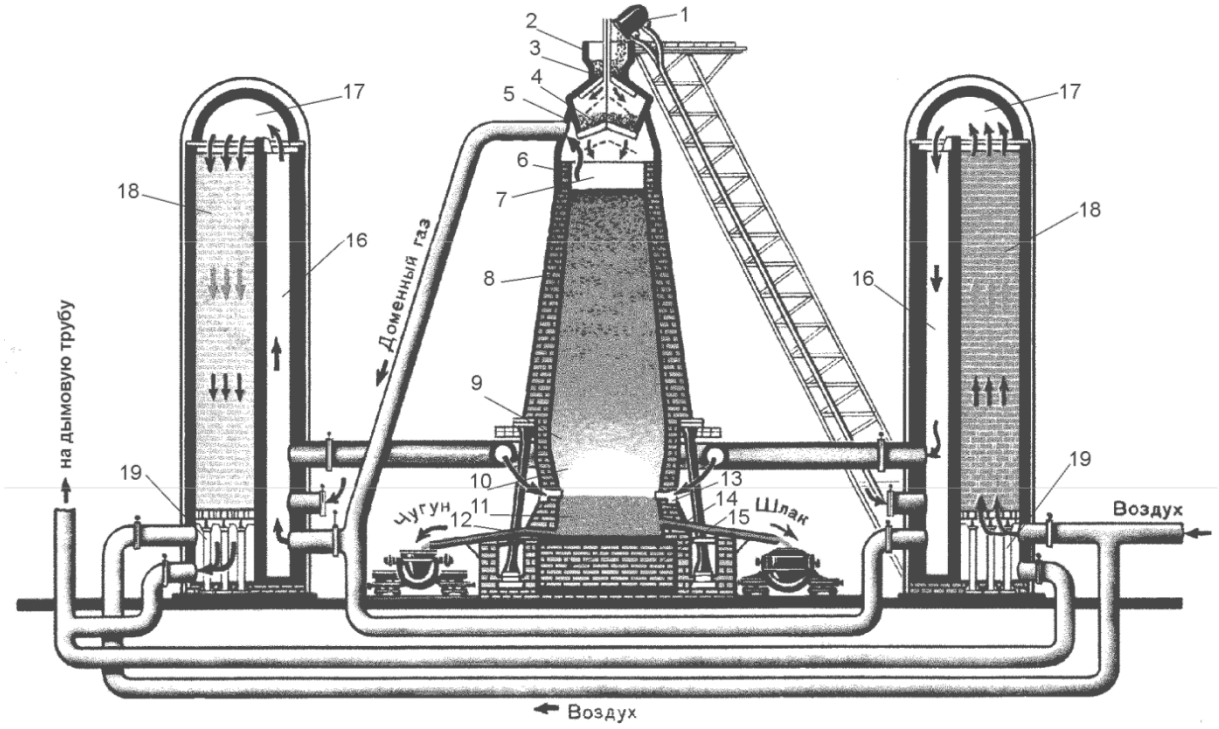
Одночасно в доменній печі відбувається плавлення пустої породи та утворення шлаку. Пуста порода та зола коксу складаються переважно з кремнезему (SiO_2) та глинозему (Al_2O_3), які мають температуру плавлення вищу за ту, що досягається в печі. Зниження температури плавлення та формування рідкого шлаку забезпечується додаванням у шихту флюсу — вапняку.

Залізна руда, концентрат і флюс надходять на фабрику грудкування, де з них формують агломерат або окатки. Відсіяний дріб'язок відокремлюється, а готовий агломерат та окатки направляються в доменний цех разом із коксом та флюсом. Доменна піч може одночасно переплавляти як агломерат, так і окатки, або працювати лише з одним видом залізорудної сировини.

Шихта завантажується в доменну піч. В доменній печі завантажені шихтові матеріали в результаті протікання фізичних і фізико – хімічних процесів поступово перетворюються на чавун, шлак і доменний газ. У нижню частину печі подається нагріте до температури 1150 – 1200 ℃ повітря, збагачене киснем для інтенсифікації процесу і природний газ, що є замінником частки коксу в доменній плавці. В результаті хімічних реакцій окислення вуглецю коксу і термічного розкладання природного газу утворюється оксид вуглецю. В результаті взаємодії оксиду вуглецю з оксидами заліза відбувається часткове

відновлення заліза.

Схема доменної печі, представлена на рисунку 1.2.



1 – скіп; 2 – приймальна воронка; 3 – малий конус; 4 – великий конус;
5 – воронка великого конуса; 6 – захисні сегменти; 7 – ведучий; 8 – шахта;
9 – распар; 10 – заплечники; 11 – горн; 12 – чавунна льотка; 13 – фурма;
14 – шлаковая льотка; 15 – лещадь; 16 – камера горіння Каупера;
17 – підкупольний простір; 18 – вогнетривка насадка Каупера;
19 – поднасадочний простір

Рисунок 1.2 – Схема доменної печі [4]

Остаточне відновлення заліза та його насичення вуглецем з утворенням чавуну відбувається в нижній зоні доменної печі. Оксиди кремнію, кальцію, магнію та інших елементів, що містяться в агломераті, окатках, кусковій руді та вапняку, після плавки переходять у шлак. Під час випуску продуктів плавки відбувається їх розділення на чавун і шлак. Основними продуктами доменної плавки є чавун, шлак та доменний газ.

Рідкий чавун переважно направляється в мартенівський цех для виплавки сталі або використовується у ливарному виробництві для виготовлення виливків. Рідкий шлак надходить на грануляційний басейн, після чого реалізується споживачам, здебільшого у дорожньому будівництві. Крім того, шлак застосовується для виробництва цементу, цегли, шлакоблоків та інших будівельних матеріалів.

Доменний газ, який є ще одним продуктом печі, після очищення від пилу використовується як паливо для підігріву повітронагрівачів, сталевих зливків, коксових батарей та котлів.

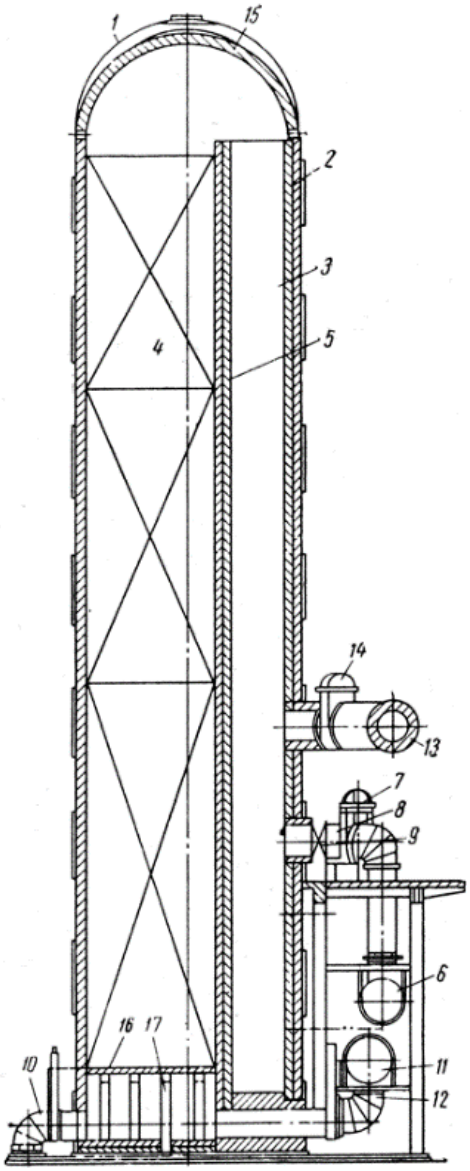
Розташування доменних печей у цеху організоване за острівним планом, що забезпечує максимальну незалежність кожної печі та зручність транспортного обслуговування. Між печами та рудним двором вздовж їх лінії розташована бункерна естакада — залізобетонна споруда висотою 10–16 м, що складається з окремих бункерів і допоміжного обладнання. Для обслуговування цеху залізничним транспортом передбачено колії, що проходять через його територію.

Нагрів дуття у доменному виробництві є одним із ключових етапів, що дозволив значно знизити витрати палива та підвищити продуктивність печей. Пошуки шляхів підвищення температури дуття призвели до впровадження регенеративних повітронагрівачів, які забезпечили високу температуру нагрітого повітря та витіснили попередні конструкції, ставши стандартним рішенням для сучасних доменних печей.

Очищений доменний газ (або суміш доменного та коксового газів) подається до повітронагрівачів у камеру горіння через газові пальники разом із повітрям, яке забезпечується спеціальною повітродувною станцією. Відпрацьовані гази піднімаються під купол нагрівача, де відбувається їхнє повне згоряння та досягається максимальна температура. Продукти згоряння потім опускаються вниз через канали насадки, передаючи їй тепло, охолоджуючись до 150–400 °C, і виводяться через димові клапани в боров димоходу. Подача газу в

камеру горіння припиняється після досягнення максимально допустимої температури підкупольного простору.

Схема повітронагрівача, представлена на рисунку 1.3.



1 – кожух; 2 – кладка; 3 – камера горіння; 4 – насадка; 5 – розділова стіна; 6 – газовий клапан; 7 – відокремлюваний клапан; 8 – підведення до пальника; 9 – пальник; 10 – димової клапан; 11 – клапан холодного дуття; 12 – патрубок трубопроводу холодного дуття; 13 – трубопровід гарячого дуття; 14 – клапан гарячого дуття; 15 – футеровка купола; 16 – литі металеві піднасадні решітки; 17 – литі металеві піднасадні колони

Рисунок 1.3 – Схема повітронагрівача [9]

Повітря подається через піднасадочний простір, насадку та камеру горіння у зворотному напрямку від газу. Пройшовши через розпечену насадку, воно нагрівається і далі через клапан гарячого дуття спрямовується по повітропроводу до доменної печі. Після охолодження насадки повітронагрівач переводять знову у режим нагріву. Безперервне постачання дуття забезпечується завдяки наявності блоку з трьох–чотирьох повітронагрівачів на кожну піч, з яких два або три працюють на нагрів, а решта – у режимі подачі гарячого повітря, залежно від обраної схеми роботи (одиночної або попарної паралельної). Основними режимами функціонування повітронагрівача є нагрів і охолодження, додатково він може працювати на «тягу» або бути тимчасово відключеним.

Доменний процес полягає у виплавці чавуну в доменній печі, де завантажуються пиловугільне паливо та агломерат. Агломерат — це підготовлена руда, спечена з флюсом для забезпечення кращої плавкості. За допомогою вдування повітря або кисню підтримується необхідна температура для плавки чавуну. У горні печі відбувається спалювання вугілля та утворення вуглекислого газу, а відновлення руди відбувається переважно у верхній частині шахти.

У складі руди присутня пустая порода – пісок або діоксид кремнію, який є тугоплавким. Щоб знизити температуру плавлення, до руди додають флюси, наприклад $CaCO_3$, що при взаємодії з тугоплавкими компонентами утворюють легкоплавкий шлак, який легко відокремлюється. Відновлене залізо поступово опускається у більш нагріту зону печі (розпар), насичується вуглецем до 4 % та іншими домішками, формуючи рідкий чавун. Розплавлений метал збирається в нижній частині печі, а шлак залишається на поверхні. Чавун і шлак періодично випускають через спеціальні отвори, при цьому відходячі гази, що містять близько 25 % оксиду вуглецю, спрямовуються у каупери для додаткового спалювання та використання теплоти.

За допомогою вдування в піч кисню можна прискорити виплавку чавуну, при цьому попередній нагрів становиться непотрібним. В результаті чого

відпадає необхідність у кауперах, а також разом з цим підвищується продуктивність печі і зменшення витрати палива. У великій доменної печі щохвилини відбувається виплавка 2,5 тонн чавуну. Переробка чавуну в сталь відбувається при окисленні міститься в чавуні вуглецю і домішок та відділенні утворюються оксидів в газову фазу або шлак. Основна маса чавуну переробляється в сталь при мартенівському процесі [13].

Для виробництва чавуну крім постійного забезпечення матеріалами дуже важливо енергетичне забезпечення. Тому велике значення має подача дуття з необхідними параметрами (витрата, тиск, температура, вологість і вміст кисню). Зі збільшенням корисного об'єму ДП і інтенсифікацією їх виробництва підвищуються і вимоги, перш за все по витраті, тиску дуття, а також економічності, стабільності і технічної забезпеченості турбокомпресора за умови комплексної автоматизації виробничого процесу.

Турбокомпресорний агрегат призначений для стиснення атмосферного повітря, збагаченого до 30% киснем, подачі його в обігрівачі і далі в доменну піч.



Рисунок 1.4 – Турбокомпресорний агрегат доменної печі

Відцентровий компресор двосекційного типу з горизонтальним роз’ємом корпусу оснащений проміжним повітроохолоджувачем. Ротор компресора

приводиться в обертання безпосередньо від парової турбіни через муфту, а регулювання його продуктивності здійснюється зміною частоти обертання турбіни. Ротор, що включає вал, робочі колеса та вирівнюючий поршень, змонтований в опорних та комбінованих підшипниках ковзання з мастилом під тиском. Ущільнення між ротором і статором забезпечується кінцевими лабіринтовими ущільненнями.

Парова турбіна одноциліндрова з аксіальним входом пари. Проточна частина ротора складається з однієї регулюючої (активної) та однієї реактивної ступені для створення тиску. Основні конструктивні елементи турбіни включають:

– стопорний клапан з гідравлічним сервоприводом, розташований праворуч від переднього підшипника;

– підвід пари до стопорного клапану знизу;

– односідельні вхідні регулюючі клапани;

– регенеративний нижній відбір пари.

До допоміжного технологічного обладнання відносяться система подачі олії для змащування турбіни, поверхневий конденсатор, двоступеневий пароструминний ежектор, пусковий ежектор, конденсаційні насоси, конденсатор пари, регенеративні підігрівачі низького тиску, контрольно-вимірювальні прилади та електрообладнання.

1.2 Аналіз існуючого рівня автоматизації на діючому виробництві

Контрольно-вимірювальна апаратура та елементи автоматизації в доменній печі ПАТ «Запоріжсталь»

У доменній печі ПАТ «Запоріжсталь» використовуються наступні елементи контрольно-вимірювальної апаратури та засобів автоматизації:

Звужуючий пристрій типу ДБ 2,5 – безкамерна діафрагма, умовний тиск 0,25 МПа, внутрішній діаметр трубопроводу 400–1200 мм.

Диференціальний манометр ДМ 3583 М: верхня межа вимірювання тиску 0,04 МПа, робочий тиск до 16 МПа, вихідний сигнал 0–5 мА.

Блок кондуктивного поділу БКР: живлення 220 В, частота 50 Гц; час гальванічного розділення 8 мс, час операції підсумовування 0,5 мс, споживана потужність 18 ВА.

Блок регулюючий імпульсний РБІМ: похибка підсумовування вхідних сигналів не перевищує ±0,5 %, відносна вологість 30–80 %, відхилення напруги живлення ±20 % від номіналу, частота 50 Гц.

Задатчик ручний РЗД–22: електричне живлення 220–240 В або 24 В, похибка 2,5 %, споживана потужність ≤4 ВА.

Блок ручного управління БРУ: живлення 24 В, частота 50 Гц, споживана потужність ≤2,5 ВА.

Пускач безконтактний реверсивний ПБР–2: живлення 220 В, частота 50 Гц, максимальний комутований струм 4 А, споживана потужність ≤20 ВА.

Виконавчий механізм МЕК–25К–120: номінальний час повного ходу вала 10 с, повний хід вихідного валу 0,25 об, номінальний обертаючий момент 250 Н·м, напруга живлення 220/380 В, частота 50 Гц, споживана потужність 290 ВА.

Склад автоматизованої системи турбоагрегату

До системи турбоагрегату входять:

– компресор;

– всмоктуючий повітропровід із повітроочисним пристроєм;

– киснепровід від колектора до всмоктуючого трубопроводу;

– нагнітальний повітропровід із протипожежними, випускними та зворотними клапанами та запірною арматурою;

– приводна парова турбіна;

– електрогідравлічна система;

– система регулювального масла та мастила;

– валоповоротний пристрій;

– конденсаційна система турбіни.

Агрегат обладнаний пристроями аварійного захисту, що забезпечують автоматичну зупинку у випадку виходу параметрів за допустимі межі, зокрема: підвищення частоти обертання, осьового зсуву ротора турбіни або компресора, зниження тиску мастильного та регулювального масел, підвищення температури мастила, надмірного тиску в конденсаторі, підвищеної вібрації підшипників.

Локальний захист «Відсічення кисню» спрацьовує у випадках: помпажу компресора, зниження витрати повітря нижче допустимого значення або припинення подачі свіжого пара до турбіни.

Аналіз існуючого рівня автоматизації

Аналіз показав, що на підприємстві застосовуються:

– первинні перетворювачі термопари ТПР–0573 із нормуючим перетворювачем Ш9322, що створює похибки сигналу;

– регулятори з вторинними приладами ДИСК–250, схильні до механічного зносу та потребують постійної перевірки.

Основні недоліки існуючої системи КВП:

– висока похибка вимірювань;

– відсутність ліній зв’язку для передачі даних та реєстрації на ЕОМ;

– великі габарити та маса приладів;

– значна енергоємність;

– вплив пилу на рухомі частини;

– моральне старіння приладів, що негативно впливає на продуктивність печі;

– відсутність сигналізації про вихід параметрів за допустимі межі.

Існуючий рівень автоматизації є застарілим, що призводить до аварійних ситуацій і економічних збитків. Для підвищення якості продукції, мінімізації втрат та збільшення річного прибутку доцільно провести комплексну модернізацію системи автоматизованого управління процесами доменної печі.

1.3 Постановка задачі і розробка технічного завдання

Якість чавуну та ефективність доменної плавки значною мірою визначаються стабільністю подачі повітря турбокомпресорними агрегатами до колошників печей, а також безперервністю та надійністю роботи системи випарного охолодження шахти. Існуюча система автоматизованого керування технологічними процесами на ПАТ «Запоріжсталь» не забезпечує достатній рівень продуктивності печі, не дає можливості покращити якість чавуну, знизити його собівартість та гарантувати надійну роботу технологічного комплексу, що включає зменшення аварійності та покращення екологічних показників печі.

Для підвищення ефективності та надійності процесу виплавки запропоновано такі заходи модернізації системи автоматизації:

– впровадження електронної системи корекції систематичних похибок вимірювача витрати повітря, що ґрунтується на порівнянні фактичних даних із прецизійною градуювальною характеристикою та внесенні відповідної поправки у вимірювальний сигнал, що дозволяє підвищити точність регулювання турбокомпресора за витратою повітря;

– створення автоматизованої системи контролю температури (АСК), що здійснює реєстрацію та моніторинг тенденцій змін температури, а також інтегровану оцінку якості відібраного тепла, з циклічною діагностикою метрологічних характеристик системи охолодження, формуванням попереджувальних і аварійних сигналів та відображенням параметрів на моніторі робочої станції технолога у вигляді мнемосхем і гістограм, що забезпечує підвищення стабільності роботи системи охолодження шахти;

– розробку інформаційно-моделюючої системи та програмного забезпечення для оцінки газодинамічного режиму доменної плавки, що дозволяє своєчасно приймати коректні управлінські рішення та підвищувати економічну ефективність виплавки чавуну.

Висновки. Доменне виробництво є першою ланкою технологічного циклу металургійного комбінату, основним завданням якого є виплавка чавуну з рудної частини шихти. Якість чавуну, ефективність і інтенсивність доменного процесу значною мірою залежать від стабільності подачі повітря турбокомпресорними агрегатами та надійності роботи системи випарного охолодження шахти печі.

Існуюча на ПАТ «Запоріжсталь» система автоматизованого керування технологічними процесами не забезпечує достатній рівень продуктивності печі, не дозволяє підвищити якість чавуну, знизити його собівартість і гарантувати надійну роботу технологічного комплексу, що проявляється у підвищеній аварійності та недостатньому контролі екологічних показників.

Для модернізації системи автоматизації пропонується впровадження електронної системи компенсації похибок вимірювача витрати повітря турбокомпресора, що дозволяє підвищити точність регулювання витрати повітря, а також розробка автоматизованої системи контролю температури (АСК) з інтегрованою оцінкою якості відібраного тепла та аварійною сигналізацією, що забезпечує стабільність роботи системи охолодження шахти печі. Розробка інформаційно-моделюючої системи та програмного забезпечення для оцінки газодинамічного режиму доменної плавки дозволяє своєчасно приймати коректні рішення щодо управління технологічним процесом та підвищувати економічну ефективність виплавки чавуну.

Проведений аналіз показав, що існуючі засоби автоматизації і КВП на підприємстві морально застаріли, мають високу похибку вимірювань та обмежені можливості дистанційної передачі даних, що негативно впливає на продуктивність печей і призводить до економічних збитків.

Отже, комплексна модернізація автоматизованої системи управління технологічними процесами доменної печі є необхідною умовою для підвищення продуктивності, якості чавуну, надійності роботи технологічного комплексу та економічної ефективності виробництва.

2 КОМПЛЕКСНА МОДЕРНІЗАЦІЯ АСУ ТП ДОМЕНОЇ ПЕЧІ

2.1 Модернізація САР системи охолодження доменної печі

Сучасна доменна піч є складним тепловим агрегатом, надійна робота якого значною мірою визначається ефективністю системи охолодження. Охолодження конструкцій печі виконує кілька важливих функцій:

захищає матеріали деталей, що працюють у зонах високих температур, від передчасного руйнування та зносу;

сприяє формуванню на холодильниках захисного шару гарнісажу, який перешкоджає стиранню та забезпечує рівномірний хід печі;

забезпечує правильний розподіл теплових потоків у кладці, що запобігає виникненню термічних напружень.

На такому складному та небезпечному агрегаті, як доменна піч, відсутність контролю навіть одного з параметрів може стати причиною серйозної аварії. Тому при виборі обладнання та програмного забезпечення особлива увага приділялася надійності їх роботи та позитивному досвіду експлуатації в агломераційних і доменних цехах.

На доменній печі ПАТ «Запоріжсталь» застосовується метод охолодження холодною технічною водою. Він передбачає проходження води через порожнини охолоджуваних елементів, де вона відбирає тепло від стінок деталей і нагрівається до визначеної температури (межі встановлюються для кожної групи холодильників). Для охолодження печі витрачається близько 1,0-1,2 м³ води на годину на кожен 1 м³ корисного об’єму. Надійне функціонування системи забезпечується наявністю двох автономних водопровідних ліній та постійним контролем оператором.

Система охолодження вимагає регулярного догляду, що включає контроль нормального постачання води, моніторинг температури води на виході з холодильників, заміну фільтрів для очищення води, промивання

охолоджувальних елементів, виявлення пошкоджених приладів і своєчасну їх заміну для запобігання потрапляння води в піч. Контроль повинен охоплювати температуру, тиск, витрату та циркуляцію води, а всі результати спостережень і вимірювань автоматично фіксуватися в журналі.

Існуюча система контролю охолодження має такі недоліки:

– контроль температури води на рівні 2-15 °С здійснюється вручну за допомогою ртутного термометра;

– температура визначається з великою похибкою;

– відсутня автоматична реєстрація температур;

– не ведеться моніторинг тенденцій зміни температур;

– відсутня інтегрована оцінка якості відбору тепла;

– ефективність контролю залежить від дисциплінованості персоналу.

Запропонована в магістерській роботі система контролю охолодження дозволяє усунути зазначені недоліки і надає наступні функції:

– діагностика метрологічних характеристик системи;

– циклічне опитування датчиків;

– обчислення різниці температур води на вході та виході системи охолодження;

– формування попереджувальних і аварійних повідомлень;

– створення бази даних результатів вимірювань;

– відображення актуальних параметрів на цифровому дисплеї щита сигналізації;

– вивід поточних значень на монітор робочої станції оператора у вигляді мнемосхеми та гістограм;

– побудова графіків динаміки зміни різниці температур.

Розроблена система має багаторівневу архітектуру, що включає робочу станцію технолога на базі РС сумісного типу, промисловий контролер та розподілені шафи управління. Приклади екранів керування системою охолодження доменної печі наведені на рис. 2.1 та 2.2.

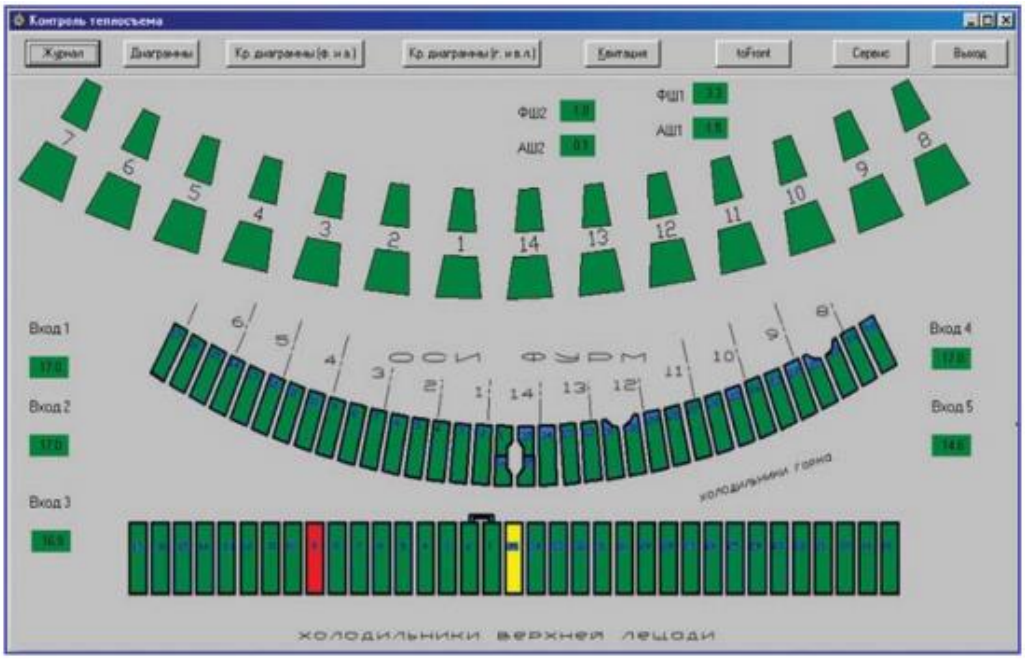


Рисунок 2.1 – Екран управління САР системи охолодження доменної печі

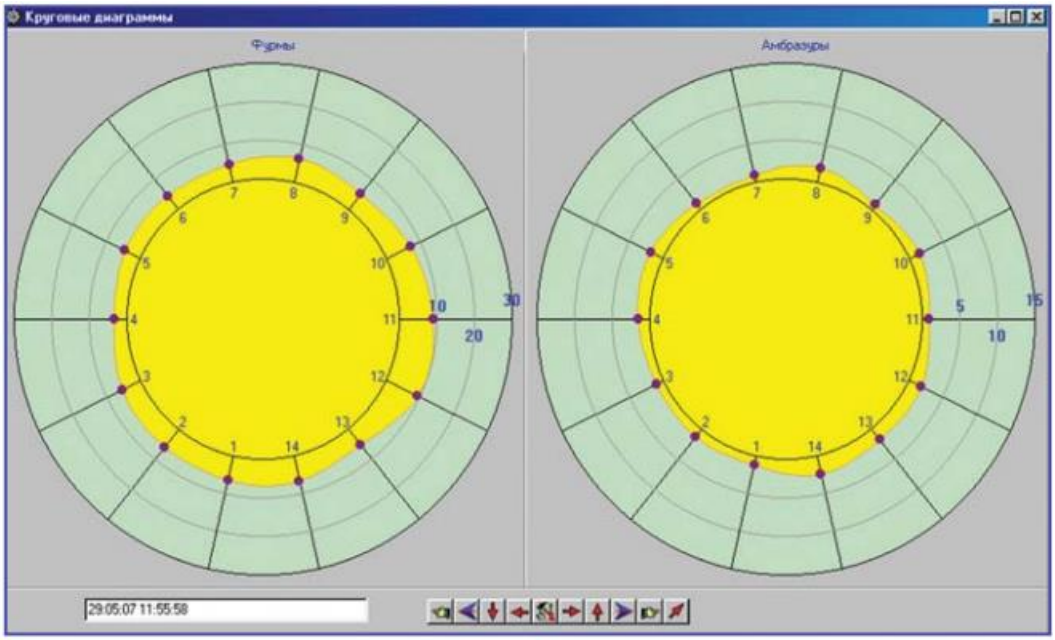


Рисунок 2.2 – Екран відображення кругових діаграм контролю температури САР системи охолодження доменної печі

У складі автоматизованої системи контролю охолодження доменної печі застосовуються наступні елементи:

– робоча станція оператора АСУТП виконана на базі міні-комп’ютера з процесорною платою Vortex86 (ICOP Technology, Тайвань);

– промисловий контролер – процесорна плата ICOP 6015, що забезпечує керування розподіленими модулями зв’язку з первинними перетворювачами;

– модуль перетворювача послідовного інтерфейсу RS232/RS485 i-7520 (ICP_DAS, Тайвань);

– модулі виведення дискретних сигналів i-7043, що керують комутацією вимірювальних каналів;

– модулі введення аналогових сигналів від датчиків температури i-7033;

– аналогові комутатори PCLD-788 (Advantech, Тайвань) для послідовного підключення датчиків до аналого-цифрового перетворювача;

– модуль комутації дискретних керуючих сигналів;

– щит сигналізації для індикації та формування аварійних сигналів;

– первинні вимірювальні перетворювачі – стандартні датчики температури та термоопору ТСМ-1288.

Комутатори та модулі збору інформації змонтовані в герметичній шафі класу захисту IP54, що забезпечує захист від пилу та вологи. Зв’язок між модулями розподіленого контролю та контролером здійснюється по кручено-парній лінії RS485, а передача даних між контролером і робочою станцією оператора – по мережі Ethernet.

Впровадження цієї системи дозволяє істотно зменшити або повністю усунути ризики аварій, пов’язаних з прогаром холодильників чи фурмених приладів, що підвищує надійність та безпечність роботи доменної печі.

2.3 Модернізація САР частоти обертання турбокомпресорного агрегату

Інтенсивність доменної плавки та якість чавуну значною мірою залежать від стабільності подачі повітря турбокомпресорними агрегатами до колошників доменних печей. Забезпечення цієї стабільності покладено на електрогідравлічну систему автоматичного регулювання (ЕГСР), яка підтримує

задану витрату повітря при зміні тиску над колошником шляхом відповідного корегування частоти обертання турбіни.

На ПАТ «Запоріжсталь» у існуючій ЕГСР зазвичай застосовуються традиційні промислові ПІД-регулятори. Проте вони характеризуються високою чутливістю до змін параметрів системи і не мають функцій адаптивного самонастроювання коефіцієнтів регулятора. Через це точність подачі повітря часто не відповідає необхідним межам (2–3% від номінального значення), що призводить до зниження ефективності процесу плавки, збільшення витрати коксу та погіршення якості чавуну.

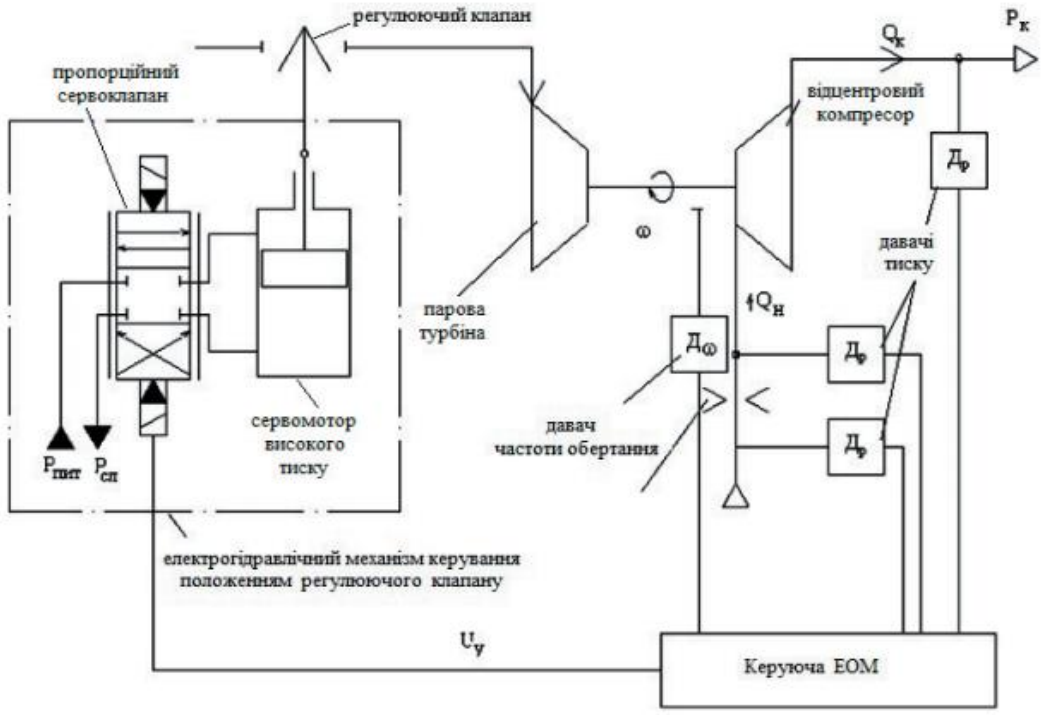


Рисунок 2.3 – Принципова схема електрогідравлічного виконавчого механізму САР частоти обертання турбоагрегату

Для підвищення ефективності електрогідравлічного виконавчого механізму у даній роботі запропоновано модернізовану уніфіковану схему ЕГСР частоти обертання турбоагрегату. Вона включає прецизійний електрогідравлічний виконавчий механізм на основі високоточного сервомотора, здатного безпосередньо передавати робоче зусилля на траверсу з

регулюючими клапанами без використання проміжних механізмів, а також компактний пропорційний сервоклапан із широкою смугою пропускання. Така конфігурація забезпечує високу статичну та динамічну точність регулювання і легко інтегрується у мікропроцесорну систему керування.

Для підтвердження ефективності запропонованого підходу проведено структурно-параметричний синтез прецизійної САР продуктивності турбокомпресорного агрегату, що забезпечує точну та стабільну подачу повітря до доменної печі.

$$J_{пр}\,\phi + |M_{ст}|\,\text{sign}\,\{\varphi\}\,k_{жт}\phi + C_{св}\,(\phi_к - \phi_Т) = K_{мпр}{}^{раб}P_{по} + K_{мпΣ}G_п{}^2, \qquad (2.1)$$

де φ – частота обертання ротора турбокомпресорного агрегату, рад/с;

$M_{кр}$ – обертальний момент на валу компресора Н/м;

$P_Н$,$T_Н$ – значення тиску і температури повітря на вході в компресор, Па, К;

$P_к$, $T_к$ – параметри повітря на виході на виході з компресора, Па, К;

R – газова постійна повітря Дж/кгК;

$Z_Н$ и $Z_К$ – коефіцієнти стисливості повітря;

$Q_К$ – об’ємна подача компресора, $м^3/с$;

$S_Н$ и $S_К$ – площі перерізів патрубків на вході і на виході з компресора;

$C_р$ – питома теплоємність повітря, Дж/кгК;

ϕ та $\phi_Т$ – кути повороту ротора турбокомпресора і турбіни, рад;

$J_{пр}$ – приведений момент інерції ротора, $кгм^2$;

$M_{ст}$ и $k_{жт}$ – значення моменту сухого тертя і коефіцієнта рідкого тертя в опорах ротора, Н·м, Нм/с;

$C_{св}$ – крутильна жорсткість зв’язку роторів компресора і турбіни, Нм/рад.

$P_{по}$ – тиск пари на вході в соплову решітку турбіни, Па;

$G_п{}^2$ – масова витрата пари через турбіну, кг/с.

Математична модель виконавчого механізму ЕГСР представлена передавальною функцією електромеханічного перетворювача сервоклапана:

$$W_{эмп}(S)=\frac{X_э(S)}{U_у(S)}=\frac{K_{эмп}}{(T_э S+1)\left(T_м^2 S^2+2\xi_м T_м S+1\right)} \tag{2.2}$$

Для вирішення завдань аналізу і синтезу прецизійних регуляторів розроблено математичні моделі турбокомпресорного агрегату і виконавчого механізму електрогідравлічної системи регулювання подачі повітря. Математичні моделі відцентрового компресору і парової турбіни представлені рівняннями стискання повітря в компресорі та динаміки ротора:

$$\omega M_{кр}=\frac{P_к}{Z_к R T_к f_2(Q_к,\omega)}\left\{\left(C_p T_п \ln\frac{P_к}{P_п}\right)Q_к+0{,}5\left[\frac{1}{S_к^2}-\left(\frac{P_к}{P_п}\cdot\frac{Z_к}{Z_п}\cdot\frac{T_к}{T_п S_п}\right)^2\right]Q_к^2\right\} \tag{2.3}$$

Рівняннями динаміки гідродвигуна (сервомотора):

$$\begin{cases} Q_{гд1}=S_п\dfrac{dX_п}{d\tau}+C_{гду}P_{гд1}+C_{гдп}(P_{гд1}-P_{гд2})+\left(\dfrac{V_{гд1}}{\chi}+\dfrac{F_п^2}{C_{оп}}\right)\dfrac{dP_{гд1}}{d\tau}, \\ Q_{гд2}=(S_п-S_{шт})\dfrac{dX_п}{d\tau}+C_{гду}P_{гд2}+C_{гдп}(P_{гд1}-P_{гд2})+ \\ +\left(\dfrac{V_{гд2}}{\chi}+\dfrac{F_{шт}^2}{C_{оп}}\right)\dfrac{dP_{гд2}}{d\tau}, \\ T_{пр}^2\ddot{X}_п+2\xi_{пр}T_{пр}\dot{X}_п+X_п=K_{p_1}^{хд}\Delta P, \\ T_д^2\ddot{X}_д+2\xi_д T_д\dot{X}_д+X_д=(K_{p_1}^{хд}P_{гд_1}-K_{p_2}^{хд}p_{гд_2})+X_п, \\ T_п^2\ddot{X}_п+2\xi_п T_п\dot{X}_п+X_п=K_{хд}^{хп}X_д, \end{cases} \tag{2.4}$$

і рівнянням витрати пари через регулюючий клапан турбіни:

$$Q_{кл} = K_{QS}^{кл}\sqrt{\frac{2}{\rho}\left(P_{вх}^{кл} - P_{вых}^{кл}\right)}X_{см}. \quad (2.5)$$

де $Q_{гд1}$ і $Q_{гд2}$ – витрати робочої рідини через порожнини гідродвигуна, м^3/с;

$X_п$ – переміщення поршня, м;

$P_{гд1}$ і $P_{гд2}$ – тиски в робочих порожнинах, Па;

$V_{гд1}$, $V_{гд2}$, $S_п$, $S_{шт}$ – обсяги та ефективні площі поршневий і штокової порожнин гідродвигуна, відповідно, м^3 и м^2;

Хз – переміщення золотника сервоклапана, м;

Uу – керуюча напруга, В;

$K_{эмп}$ – статичний коефіцієнт посилення сервоклапана, м/В;

$T_э$ та $T_м$ електрична і механічна постійні часу сервоклапана, с;

$X_д$ – переміщення гідродвигуна, м;

$P_{гд1}$ та $P_{гд2}$ – тиски в робочих порожнинах гідродвигуна, м;

$T_д$, $T_к$, $T_н$ – постійні часу робочого органу, корпуса гідродвигуна і навантаження, с;

$\xi_д$, $\xi_к$, $\xi_н$ – відповідні коефіцієнти демпфіювання;

$Q_{кл}$ – об’ємна витрата пари через регулюючий клапан турбіни, м^3/с;

$X_{см}$ – переміщення клапана, м;

$P_{вх\ кл}$ и $P_{вых\ кл}$ – тиски пари на вході і на виході з регулюючого клапана, Па;

ρ – щільність пари, кг/м^3;

K_{QS} – коефіцієнт витрати.

Для ідентифікації та визначення параметрів розроблених моделей проведено експериментальні дослідження системи автоматичного регулювання (САР) продуктивності турбокомпресорного агрегату домни об’ємом 3000 м³. Під час випробувань вимірювалися частота обертання ротора турбокомпресора, об’ємна продуктивність і витрата стисненого повітря. Швидкість обертання

фіксувалася за допомогою приладів багатоканальної автоматизованої системи віброзахисту та діагностики.

Витрата повітря визначалася на основі вимірюваного перепаду тисків на торцевій діафрагмі діаметром 1556 мм при перепаді тиску 400 кгс/м² та номінальному значенні витрати 320000 Нм³/год. Для цього використовувалися мембранні давачі тиску типу «АІР-2000», виробництва «ЕЛЕМЕР» Україна, що забезпечують безперервне перетворення тиску у цифровий сигнал із допустимою похибкою від 0,25 до 1%.

Результати експерименту показали, що тривалість перехідних процесів зміни частоти обертання та продуктивності турбокомпресора становить близько 30 с. Постійна, змінна та сумарна похибки регулювання витрати повітря відповідно складають 3,5; 6,9 та 10,4%. Отримані дані дозволили здійснити повну ідентифікацію параметрів математичної моделі турбокомпресорного агрегату та виконавчого механізму САР, що дає можливість використати її для синтезу прецизійного регулятора подачі повітря.

При розробці структурно-параметричного синтезу прецизійних регуляторів застосовано нову класифікацію загальних структур САР, що дозволяє ефективно будувати конкретні системи управління турбокомпресорними агрегатами. Аналіз результатів попередніх досліджень у сфері прецизійних електрогідравлічних САР дозволив виділити найбільш ефективні структури, здатні забезпечити високу точність управління:

– САР з мультиплікативними регуляторами;

– САР на основі рішень зворотних задач динаміки керованих об’єктів;

– САР із застосуванням еталонних моделей (спостерігачів стану) об’єктів управління.

Найбільш ефективні прецизійні САР можуть бути реалізовані шляхом комбінації наведених структур.

Для підвищення статичної та динамічної точності САР запропоновано:

– ефективну конструкцію електрогідравлічного виконавчого механізму,

що включає двокаскадний пропорційний електрогідравлічний підсилювач (сервоклапан) і гідроциліндр, шток якого безпосередньо з'єднаний з клапанною траверсою;

– прецизійну систему вимірювання об'ємної витрати повітря, що містить мікропроцесорний модуль корекції систематичних похибок та еталонну модель-спостерігач (фільтр Калмана), що обчислює витрату повітря в реальному часі;

– алгоритми управління, які забезпечують компенсацію всіх видів статичних і динамічних помилок.

Структурну схему, що відповідає спрощеній математичній моделі, наведено на рис. 2.4.

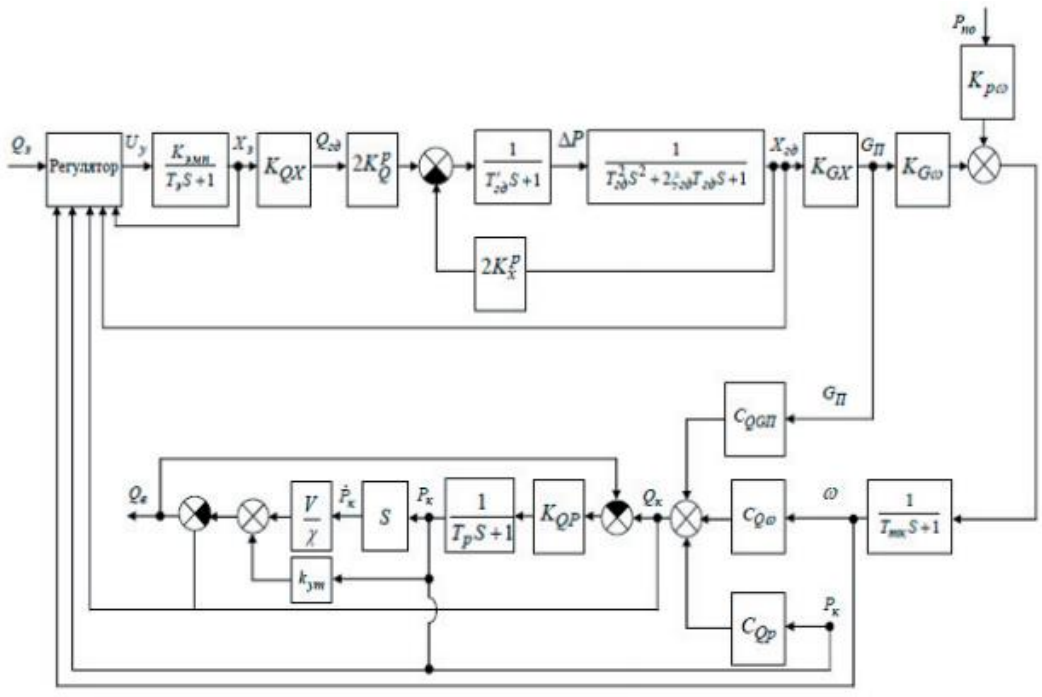


Рисунок 2.4 – Структурна схема турбокомпресорного агрегату

Чисельні значення параметрів розробленої структурної схеми були визначені на основі результатів проведених експериментальних досліджень. Під час структурного синтезу застосовано принцип мультиплікативного керування, який передбачає формування автономних контурів управління для окремих елементів системи. Використання цього підходу дозволяє значно спростити

структуру регулятора, полегшити параметричний синтез та точну наладку його характеристик.

Структура мультиплікативного регулятора, представлена на рис. 2.5, складається з чотирьох автономних контурів управління:

– положенням золотника сервоклапану;

– положенням гідродвигуна (сервомотора);

– частотою обертання турбіни;

– продуктивністю турбокомпресора.

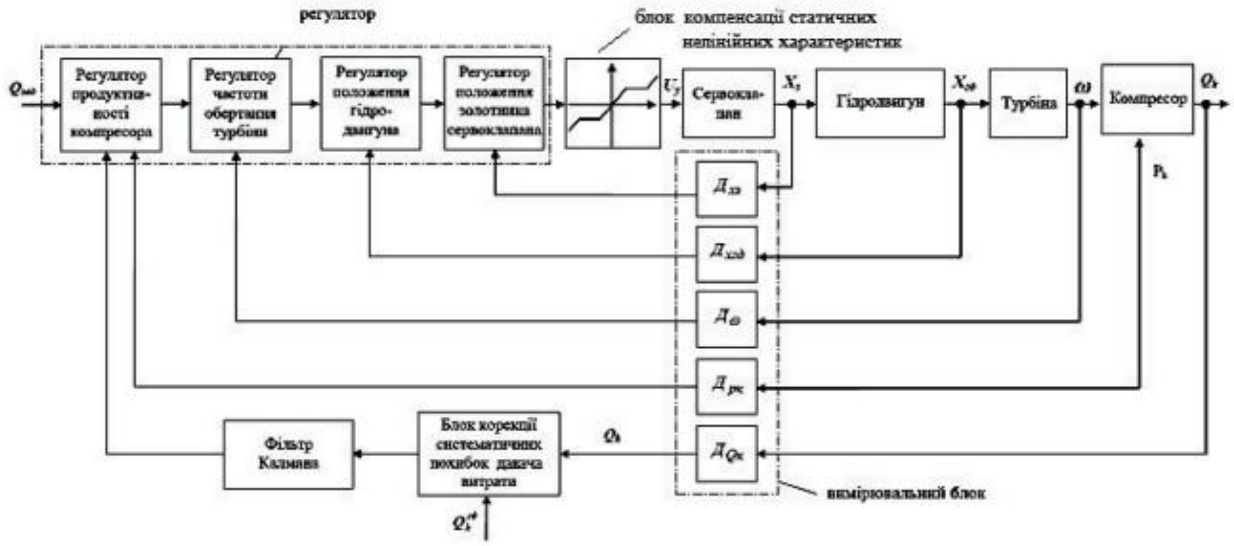


Рисунок 2.5 – Загальна функціональна схема САР продуктивності турбокомпресорного агрегату з прецизійним мультиплікативним регулятором

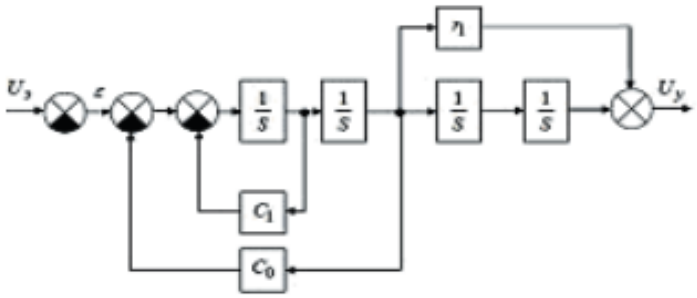
У складі вимірювального блоку передбачено використання датчиків положення золотника ($Д_{хз}$) та гідродвигуна ($Д_{хгд}$), частоти обертання ротора турбокомпресора ($Д_{\omega}$), об’ємної продуктивності компресора ($ДQ_k$) і тиску в напірному повітроводі ($Д_{pk}$). Для підвищення точності регулювання по основному параметру – витраті повітря – запропонована електронна система корекції систематичних похибок вимірювача. Вона ґрунтується на порівнянні фактичних показань із прецизійною градуювальною характеристикою та внесенні відповідної коригуючої поправки у вимірювальний сигнал.

Хоча вимірювання положення, тиску та частоти обертання можна виконувати з високою точністю, визначення витрати повітря є технічно складним завданням через систематичні похибки, випадкові помилки, пульсації тиску та вихрові зони потоку. Для відокремлення цих шумів від корисного сигналу застосовується фільтр Калмана–Бюси (спостерігач стану), який реалізовано у мікропроцесорній системі керування в реальному часі на основі еталонної моделі процесу.

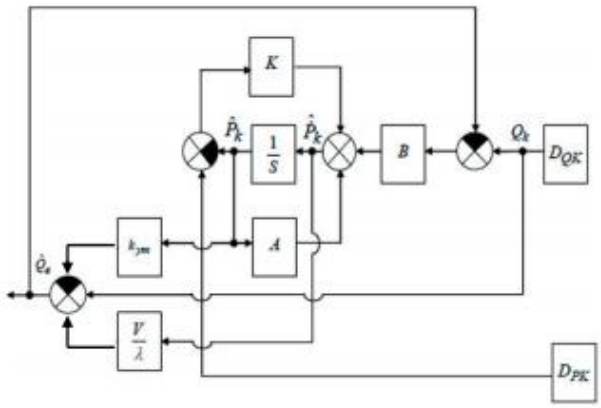
Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що найбільш ефективні алгоритми управління та регулятори прецизійних САР можна синтезувати на основі рішення зворотних задач динаміки керованого об’єкта. Такі алгоритми забезпечують швидке реагування системи, надійну компенсацію помилок будь-якого порядку астатизму, мають уніфіковану та просту у практичній реалізації структуру, стійкі до зміни параметрів об’єкта під час експлуатації і дозволяють ефективно керувати об’єктом, використовуючи лише один вимірюваний сигнал – вихідний регульований параметр.

Виходячи з цього, доцільно синтезувати всі автономні контури мультиплікативного регулятора (рис. 2.5) на основі розв’язання зворотних задач динаміки відповідних елементів. Відповідно до структурної схеми об’єкта регулювання (рис. 2.4), загальна структура мультиплікативного регулятора (рис. 2.5) включає три контури для об’єктів першого динамічного порядку (сервоклапан, турбіна, компресор) і один контур для об’єкта третього динамічного порядку (гідродвигун).

Для зменшення впливу статичних нелінійностей електрогідравлічного виконавчого механізму – таких як позитивні перекриття золотника, сухе тертя, люфти та нечутливість – у регуляторі положення сервоклапана застосовано спеціальний блок корекції статичних нелінійних характеристик. Структурні схеми автономних регуляторів представлені на рис. 2.6.



а



б

а – для динамічного об’єкту першого порядку; б – для динамічного об’єкту третього порядку

Рисунок 2.6 – Структурні схеми астатичних регуляторів, побудованих на вирішенні зворотних задач динаміки

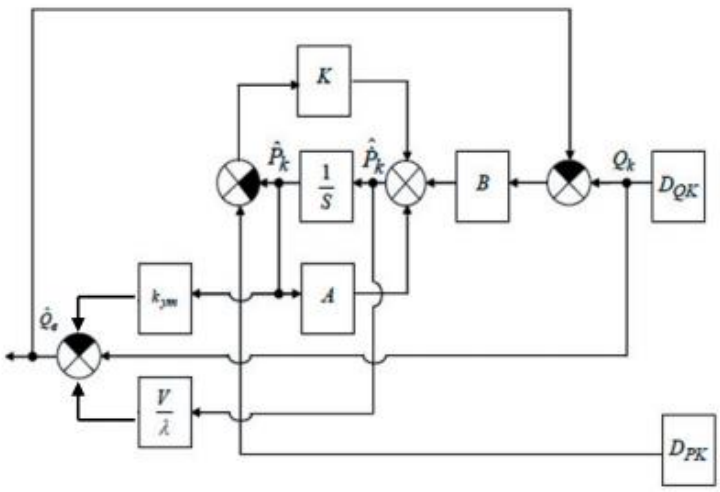


Рисунок 2.7 – Структурна схема еталонної моделі-спостерігача для повітропроводу

Запропонована структура мультиплікативного регулятора забезпечує високу величину загального коефіцієнта підсилення в області малих сигналів і «зону стабілізації» при переході до номінального коефіцієнта підсилення, що дозволяє підтримувати стійкість системи (рис. 2.5).

Дана структура регулятора компенсує всі основні типи похибок САР продуктивності турбокомпресора, включаючи астатизм і статичні нелінійності елементів виконавчого механізму, а також систематичні й випадкові похибки вимірювального каналу регульованої величини – витрати повітря.

Параметричний синтез регуляторів виконано за універсальними методиками оптимізації, розробленими на основі рішень зворотних задач динаміки. Критерієм оптимізації обрано мінімум інтегралу від добутку абсолютного значення похибки на час, що дозволяє досягти оптимального балансу між статичною та динамічною точністю регулювання. На основі цього критерію визначено оптимальні параметри універсальних регуляторів для об’єктів першого та третього порядків.

У роботі виконано такі ключові завдання:

– проведено аналіз існуючої АСУТП доменної печі ПАТ «Запоріжсталь»;

– досліджено систему автоматичного регулювання охолодження доменної печі та турбоагрегатів;

– створено математичну модель турбокомпресорного агрегату з урахуванням основних функціональних зв’язків і параметрів, чисельні значення яких ідентифіковані експериментально;

– розроблено структуру чотирьохконтурного мультиплікативного регулятора для практичної реалізації та налагодження, що включає автономні контури керування положенням золотника сервоклапана, положенням гідродвигуна, частотою обертання турбіни та продуктивністю турбокомпресора;

– запропоновано уніфіковані структурні схеми алгоритмів керування для всіх автономних контурів на основі рішення зворотних задач динаміки;

– виконано структурно-параметричний синтез фільтра Калмана для відокремлення сигналу витрати повітря від випадкових збурень;

– запропоновано запатентований метод компенсації систематичних похибок витрати повітря шляхом порівняння з еталонною градуювальною характеристикою в мікропроцесорному блоці;

– розроблено спосіб компенсації статичних нелінійностей виконавчого механізму (сухе тертя, люфти, нечутливість) за допомогою змінного коефіцієнта підсилення з «горизонтальною зоною стабілізації»;

– створено уніфіковані структурні схеми прецизійних регуляторів, що забезпечують компенсацію всіх статичних і динамічних похибок;

– виконано параметричний синтез цих регуляторів і отримано універсальні матричні співвідношення для визначення оптимальних параметрів за критерієм мінімуму інтеграла абсолютної помилки.

Висновки. У цьому розділу узагальнено результати комплексної модернізації автоматизованих систем керування ключовими агрегатами доменного виробництва ПАТ «Запоріжсталь». На основі детального аналізу існуючої АСУ ТП було виявлено критичні недоліки в системі охолодження доменної печі, зокрема низьку точність ручного контролю температури та відсутність автоматизованого моніторингу динаміки теплових потоків. Запропоноване рішення на базі сучасних промислових контролерів ICOP та розподілених модулів збору даних дозволило повністю автоматизувати циклічне опитування датчиків, впровадити цифрову візуалізацію параметрів у вигляді мнемосхем та забезпечити превентивну діагностику прогарів холодильників, що суттєво підвищує надійність експлуатації печі.

Окрему увагу приділено вдосконаленню системи автоматичного регулювання частоти обертання турбокомпресорного агрегату, що є визначальним для стабільності подачі повітря. Розроблена математична модель агрегату, яка враховує нелінійні динамічні зв'язки між паровою турбіною та відцентровим компресором, була успішно ідентифікована за результатами

промислових експериментів. Це дозволило здійснити перехід від традиційних ПІД-регуляторів до прогресивного чотириконтурного мультиплікативного керування. Застосування алгоритмів, побудованих на розв’язанні зворотних задач динаміки, забезпечило системі високу завадостійкість та здатність компенсувати статичні нелінійності виконавчих механізмів, такі як сухе тертя та люфти.

Наукову та практичну цінність розділу підсилює впровадження інтелектуальних методів обробки сигналів, зокрема використання фільтра Калмана-Бюси для відокремлення корисного сигналу витрати повітря від вихрових шумів та пульсацій тиску. У поєднанні із запатентованою методикою мікропроцесорної корекції систематичних похибок вимірювання, це дозволило досягти прецизійної точності регулювання продуктивності агрегату. Таким чином, запропонований комплекс модернізації створює цілісну цифрову інфраструктуру, яка гарантує оптимальний тепловий режим печі та енергоефективний розподіл дуття, що безпосередньо сприяє зниженню питомої витрати коксу та підвищенню якості чавуну.

3 РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-МОДУЛЮЮЧОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ РЕЖИМАМИ ВИПЛАВКИ

3.1 Структура АСУ ТП доменної плавки

Сучасні автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП) доменної плавки є складними комплексами, які відрізняються за структурою, функціональним призначенням та технічними особливостями реалізації. Як правило, вони мають ієрархічну, багаторівневу, відкриту та розподілену архітектуру [19, 20]. Кожен рівень системи характеризується специфічними функціями, моделями, апаратними та програмними засобами.

Автоматизований технологічний комплекс доменної печі як об’єкт контролю та управління має такі особливості:

– значна кількість контрольованих змінних і розрахункових параметрів;

– обмежена прозорість процесу через неможливість прямого спостереження за окремими стадіями плавки;

– затримка у отриманні інформації про кінцеві результати плавки, що ускладнює визначення першопричини відхилень у роботі печі;

– тісний взаємозв’язок усіх процесів плавки за умов обмежених ресурсів управління;

– наявність випадкових перешкод вимірювального характеру, що знижує точність отримуваної інформації.

Структура АСУ ТП доменної печі включає наступні рівні:

Перший рівень (I/O – Input/Output):

Інструментальна система на базі контрольно-вимірювальних приладів та автоматики (КВПіА), що складається з датчиків, виконавчих механізмів та допоміжних пристроїв для збору первинної інформації та реалізації керуючих впливів.

Другий рівень (Control Level):

Рівень базової автоматизації, призначений для безпосереднього управління технологічним процесом через пристрої зв’язку з об’єктом (УСО) та програмовані логічні контролери (PLC – Programmable Logic Controller).

Третій рівень (SCADA Level):

Супервізорна система SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) забезпечує збір даних та диспетчерське управління технологічним процесом, приймає тактичні рішення, орієнтовані на підтримку стабільності доменної плавки.

Четвертий рівень (MES Level):

Система управління виробництвом (MES – Manufacturing Execution Systems) виконує обробку та збереження інформації про хід процесів у різних доменних печах цеху, забезпечує координацію роботи комплексу доменних печей, а також надає дані у реальному часі для вищих рівнів управління підприємством. Основне завдання цього рівня – впорядкування первинної інформації та її передача на рівень планування ресурсів.

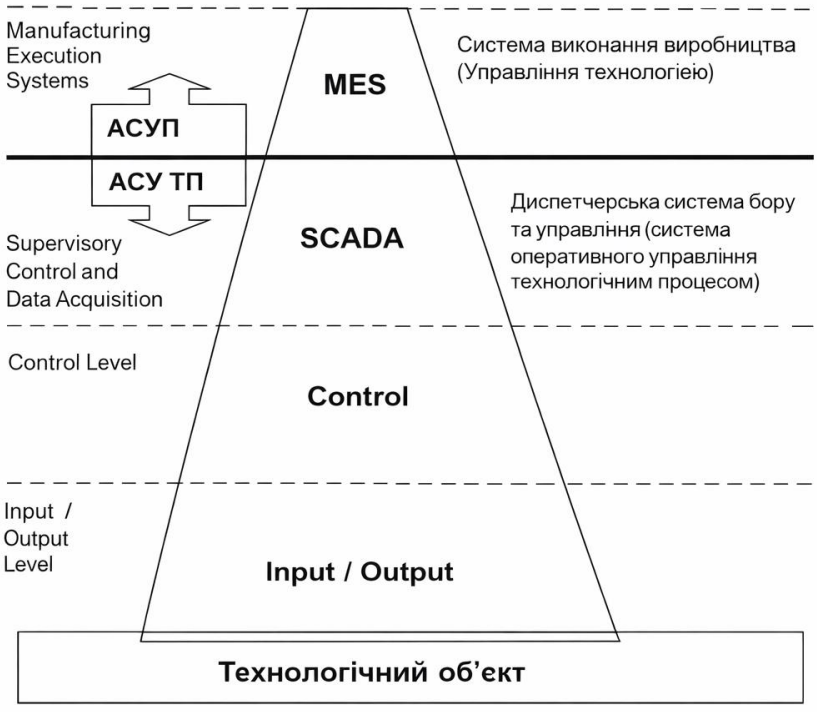


Рисунок 3.1 – Рівні автоматизованої інформаційної системи

Сучасні завдання управління комплексом доменних печей передбачають оптимізацію використання ресурсів цеху як єдиного організаційно-технологічного комплексу. Це досягається шляхом оперативного контролю та обліку параметрів, що характеризують стан об’єкта управління, з урахуванням вказівок від верхнього рівня управління. Основна мета створення системи управління комплексом печей полягає у забезпеченні стабільного функціонування виробництва при мінімізації собівартості продукції, враховуючи технологічні обмеження та технічні можливості обладнання.

Сучасний підхід до управління доменним процесом передбачає використання засобів отримання об’єктивної інформації про технологічні параметри та потенціал інтелектуальних систем для наближення процесу управління до повністю автоматизованого рівня. Крім того, системи підтримки прийняття рішень в комп’ютеризованих інформаційних системах допомагають операторам АСУТП вирішувати складні, погано структуровані задачі через інтерактивну взаємодію з комп’ютером, використовуючи дані та математичні моделі.

3.2 Функціональна модель автоматизованої інформаційної системи аналізу і прогнозування виробничих ситуацій

Функціональна структура інформаційної системи аналізу та прогнозування виробничих процесів доменного цеху (АІС АППС ДЦ) створена з урахуванням потреб інженерно-технологічного персоналу.

На основі проведеного аналізу вимог до системи та її функціональних можливостей, її архітектуру доцільно розглядати як сукупність декількох ключових підсистем (згідно з рис. 3.2):

Збір, первинна обробка та зберігання даних. Ця підсистема відповідає за формування бази даних, що містить усі необхідні вихідні дані для ефективного функціонування АІС АППС ДЦ.

Візуалізація параметрів роботи печей та цеху в цілому. Підсистема дозволяє будувати графічні тренди за вибраними параметрами у будь-яких комбінаціях та за обраний часовий інтервал.

Формування технічних звітів. Вона забезпечує генерацію детальних звітів про роботу доменних печей і цеху за визначені періоди експлуатації.

Порівняльний аналіз роботи печей і цеху. Підсистема дає змогу порівнювати продуктивність цеху або окремої печі за набором обраних параметрів у заданому часовому проміжку.

Модельна підтримка прийняття рішень. Ця підсистема реалізує прогнозування технологічних ситуацій, діагностику роботи печей і сприяє оптимальному вибору рішень для управління виробничим процесом.



Рисунок 3.2 – Функціональна структура системи

Реалізація підсистеми базується на алгоритмах розрахунку, що застосовують математичні моделі доменного процесу для заданого користувачем періоду роботи окремих печей або цеху в цілому. Аналіз особливостей доменного процесу свідчить, що підсистема модельної підтримки прийняття рішень для аналізу та прогнозування роботи доменного цеху повинна включати наступні взаємопов'язані підсистеми нижчого рівня:

- розрахунок балансів елементів;
- шлаковий режим;
- газодинамічний режим;
- тепловий режим;
- діагностика ходу доменної плавки.

Ці підсистеми охоплюють ключові явища, характерні для доменного процесу, та взаємодіють як між собою, так і з іншими блоками системи та зовнішнім середовищем. Наступним етапом після визначення структури АІС АППС ДЦ є функціональне моделювання системи.

Методологічною основою проектування автоматизованої інформаційної системи аналізу та прогнозування виробничих ситуацій доменного цеху слугували принципи та нотації методики структурного аналізу і проектування IDEF0. Ця методика є розвитком графічної мови SADT (Structural Analysis and Design Technique), запропонованої Дугласом Россом. Використання IDEF0 дозволило змоделювати функціональну структуру програмного комплексу, визначити виконувані функції, взаємозв'язки між ними, а також управляючі впливи та механізми реалізації кожної функції, що дало змогу на ранньому етапі проектування запобігти потенційним помилкам.

На верхньому рівні функціональної моделі АІС виділено два основних потоки вхідної інформації: дані з систем АСУ ТП та корпоративної інформаційної системи (КІС), а також звітні документи щодо виробництва. Деталізація вхідних даних здійснюється на наступних рівнях декомпозиції.

Інтерфейс управління системою складається з чотирьох логічних блоків:

– документи, що включають технологічні інструкції та керівництва користувачів;

– нормативно-довідкова інформація (НДІ);

– вимоги користувачів;

Опис математичних моделей та алгоритмів, на основі яких реалізовано програмне забезпечення для аналізу та прогнозування роботи доменних печей і цеху.

Документи розглядаються як затверджені стандарти підприємства інструкції ведення технологічних процесів та керівництва користувачів, призначені для роботи з автоматизованими робочими місцями.

3.3 Розробка структури системи обробки даних

Ключовим елементом АІС АППС ДЦ є система зберігання даних, яка розгортається на сервері бази даних Інформаційно-обчислювального центру аглодоменного виробництва (ІОЦ ДЦ). Джерелами наповнення цієї системи виступають апаратно-програмні комплекси АСУ доменного цеху, корпоративна інформаційна система (КІС) та центральна диспетчерська служба комбінату (КДК). В залежності від потреб окремих підсистем можливо встановлювати різні інтервали усереднення даних у базі, що реалізується за допомогою функцій СУБД.

На рисунку 3.3 наведена структура підсистеми, у якій виділено основні складові для її програмної реалізації.

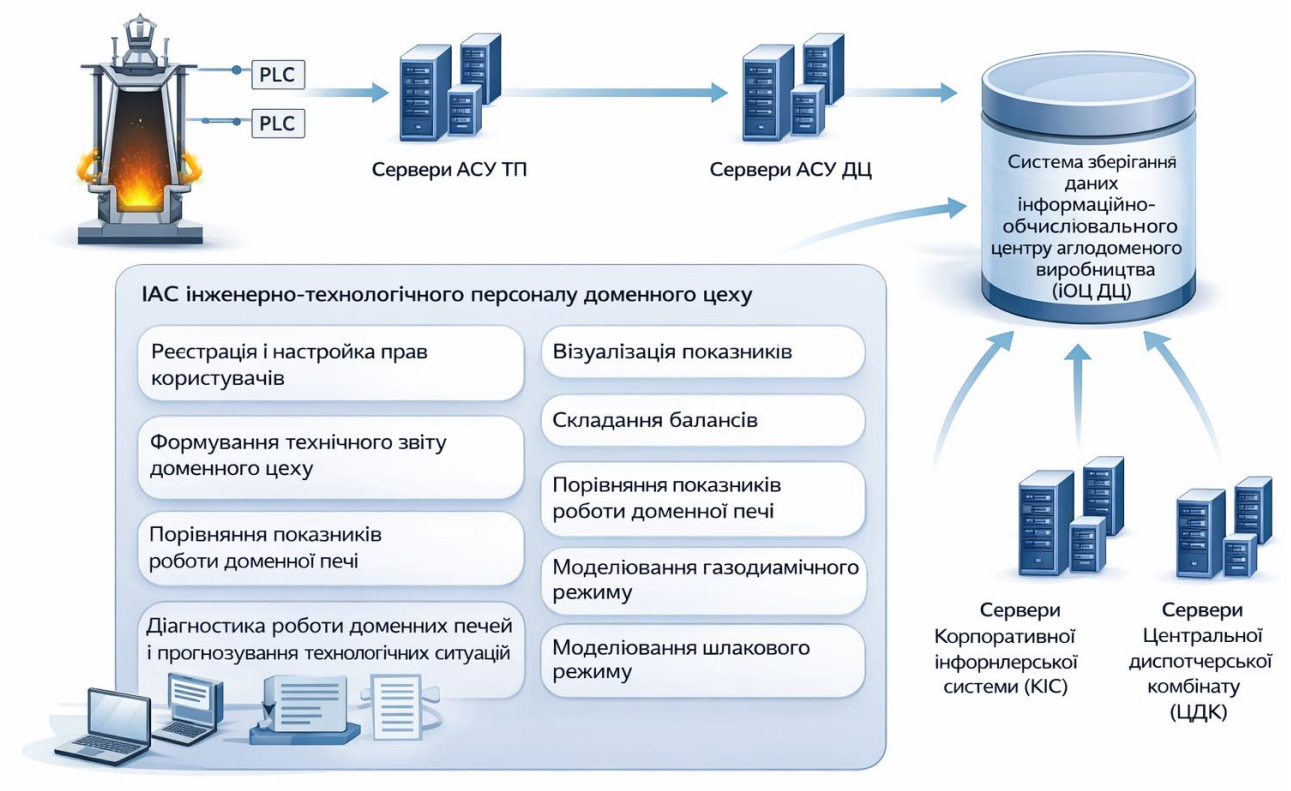


Рисунок 3.3 – Структурна схема підсистеми збору, первинної обробки та зберігання даних АІС АППС ДЦ

Функціональні можливості системи передбачають гнучкість у часових інтервалах обробки інформації. Зокрема, модулі візуалізації аналітичних даних оперують мінімальним кроком агрегації на рівні середньозмінних значень. Водночас блок генерації технічної звітності орієнтований на ширші часові межі: він дозволяє формувати вибірки за календарний місяць або кумулятивно – від початку року до вказаної дати.

Запропонована архітектурна модель (див. рис. 3.3) гарантує повну відповідність специфіці галузі та забезпечує:

– можливість масштабування та модифікації системи з мінімальними витратами ресурсів;

– автономність розробки програмних компонентів;

– незалежність програмної логіки від фізичної організації даних.

Критерії проектування структури БД:

1. Для забезпечення стабільної та ефективної роботи інформаційної системи, архітектура бази даних має відповідати наступним принципам:

2. Універсальність та абстракція: Структура таблиць повинна залишатися незмінною навіть у разі інтеграції нових параметрів моніторингу.

3. Дотримання 3NF (Третьої нормальної форми): Це передбачає усунення надлишковості інформації та встановлення логічно обґрунтованих взаємозв'язків між сутностями.

4. Цілісність даних: Впровадження механізмів валідації для блокування некоректних або логічно суперечливих записів на етапі введення чи редагування.

5. Відповідність предметній області: Побудова реляційних зв'язків, що ідентично відтворюють реальні процеси об’єкта автоматизації.

Важливе зауваження: Попри те, що повна нормалізація є еталоном для транзакційних систем (OLTP), у певних випадках припускається контрольована денормалізація. Це рішення може бути виправданим для підвищення швидкодії системи під час виконання складних аналітичних запитів.

Аудит та адміністрування

Система повинна підтримувати механізм логіювання (версійності), що дозволяє відстежувати історію будь-яких коригувань у робочих таблицях. Крім того, ідентифікація користувачів та обладнання, задіяного в робочих процесах, має суворо регламентуватися через систему взаємопов'язаних довідників.

Структура бази даних підсистеми збору, первинної обробки та зберігання даних. Аналіз вимог до функціональності системи, що розробляється і існуючого на комбінаті інформаційного забезпечення корпоративної бази даних дозволив сформувати структурну схему підсистеми АІС АППС ДЦ, яка відображатиме можливості проведення збору, первинної обробки та зберігання даних для кожної окремої підсистеми. В ході цього процесу надані порівняно незалежні інформаційні блоки, що моделюють окремі аспекти доменного виробництва (рис. 3.4).

Виділені блоки дозволяють використовувати теми, збережені в них дані одночасно в різних підсистемах. Центральною ланкою є структура бази даних, яка розташовується на сервері ІОЦ ДЦ в корпоративній мережі комбінату. Етапи розробки зовнішніх моделей бази даних будуть розглянуті далі при описі процесів проектування і реалізації окремих підсистем АІС АППС ДЦ.

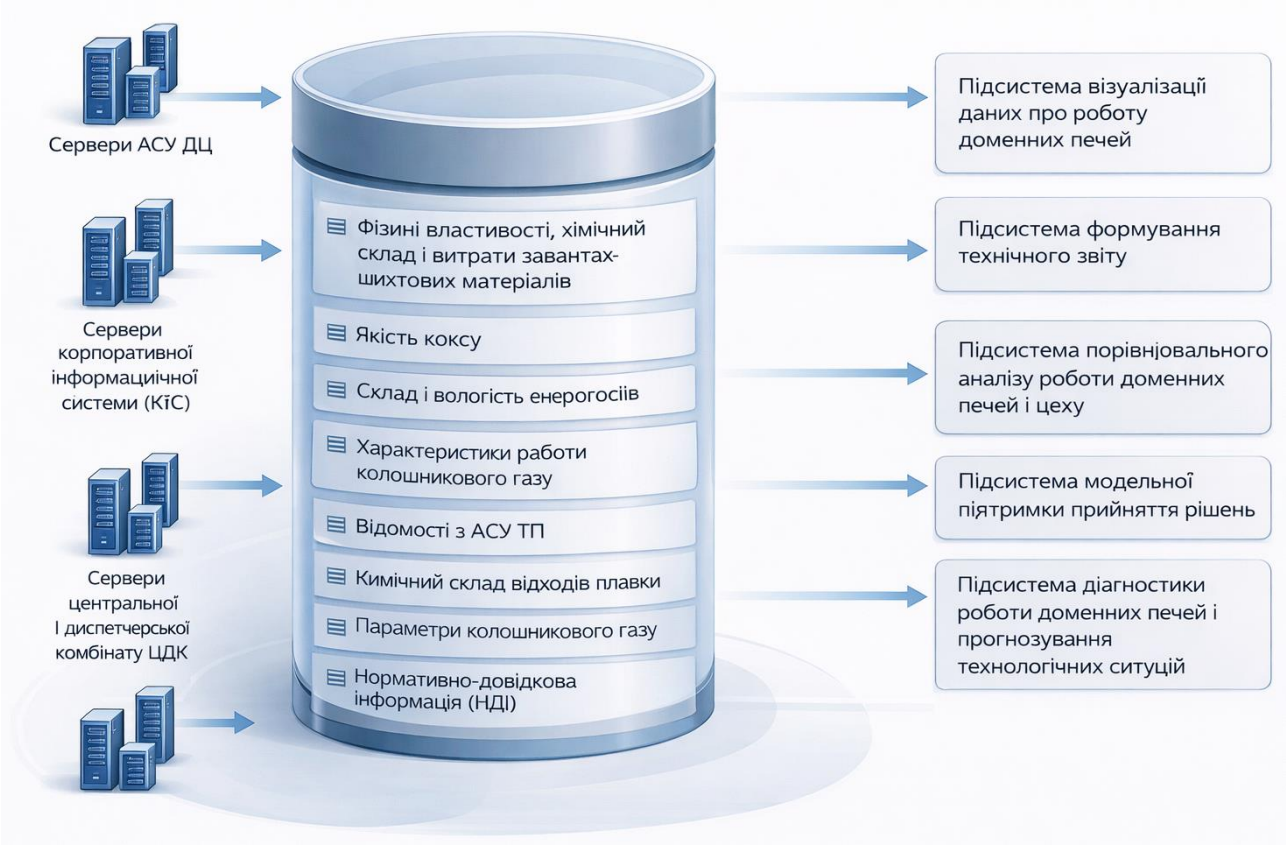


Рис. 3.4 – Узагальнення структура бази даних АІС АППС ДЦ

3.4 Розробка структури підсистем підтримки прийняття рішень

Архітектура інтелектуальної підтримки та аналізу доменного виробництва.

Комплексна підсистема, що відповідає за діагностику станів, прогнозування технологічних сценаріїв та модельну підтримку управлінських рішень, базується на наступних функціональних вузлах:

Аналітичний блок обчислення балансів: охоплює розрахунки теплових та матеріальних потоків, а також розподіл специфічних хімічних компонентів.

Діагностично-прогностичний блок: призначений для моніторингу газодинамічних процесів, шлакового та теплового режимів роботи печі з метою завчасного виявлення відхилень у технології.

Модуль балансових розрахунків:

– розрахункова частина системи деталізує показники доменної плавки за такими напрямками;

– загальний баланс матеріалів;

– енергетичний (тепловий) баланс процесу;

– поелементний баланс (аналіз масопереносу заліза, сірки, цинку, хрому, ванадію, титану, оксиду кальцію та лужних сполук).

Варто зауважити, що алгоритмічна база та математичний апарат для моделювання теплових і матеріальних балансів базуються на фундаментальних розробках фахівців УДТУ-УПІ, виконаних у попередні періоди [16, 19].

Особливості аналізу розподілу елементів

Схематичне представлення модуля розрахунку балансу окремих хімічних елементів наведено на рис. 3.5. Даний інструментарій дозволяє з високою точністю встановити питому вагу надходження та виходу Fe, S, Zn, Cr, V, Ti, CaO та лугів.

Для функціонування підсистеми використовуються такі вхідні дані:

– характеристики дуття: тиск, температура, вологість;

– параметри шихти: фізико-хімічні властивості, компонентний склад та обсяги завантаження сировини;

– показники продуктів плавки: хімічний склад і вихід рідкого чавуну та шлаку.

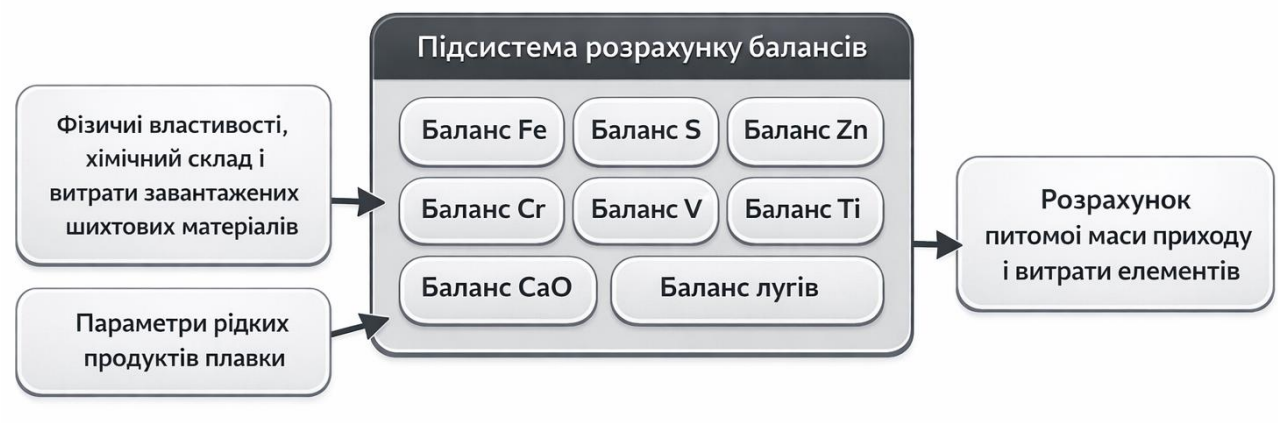


Рисунок 3.5 – Структура підсистеми розрахунку балансів доменної плавки

В основу функціонування підсистеми діагностики та прогнозування технологічних режимів доменної плавки (теплового, шлакового та газодинамічного) покладено метод натурно-математичного моделювання [9, 16, 19]. Архітектура даного підходу базується на взаємодії двох ключових компонентів: базової (еталонної) та прогнозної моделей.

1. Модель еталонного (базового) стану.

Цей блок призначений для аналізу поточної ситуації на основі усереднених фактичних показників за обраний базовий цикл.

Призначення: Служить «точкою відліку» (аналогом-стандартом) для порівняльного аналізу та узагальнення результатів роботи різних печей чи підприємств.

Адаптація: Використовується для калібрування математичного апарату під реальні умови експлуатації. Вхідними даними тут виступають фактичні параметри шихтових матеріалів, характеристики комбінованого дуття, показники колошникового газу та вихідних продуктів плавки.

2. Прогнозуюча модель.

Спираючись на результати, отримані від еталонної моделі, цей модуль дозволяє змоделювати проектний період — гіпотетичний стан печі при зміні зовнішніх факторів, які ще не були впроваджені в реальності.

Функціональні можливості прогнозування:

– оцінка наслідків використання нових видів залізорудної сировини або флюсів;

– прорахунок сценаріїв при зміні параметрів дуття;

– оптимізація складу агломераційної та доменної шихти;

– моделювання динаміки шлакового режиму та газодинаміки;

– технологічні переваги підходу.

Розроблена математична модель вирізняється високою гнучкістю та надійністю завдяки таким властивостям:

Адаптивність обчислень: структура алгоритмів підлаштовується під конкретне технологічне завдання та специфіку існуючої системи збору даних.

Завадостійкість: здатність системи генерувати достовірні прогнози навіть за умови наявності «інформаційного шуму» або похибок у вхідних даних.

Конфігурація та налаштування.

Для точної інтеграції системи в умови конкретного виробництва передбачено блок «Налаштування», що складається з трьох ключових підсистем:

– нормативно-довідкова база: зберігання стандартів та констант;

– коригувальні коефіцієнти: механізм тонкого калібрування розрахунків;

– параметри діагностики: індивідуальні налаштування критеріїв оцінки стану печі.

Детальна візуалізація архітектури натурно-модельного підходу наведена на рис. 3.6.

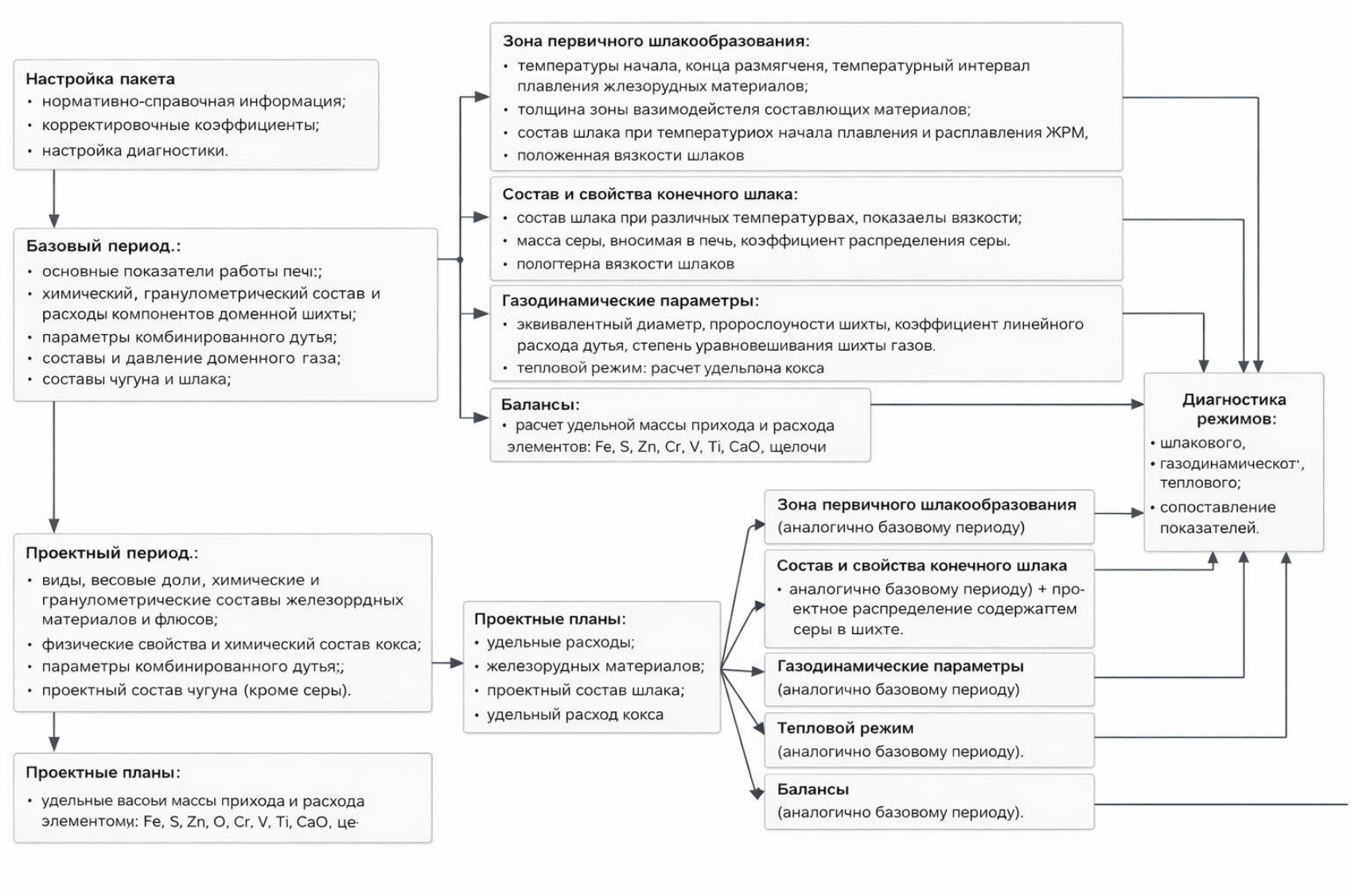


Рисунок 3.6 – Структура підсистеми моделювання доменної плавки

3.5 Розробка математичної моделі системі аналізу і прогнозування виробничих ситуацій

Дослідження природи нелінійності доменної плавки дозволило дійти висновку щодо можливості спрощення математичного апарату при розв'язанні задач оптимізації. Зокрема, у процесі розподілу паливно-енергетичних ресурсів було встановлено, що фактичні коливання параметрів відносно базового (еталонного) стану є порівняно незначними.

Завдяки цьому, для розрахунків доцільно застосовувати лінеаризовані залежності. Такий підхід забезпечує:

– зниження обчислювальної складності без суттєвої втрати точності в межах робочого діапазону;

– стабільність алгоритмів при пошуку оптимальних значень витрат енергоносіїв;

– прогнозну спроможність моделі в умовах реального часу, де швидкість прийняття рішень є критичною.

Оскільки відхилення в системі не виходять за межі зони квазілінійності, апроксимація лінійними функціями є цілком виправданою для оперативного управління енергоефективністю доменної печі [16, 19 – 21].

Оптимізаційна модель в загальному випадку зводиться до наступного.

Цільова функція:

$$Z = \sum_{i=1}^{n} \{\alpha(e_i C_k - C_{пг}) + (1-\alpha)\, C_п\, [\Delta П_i^{пг} - e_i \Delta П_i^{к}]\}\, V_i^{пг} \rightarrow \max_{V_i^{пг}} \qquad (3.1)$$

де Z – ефективність використання природного газу по цеху, грн./год;

n – число печей в розглянутій групі (цеху);

α – ваговий коефіцієнт, $0 < \alpha \leq 1$;

e_i – еквівалент заміни коксу, кг коксу/м^3 природного газу;

C_k – вартість коксу, руб. /кг коксу;

$С_п$ – умовно-постійний коефіцієнт, грн. /т чавуну;

$П_i^{пг}$ – зміна продуктивності, т чавуну /м^3 природного газу;

$П_i^{К}$ – зміна продуктивності печі, т чавуну/кг коксу;

$V_i^{пг}$ – витрата природного газу, м^3/год.

За витратою природного газу:

$$\sum_{i=1}^{n} V_i^{пг} \le V_{пг}^{\Sigma}, \qquad (3.2)$$

де $V_{нг}^{\Sigma}$ – ресурс цеха по природному газу, м^3/год.

По витратою коксу:

$$\sum_{i=1}^{n} \{K_{0i} + 0{,}001(V_{i0}^{пг} - V_i^{пг})\, e_i\} \le K_{\Sigma}, \qquad (3.3)$$

де K_{0i} – витрата коксу на піч, т/год;

К – резерв по коксу цеху, т/год;

$V_{i0}^{пг}$ – витрата природного газу на піч в базовому періоді, м^3/год.

Таким чином, в найзагальнішому вигляді постановка задачі оптимізації в доменному цеху передбачає врахування наступних обмежень на роботу цеху:

– обсяг виділеного цеху природного газу $V_{пг}^{\Sigma}$;

– планове (необхідну) виробництво чавуну $П_{\Sigma}$;

– наявні в розпорядженні цеху ресурси по витраті коксу K_{Σ}.

По об’єму виробництва чавуну

$$\sum_{i=1}^{n}\{(V_i^{пт} - V_{i0}^{пт})\,\Delta П_i^{пт} - e_i\,(V_i^{пт} - V_{i0}^{пт})\,\Delta П_i^{к} + П_{i0}\} \geq П_{\Sigma}\,, \tag{3.4}$$

де $П_{\Sigma}$ – необхідна виробництво чавуну в цеху, т/год;

$П_{i0}$ – продуктивність і-й печі, т/год.

У процесі виконання завдання можлива ситуація, коли цех не може повністю або частково ефективно використовувати всі зазначені ресурси, тоді частина (або навіть всі) обмежень, зазначених вище, можуть виявитися несуттєвими і вони могли б не враховуватися в процесі вирішення. Однак це не очевидно і стає зрозумілим тільки після виконання процедури вирішення.

Технологічні обмеження на кожну з печей цеху.

При виборі основних обмежень на тепловий стан доменної печі використовувалися фізичне обґрунтування та класифікація факторів, що лімітують при інжекції палив в доменні печі, представлені в роботах Б.І. Китаєва та його учнів [11,16,19].

Узагальнені технологічні вимоги, що визначають граничні умови використання природного газу, включають:

– термічний баланс: підтримання необхідного теплового рівня як у верхній, так і в нижній зонах теплообміну;

– повнота реакцій: гарантування завершеності процесів конверсії газу безпосередньо у фурмених зонах;

– газодинамічна стабільність: запобігання порушенням руху газового потоку крізь шар шихтових матеріалів;

– відновна ефективність: досягнення максимальних показників використання хімічної енергії водню та монооксиду вуглецю;

– якість продукції: отримання чавуну із заданими фізико-хімічними властивостями, зокрема контроль граничного вмісту сірки.

Як параметри, що характеризують тепловий стан печі, прийняті:

$$Q_{нi}^{min} \le \{(V_i^{пг} - V_{i0}^{пг})\,\Delta Q_{iн}^{пг} - e_i\,(V_i^{пг} - V_{i0}^{пг})\,\Delta Q_{iн}^{к} + [\Delta П_i^{пг}\,(V_i^{пг} - V_{i0}^{пг}) - e_i(V_i^{пг} - V_{i0}^{пг})\,\Delta П_i^{к}]\,\Delta Q_{iн}^{п} + Q_{iн0}\} \le Q_{нi}^{max}, \quad (3.5)$$

де $Q_{нimin}$ – мінімально допустиме значення індексу низу, МДж/т чавуну;

$Q_{iнпг}$ – приріст теплового стану низу печі при збільшенні витрати природного газу на м^3/ч, тобто МДж/т чавуну/(м^3/год);

$Q_{iнк}$ – приріст теплового стану низу печі при збільшенні витрати коксу на кг коксу/год, тобто МДж/т чавуну/(кг коксу/ч);

$Q_{iнп}$ – приріст теплового стану низу печі при збільшенні потужності печі на т / год, тобто МДж /т чавуну/(т чавуну/год);

$Q_{iн0}$ – індекс теплового стану низу печі в базовому режимі, МДж/т чавуну;

$Q_{нimax}$ – максимально допустиме значення індексу низу печі, МДж/т чавуну.

– теоретична температура горіння на фурмах:

$$T_i^{min} \le (V_i^{пг} - V_{i0}^{пг})\,\Delta T_i^{пг} + T_i^{0}) \le T_i^{max}, \quad (3.6)$$

де i_{min}, i_{max} – мінімально і максимально допустимі значення теоретичних температур горіння, °С;

$i_{пг}$ – зміна теоретичної температури горіння при збільшенні витрати природного газу на печі на м^3/ч, тобто °С/(м^3/год);

T_i^0 – теоретична температура горіння на і-й печі в базовому періоді, °С;

– вміст кремнію в чавуні:

$$Si_i^{min} \le (V_i^{пг} - V_{i0}^{пг})\,\Delta Si_i^{пг} - e_i\,(V_i^{пг} - V_{i0}^{пг})\,\Delta Si_i^{к} + [\Delta П_i^{пг}\,(V_i^{пг} - V_{i0}^{пг}) - e_i(V_i^{пг} - V_{i0}^{пг})\,\Delta П_i^{к}]\,\Delta Si_i^{п} + Si_{i0} \le Si_i^{max}, \quad (3.7)$$

де S_{iimin}, S_{iimax} – мінімально і максимально допустимі вмісту кремнію в чавуні,%;

$S_{iiпг}$ – приріст вмісту кремнію в чавуні (у відсотках) при збільшенні витрати природного газу на $м^3$/ч;

$S_{iiк}$ – приріст вмісту кремнію в чавуні (у відсотках) при збільшенні витрати коксу на кг/год;

$S_{iiп}$ – приріст вмісту кремнію в чавуні (у відсотках) при збільшенні продуктивності печі на т/год;

S_{ii0} – вміст кремнію в чавуні в базовому періоді, %;

– відношення теплоємностей потоків шихти і газу в верхньому щаблі теплообміну:

$$m_i^{min} \le (V_i^{пг} - V_{i0}^{пг})\,\Delta m_i^{пг} - e_i\,(V_i^{пг} - V_{i0}^{пг})\,\Delta m_i^{к} + [\Delta П_i^{пг}\,(V_i^{пг} - V_{i0}^{пг}) - e_i\,(V_i^{пг} - V_{i0}^{пг})\,\Delta П_i^{к}]\;\Delta m_i^{п} + m_{i0} \le m_i^{max}, \quad (3.8)$$

де m_{imin}, m_{imax} – мінімально і максимально допустимі значення відносини теплоемкостей потоків;

$m_{iпг}$ – зміна ставлення теплоємностей потоків при збільшенні витрати природного газу на $м^3$/ч;

$m_{iк}$ – зміна ставлення теплоємностей потоків при збільшенні витрати коксу на кг/год;

$m_{iп}$ – зміна ставлення теплоємностей потоків при збільшенні продуктивності печі на т/год;

m_{i0} – відношення теплоємностей потоків на печі в базовому режимі;

Облік повноти конверсії природного газу та газодинамічного режиму доменної плавки зводиться до наступного:

– прямі обмеження на витрату природного газу на кожну з печей цеху:

$$V_{imin}^{пг} \le V_i^{пг} \le V_{imax}^{пг},$$

де $V_{пг}$, $V_{пг}$ – відповідно мінімально та максимально допустимі витрати природного газу, $м^3$/год;

– ступінь врівноваження шихти:

$$C_{yi}^{min} \le (V_i^{пг} - V_{i0}^{пг})\,\Delta C_{yi}^{пг} - e_i\,(V_i^{пг} - V_{i0}^{пг})\,\Delta C_{yi}^{к} + C_{yi0} \le C_{yi}^{max}, \quad (3.9)$$

де C_{yi}^{min}, C_{yi}^{max} – відповідно мінімально та максимально допустимі ступеня урівноваження шихти;

$C_{yi}^{пг}$ – зміна ступеня урівноваження шихти при збільшенні витрати природного газу на $м^3/ч$;

$C_{yi}^{до}$ – зміна ступеня урівноваження шихти при збільшенні витрати коксу на кг/год;

C_{yi}^{0} – ступінь врівноваження шихти в базовому періоді;

– якість виплавленого чавуну оцінюється за вмістом сірки в чавуні:

$$S_i^{min} \le (V_i^{пг} - V_{i0}^{пг})\,\Delta S_i^{пг} - e_i\,(V_i^{пг} - V_{i0}^{пг})\,\Delta S_i^{к} + [\Delta П_i^{пг}\,(V_i^{пг} - V_{i0}^{пг}) - e_i\,(V_i^{пг} - V_{i0}^{пг})\,\Delta П_i^{к}]\,\Delta S_i^{п} + S_{i0} \le S_i^{max}, \quad (3.10)$$

де S_i^{min}, S_i^{max} – відповідно мінімально та максимально допустимі вмісту сірки в чавуні,%;

$S_i^{пг}$ – приріст вмісту сірки в чавуні (у відсотках) при збільшенні витрати природного газу на $м^3/ч$;

$S_{iк}$ – приріст вмісту сірки в чавуні (у відсотках) при збільшенні витрати коксу на кг/год;

$S_i^{п}$ – приріст вмісту сірки в чавуні (у відсотках) при збільшенні продуктивності печі на т/год;

S_{i0} – вміст сірки в чавуні на даній печі в базовому періоді, %.

Висновки. Запропонований підхід суттєво відрізняється від існуючих аналогів глибшою інтеграцією технологічних лімітів, що охоплюють тепловий баланс верхньої та нижньої зон печі, показники хімічного нагріву через

концентрацію кремнію, якісні характеристики металу за вмістом сірки, а також комплексні газодинамічні параметри. При цьому конкретні числові межі цих показників встановлюються через механізм експертних оцінок, що дозволяє адаптувати математичний апарат до специфіки живого виробництва шляхом формалізації професійного досвіду інженерного корпусу. З обчислювальної точки зору процедура пошуку оптимальних обсягів подачі природного газу та кисню є цілком реалізованою завдяки широкому спектру сучасних інструментів лінійного програмування, таких як середовища MS Excel, MatLAB чи MathCAD.

Розроблений інструментарій демонструє високу універсальність, дозволяючи моделювати стратегії розподілу енергоносіїв у різноманітних сценаріях: від умов стабільного чи змінного ліміту газу на весь цех до розрахунку граничної поглинальної здатності комплексу печей щодо комбінованого дуття. Модель однаково ефективно працює як при коливаннях запасів коксу чи планових обсягів виплавки чавуну, так і при трансформації ринкових пріоритетів, коли необхідно зміщувати фокус між максимальною продуктивністю, паливною економністю чи загальною рентабельністю з урахуванням динаміки цін. Навіть при зміні конструктивних або режимних характеристик окремих агрегатів система зберігає свою функціональність.

Процес ідентифікації коефіцієнтів для оптимізаційного алгоритму передбачає обов’язкову стадію аналізу ретроспективних даних кожної печі для точного налаштування моделі, після чого здійснюється серія прогнозних ітерацій. Під час таких розрахунків вивчається реакція теплового, шлакового та газодинамічного режимів на послідовну варіацію витрат паливних компонентів за умови стабільності інших чинників. У кінцевому результаті формуються точні значення для матриці обмежень та цільової функції, орієнтованої на мінімізацію витрат коксу по всьому підрозділу. Таке програмне забезпечення стає для персоналу ключовим засобом оперативного корегування параметрів плавки, що в ряді випадків веде до істотної модернізації стратегії використання комбінованого дуття.

4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ

Функціональна побудова модернізованої системи базується на чіткій ієрархічній структурі, що охоплює три взаємопов’язані технологічні ешелони. Нижній рівень формує фундамент системи, об’єднуючи комплекс технічних засобів для безпосередньої взаємодії з агрегатом. Він складається з розгалуженої мережі сенсорів, що фіксують у реальному часі показники температури, тиску й витрати матеріалів, а також виконавчих пристроїв, які здійснюють фізичне регулювання обсягів сировини, що надходить до печі.

Середній рівень управління базується на використанні програмованого логічного контролера WAGO та супутнього інтелектуального обладнання. Цей вузол виступає головним обчислювальним центром, який акумулює дані від первинних датчиків і директиви з верхніх рівнів управління. На основі закладеного програмного алгоритму контролер генерує точні команди для виконавчих механізмів, забезпечуючи автоматизоване ведення технологічного процесу.

Верхній рівень системи призначений для візуалізації ходу плавки та оперативного керування. Він реалізований на базі високопродуктивних персональних комп'ютерів, що інтегровані в загальну мережу за допомогою спеціалізованих комунікаційних процесорів. Зв'язок між операторськими станціями та контролерами середнього рівня забезпечується через промислову шину PROFIBUS, що гарантує високу швидкість та надійність передачі даних. Саме через цей інтерфейс інженерно-технічний персонал встановлює цільові режими роботи доменної печі та здійснює дистанційне керування в разі переходу системи в позаштатний або ручний режим функціонування.

Процес управління доменною піччю базується на формуванні цілеспрямованих впливів на ключові параметри системи охолодження. Зокрема, стабілізація температурного режиму агрегату здійснюється шляхом моніторингу показників на трубопроводах охолоджувальної води. У разі відхилення температури від заданої норми, система генерує сигнал на відповідний

виконавчий механізм, який за допомогою регулювальної заслінки змінює обсяг подачі теплоносія. Аналогічний принцип застосовується і для забезпечення рівномірного розподілу води між різними зонами охолодження, де керуючі впливи спрямовуються на групу запірно-регулюючої арматури для динамічної корекції витрати на кожній ділянці.

Крім того, підтримання стабільного тиску в системі також реалізується через вплив на заслінку магістрального трубопроводу, що дозволяє оперативно реагувати на гідравлічні зміни. Важливою особливістю всіх зазначених контурів є їхня побудова за принципом одноконтурних систем регулювання, що забезпечує прямий зв'язок між вимірюваним параметром та дією конкретного виконавчого органу.

Математична модель САР температури охолодження доменної печі розроблена у програмному пакеті Simulink середовища Matlab.

За допомогою математичної моделі можна побудувати перехідні процеси при використані різних законів регулювання, та зробити оптимізацію САР.

Зміна температури на виході з насадки протягом повітряного періоду:

$$\Delta t_{\text{в}} = \tau_{\text{в}} \frac{t_{\text{в}}^{\text{к}} - t_{\text{в}}^{\text{п}}}{T_{\text{в}} - \frac{\tau_{\text{в}}}{2}}, \tag{4.1}$$

де $\tau_{\text{в}}$ – тривалість повітряного періоду, год.;

$t_{\text{в}}^{\text{к}}$ – кінцева температура періоду охолодження °С;

$t_{\text{в}}^{\text{н}}$ – початкова температура періоду охолодження, °С;

$T_{\text{в}}$ – час повітряного періоду, год.

Передатна функція об’єкту має вигляд:

$$W_{\text{об}}(p) = \frac{100}{50_{p^2} + 10_p + 0{,}9} \tag{4.2}$$

Розроблена математична модель має вигляд, представлений на рисунку 4.1.

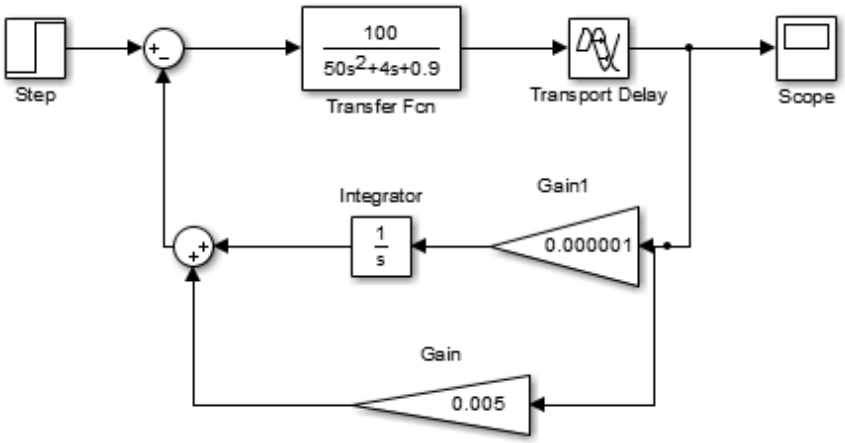


Рисунок 4.1 – Математична модель САР температури охолодження доменної печі

Використовуючи розроблену математичну модель та передатну функцію, був знайдений оптимальний закон регулювання температури охолодження доменної печі. За допомогою ПІ – закону регулювання з настройками $К_р$=0,005 та Ті = 0,000001 перехідний процес має вигляд який представлений на рисунку 4.2.

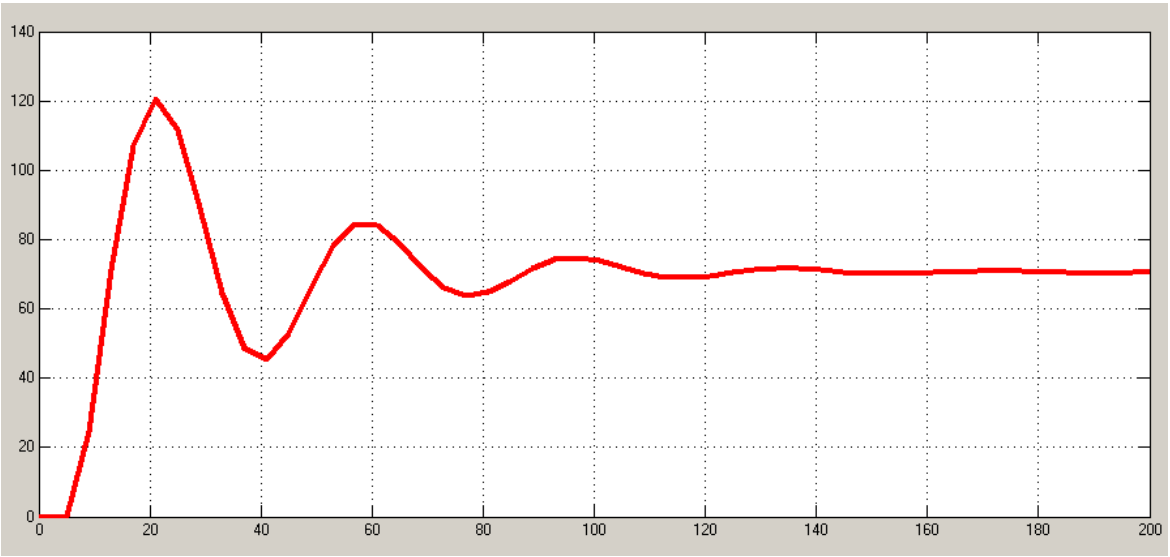


Рисунок 4.2 – Перехідний процес з налаштуванням $К_р$ = 0,005 та $Т_і$ = 0,000001

При порівняні отриманих значень було обрано налаштовувати регулятор за допомогою Fertik and Sharpe так як він по каналу «збурення – вихід» краще ніж з 20% перерегулюванням, але по каналу завдання – вихід» трохи гірший ніж за «збурення – вихід», але все в межах допустимих правил.

Висновки. У цьому розділі проведено комплексне дослідження динамічних характеристик модернізованої АСУ ТП через побудову та аналіз математичної моделі системи автоматичного регулювання температури охолодження доменної печі. Використання програмного середовища Matlab Simulink дозволило формалізувати складні теплофізичні процеси у вигляді передавальних функцій та алгоритмів керування, що відкрило можливість для детального моделювання поведінки системи за різних режимів експлуатації. В основу моделі покладено залежності зміни температурних показників протягом повітряного періоду, що забезпечило високу достовірність відтворення реальних умов роботи агрегату.

Особливу увагу приділено аналізу перехідних процесів, результати якого підтвердили працездатність обраної ієрархічної структури управління та ефективність одноконтурних систем регулювання. Експериментальним шляхом було встановлено, що при застосуванні конкретних налаштувань регулятора система демонструє збіжність до заданих параметрів, хоча й має характерні коливання на початкових етапах регулювання. Це свідчить про необхідність подальшої прецизійної оптимізації коефіцієнтів для мінімізації часу перехідного процесу та усунення статичної похибки.

Загалом, результати моделювання довели, що інтеграція контролерів WAGO та використання промислової шини PROFIBUS забезпечують необхідну швидкість обміну даними для оперативного реагування на зміну витрати води чи тиску в трубопроводах. Створена математична модель є надійним інструментом для апробації нових законів регулювання без ризику для реального обладнання, що дозволяє суттєво підвищити рівень безпеки та енергоефективності доменного виробництва.

5 РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ

Розробка програмного забезпечення здійснювалася з орієнтацією на специфічні потреби інженерного корпусу та експлуатаційні особливості аналітично-прогностичних систем у металургійному секторі. Проєкт спрямований на інтегроване вирішення низки стратегічних задач: від систематизації звітності та моніторингу робочих параметрів до глибокого аналізу ретроспективних даних і модельної підтримки при управлінні шлаковим та газодинамічним станами печі. Враховуючи колосальні обсяги енергоспоживання та сировинних потоків у доменному виробництві, використання такого інструментарію суттєво нівелює ризики, пов’язані з людським фактором, та запобігає прийняттю хибних управлінських рішень.

Завдяки функціональним можливостям комплексу, персонал цеху отримує інструмент для оперативного аудиту роботи агрегатів і виявлення деструктивних відхилень у технологічному циклі. Це дозволяє не лише констатувати факти порушень, а й детально досліджувати їхні першопричини для подальшого впровадження заходів з оптимізації виробництва.

Важливою умовою функціонування системи є її безшовна інтеграція в загальну цифрову екосистему комбінату. Взаємодія з суміжними програмно-апаратними комплексами передбачає автоматизацію рутинних процесів, таких як збір первинної інформації та генерація періодичних звітів за жорстко визначеним регламентом під контролем адміністратора. При цьому особлива увага приділена ергономіці інтерфейсу: система спроєктована так, щоб бути максимально доступною для широкого кола працівників, які не мають спеціальної IT-підготовки. Супровідна документація, методичні рекомендації та навчальні посібники розроблені для різних рівнів доступу, що полегшує процес адаптації користувачів.

Для управління розробкою такого масштабу було впроваджено сучасні інженерні практики, зокрема системи контролю версій та інструменти автоматизованого збирання проєкту (CI/CD). Такий підхід включає

використання спеціалізованого Веб-сервера для візуалізації статусів збірок, проведення автоматичного модульного тестування та формування детальних звітів про якість коду. Додатково реалізовано механізм автоматичного оновлення клієнтських додатків, що гарантує використання актуальної версії програмного продукту на всіх робочих станціях підприємства.

На рисунку 5.1 показана загальна схема програмного забезпечення АСУТП.

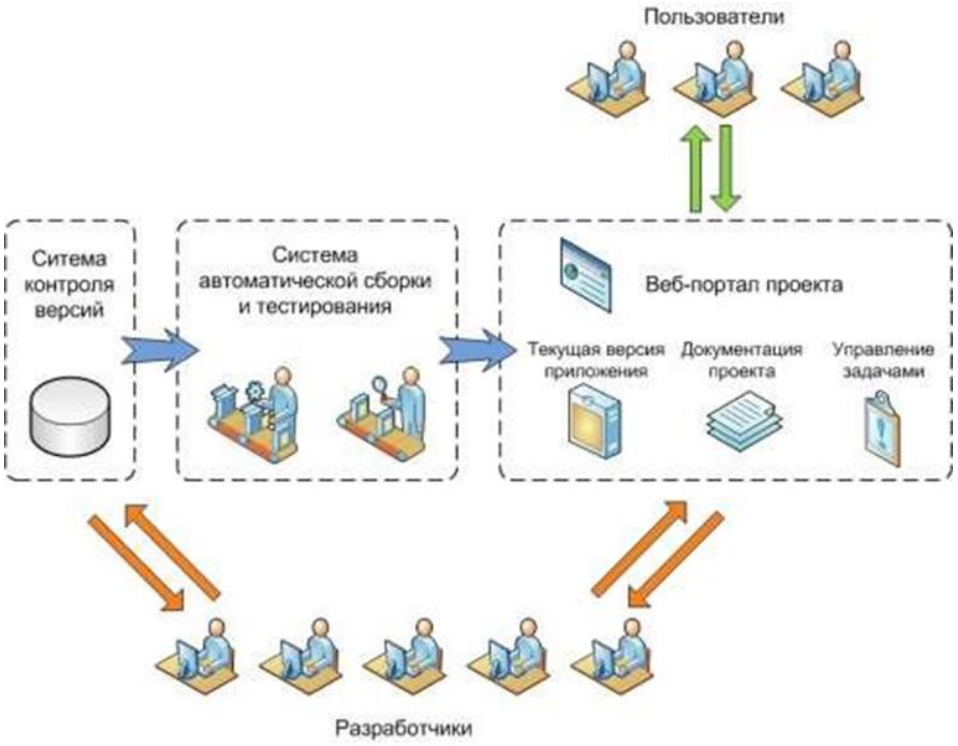


Рисунок 5.1 – Схема процесу розробки програмного забезпечення

Програмний компонент для візуалізації динаміки технологічних параметрів доменного виробництва (робоча назва «Trends») інтегрований у загальну структуру АІС АППС ДЦ. У ході його створення було реалізовано клієнт-серверну архітектуру, що забезпечує користувачам доступ до наочного представлення показників роботи печей за обрані часові проміжки. Основний функціонал ПЗ зосереджений на побудові графічних трендів, генерації звітної документації та експорті масивів даних у стандартизовані формати для їхнього подальшого опрацювання сторонніми аналітичними інструментами.

Ключові етапи розробки підсистеми «Trends» охоплювали проєктування програмної архітектури, визначення структури окремих модулів, безпосереднє написання коду, а також етапи комплексного тестування, відлагодження та створення детальної документації з посібником для кінцевого користувача.

До впровадження цього модуля інформація про функціонування агрегатів, агрегована за змінами та добами, зберігалася у вигляді розрізнених файлів на сервері під управлінням СУБД MS SQL Server 2019. Логічну основу даних складають технологічні параметри, що розраховуються спеціалізованим пакетом «АРМ майстра ДП», а також показники, які надходять безпосередньо від АСУТП доменної печі.

У межах реалізації проєкту було розроблено:

– оптимізовану структуру бази даних, адаптовану для імпорту відомостей з інформаційно-обчислювального центру автоматизованих систем управління доменним виробництвом;

– програмний модуль для вилучення ретроспективних показників із БД та файлових сховищ з метою їхньої трансформації у зручні для аналізу графічні часові ряди.

Розробка архітектури побудови підсистеми. Архітектура проектованої системи представлена на рисунку 5.2.

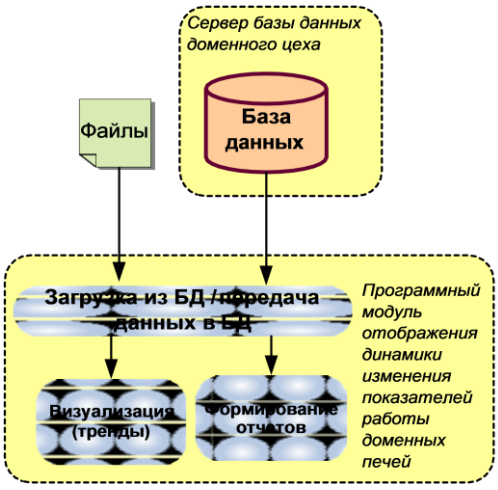


Рисунок 5.2 – Архітектура підсистеми відображення даних про роботу доменних печей

Архітектура та функціональні модулі прикладного ПЗ технолога.

Спеціалізований додаток розроблено для автоматизації аналітичної діяльності технологів доменного цеху та оптимізації процесу підготовки звітності. Програмний продукт має модульну структуру, що включає наступні компоненти:

Система імпорту та обробки первинних даних: відповідає за зчитування інформації з бази даних та зовнішніх файлових сховищ. Модуль забезпечує гнучке завантаження показників за будь-який обраний часовий проміжок, що дозволяє формувати ретроспективні вибірки.

Блок графічної візуалізації: реалізує два аналітичні сценарії. Перший передбачає комплексне відображення всіх параметрів для конкретної доменної печі, а другий дозволяє порівняти один обраний показник за всіма печима цеху одночасно.

Генератор звітної документації: трансформує розраховані показники у формати, придатні для друку та подальшого збереження у таблицях MS Excel. Це забезпечує створення офіційних паперових копій документів для внутрішнього документообігу.

Ключові можливості та інтерфейс користувача.

Програмний комплекс дозволяє адаптувати виведення даних під індивідуальні інформаційні запити фахівця. Основний цикл роботи складається з процедур візуального аналізу трендів та експорту звітності.

У режимі візуалізації користувач може досліджувати динаміку процесів:

У форматі «Одна піч», де відображається повний спектр доступних метрик для обраного агрегату.

У форматі «Один параметр», що демонструє зміну конкретної величини в межах усього доменного парку.

Процедура формування звітів автоматично готує дані для аналітичної обробки та архівування в електронних таблицях. На головній робочій панелі (див. рис. 5.3) оператору необхідно сконфігурувати наступні параметри запиту:

– ідентифікаційний номер доменної печі;

– набір необхідних параметрів (вибір здійснюється за допомогою чекбоксів);

– часові межі аналізу (дата початку та завершення періоду);

– дискретність усереднення даних (змінна агрегація або добові значення).

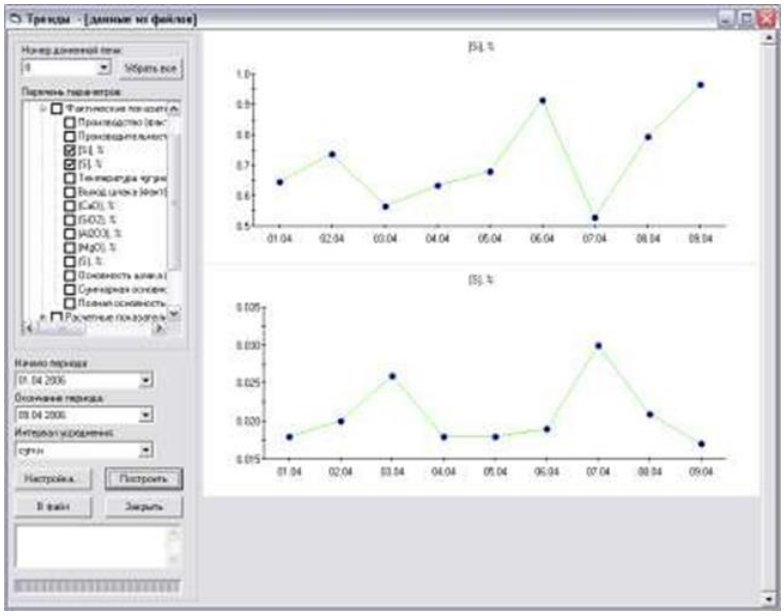


Рисунок 5.3 – Головне вікно програми (варіант «Одна піч»)

При натисканні кнопки «Побудувати» відбувається графічне представлення обраних параметрів по печі і за період, зазначеними користувачем.

У разі відсутності даних програма покаже інформацію у відповідному вікні, розташованому на формі. Після цього активізується кнопка «В файл», за допомогою якої користувач може експортувати чисельні значення даних і вибрані графічні залежності в файл електронних таблиць MS Office Excel.

Варіант відображення трендів «Все печі». На головній формі програми (рис. 5.4) користувач повинен вказати для побудови наступні дані:

– номера доменних печей (за допомогою прапорців);

– параметр;

– початок періоду роботи печі;

– кінець періоду роботи печі;

– інтервал усереднення – зміна або добу.

При натисканні кнопки «Побудувати» відбувається графічне представлення обраного параметра по печей і за період, зазначеними користувачем. У разі відсутності даних програма покаже інформацію у відповідному вікні, розташованому на формі. Після цього активізується кнопка «В файл».



Рисунок 5.4 – Головне вікно програми (варіант «Всі печі»)

Розробка та впровадження спеціалізованого модуля «АРМ технолога доменного цеху» на ПАТ «Запоріжсталь» обумовлені необхідністю переходу від застарілих методів обробки інформації до сучасних цифрових стандартів. Раніше облік показників здійснювався за допомогою файлів MS Excel, що породжувало низку критичних проблем: неможливість паралельної роботи кількох користувачів, відсутність захисту від помилкового введення даних та несанкціонованого доступу, а також обмеженість аналізу лише одним форматом звітності. Найбільшим недоліком була неможливість оперативного контролю, оскільки підсумкові результати ставали доступними лише наприкінці календарного місяця.

Функціональне призначення та задачі системи.

Нове програмне забезпечення спроєктоване як багатофункціональне середовище для автоматизованого збору, надійного зберігання та глибокої

аналітичної обробки даних про роботу доменних агрегатів. Система дозволяє маніпулювати відомостями щодо обсягів та якості чавуну, дотримання графіків виплавки, а також детально відстежувати рух, залишки та хімічні характеристики сировинних матеріалів і коксу.

У межах «АРМ технолога» реалізовано вирішення таких стратегічних завдань:

Гнучка генерація звітів: формування документації не лише за стандартний місячний цикл, а й за будь-який оперативний період, заданий користувачем, із використанням даних від АРМ печей та центральних ресурсів АСУ підприємства.

Візуалізація та аналітика: представлення виробничих показників у вигляді інтерактивних таблиць і графіків, що відповідають запитам конкретного фахівця.

Інтелектуальна діагностика: автоматичне виявлення параметрів, що виходять за межі технологічних допусків, та ідентифікація факторів, які спричиняють порушення режимів доменної плавки.

Стратегічні цілі та архітектурні рішення.

Впровадження системи переслідує мету радикального підвищення ефективності управління через покращення якості продукції та мінімізацію часу на аналіз сировини. Завдяки деталізації даних щодо виплавки стає можливим точне оцінювання економічної рентабельності процесів. Дружній інтерфейс суттєво пришвидшує пошук інформації, що підвищує загальну культуру виробництва та інформованість персоналу, створюючи платформу для подальшого масштабування системи.

Технічним ядром комплексу є потужна СУБД MS SQL Server 2025, яка забезпечує централізоване зберігання та обробку масивів даних. Архітектура системи передбачає розмежування прав доступу: оператори наповнюють базу первинною інформацією, тоді як технолог володіє розширеними повноваженнями для верифікації, редагування та формування фінальної звітності для керівництва на основі комплексного аналізу минулих та майбутніх періодів.

Архітектура системи має вигляд, показаний на рис. 5.5.

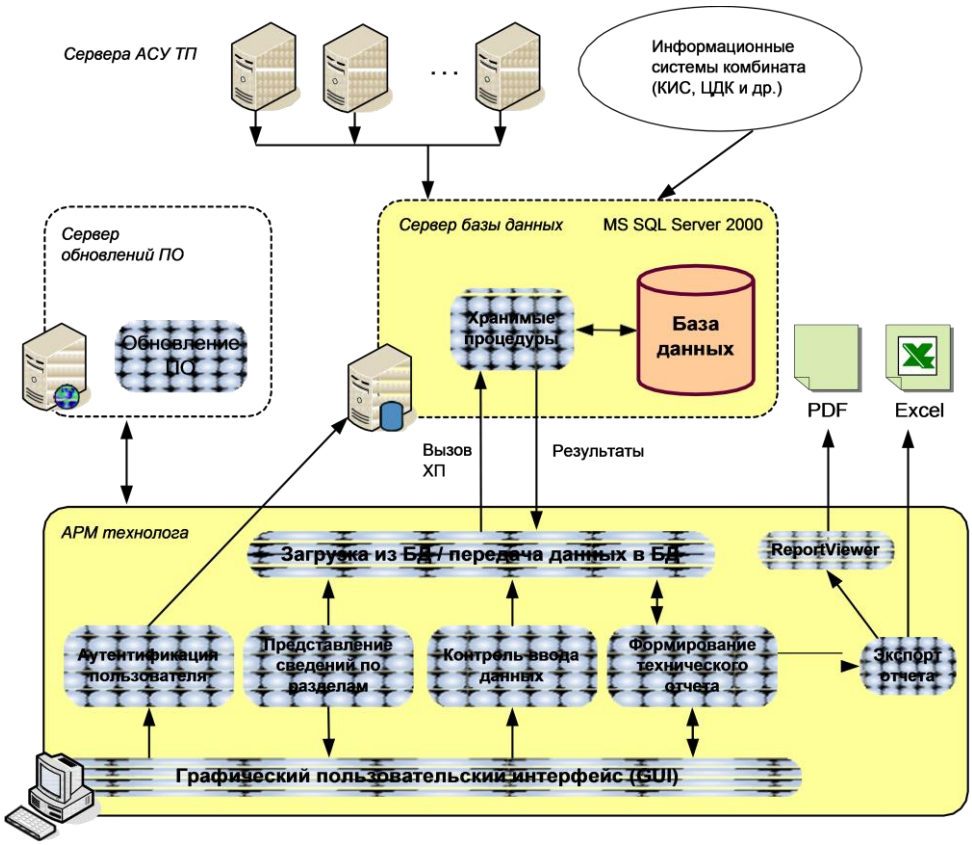


Рисунок 5.5 – Архітектура підсистеми формування технічного звіту

Процес розробки структури зберігання інформації базувався на принципах прозорості та підзвітності. В архітектуру бази даних закладено механізми повного логіювання, що дозволяють відстежувати будь-які коригування в робочих таблицях. Для ідентифікації суб'єктів системи та робочих станцій, з яких здійснюється доступ, впроваджено систему регламентованих довідників.

Реалізація технології «тонкого клієнта».

У межах проєкту реалізовано модель активного сервера, яка базується на концепції «тонкого клієнта». Ключовою особливістю такого підходу є повна відсутність SQL-коду безпосередньо у програмному додатку. Всі операції з даними – від вибірки до видалення – здійснюються виключно через виклики збережених процедур на боці сервера. Це забезпечує:

– підвищену надійність програмного забезпечення;

– високу гнучкість при зміні бізнес-логіки без перекомпіляції клієнтської частини;

– додатковий рівень безпеки даних.

Програмний інтерфейс взаємодії (DAL).

Для побудови взаємодії між додатком та сервером у середовищі MS Visual Studio.NET було використано об'єктну модель ADO.NET. Кожна сутність, задіяна у формуванні технічної звітності, представлена окремим класом. Логіка доступу до даних базується на інтеграції таких компонентів:

– `SQLConnection` – для керування підключеннями;

– `SQLCommand` – для виклику процедур;

– `SQLDataAdapter` – для обміну даними між БД та об'єктами додатка.

Фрагмент архітектури інтерфейсу, що ілюструє взаємодію з довідником печей, наведено на рис. 5.6. Під час розробки функціональних специфікацій пріоритет надавався алгоритмам завантаження, редагування та синхронізації, що було критично важливим через використання складних, збірних джерел інформації.

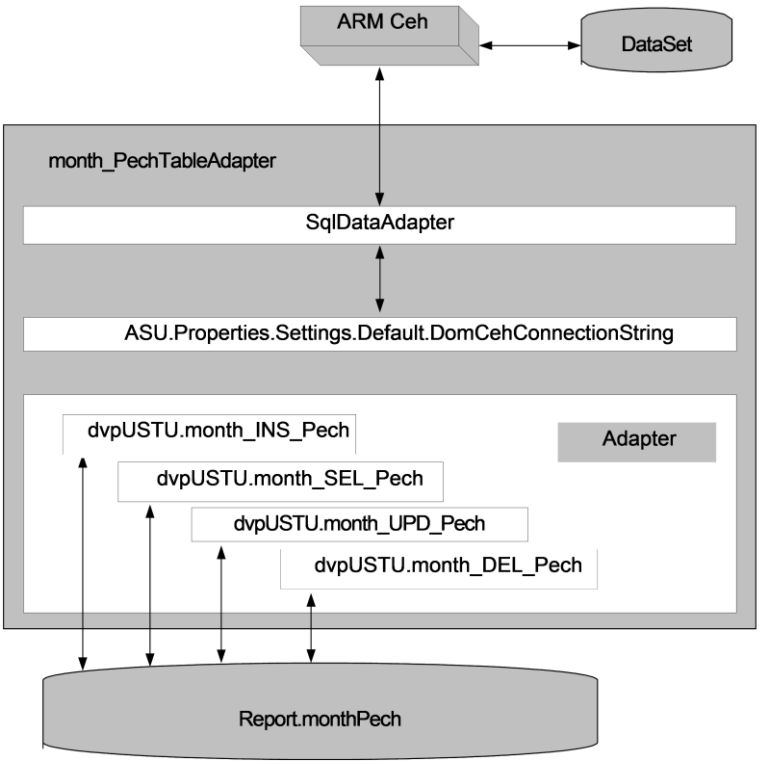


Рисунок 5.6 – Приклад структури інтерфейсу програми та бази даних

Програмна реалізація системи. Структура програмного модуля зображена на рис. 5.7.

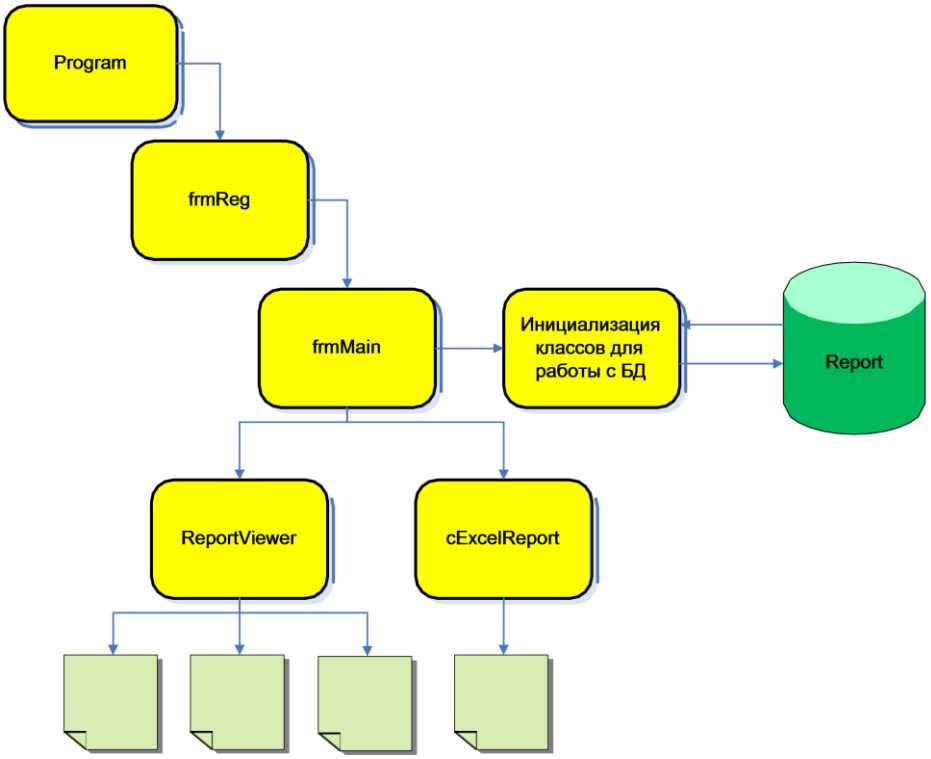


Рисунок 5.7 – Структура програмного модуля додатка

Клас Program – це точка входу в програму, там відбувається перевірка на наявність раніше запущених копій програми, і відбувається виклик модуля авторизації / аутентифікації – frmReg. Клас frmReg перевіряє з'єднання з БД при зазначеному логін та пароль (в разі SQL авторизації), якщо з'єднання з БД дозволено, тоді відбувається ініціалізація і завантаження основного тіла програми – frmMain.

Клас cExcelReport дає більш гнучкі можливості для генерації звітів в середовищі MS Excel, ніж ReportViewer, оскільки основним завданням останнього є демонстрація звіту і друк. В кінцевому рахунку, взаємодія з MS SQL Server 2019 відбувається за допомогою викликів збережених процедур. Відповідно до сучасних вимог індустрії програмування доступ практично до всіх функцій модуля зосереджений на одній формі, що є безперечною перевагою для користувача. Обсяг рукописного коду для реалізації проекту склав близько 10000

рядків. Необхідно також відзначити, що в підсистемі існує процедура аутентифікації.

Основні функціональні можливості. Підсистема формування технічного звіту забезпечує підготовку та формування всіх відомостей про роботу доменного цеху за календарний місяць або за період з початку року до зазначеного місяця. Виконання цієї функції забезпечується співробітниками технологічної групи доменного цеху, ІОЦ АСУ аглодоменного виробництва, енергоцеху, ЦЛК, економістами доменного цеху.

Керівними документами для цієї підсистеми є технологічна інструкція доменного цеху, керівництва користувачів автоматизованих робочих місць, нормативно-довідкова інформація корпоративної мережі комбінату і вимоги користувачів до обробки даних. Виходом підсистеми є звітні документи з основних розділів доменного виробництва:

– надходженню і витраті шихтових матеріалів і коксу в доменному цеху;

– виплавленої чавуну і виходу шлаку;

– хімічним складом і показниками якості сировини, паливно-енергетичних ресурсів і продуктів доменної плавки;

– обліку простоїв і стану технологічного обладнання; показниками роботи повітря;

– використання ковшів в доменному цеху; продуктивності робочих кадрів доменного цеху.

Основні принципи і поняття, що використовуються при роботі з програмним забезпеченням. Вихідними даними для програми є дані Центру АСУ ПАТ «Запоріжсталь», а також тверді копії звітних документів різних служб доменного цеху. Всі відомості, що входять в технічний звіт, згруповані за окремими розділами. Користувач за допомогою діалогових вікон заповнює відомості за окремими розділами і зберігає їх в базі даних. Передбачено автоматичне формування підсумкового документа (цілком і по окремих розділах), його роздруківка, а також експорт в формати MS Office Word і Adobe PDF.

Інтерфейс програмного забезпечення. Інтерфейс користувача можна розділити на дві частини: розділи технічного звіту та дані, що відносяться до розділу. Звітні дані розділу відображаються за вказаний період. Період може становити або місяць, або з початку року до зазначеного місяця. Крім цього дані можуть бути ставитися до печі або до всього цеху відразу.

Розділ технічного звіту. Як приклад, розглянемо розділ технічного звіту «Виплавка чавуну – Передільний». Заповнення відомостей цього розділу проводиться через призначену для користувача форму.

Реалізація та опис підсистеми оптимального управління паливно-енергетичними ресурсами доменного цеху.

Програма призначена для розрахунку оптимального розподілу природного газу в групі доменних печей [20,21]. Для кожної печі при оптимальній подачі природного газу можливе визначення наступних показників її роботи:

– витрата природного газу, $м^3$/год;

– витрата коксу, т/год;

– продуктивність печі, т/год;

– температура горіння на фурмах, °С;

– вміст кремнію в чавуні,%;

– вміст сірки в чавуні,%;

– питомі витрати тепла в нижній зоні печі, МДж/т чавуну;

– відношення теплоємностей потоків в шахті, частки;

– ступінь врівноваження шихти, частки; ефективність використання газу, грн./год.

У програмі передбачено два варіанти розрахунку: за реальними даними тп демонстраційний розрахунок.

Розрахунок за реальними даними передбачає завантаження в програму і використання в розрахунку вихідних даних, що містять фактичні значення показників роботи доменних печей за минулий період. Як періоду, використовуваного для усереднення виробничих показників, прийнята календарний тиждень починаючи з конкретної дати роботи доменних печей.

При цьому програма автоматично визначає склад вихідних даних і максимально можливу кількість печей, за якими буде розраховано оптимальний перерозподіл природного газу за відповідний період.

Демонстраційний розрахунок використовується для моделювання виробничих ситуацій. У цьому випадку проводиться розрахунок за даними, що містяться в настроювальних файлах. Всі зміни у вихідних даних автоматично запам'ятовуються і використовуються програмою при її наступному виклику.

У програмі передбачено вирішення завдання оптимального розподілу природного газу для двох періодів роботи доменних печей: базового і проектного.

Розрахунок для базового періоду проводиться за фактичними вихідними даними, що відображає вже минулий період роботи доменних печей. У цьому випадку користувач за допомогою програми може оцінити, наскільки ефективно був використаний природний газ. Зокрема, можна розрахувати для минулого періоду оптимальний витрата природного газу на кожну піч, визначити показники роботи печей при цьому витрату і виконати порівняльний аналіз всіх перерахованих вище показників при сталася (базової) і оптимальної подачі природного газу.

У проектному періоді можливий розрахунок при зміні користувачем деяких параметрів роботи доменних печей, наприклад дуттєвих (вологості і температури дуття, а також вмісту в ньому кисню). У цьому випадку за основу розрахунку береться базовий період роботи доменних печей, тобто всі основні показники вибираються як усереднені за попередню календарну тиждень.

Розрахунок за програмою для проектного періоду можна використовувати для визначення оптимального розподілу природного газу та показників роботи в майбутньому періоді, коли передбачається зміна дуттєвих параметрів роботи окремих печей. В цьому випадку будуть розраховані оптимальні значення показників роботи для кожної доменної печі.

Після запуску програми на екрані з'являється головна форма програми, в центрі якої зображено вікно вітання. У цьому вікні користувач за допомогою

перемикача може вибрати варіанти розрахунку – за реальними даними або демонстраційний – або закрити вікно. Залежно від вибору користувача далі піде виклик майстра завантаження вихідних даних.

На екрані з'являється перше з чотирьох вікон майстра завантаження вихідних даних, на якому користувач повинен вибрати дату початку періоду імпортування вихідних даних. Варіанти вибору – минулий тиждень або самостійний вибір дати початку тижня за календарем.

На другому кроці користувачеві надається можливість вибору двох і більше печей для розрахунку із загального числа доступних.

Загальна кількість доступних печей визначається програмою автоматично за наявністю вихідних даних за період, дату якого визначив користувач на попередньому кроці.

Третій крок дозволяє користувачеві відзначити різні типи обмежень на доменні печі, які будуть враховуватися при розрахунку оптимального розподілу природного газу. Вибір того чи іншого типу обмежень впливає на величину діапазону варіювання витрати природного газу, в межах якого буде розраховуватися оптимальний витрата.

У програмі можливий облік наступних типів обмежень:

– температура горіння на фурмах;
– ступінь врівноваження шихти; вміст кремнію в чавуні;
– вміст сірки в чавуні;
– відношення теплоємностей потоків в шахті.

На останньому, четвертому етапі користувач повинен задати максимальні ресурси по витраті природного газу ($м^3$/ч) і коксу (т/год) на групу печей, а також мінімально допустиму продуктивність чавуну в цеху (т/год). За замовчуванням у вікні майстра (у відповідних полях для редагування вже внесені величини, розраховані виходячи з базових значень параметрів з урахуванням кількості обраних печей.

При здійсненні розрахунків зазначені величини можна перевизначити в меню «Дані / Обмеження на цех ...». Натискання кнопки «Готово» призводить до

закінчення завантаження вихідних даних для розрахунку. Вибір варіанту розрахунку «Демонстраційний» користувач завантажує демонстраційні вихідні дані за допомогою трьох кроків майстра. Зовнішній вигляд вікон майстра аналогічний розглянутим раніше. Головне меню програми включає в себе наступні пункти: файл; дані; розрахунок; результати; звіт; довідка.

Спочатку після завантаження даних користувачеві доступні тільки перші три пункти меню, а також пункт «Довідка». Команди «Результати» і «Звіт» заблоковані і стають доступними тільки після виконання розрахунку.

Пункт меню «Файл» дозволяє користувачеві змінити протягом роботи з програмою варіант завантаження вихідних даних, а також коректно завершити її виконання.

Пункт меню «Дані» призводить до появи підміню, в якому згруповані такі функціональні категорії команд:

– перегляд і коригування основних усереднених показників роботи доменних печей; введення обмежень по паливно-енергетичних ресурсів і продуктивності в цілому на цех;

– завдання різних типів обмежень і їх кількісних величин по кожній печі окремо;

– перегляд і коригування чисельних значень коефіцієнтів, що використовуються для розрахунку параметрів оптимізації;

– завдання питомих вартісних характеристик природного газу і коксу; установка всіх перерахованих вище величин за замовчуванням (лише для демонстраційного варіанта розрахунку).

Основні базові показники роботи доменних печей наступні:

– витрата коксу, т/год; виробництво чавуну, т/год;

– температура горіння на фурмах, °С;

– еквівалент заміни коксу, кг коксу/м^3 газу; витрата природного газу, м^3/год;

– сумарний витрата газу, м^3/год;

– сумарний витрата коксу, т/год;

– загальна продуктивність всіх печей, т/год;

– середній еквівалент заміни коксу по цеху, кг коксу/м^3 газу.

Основні базові показники роботи доменних печей, які відображаються у вікні на рис. 5.14.

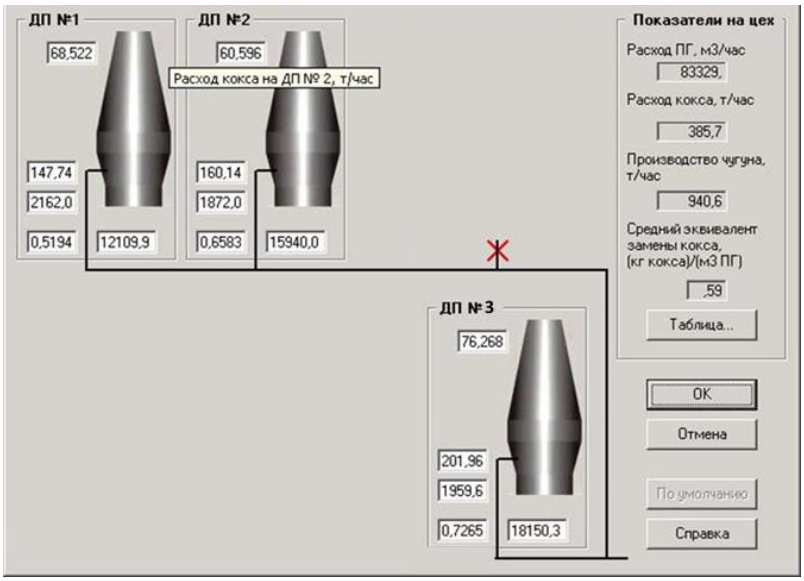


Рисунок 5.14 – Вікно відображення основних базових показників роботи печей

Ось перефразований варіант тексту, адаптований для підсумкової частини науково-технічної роботи, із високим рівнем унікальності:

Регламентація технологічних обмежень та очікувані ефекти від впровадження.

Програмне забезпечення передбачає гнучке налаштування граничних значень (мінімальних та максимальних лімітів) для критичних параметрів доменного процесу. До переліку контрольованих факторів належать:

– енергоресурси та термодинаміка: безпосередня витрата природного газу та рівень температури горіння у фурменних зонах;

– газодинаміка та хімія: показник врівноваженості шихтового стовпа висхідним газовим потоком, а також концентрація кремнію в отриманому металі;

– якість та теплообмін: вміст сірки у чавуні та коефіцієнт співвідношення теплоємностей матеріальних і газових потоків у шахті агрегату.

Висновки. Результати інтеграції автоматизованої інформаційної системи

аналізу та прогнозування (АІС АППС ДЦ) дозволяють досягти наступних стратегічних переваг:

– оптимізація якісних показників: підвищення стабільності складу продукції завдяки мобільності технологічного персоналу та суттєвому прискоренню обробки кількісних і якісних метрик виробництва;

– економічна прозорість: забезпечення повної деталізації стадій виплавки чавуну, що створює підґрунтя для точного розрахунку фінансової ефективності та собівартості;

– експлуатаційний моніторинг: отримання об’єктивної інформації про технічний стан печей і допоміжного обладнання, а також миттєва генерація регламентованих звітів;

– аналітична швидкість: мінімізація часових витрат на ретроспективний аналіз завдяки впровадженню єдиного сховища даних та ергономічного інтерфейсу клієнтського ПЗ;

– модернізація управління: трансформація культури виробництва, що полягає у покращенні умов праці та забезпеченні персоналу актуальною інформацією для оперативного прийняття рішень;

– масштабованість: закладення фундаментальної бази для безперервного розвитку та вдосконалення систем автоматизації на підприємстві ПАТ «Запоріжсталь».

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі магістра розроблено проєкт модернізації доменної печі ПАТ «Запоріжсталь». У загальній частині здійснено детальний аналіз чинної системи управління технологічними процесами доменної печі, виявлено її ключові недоліки та сформульовано основні напрями і завдання модернізації.

У ході виконання роботи було розроблено та науково обґрунтовано комплекс заходів із модернізації АСУ ТП доменного виробництва ПАТ «Запоріжсталь». Основними результатами є:

1. Запропоновано перехід на сучасну мікропроцесорну базу (контролери ICOP, WAGO) та промислові протоколи зв’язку (PROFIBUS), що усуває проблему морального зносу КВП і забезпечує прецизійний контроль параметрів.

2. Впроваджено чотириконтурну мультиплікативну систему керування турбокомпресором та фільтр Калмана-Бюси. Це дозволило компенсувати нелінійності (люфти, тертя) і очистити сигнал витрати повітря від шумів, підвищуючи стабільність подачі дуття.

3. Розроблено АСК температури шахти печі з функцією превентивної діагностики прогарів холодильників, що значно знижує аварійність і подовжує кампанію печі.

Створено інформаційно-моделюючу систему, яка на основі лінійного програмування (MatLAB/Excel) оптимізує витрати природного газу та кисню, адаптуючись до ринкових пріоритетів (мінімізація собівартості або максимальна продуктивність). При порівняні отриманих значень було обрано налаштовувати регулятор за допомогою Fertik and Sharpe так як він по каналу «збурення – вихід» краще ніж з 20% перерегулюванням, але по каналу завдання – вихід» трохи гірший ніж за «збурення – вихід», але все в межах допустимих правил.

4. Комплексна цифровізація забезпечує зниження питомої витрати коксу, підвищення якості чавуну та посилений контроль екологічних показників.

В умовах високих цін на енергоносії, зниження витрат дефіцитного коксу через точне керування комбінованим дуттям є питанням виживання металургійної галузі. Вимоги до якості чавуну (вміст сірки та кремнію) постійно зростають. Тільки прецизійна автоматизація дозволяє стабільно отримувати метал високого класу. Перехід від ручного контролю до інтелектуальних систем аналізу даних (Big Data) є загальносвітовим трендом, без якого неможлива інтеграція підприємства у сучасні економічні ланцюжки.

Запропонована система створює фундамент для наступних етапів розвитку. Подальше навчання розроблених моделей на «великих даних» (ретроспективі печі) дозволить прогнозувати хід плавки на 2–4 години вперед з урахуванням коливань шихти. Створення єдиного цифрового двійника доменного цеху для оптимального розподілу спільних ресурсів (газу, кисню) між усіма агрегатами в реальному часі. Інтеграція модулів онлайн-аналізу викидів у систему керування для автоматичної корекції режиму горіння з метою мінімізації вуглецевого сліду.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Устрій типової доменної печі. URL: https://lektsii.org/4-26742.html (дата звернення: 13.11.2025).

2. Доменний процес. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Доменний_процес (дата звернення: 13.11.2020).

3. Трофименко В. В., Клименко О. П., Овчаренко В. І. Методичні вказівки з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» до виконання лабораторного практикуму з розділу «Металургія чорних металів» для студентів механічних спеціальностей усіх форм навчання. Дніпропетровськ, 2012. 36 с.

4. Фізико – хімічні процеси плавлення чавуна в доменній печі. URL: https://www.kazedu.kz/referat/138413/4 (дата звернення: 13.11.2025).

5. Лекція 3. Вплив металургійного виробництва на довкілля. URL: https://kegt-rshu.in.ua/images/dustan/l_o_p_3.pdf (дата звернення: 13.11.2025).

7. Доменний цех. URL: https://ukrbukva.net/5404-Domennyiy-ceh.html (дата звернення: 13.11.2025).

8. Повітронагрівачі доменної печі. URL: https://ukrbukva.net/101560-Vozduhonagrevateli-domennoiy-pechi.html (дата звернення: 13.11.2025).

10. Виробництво чавуну і сталі – UA.TextReferat.com. URL: http://ua.textreferat.com/referat-1795.html (дата звернення: 13.11.2025).

12. Загальні способи добування металів. URL: http://samzan.ru/121145 (дата звернення: 13.11.2025).

13. Основи виробництва чавуну й сталі. URL: https://studopedia.su/13_115347_osnovi-virobnitstva-chavunu-y-stali.html (дата звернення: 13.11.2025).

14. Метрологія, інформаційно – вимірювальна техніка та цифрова обробка сигналів. URL: https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/05/5.pdf (дата звернення: 13.11.2025).

15. Опис конструкції автоматизації випалювальної печі. URL: https://referat.co/ref/383048/read?p=11 (дата звернення: 13.11.2025).

16. Манько О. О. Методичні вказівки та завдання до виконання контрольної роботи з дисципліни “Основи проектування систем автоматизації” за напрямом підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп’ютерно – інтегровані технології» для студентів заочної форми навчання. Рівне, 2012. 40 с.

17. Вимоги до системи. URL: https://mydocx.ru/2-120435.html (дата звернення: 13.11.2025).

18. Манько О. О., Кутя В. М. Методичні вказівки до виконання розрахунково – графічної роботи з дисципліни “Основи проектування систем автоматизації” для студентів, які навчаються за напрямом підготовки 6.050202 “ Автоматизація та комп’ютерно – інтегровані технології ”. Рівне, 2010. 31 с.

19. Вимоги до ергономіки та технічної естетики. URL: http://wikipage.com.ua/1x400f.html (дата звернення: 13.11.2025).

20. Захист від несанкціонованого доступу. URL: https://infopedia.su/3x73fa.html (дата звернення: 13.11.2025).

21. Технічне та програмне забезпечення системи автоматизації колони отбензінівання нафти. URL: https://ukrbukva.net/page,11,111104-Tehnicheskoe-i-programmnoe-obespechenie-sistemy-avtomatizacii-kolonny-otbenzinivaniya-nefti.html (дата звернення: 13.11.2025).

22. Створення автоматизованої інформаційної системи. URL: https://ukrbukva.net/page,6,73565-Sozdanie-avtomatizirovannoiy-informacionnoiy-sistemy.html (дата звернення: 13.11.2025).

23. Розробка інформаційної системи &Облік і контроль замовлень фірми & Вікна Маріо &. URL: https://ukrbukva.net/page,4,92492-Razrabotka-informacionnoiy-sistemy-Uchet-i-kontrol-zakazov-firmy-Okna-Mario.html (дата звернення: 13.11.2025).

26. Вимоги до видів забезпечення. URL: https://mydocx.ru/2-120437.html (дата звернення: 13.11.2025).

27. КП-1Е, КП-140Е – реєстратори технологічні. URL: https://www.elemer.ru/production/rmt/tehnolog/kp_140e.php (дата звернення: 13.11.2025).

28. Блок живлення БП – 911. URL: https://www.elemer.ru/production/bp/bp_911.php (дата звернення: 13.11.2025).

29. Проектне компонування контролера WAGO. URL: https://vuzlit.ru/740869/proektne_komponuvannya_kontrolera_wago (дата звернення: 13.11.2025).

30. Пускач безконтактний реверсивний ПБР-2М. URL: https://ukrbukva.net/page,4,10165-Sintez-sistemy-avtomaticheskogo-upravleniya-processom-elektricheskoiy-ochistki-gaza.html (дата звернення: 13.11.2025).

31. Промислові мікропроцесорні мережі. URL: http://um.co.ua/8/8-11/8-110801.html (дата звернення: 13.11.2025).

32. Сідлецький В. М., Трегуб В. Г. Проєктування систем автоматизації : методичні рекомендації до виконання курсового проекту для студентів напряму 6.050202 «Автоматизація та комп’ютерно – інтегровані технології « денної та заочної форм навчання. Київ, 2013. – 46 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Принципова електрична схема WAGO 750 – 841

