

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

ННІ/факультет Навчально-науковий технологічний інститут
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»
Форма навчання Денна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Горланова Олександра Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему: Автоматизація металургійного виробництва. Розробка комплексу
технічних засобів автоматизованої системи керування нагрівальними
колодязями блюмінгу

(повна назва теми)

за матеріалами технологічного процесу цеху Блюмінг ПАТ «АрселорМіттал
Кривий Ріг»

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник доцент, к.т.н. Жуков М.С.
(наук. ступінь, вчене звання) (підпис) (прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від 16.06. 2026 р. № 397-ст

Завідувач кафедри

(підпис)

доцент, к.п.н.
Наук. ступень, вчене звання

Є.О. Модло
Ініціали, прізвище

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«___» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Горланову Олександру Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Автоматизація металургійного виробництва. Розробка комплексу технічних засобів автоматизованої системи керування нагрівальними колодязями блюмінгу

керівник випускної роботи Жуков Микола Степанович, доцент, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «06» квітня 2026 року
№ 239-ст

2. Строк подання студентом випускної кваліфікаційної роботи 02.06.2026

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи Тип: рекуперативні нагрівальні колодязі; Кількість колодязів: 48 (в експлуатації 36); Кількість груп: 12 (по 4 колодязі); Площа поду колодязя: 32,5 м²; Місткість: 16+17 (12+13) злитків по 8,5 (12,5) тонн; Тип опалення: коксодоменною сумішшю газів; Калорійність газу: 1700 ккал/нм³; Максимальна теплова потужність: 9 Гкал/год; Тиск змішаного газу: 500 кгс/см²; Температура підігріву газу: 250-300°C; Максимальна температура: 1300°C; Температура підігріву повітря: 600-650°C; Тиск інжектowanego повітря: 1,7 кгс/см²; Позитивний тиск під кришкою: 20-25 Па; Температура димових газів: 600°C

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 4.1 Аналітична частина. Положення справ у галузі АСУТП нагрівальних колодязів цеху Блюмінг. 4.2 Основна частина. Характеристика засобів КВПтаА. Апаратне забезпечення. Умови експлуатації об'єкта

автоматизації й характеристика навколишнього середовища. Розробка алгоритму опитування датчиків та початкової обробки інформації. Розрахунок капітальних витрат. Вибір і характеристика будівельного майданчика цеху Блюмінг. Екологія й охорона навколишнього середовища.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Функціональна схема автоматизації, ВРБ.174.239-ст.04.Е2; Структурна схема САР - температури та співвідношення «газ-повітря», ВРБ.174.239-ст.04.Е1.1; Структурна схема АСУ нагрівальних колодязів, ВРБ.174.239-ст.04.Е1.2; Структурна схема організації інформаційного забезпечення, ВРБ.174.239-ст.04.Е1.3; Алгоритм опитування датчиків, ВРБ.174.239-ст.04.Е0.

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналітична частина	Жуков М.С.	10.04.2026	10.04.2026
Основна частина	Жуков М.С.	10.04.2026	10.04.2026

7. Дата видачі завдання 10.04.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної роботи	Строк виконання етапів випускної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	01.05.2026	
2.	Основна частина	22.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	28.05.2026	
4.	Виконання графічної частини	29.05.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	08.06.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	19.06.2026	

Студент

(підпис)

Горланов О.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи

(підпис)

Жуков М.С.
(прізвище та ініціали)

№ ряд ка	Фор мат	Позначення			Назва	Кіл. листів	№ екз.	Прим.	
1	A3	ВРБ.174.239-см.04.Е2			Функціональна схема	1			
2					автоматизації				
3									
4	A3	ВРБ.174.239-см.04.Е1.1			Структурна схема САР -	1			
5					температури та				
6					співвідношення «газ				
7					повітря»				
8									
9	A3	ВРБ.174.239-см.04.Е1.2			Структурна схема АСУ	1			
10					нагрівальних колодязів				
11									
12	A3	ВРБ.174.239-см.04.Е1.3			Структурна схема	1			
13					організації інформаційного				
14					забезпечення				
15									
16	A3	ВРБ.174.239-см.04.Е0			Алгоритм опитування	1			
17					датчиків				
18									
19	A4	ВРБ.174.239-см.04.ПЗ			Пояснювальна записка	54			
20									
21									
22									
					ВРБ.174.239-см.04.ВР				
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Автоматизація металургійного виробництва. Розробка комплексу технічних засобів автоматизованої системи керування нагрівальними колодязями блюмінгу	Літера		Аркуш	Аркушів
Розроб.		Горланов О.В.						4	1
Пров.		Жуков М.С.							
Н.контр.		Жуков М.С.							
Затв.		Модло Є.О.			Відомість роботи	ННТІ ДУЕТ Каф.ЕІА гр. АВ-23ск			

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 54 с., 15 рис., 12 табл., 30 джерел.

Об'єкт розробки – автоматизована система керування тепловим режимом нагрівальних колодязів рекуперативного типу обтискного цеху Блюмінг.

У роботі виконано аналіз поточного стану засобів керування нагрівальними колодязями та обґрунтовано техніко-економічну доцільність їх модернізації з метою скорочення питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів, мінімізації чаду металу та підвищення якості прокатної заготовки. Встановлено, що застаріла аналогова елементна база не забезпечує нормованої точності регулювання та унеможливорює інтеграцію в сучасні промислові мережі.

Основна частина присвячена синтезу дворівневої автоматизованої системи керування на базі програмованих логічних контролерів Siemens SIMATIC S7-1500 та промислових комп'ютерів SIMATIC IPC477E. Розроблено каскадну схему регулювання контуру «газ–повітря» з корекцією за залишковим вмістом вільного кисню у димових газах (цирконієвий зонд). Описано математичний критерій готовності злитка до прокатки та алгоритм технологічного відсічення. Інтеграцію в Industry 4.0 реалізовано через PROFINET та OPC UA.

Розглянуто заходи з охорони праці, техніки безпеки та пожежної безпеки при експлуатації обладнання цеху Блюмінг.

Ключові слова: автоматизована система керування, каскадне регулювання, нагрівальний колодязь, OPC UA, PROFINET, програмований логічний контролер, співвідношення «газ–повітря», температурний режим, цирконієвий зонд.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Стан справ у металургійній галузі.....	10
1.1.1 Процес нагрівання злитків	11
1.1.2 Опис об'єкта автоматизації.....	12
1.2 АСУТП нагрівальних колодязів цеху Блюмінг	14
1.2.1 Мета створення системи.....	15
1.2.2 Функції системи	15
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	17
2.1 Характеристика засобів контролю, вимірювання та автоматичного керування.....	17
2.1.1 САР температури	18
2.1.2 Система автоматичного регулювання співвідношення газ–повітря (тиску) в нагрівальному колодязі	19
2.2 Апаратне забезпечення	20
2.3 Умови експлуатації об'єкта автоматизації та характеристика навколишнього середовища	27
2.3.1 Електроживлення промислових робочих станцій	28
2.3.2 Електроживлення датчиків.....	28
2.4 Характеристика інформаційного забезпечення	28
2.5 Функціонування Системи.....	31
2.5.1 Функції нижнього рівня Системи.....	31
2.5.2 Функції верхнього рівня Системи	32
2.6 Розробка алгоритму опитування датчиків та початкової обробки інформації.....	36
2.7 Розрахунок САР співвідношення	39
2.8 Заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності	45

2.8.1 Аналіз основних шкідливих і небезпечних чинників в умовах цеху Блюмінг	45
2.8.2 Заходи щодо зниження шкідливих і небезпечних чинників в умовах цеху Блюмінг	46
2.8.3 Пожежна безпека	48
ВИСНОВКИ.....	50
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	52

ВСТУП

Металургійний комплекс є одним із системоутворюючих секторів промисловості України, що задовольняє потреби машинобудування, будівельної індустрії та суміжних виробництв у конструкційних матеріалах із регламентованими механічними властивостями [1]. Пріоритетним напрямом розвитку галузі в умовах зростання вартості енергоносіїв є впровадження ресурсозберігаючих технологій виробництва сталі та скорочення питомих витрат палива [3; 4].

Нагрівання злитків перед прокаткою у нагрівальних колодязях є ключовою технологічною ланкою обтискового виробництва. Рівномірність прогріву злитка по перерізу безпосередньо визначає стан металу на кліті прокатного стану, питомі витрати енергоресурсів, інтенсивність окалиноутворення та кінцеві механічні властивості прокатної заготовки [6; 7].

Діючий парк нагрівальних колодязів цеху Блюмінг оснащено аналоговими регуляторами та вимірювальними приладами з терміном служби 18-20 років. Зазначене обладнання не забезпечує точності підтримання теплових режимів та не має цифрових інтерфейсів для підключення до комп'ютерних систем вищого рівня [9; 10]. Це унеможливорює реалізацію оптимальних алгоритмів нагрівання та інтеграцію нижнього рівня з виробничими інформаційними системами типу MES та ERP.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом нагрівання злитків у рекуперативних нагрівальних колодязях цеху Блюмінг, що забезпечує ефективне використання паливно-енергетичних ресурсів, мінімізацію втрат металу та підвищення стабільності якісних показників прокатної продукції.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання: проаналізовано стан існуючої системи керування; розроблено структуру дворівневої АСУТП; синтезовано каскадну схему регулювання з цирконієвим зондом O_2 ; описано алгоритм технологічного відсічення; обрано апаратну базу; виконано

розрахунок параметрів налаштування регулятора; розглянуто питання охорони праці.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Стан справ у металургійній галузі

Питання раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів набули першочергового значення в сучасній енергоємній промисловості, насамперед у чорній металургії [1; 2]. Питомі витрати умовного палива на виробництво сталі в Україні суттєво перевищують відповідні показники провідних країн: за оцінками галузевих експертів, розвинені держави знизили питомі витрати на 25-30 % за останні два десятиліття [3; 4].

Одним із методів підвищення ефективності є нагрівання злитків зі збереженою рідкою серцевиною, що практикується на ряді вітчизняних підприємств [6]. Однак зазначена технологія висуває підвищені вимоги до контролю ступеня кристалізації металу: обробка недостатньо затверділого злитка неминує породжує аварійні ситуації та масовий шлюб продукції [7].

Значним резервом є усунення понаднормативного «пересиджування» злитків у колодязі [8]. Надлишкова витримка призводить до зростання питомої витрати палива та інтенсифікації окалиноутворення, що прямо збільшує втрати металу на чад. Вирішення цієї проблеми потребує впровадження адаптивних алгоритмів нагрівання, що враховують фактичний темп прокатки та теплофізичний стан партії злитків [9; 10].

Підвищення ефективності теплових агрегатів неможливе без застосування безперервного моніторингу та автоматизованого керування, що ґрунтуються на математичному моделюванні [12]. Серед пріоритетних заходів енергозбереження виділяють: оптимізацію теплового завантаження агрегатів; вдосконалення режимів нагрівання; модернізацію засобів контролю та вимірювання; підвищення повноти спалювання палива через регулювання коефіцієнта надлишку повітря [13].

1.1.1 Процес нагрівання злитків

Нагрівальні колодязі, що застосовуються в цеху блюмінга, забезпечують термічну підготовку злитків до прокатки й мають низку конструктивних переваг порівняно з методичними печами [6; 7]. Вертикальне розміщення злитків у робочій камері сприяє правильній кристалізації ще не повністю остиглої серцевини. Усі грані злитка отримують рівномірний тепловий потік від центрального пальника, що мінімізує температурний градієнт по поперечному перерізу.

Геометрія та маса злитків визначаються хімічним складом сталі, типом прокатного стану та видом кінцевого прокату [8]. Для виробництва сортової заготовки (блюма) з вуглецевої сталі характерна маса злитка 10–12 т при квадратному поперечному перерізі. Для високолегованих сталей маса злитків зменшується до 500–700 кг. Злитки киплячої сталі виливаються в ізложниці, що звужуються донизу; злитки спокійної сталі – в ізложниці з розширенням доверху. Відношення висоти злитка до розміру сторони перерізу становить 3,0–3,5 [7].

Нагріті злитки транспортуються до прокатного стану злитковозами по рейковій колії. Розвантаження, завантаження та вивантаження злитків з камер колодязів виконується мостовим краном із кліщовим захватом. Схему розміщення злитків у камерах колодязів наведено на рис. 1.1.

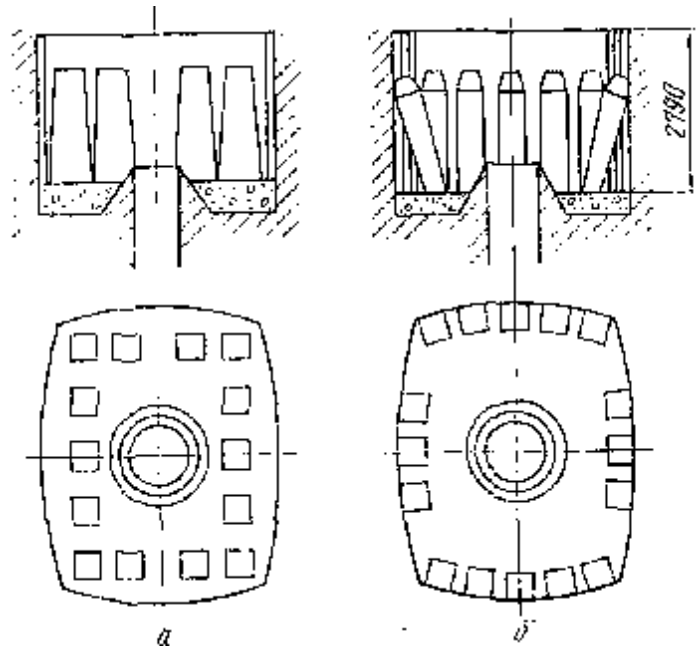


Рис. 1.1. Схема розміщення злитків у камерах нагрівальних колодязів з опаленням із центра подини

(розроблено автором з використанням [6; 7; 8])

Для забезпечення стійкого положення в процесі нагрівання злитки спокійної сталі встановлюються похило, з обпиранням на стінку камери. Після завантаження партії кришка камери закривається і пальник вмикається у режим нагрівання; механізм відкривання кришки повністю механізовано. Нагріті до заданої температури прокатки злитки послідовно вилучаються кліщовим краном вантажопідйомністю 30–50 т і передаються на злитковози, які доставляють їх до приймального рольганга блюмінга [6].

1.1.2 Опис об'єкта автоматизації

Об'єктом керування слугують нагрівальні колодязі рекуперативного типу з опаленням одним верхнім пальником, призначені для підготовки злитків до прокатки на стані Блюмінг-1300 та безперервно-заготовочному стані 900/750/500 без проміжного нагрівання [6; 7].

Загальна кількість колодязів становить 48 одиниць; вони об'єднані у 12 груп по 4 колодязі. У діючому парку перебуває 9 груп (36 колодязів); блок №4 знаходиться на консервації з 1993 року.

Кожен колодязь оснащений: керамічним трубчастим рекуператором для підігріву інжектованого повітря; трубчастим металевим U-подібним рекуператором для додаткового підігріву інжектованого повітря; трубчастим металевим W-подібним рекуператором для підігріву змішаного газу; системою боровів із регульованим димовим шибером; індивідуальними трубопроводами підведення газу та повітря; системою теплового контролю та регулювання [8].

Площа подини колодязя становить 32,5 м²; місткість – 16+17 (12+13) злитків масою 8,5 (12,5) т. Паливом слугує коксодоменна суміш газів з теплотворною здатністю 1700 ккал/нм³ [8]. Максимальна теплова потужність агрегату – 9 Гкал/год. Тиск змішаного газу в цеховому колекторі – 500 кгс/см². Температура підігріву змішаного газу 250-300 °С. Максимальна температура в робочому просторі 1300 °С; тиск під кришкою підтримується позитивним у межах 20-25 Па [6].

У процесі нагрівання нагрівальник відстежує такі параметри:

- а) температуру у робочому просторі колодязя;
- б) температуру повітря після керамічного рекуператора;
- в) температури палива та стисненого повітря після металевих рекуператорів;
- г) витрату змішаного газу;
- д) витрату інжектованого повітря;
- е) тиск у робочому просторі.

Тиск інжектованого повітря – 1,7 кгс/см². Температура підігріву повітря в металевому рекуператорі 300 °С, у керамічному 600-650 °С. Завантаження та вивантаження злитків виконується при відключеній подачі газу та повітря; припинення та відновлення подачі здійснюється автоматично при відкриванні та закриванні кришки колодязя (технологічне відсічення) [9].

1.2 АСУТП нагрівальних колодязів цеху Блюмінг

Керування нагрівальними колодязями цеху Блюмінг здійснюється за допомогою аналогових регуляторів, завдання на які вводить нагрівальник відповідно до технологічних інструкцій [9; 10]. Більшість приладів перебуває в експлуатації протягом 18-20 років; промисловість припинила їх випуск. Нормуючі перетворювачі, що використовуються, не мають цифрових вихідних інтерфейсів, що унеможлиблює підключення до комп'ютерних систем керування.

До недоліків існуючої технології нагрівання металу належать:

- а) недостатня точність роботи регуляторів та вимірювальних приладів;
- б) ведення реєстрації на паперових кругових діаграмах, що ускладнює аналіз режимів нагрівання;
- в) залежність результату нагрівання від суб'єктивних рішень оператора;
- г) неконтрольований процес спалювання палива внаслідок коливань тиску й теплотворної здатності компонентів суміші;
- д) складність вибору оптимального режиму нагрівання через велику кількість вхідних параметрів [10].

Зазначені недоліки не дають змоги стабільно реалізовувати ефективні технології нагрівання, здатні забезпечити економію палива та зниження втрат металу на чад, що обумовлює необхідність модернізації АСУТП [9].

«Автоматизована система керування тепловим режимом нагрівальних колодязів цеху Блюмінг» (далі – Система) призначена для автоматизованого ведення технологічного процесу нагрівання злитків та інформаційного забезпечення оперативно-технологічного персоналу.

1.2.1 Мета створення системи

Система створюється для автоматизованого керування процесом нагрівання злитків та надання оперативному персоналу повного обсягу інформації про стан технологічного процесу. Введення Системи в дію забезпечує:

а) підвищення якості керування процесом нагрівання злитків завдяки оперативному наданню персоналу вичерпних даних про перебіг процесу та показники роботи кожного колодязя [9; 10];

б) покращення умов прокатки металу шляхом зменшення відхилення температури злитків від регламентованого значення;

в) скорочення питомої витрати палива та зниження втрат металу у вигляді окалини завдяки коригуванню теплового режиму відповідно до фактичного темпу прокатки та оптимізації коефіцієнта надлишку повітря за сигналом цирконієвого зонда O_2 [12; 13];

г) підвищення технічного рівня виробництва та покращення умов праці за рахунок зручного доступу до інформації;

д) підвищення ефективності розгляду рекламаций та поліпшення якості прокатної продукції.

1.2.2 Функції системи

Система виконує такі функції [9; 10; 11]:

– збирання даних про стан технологічних параметрів кожного колодязя в групі від первинних засобів вимірювання;

– керування виконавчими механізмами для утримання технологічних параметрів у нормованих межах у режимі реального часу;

– автоматичне ведення процесу нагрівання злитків відповідно до заданих параметрів плавки;

- скорочення витрат палива та зниження втрат металу у вигляді окалини завдяки оптимізації теплового режиму;
- відображення на екранах АРМ трендів основних технологічних параметрів;
- протоколювання та архівування технологічних даних і подій;
- передавання архівних трендів технологічних параметрів на MES-рівень за стандартом OPC UA із захищеним шифруванням [13].

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Характеристика засобів контролю, вимірювання та автоматичного керування

Кожен нагрівальний колодязь оснащено комплексною системою моніторингу та автоматичного регулювання теплового режиму [9; 10]. До складу системи входять такі функціональні підсистеми:

- підсистема контролю та регулювання температури в робочому просторі колодязя з термоелектричними перетворювачами та цифровими регуляторами;
- каскадна підсистема регулювання витрат газу та повітря з корекцією коефіцієнта надлишку повітря за сигналом цирконієвого зонда вимірювання залишкового O_2 у димових газах, що мінімізує чад металу та питому витрату палива [12; 13];
- підсистема контролю тиску та регулювання положення димового шиберу для підтримання надлишкового тиску в робочому просторі у діапазоні 20-25 Па;
- система моніторингу допоміжних параметрів: температур газу та повітря після рекуператорів, температури відхідних димових газів;
- датчики положення регулюючих органів (заслінок, шиберів) для формування сигналів зворотного зв'язку;
- система технологічних блокувань та аварійного відсічення газу (швидкісні клапани-відсікачі) при виявленні аварійних ситуацій [9].

Автоматизована система керування є дворівневою: нижній рівень забезпечує збирання даних та безпосереднє регулювання, верхній – диспетчеризацію та зберігання даних [10].

2.1.1 САР температури

Контроль і регулювання температури в робочому просторі колодзя реалізовано у вигляді каскадного контуру з зовнішнім контуром стабілізації температури та підпорядкованим внутрішнім контуром стабілізації витрати газу [9; 11]. Структурну схему цього контуру наведено на рис. 2.1.

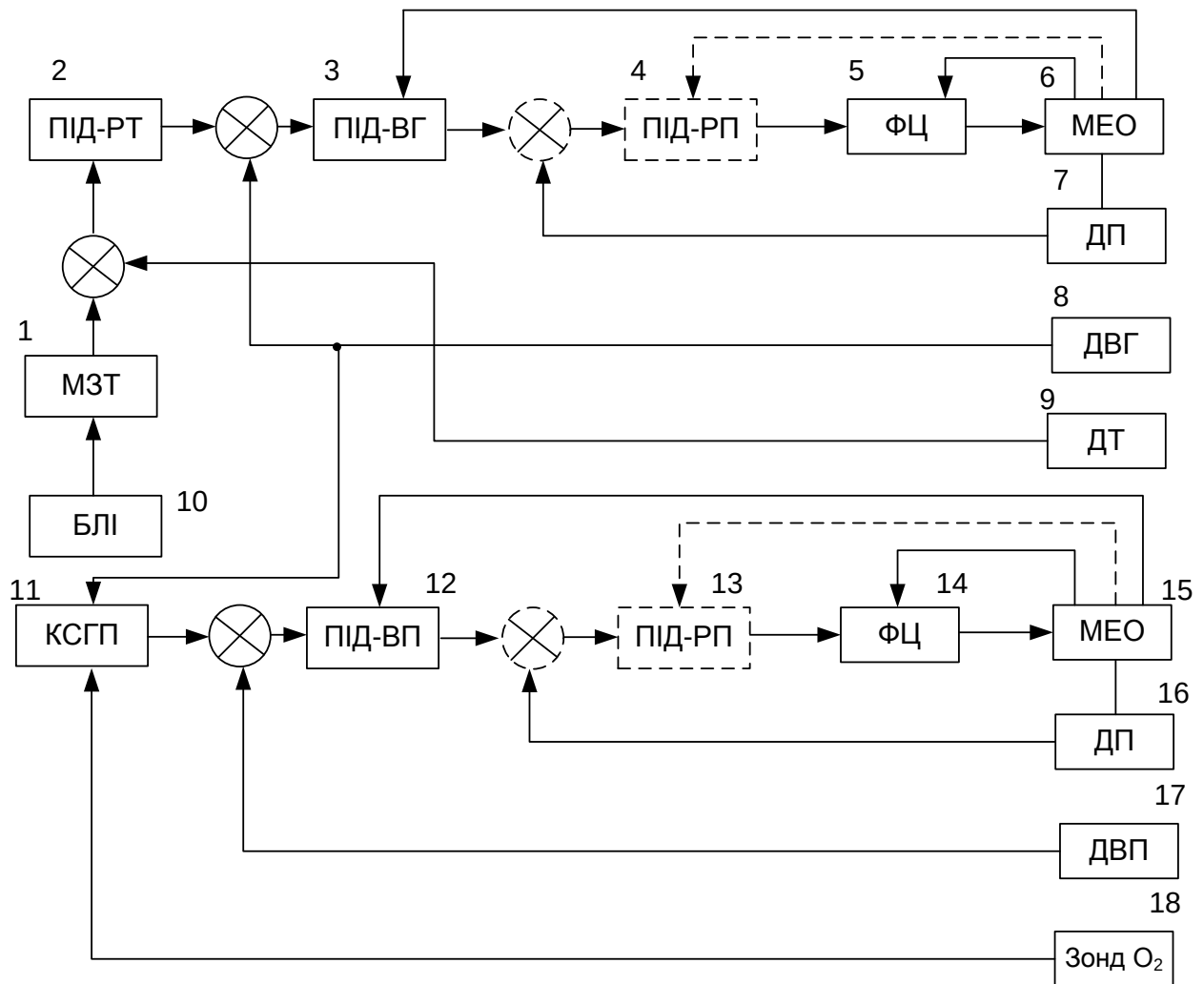


Рис. 2.1. Структурна схема контуру регулювання температури в робочому просторі

(розроблено автором з використанням [9; 10; 11; 12; 13; 14])

На рис. 2.1 позначено: 1 – Модуль завдання температури; 2 – ПІД-регулятор температури (зовнішній контур); 3 – ПІД-регулятор витрати газу

(підпорядкований контур); 4 – Виконавчий механізм заслінки газу; 5 – Заслінка газу; 6 – Датчик положення заслінки газу; 7 – ПД-регулятор положення заслінки газу; 8 – Датчик витрати газу (ДВГ); 9 – Датчик температури (ДТ); 10 – Блок обробки логічної інформації; 11 – Блок КСГП з корекцією за O_2 ; 12 – ПД-регулятор витрати повітря; 13 – Виконавчий механізм заслінки повітря; 14 – Заслінка повітря; 15 – Датчик положення заслінки повітря; 16 – ПД-регулятор положення заслінки повітря; 17 – Датчик витрати повітря (ДВП); 18 – Цирконієвий зонд O_2 .

Каскадна структура контуру передбачає два підпорядковані рівні: регулювання витрати газу (внутрішній швидкий контур) та регулювання витрати повітря (підпорядкований контур). Вихід регулятора температури є заданням для ПД-регулятора витрати газу. Фактична витрата газу змінюється відповідно до теплового запиту зовнішнього контуру зі значно вищою динамікою, ніж при одноконтурному регулюванні [14].

Цирконієвий зонд (елемент 18) встановлюється у борві та безперервно вимірює об'ємну частку O_2 у димових газах. Сигнал зонда надходить на блок КСГП (11), який автоматично коригує задане значення коефіцієнта надлишку повітря α таким чином, щоб вміст O_2 утримувався в оптимальному діапазоні 1,5–2,5 % [12; 13]. Це забезпечує повноту спалювання палива та мінімізацію утворення окислини.

Об'єктами регулювання є повітряна заслінка та заслінка змішаного газу, що приводяться в рух електричними виконавчими механізмами з безконтактними пускачами. Програмну реалізацію алгоритмів виконано на ПЛК Siemens SIMATIC S7-1500 [9].

2.1.2 Система автоматичного регулювання співвідношення газ–повітря (тиску) в нагрівальному колодязі

Структурну схему каскадного контуру регулювання співвідношення газ–повітря (тиску) наведено на рис. 2.2.

- промислова робоча станція Siemens SIMATIC IPC477E (Siemens AG, Німеччина) – для реалізації APM нагрівальника та SCADA-функцій;
- два програмованих логічних контролери Siemens SIMATIC S7-1500, CPU 1516-3 PN/DP – для реалізації алгоритмів регулювання та захистів нижнього рівня;
- джерело безперебійного живлення APC Smart-UPS 3000 BA RM (APC by Schneider Electric, США) – для безперервної роботи при короткочасних збоях в електромережі;
- додаткова робоча станція Siemens SIMATIC IPC477E на APM старшого нагрівальника.

Програмне забезпечення системи включає: TIA Portal для програмування ПЛК; SCADA-систему WinCC для візуалізації та оперативного контролю; операційну систему Windows 10 IoT Enterprise [9].

Контролери Siemens SIMATIC S7-1500 здійснюють обмін даними з диспетчерським пунктом та SCADA-системою WinCC через заводський промисловий протокол PROFINET з резервованою топологією кільця (MRP). Передача архівних трендів технологічних параметрів на MES-рівень реалізована за відкритим стандартом OPC UA із підтримкою механізмів автентифікації та шифрування, що забезпечує захищений доступ до виробничих даних незалежно від апаратної платформи замовника [13].

Вимір та регулювання витрат газу й повітря, а також регулювання коефіцієнта надлишку повітря виконується так (рис. 2.3): витрати вимірюються звужуючими пристроями та диференціальними вимірювачами тиску Rosemount 3051S (Emerson Electric Co., США); сигнали 4-20 мА надходять на модулі SM 1531 у ПЛК S7-1500; регулювання витрат виконується через модулі SM 1532 та перетворювачі частоти Siemens SINAMICS G120; вміст O_2 вимірюється цирконієвим зондом, вихідний сигнал якого коригує α [12; 13].

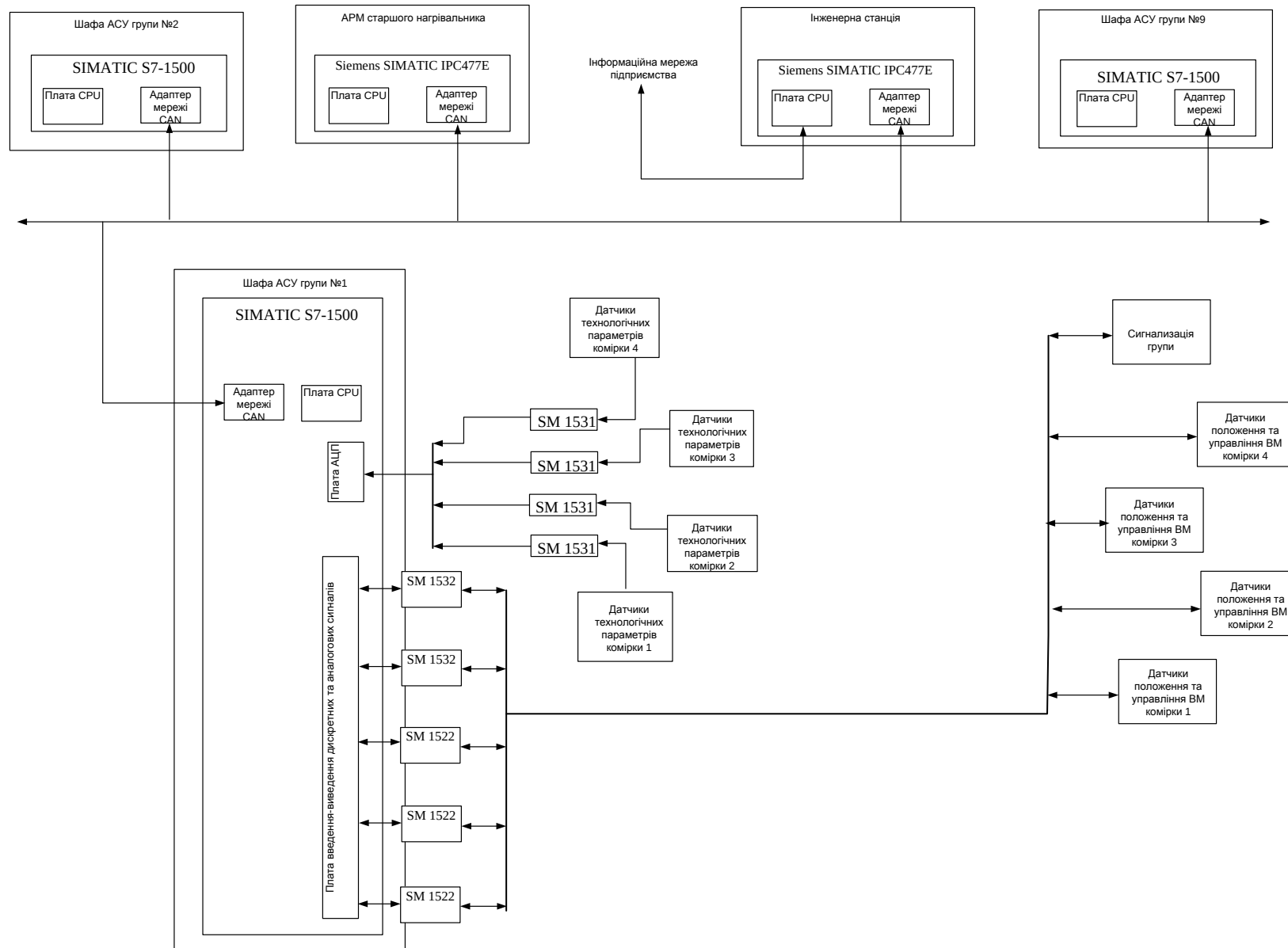


Рис. 2.3. Структурна схема АСУ нагрівальних колодязів
(розроблено автором)

Технічні характеристики обраного обладнання наведено у табл. 2.1 – табл. 2.9.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики промислової робочої станції Siemens SIMATIC IPC477E [9]

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Значення
1	Виробник (країна)	—	Siemens AG (Німеччина)
2	Процесор	—	Intel Core i7-6700
3	Тактова частота	ГГц	3,4
4	Оперативна пам'ять	ГБ	8
5	Накопичувач	—	SSD 240 ГБ
6	Мережний інтерфейс	—	2 × PROFINET (резервований, MRP)
7	Операційна система	—	Windows 10 IoT Enterprise

Таблиця 2.2

Технічні характеристики програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1500 [9]

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Значення
1	Виробник (країна)	—	Siemens AG (Німеччина)
2	Модель	—	CPU 1516-3 PN/DP
3	Робоча пам'ять	МБ	1,5
4	Пам'ять завантаження	МБ	8
5	Інтерфейси	—	PROFINET, PROFIBUS DP
6	Тактова частота	МГц	300
7	Кількість модулів вводу/виводу	шт	До 32

Таблиця 2.3

Технічні характеристики модуля аналогового введення Siemens SM 1531**[9]**

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Значення
1	Виробник (країна)	—	Siemens AG (Німеччина)
2	Модель	—	6ES7 531-7NF10-0AB0
3	Кількість входів	шт	8
4	Діапазони вимірювання	—	± 10 В; 0...10 В; 4...20 мА
5	Роздільна здатність	біт	16
6	Час інтегрування	мс	16 $\frac{2}{3}$; 20; 60; 100
7	Гальванічна розв'язка	—	Є

Таблиця 2.4

Технічні характеристики модуля аналогового виведення Siemens SM 1532**[9]**

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Значення
1	Виробник (країна)	—	Siemens AG (Німеччина)
2	Модель	—	6ES7 532-5HF00-0AB0
3	Кількість виходів	шт	4
4	Діапазони виходу	—	± 10 В; 0...10 В; 4...20 мА
5	Роздільна здатність	біт	16
6	Час перетворення	мс	0,6
7	Гальванічна розв'язка	—	Є

Таблиця 2.5

Технічні характеристики модуля дискретного введення Siemens SM 1521**[9]**

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Значення
1	Виробник (країна)	—	Siemens AG (Німеччина)
2	Модель	—	6ES7 521-1BL00-0AB0
3	Кількість входів	шт	16
4	Напруга входу	В	24 (пост. струм)
5	Гальванічна розв'язка	—	Є
6	Затримка входу	мс	3,2 при U = 24 В
7	Струм входу	мА	7

Таблиця 2.6

Технічні характеристики модуля дискретного виведення Siemens SM 1522**[9]**

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Значення
1	Виробник (країна)	—	Siemens AG (Німеччина)
2	Модель	—	6ES7 522-1BH00-0AB0
3	Кількість виходів	шт	16
4	Вихідна напруга	В	24 (пост. струм)
5	Гальванічна розв'язка	—	Є
6	Затримка виходу	мс	100
7	Максимальний струм виходу	мА	500

Таблиця 2.7

Технічні характеристики джерела безперебійного живлення APC Smart-UPS 3000 BA RM [9]

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Значення
1	Виробник (країна)	—	APC by Schneider Electric (США)
2	Вихідна потужність (повна)	ВА	3000
3	Вихідна потужність (активна)	Вт	2700
4	Напруга входу	В	230
5	Напруга виходу	В	230 ± 3 %
6	Тип акумулятора	—	VRLA (герметичний свинцево-кислотний)
7	Час резервного живлення	хв	≥10 при 100 % навантаженні

Таблиця 2.8

Технічні характеристики термопари та перетворювача Siemens SIMATIC TP700 [9]

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Значення
1	Виробник (країна)	—	Siemens AG (Німеччина)
2	Модель перетворювача	—	TP700
3	Тип термопари	—	S (платина-родій)
4	Діапазон вимірювання	°C	0...+1600
5	Основна похибка	°C	±0,15 % від діапазону
6	Вихідний сигнал	мА	4–20
7	Інтерфейс зв'язку	—	HART 7

**Технічні характеристики диференціального датчика тиску Rosemount
3051S [9]**

№ п/п	Найменування параметру	Одиниця виміру	Значення
1	Виробник (країна)	—	Emerson Electric Co. (США)
2	Діапазон вимірювання	кПа	0,1–6900
3	Основна похибка	%	±0,065 % від діапазону
4	Вихідний сигнал	—	4–20 мА та цифровий HART
5	Матеріал мембрани	—	Нержавіюча сталь 316L
6	Тиск статичної перевірки	МПа	51 (фланцевий монтаж)
7	Протокол зв'язку	—	HART 5/7

**2.3 Умови експлуатації об'єкта автоматизації та характеристика
навколишнього середовища**

Приміщення керування характеризуються такими показниками [9]:

- температура навколишнього повітря – від 0 °С до +40 °С;
- відносна вологість при 25 °С – до 80 % без конденсації;
- атмосферний тиск – від 84 до 106 кПа;
- вібрація – до 0,5 м/с².

Параметри мережі живлення Системи:

- номінальне значення однофазної змінної напруги – 230 В;
- допустимі коливання напруги – від +10 % до –15 %;
- частота живлячої напруги – 50/60 Гц;
- коефіцієнт вищих гармонік – не більше 8 %.

За ступенем пожежо- і вибухобезпеки приміщення мають категорію «В» відповідно до вимог [20]. ПЛК Siemens SIMATIC S7-1500 живляться від

джерела безперебійного живлення APC Smart-UPS 3000 VA RM, що забезпечує безперервну роботу при короткочасних збоях в електромережі тривалістю до 10 хвилин при 100 % навантаженні.

2.3.1 Електроживлення промислових робочих станцій

Промислові робочі станції Siemens SIMATIC IPC477E живляться від того самого ДБЖ, що і ПЛК. Час автономної роботи від акумуляторів типу VRLA становить не менше 20 хвилин при повному навантаженні, що достатньо для коректного завершення технологічних операцій та збереження даних [9].

2.3.2 Електроживлення датчиків

Датчики тиску та витрати Rosemount 3051S зі струмовим виходом 4–20 мА живляться за двопровідною схемою від блоків живлення 24 В постійного струму, вбудованих у шафи вводу/виводу ПЛК. Дискретні датчики положення засувки живляться напругою 24 В від внутрішніх джерел живлення контролерів. Цирконієвий зонд O_2 живиться від окремого стабілізованого джерела 24 В, змонтованого у шафі приладового обладнання [9].

2.4 Характеристика інформаційного забезпечення

До складу інформаційного забезпечення АСУТП входять [9; 10]:

- масиви й набори даних, що формуються та використовуються на етапі створення системи;
- масиви й набори даних, що формуються та використовуються при експлуатації системи;
- програмні й технічні засоби для організації інформаційних потоків, зберігання і передачі даних.

На етапі створення Системи формуються: переліки вхідних сигналів (аналогових і дискретних); відомості про пристрої; специфікації КВПіА; переліки механізмів та запірно-регулюючої арматури (ЗРА); відомості про технічні засоби програмно-технічного комплексу.

Схему формування масивів даних наведено на рис. 2.4.

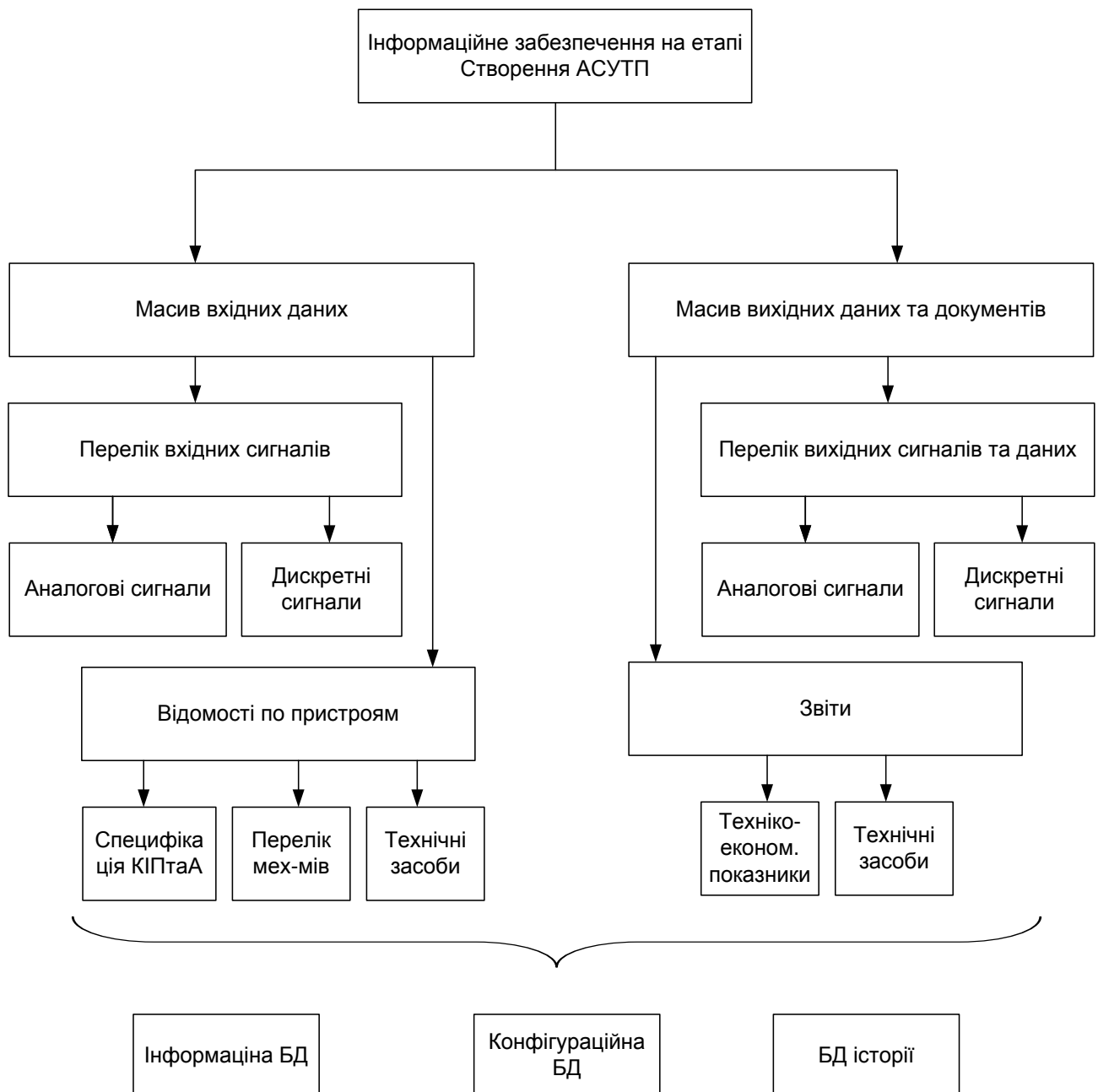


Рис. 2.4. Формування масивів даних

(розроблено автором)

При експлуатації Система оперує такими потоками даних: поточні значення технологічних параметрів (цикл оновлення 500 мс); тренди технологічних параметрів (архівування з інтервалом 1 хв); журнали подій та аварійних сигналів; протоколи нагрівання злитків; дані обміну з MES-рівнем за OPC UA [13]. Зберігання архівних даних виконується на накопичувачі ємністю 240 ГБ; глибина архіву – не менше 1 року.

Організацію інформаційного забезпечення Системи наведено на рис. 2.5.

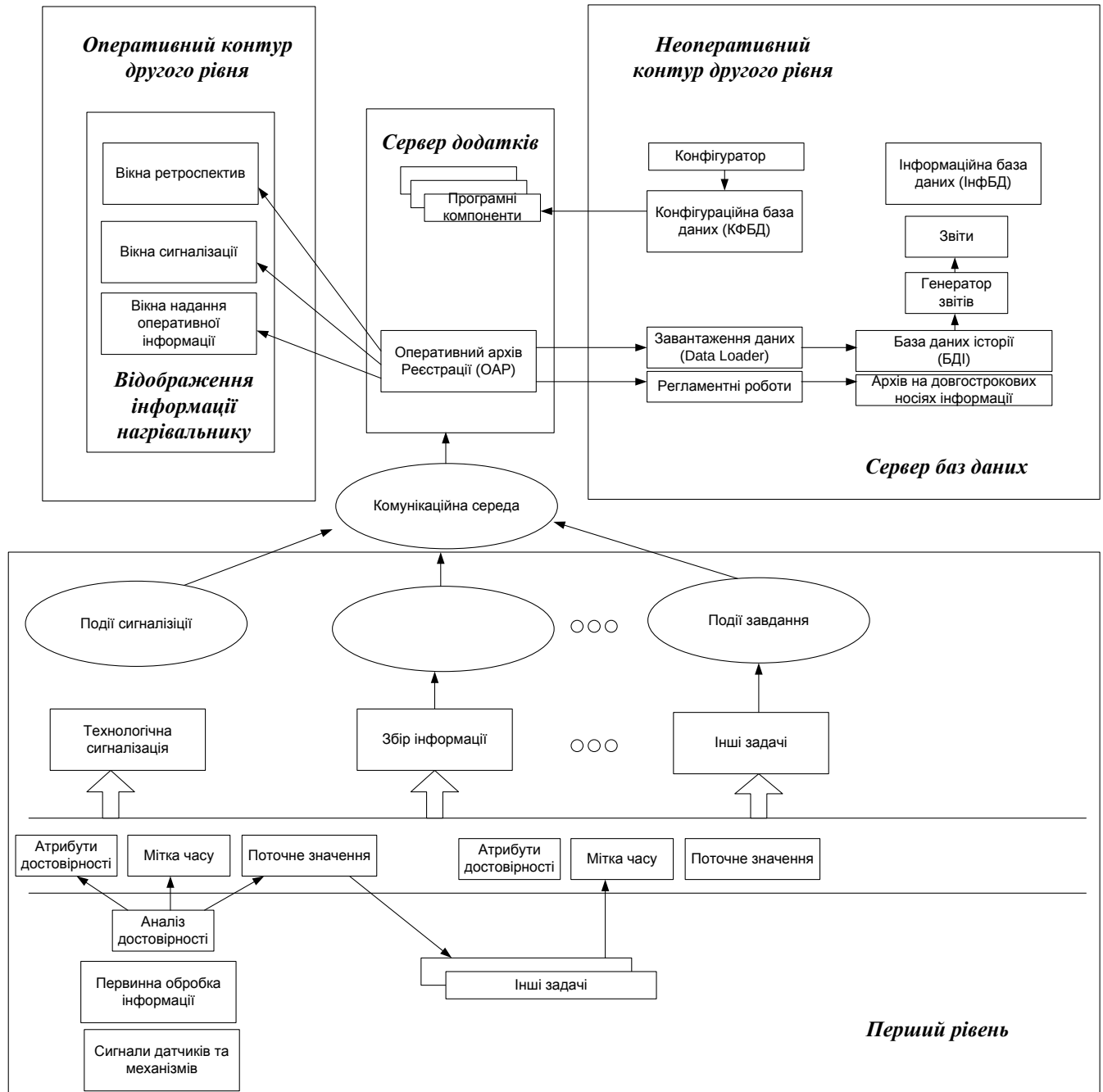


Рис. 2.5. Організація інформаційного забезпечення

(розроблено автором з використанням [9; 10])

2.5 Функціонування Системи

2.5.1 Функції нижнього рівня Системи

Нижній рівень Системи реалізується на ПЛК Siemens SIMATIC S7-1500 та виконує такі функції [9; 10; 11]:

- циклічне опитування первинних засобів вимірювання: аналогових датчиків температури, тиску, витрати, положення виконавчих органів, залишкового O_2 (цирконієвий зонд), а також дискретних датчиків положення та кінцевих вимикачів;
- первинне масштабування, цифрову фільтрацію та перевірку достовірності отриманих сигналів; виявлення відмов датчиків за виходом сигналу за діапазон 4–20 мА;
- виконання алгоритмів каскадного регулювання: зовнішній контур температури формує завдання для підпорядкованого контуру витрати газу; канал витрати повітря отримує завдання через блок КСПП з корекцією від цирконієвого зонда;
- реалізацію алгоритму «технологічного відсічення» – аварійного закриття швидкісних клапанів-відсікачів при виникненні будь-якого з аварійних сигналів [9]:
 - падіння тиску газу нижче мінімально допустимого значення;
 - падіння тиску повітря нижче мінімально допустимого значення;
 - зникнення напруги живлення (сигнал від ДБЖ);
 - відсутність сигналу від фотоелектричного датчика контролю полум'я (погасання полум'я пальника);
 - відкривання кришки колодязя (датчик положення кришки, нормально замкнутий контакт);
- реалізацію математичного критерію готовності злитка до прокатки: система визначає готовність не за таймером, а за стабілізацією мінімальної витрати газу під час стадії витримування. Коли температура у робочому просторі досягла заданої уставки і витрата газу асимптотично зменшилась до

стаціонарного значення (тепловий баланс досягнуто), ПЛК формує сигнал для оператора. Математично умова готовності визначається формулою (2.1) [14]:

$$\Delta Q(t) = |Q(t) - Q(t-\Delta t)| \leq \varepsilon \quad (2.1)$$

де $\Delta Q(t)$ - абсолютне значення приросту витрати газу за інтервал Δt ,
 нм³/год;

$Q(t)$ - поточне значення витрати газу, нм³/год;

Δt - інтервал спостереження, с;

ε - порогове значення допустимого приросту, нм³/год.

- передавання технологічних даних на верхній рівень через протокол PROFINET;
- формування сигналів технологічних попереджень і аварійної сигналізації.

2.5.2 Функції верхнього рівня Системи

Верхній рівень Системи реалізується на ПК Siemens SIMATIC IPC477E під управлінням SCADA-системи WinCC та виконує такі функції [9; 10]:

- відображення поточних значень технологічних параметрів на мнемосхемах у реальному часі;
- відображення трендів технологічних параметрів за обраний проміжок часу;
- квітування аварійних сигналів оператором;
- введення завдань на нагрівання (тип сталі, технологічна програма, параметри плавки);
- архівування технологічних параметрів і подій у базі даних SCADA;
- формування звітів та протоколів нагрівання злитків;

- передавання архівних трендів на MES-рівень за стандартом OPC UA з аутентифікацією та шифруванням [13];
- діагностика стану технічних засобів нижнього рівня (ПЛК, датчики, виконавчі механізми).

Приклади трендів технологічних параметрів нагрівання на екрані АРМ наведено на рис. 2.6 та рис. 2.7.



Рис. 2.6. Тренди технологічних параметрів нагрівання
(розроблено автором)

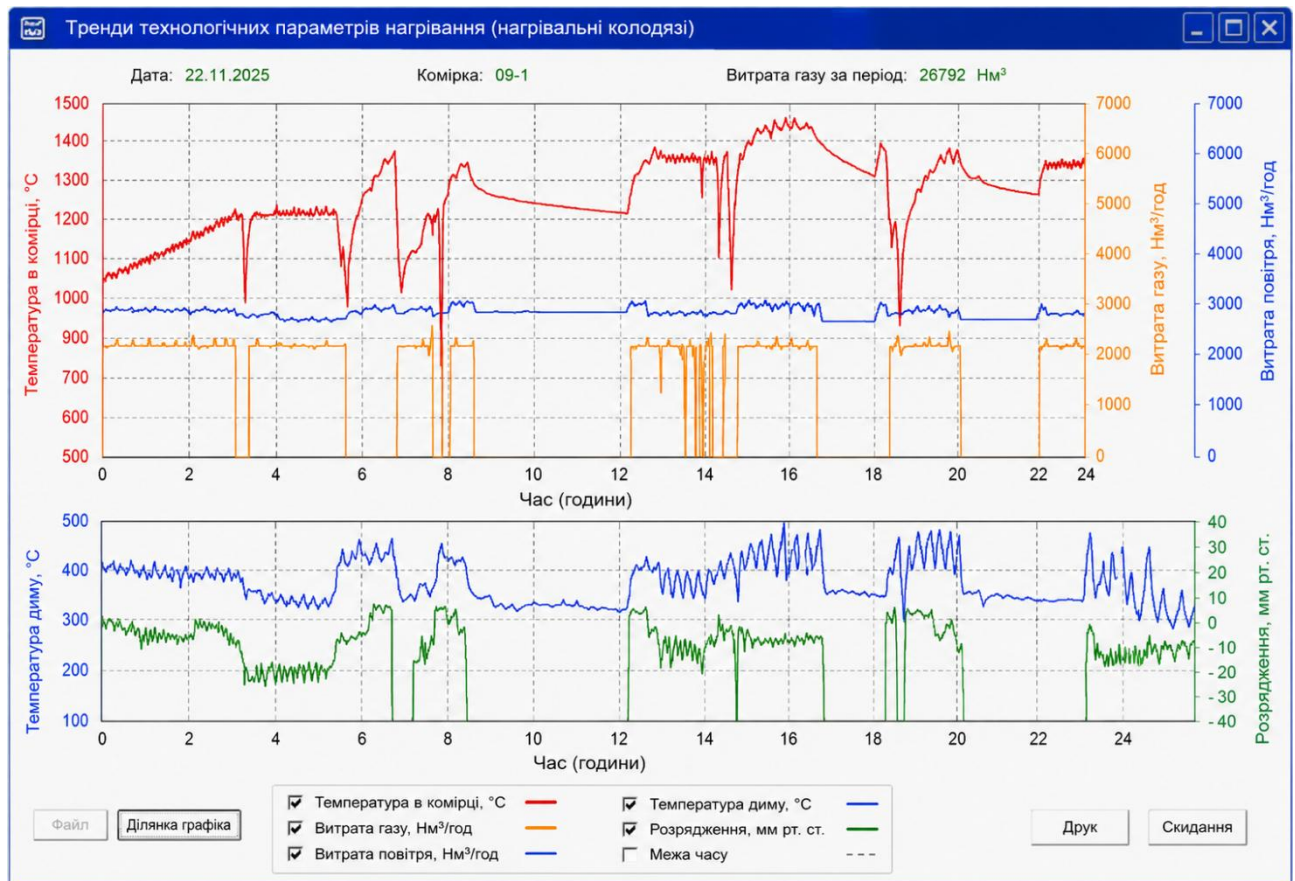


Рис. 2.7. Тренди технологічних параметрів нагрівання з 18:50 до 24:00
(розроблено автором)

Фрагмент протоколу автоматичного нагрівання злитків наведено на рис. 2.8.

```
* 18:48:50   Плавка (ВУ1): 0210746
* 18:51:23   Натискання клавіші «ПУСК», [t = 1397]
Плавка (ПЛ): 0210746; Читання графіка – стор. 1, [t = 963]
Посад: Г: Трансп: 02:06; Готовність: 21:41 (22.11.2025)
Відрізок: НАГРІВАННЯ, [t = 963]
* 20:01:26   Відрізок: ТОМЛ_1, [t = 1375]
* 20:16:02   Дод.томл., [t = 1359]; Томл. перед видаванням, [t = 1359]
* 21:09:38   Читання графіка – стор. 3, [t = 1280]
* 22:14:34   Читання графіка – стор. 4, [t = 1260]
Готовність: 23:39 (22.11.2025)
* 22:57:02   Відрізок: ТОМЛ_1, [t = 1335]
* 23:55:02   ТОМЛ перед видаванням; кінець завдання, [t = 1387]
```

Рис. 2.8. Фрагмент протоколу роботи нагрівального колодязя з 18:50 до 24:00 22.11.2025
(розроблено автором)

Загальну функціональну схему автоматизації наведено на рис. 2.9.

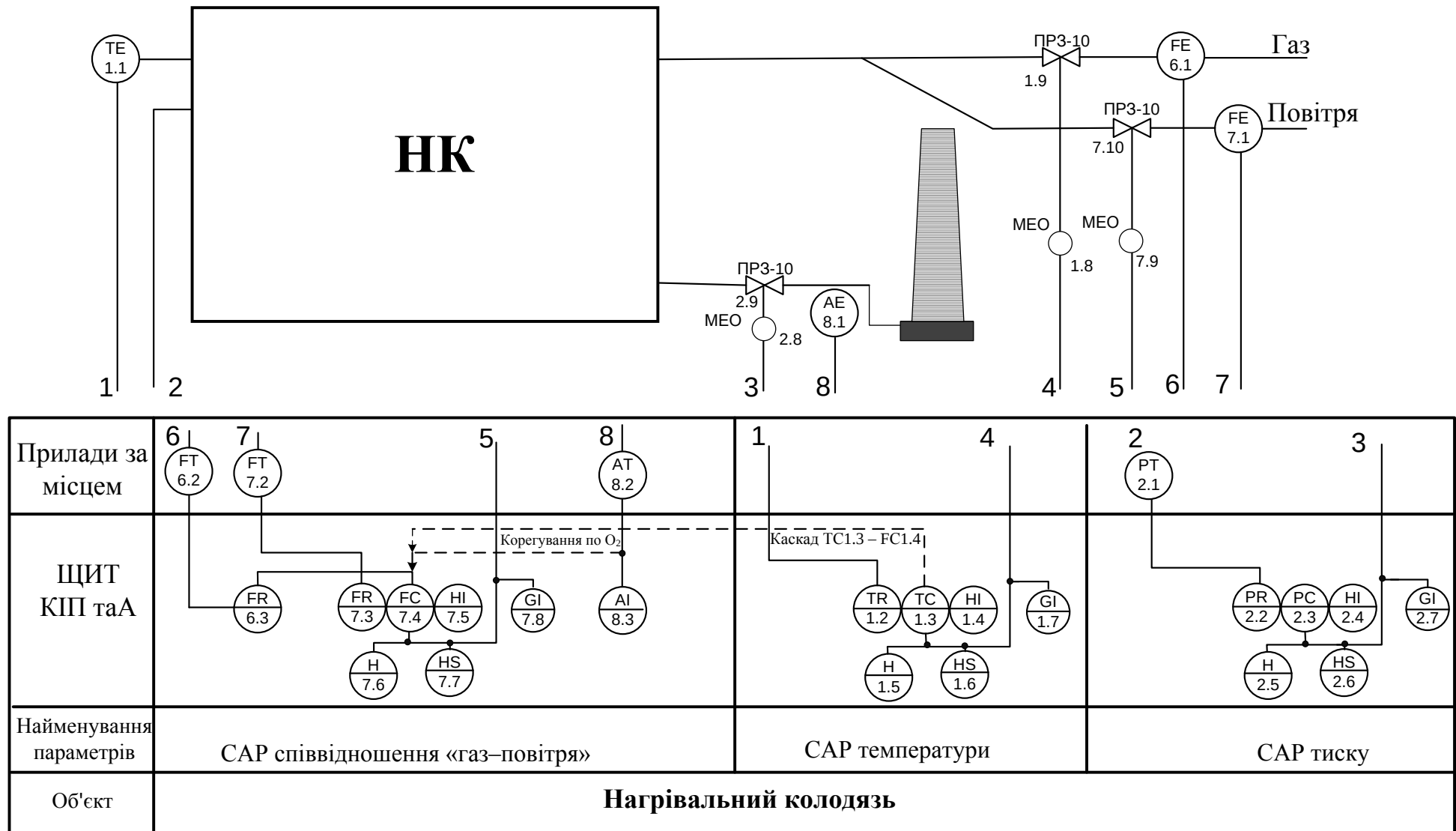


Рис. 2.9. Функціональна схема автоматизації АСУ нагрівальних колодязів
(розроблено автором)

2.6 Розробка алгоритму опитування датчиків та початкової обробки інформації

Алгоритм опитування датчиків та початкової обробки інформації реалізується циклічно в програмному забезпеченні ПЛК Siemens SIMATIC S7-1500 [9; 11]. Цикл опитування становить 500 мс для аналогових датчиків та 100 мс для дискретних датчиків захистів. Алгоритм наведено на рис. 2.10.

Послідовність виконання алгоритму для кожного i -го датчика ($i = 1, \dots, N$):

- 1) Перевірка наявності опитування i -го датчика на даному циклі відповідно до налаштованого пріоритету.
- 2) Зчитування значення сигналу з модуля вводу ПЛК.
- 3) Перевірка достовірності: діапазон 4–20 мА; виявлення розриву лінії ($< 3,6$ мА) або КЗ ($> 20,5$ мА). При недостовірному сигналі – встановлення прапора «Несправність датчика» та формування аварійного повідомлення [11].
- 4) Лінійне масштабування достовірного сигналу за формулою (2.2) [14]:

$$X = X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min}) \cdot \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (2.2)$$

де X - значення параметра у фізичних одиницях;

$X_{\min}$ - мінімальне значення діапазону датчика;

$X_{\max}$ - максимальне значення діапазону датчика;

I - поточне значення вихідного сигналу, мА;

$I_{\min}$ - мінімальний рівень сигналу (4 мА);

$I_{\max}$ - максимальний рівень сигналу (20 мА).

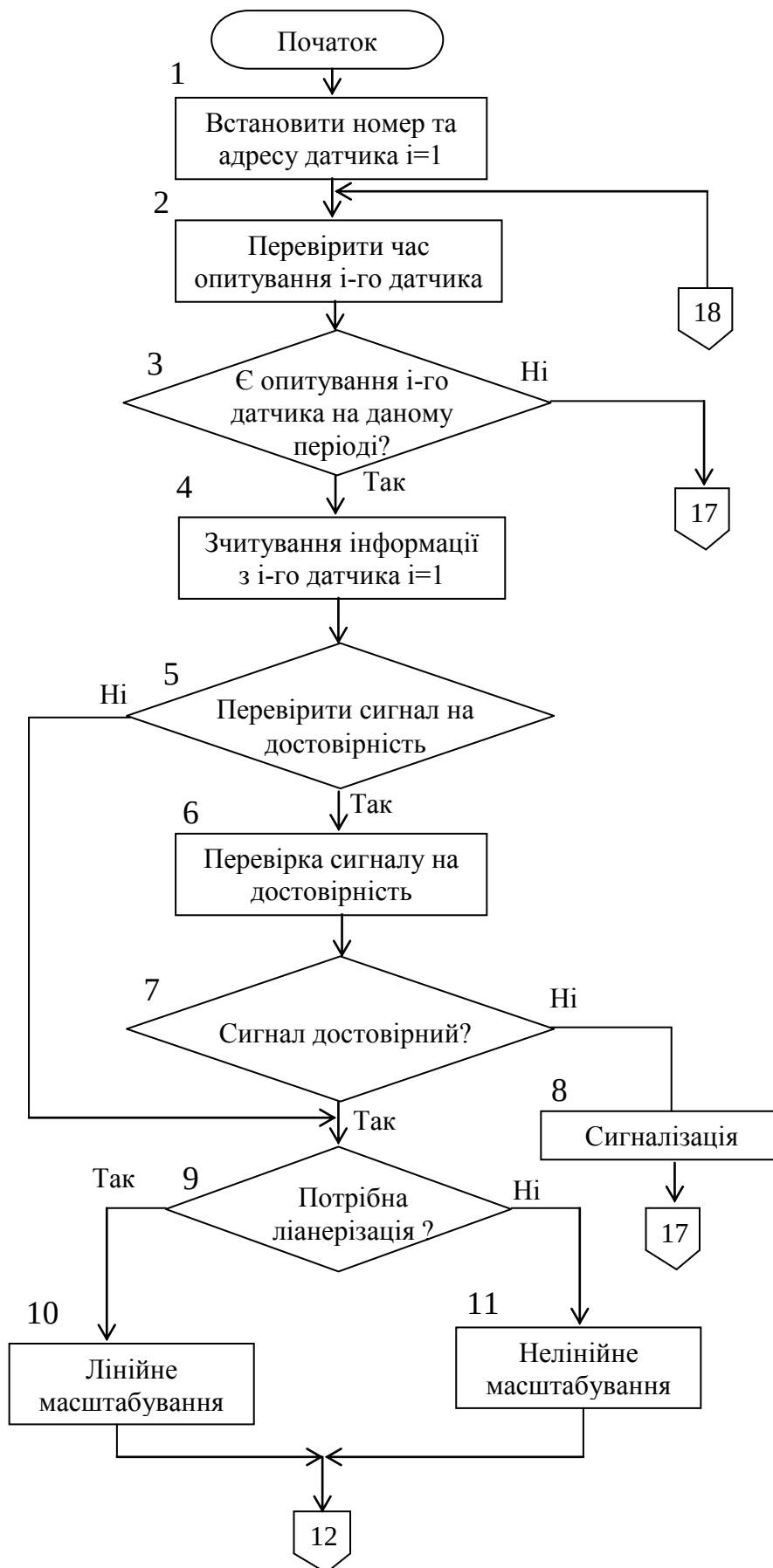


Рис. 2.10. Алгоритм опитування датчиків та початкової обробки інформації, аркуш 1

(розроблено автором)

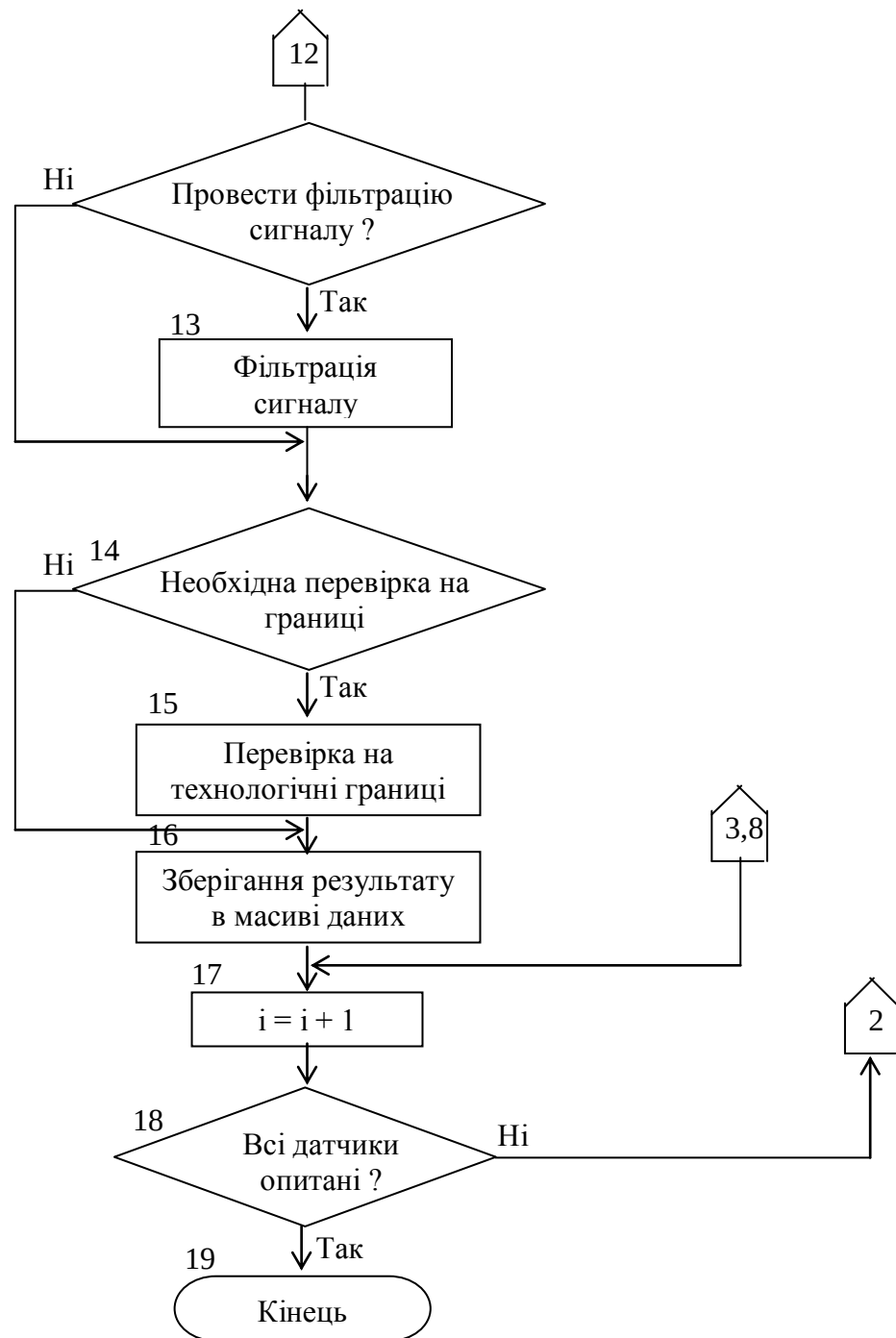


Рис. 2.10, аркуш 2

5) При нелінійній характеристиці (термопара, цирконієвий зонд) – нелінійне масштабування за таблицею або поліноміальною функцією.

6) Цифрова фільтрація (ковзне середнє по n значенням) для придушення завад.

7) Порівняння з граничними значеннями (уставками попередження та аварії) та формування відповідних сигналів.

8) Запис обробленого значення до бази даних реального часу ПЛК для передачі на регулятори та верхній рівень.

2.7 Розрахунок САР співвідношення

Об'єктом регулювання є повітряний клапан (димовий шибер), що приводиться в рух електричним виконавчим механізмом, привід якого комутується безконтактним пускачем [14]. Вихідний пристрій регулятора, реалізований у ПЛК, функціонує в імпульсному режимі «більше – менше». З урахуванням вимог до якості регулювання (виключення статичної похибки) необхідна реалізація ПІ- або ПІД-структури. Нагрівальний колодязь як об'єкт характеризується збільшеним запізненням, що знижує ефект дії диференціальної складової, тому обґрунтованим є застосування ПІ-регулятора.

Основний вихідний параметр – кількість повітря, що надходить на інжектор; максимальна витрата $F = 1250 \text{ нм}^3/\text{год}$. Основний вхідний параметр – кількість газу в нагрівальному колодязі; максимальна витрата $F = 6300 \text{ нм}^3/\text{год}$. Максимально можливе збудження навантаження $Y_v = 70 \%$. Необхідні показники якості регулювання: максимальне динамічне відхилення – не більше 20 %; допустиме залишкове відхилення – не більше $6,5 \text{ нм}^3/\text{год}$; допустимий час регулювання – не більше 10–11 с.

З кривої розгону об'єкта (рис. 2.11), знятої при збудженні 20 %, визначено динамічні параметри [14]:

- запізнення $\tau = 1,2 \text{ с}$;
- постійна часу $T = 6 \text{ с}$;
- коефіцієнт передачі $K_{об}$ визначається з кривої розгону.

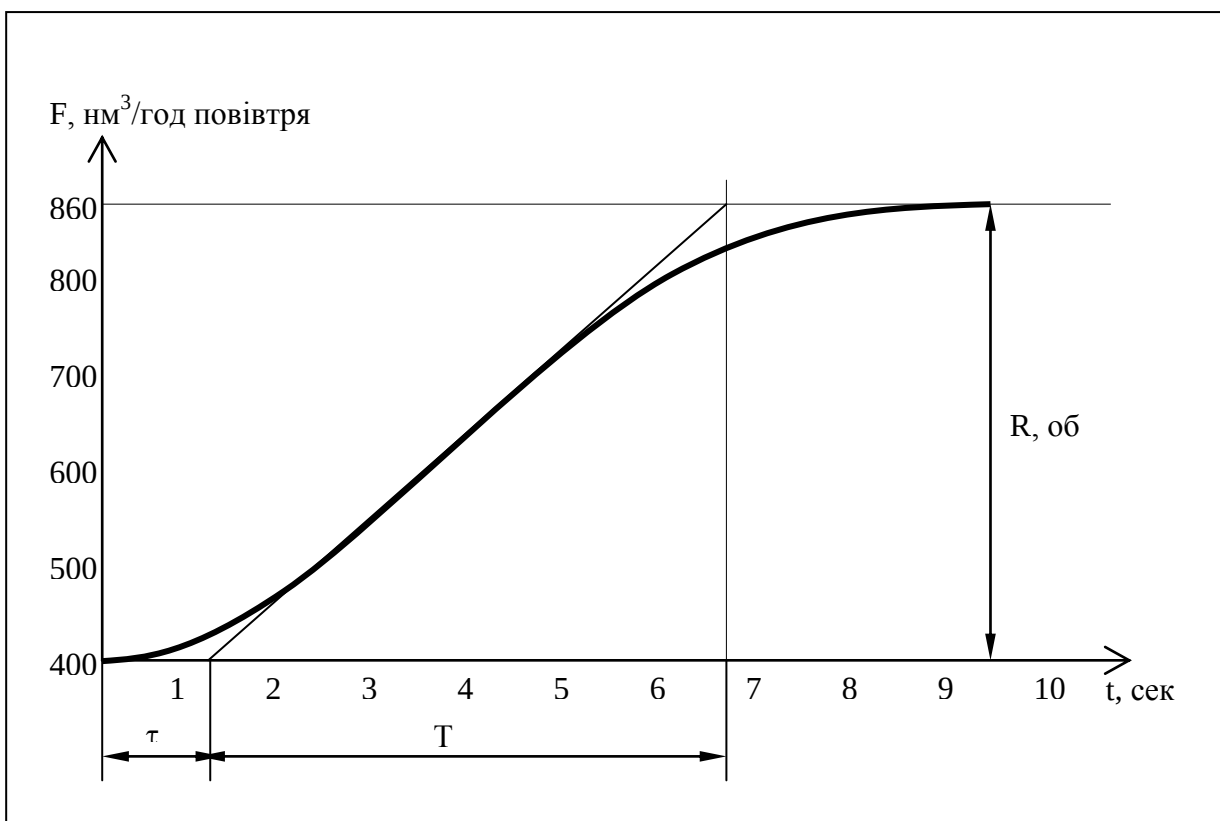
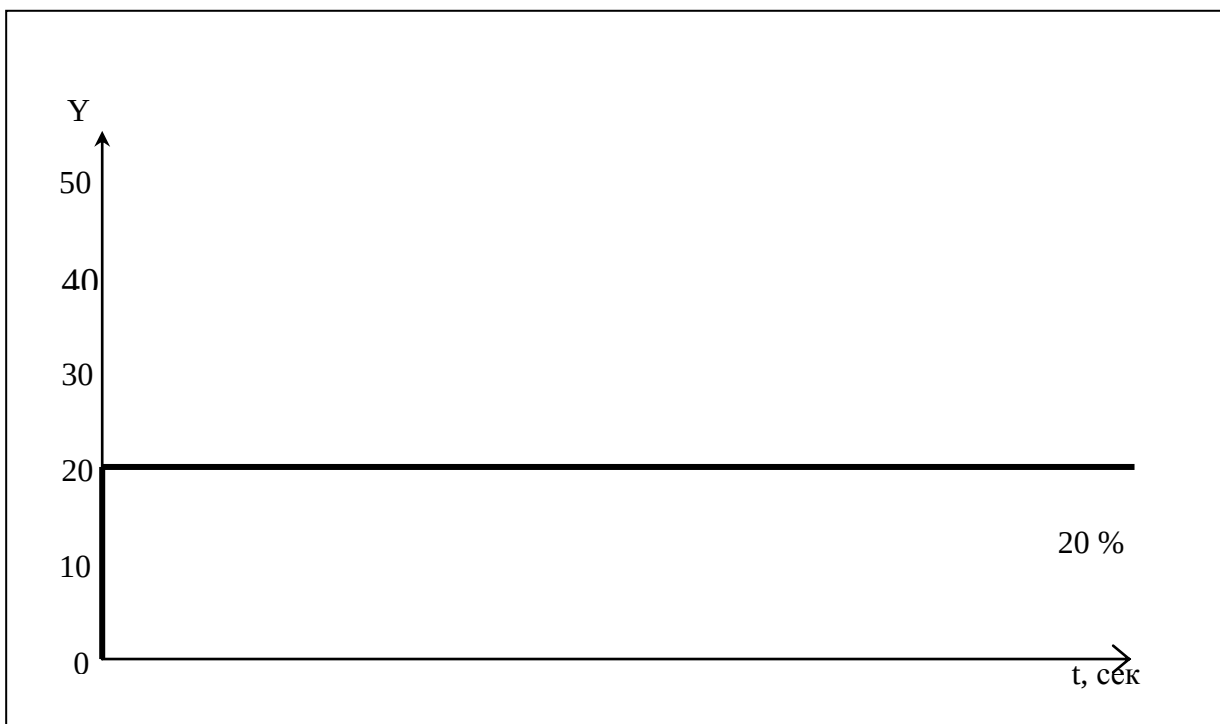


**Рис. 2.11. Експериментальна крива розгону вузла регулювання
співвідношення «газ – повітря»
(розроблено автором)**

З кривої розгону об'єкта (рис. 2.11) експериментально знятої при одиничному збудженні (20%) з боку навантаження об'єкта, з'ясовуємо динамічні параметри:

- запізнення $\tau = 1.2c$
- постійна часу $T = 6c$
- коефіцієнт передачі знаходимо по кривій розгону

$$R_{об} = \frac{x(\infty) - x(0)}{\Delta y} = \frac{860 \text{ нм}^3 / \text{год} - 400 \text{ нм}^3 / \text{год}}{20\%} = 23 \quad (2.3)$$

По відношенню $\frac{\tau}{T} = \frac{1,2}{6} = 0,2$ з табл. 2.10 з'ясовуємо, що в цих умовах необхідно мати регулятор безперервної дії.

Табл. 2.10

Відношення запізнювання до постійної часу

Відношення запізнювання до постійної часу	
Значення τ / T	Тип регулятора
До 0,2	Релейний
Від 0,2 до 1,0	Безперервний
Більше 1,0	Імпульсний або безперервний

Визначаємо величину динамічного коефіцієнта регулювання:

$$R_o = \frac{X_1}{R_{об} \cdot Y_6} = \frac{7}{23 \cdot 0,7} = 0,43$$

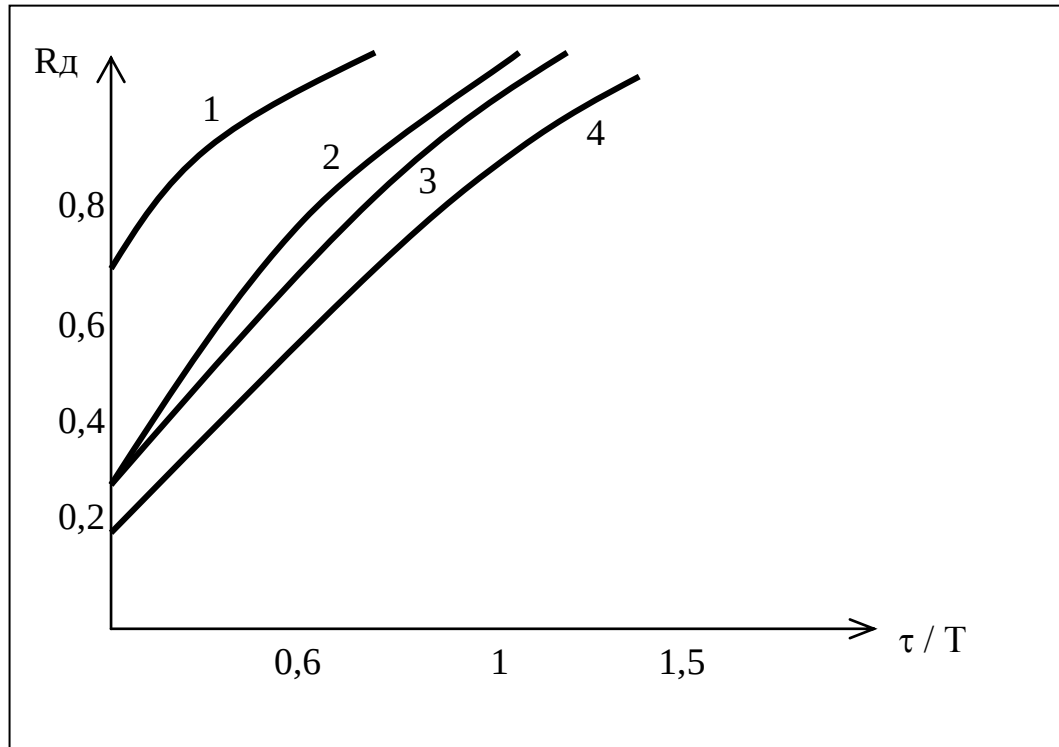


Рис. 2.12. Динамічні коефіцієнти регулювання
(розроблено автором)

- 1 - І – регулятор
- 2 - П – регулятор
- 3 - ПІ – регулятор
- 4 - ПІД – регулятор

По графіку (рис.2.12) для прийнятого аперіодичного процесу з мінімальним часом регулювання, вибираємо при $\tau/T=0.2$, ПІ регулятор забезпечуючи розрахункову величину динамічного коефіцієнта регулювання.

По графіку (рис. 2.11) з'ясуємо що $t'_p \approx 10c$. Отже ПІ-регулятор забезпечує необхідний час регулювання, тобто $t'_p \approx t_p \approx 10c \approx 11c$.

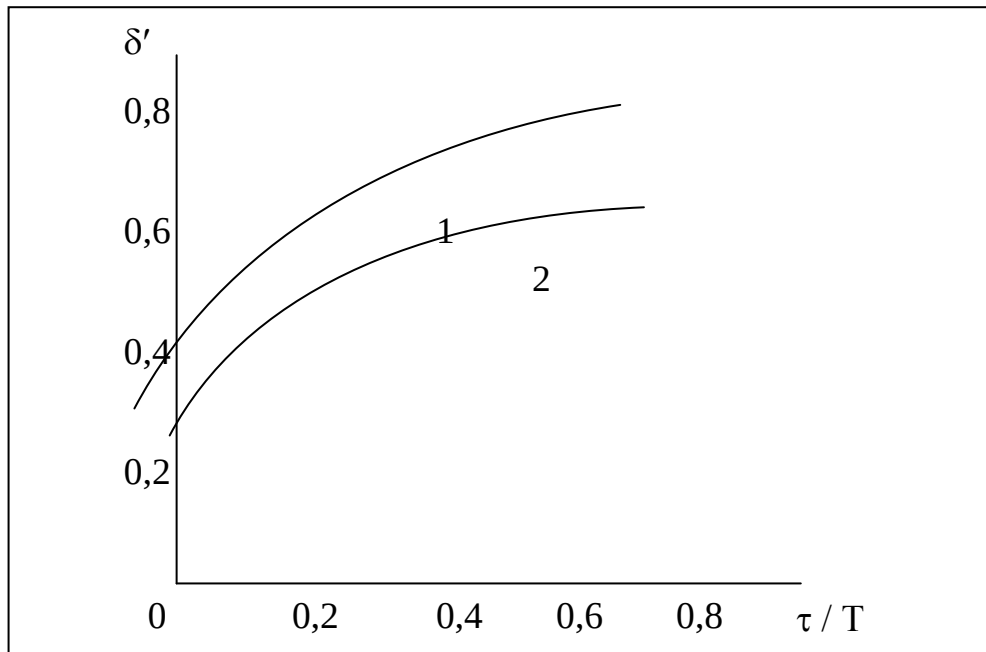


Рис. 2.13. Відносне остаточне відхилення на статичних об'єктах
(розроблено автором)

1 – Аперіодичний процес;

2 – Процес с 20%-вим перерегулюванням.

По графіку (рис. 2.19) з'ясовуємо відносне залишкове відхилення $\delta' = 0.38$ по котрому для вибраного ПИ-реулятора визначаємо величину допустимого залишкового отклоненеия:

$$\delta = \delta' \cdot R_{об} \cdot Y_v = 0,38 \cdot 23 \cdot 0,7 = 6,1 \text{ нм}^3 / \text{годину}. \quad (2.4)$$

Як видно отримана величина кінцевого відхилення менше прийнятої в розрахунку ($6,5 \text{ нм}^3 / \text{годину}$) тобто:

$$6,1 \text{ нм}^3 / \text{годину} < 6,5 \text{ нм}^3 / \text{годину}.$$

Відповідно, вибраний ПИ-регулятор, відповідає усім показникам, що визначають задану якість регулювання.

Розрахунок налаштувань.

У відношенні з отриманим законом регулювання і вибраним ПІ-регулятором є:

- R_p - коефіцієнт передачі(% ходу рег. органу рег. величин);

- T_u - час ізодромного(с).

По формулах для визначення налаштувань безперервних регуляторів на статичних об'єктах, при аперіодичному процесі регулювання, для ПІ-регулятора визначаємо:

$$R_p = \frac{0.6}{R_{ob} \cdot \tau / T} = \frac{0.6}{23 \cdot 0.2} = 0.13 \quad , \% \text{ходу РО} / \text{нм}^3 / \text{годину} \quad (2.5)$$

$$T_u = 0.6 = 0.6 \cdot 6 = 3.6 \text{с}$$

Для точнішого визначення параметрів налаштування регулятора, використовуємо номограму (рис 2.14), по якій для $\tau / T = 0.2$

Знаходимо:

$$(R_p / R_{об})_{опт} = 2.3 \quad \text{і} \quad (T_u / \tau)_{опт} = 3.7 \quad (2.6)$$

$$R_{p \text{ опт}} = \frac{(R_p / R_{об})_{опт}}{R_{об}} = \frac{2.3}{23} = 0.1, \frac{\% \text{ходу РО}}{\text{нм}^3 / \text{год}} \quad (2.7)$$

$$T_{u \text{ опт}} = (T_u / \tau)_{опт} \cdot \tau = 3.7 \cdot 1.2 = 4.44 \text{с}. \quad (2.8)$$

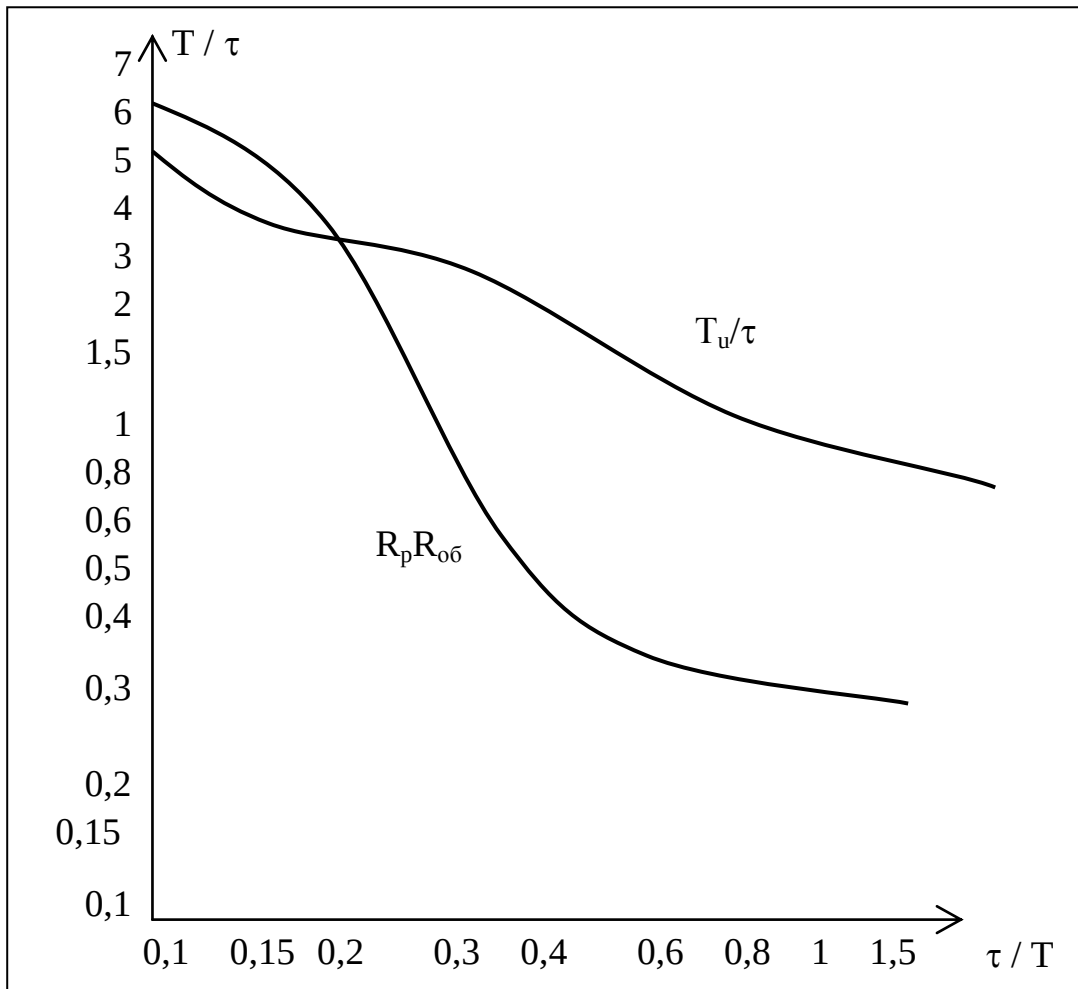


Рис. 2.14. Номограма для визначення оптимальних параметрів налаштування ПІ - регулятора на статичних об'єктах. Періодичний процес
(розроблено автором)

2.8 Заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності

2.8.1 Аналіз основних шкідливих і небезпечних чинників в умовах цеху Блюмінг

Цех Блюмінг характеризується комплексним впливом шкідливих і небезпечних виробничих факторів, що потребують систематичного контролю та вжиття захисних заходів відповідно до вимог [15; 16].

Механічний шум генерується зубчастими передачами, підшипниковими вузлами, рольгангами та процесами деформування металу. Нормативний рівень

еквівалентного звукового тиску – 80 дБ(А); фактичні виміри фіксують рівень 93 дБ(А), що перевищує норму на 13 дБ(А) відповідно до вимог [15; 16].

Вібрація виникає від роботи основного та допоміжного обладнання й посилюється зі збільшенням швидкості обробки металу відповідно до вимог [16]. Фактична температура в районі нагрівальних колодязів сягає 37–42 °С, що суттєво перевищує нормативне значення до 26 °С, встановлене відповідно до вимог [15], і становить ризик теплового удару. Рівень запиленості 8–10 г/м³ перевищує ГДК; фактична освітленість 84–92 лк є недостатньою відповідно до норм [17].

Приміщення відносяться до особливо небезпечних щодо ураження електричним струмом внаслідок наявності струмопровідних підлог, підвищеної температури (понад 35 °С) та можливості одночасного контакту із заземленими металоконструкціями відповідно до класифікації [18].

Таблиця 2.11

Рівень шкідливих виробничих чинників

Найменування чинника	Норма	Факт	Перевищення
Рівень шуму, дБ(А)	80	93	13
Температура повітря, °С	≤26	37–42	11–16
Запиленість, г/м³	≤6	8–10	2–4
Освітленість, лк	≥200	84–92	дефіцит

2.8.2 Заходи щодо зниження шкідливих і небезпечних чинників в умовах цеху Блюмінг

Для зниження рівня механічного шуму передбачено встановлення шумопоглинаючих бар'єрів та екранів, а обслуговуючий персонал забезпечується засобами захисту слуху (беруші, навушники) відповідно до

вимог [19]. Для зниження рівня вібрації на елементи машин і механізмів наносяться пружно-грузлі матеріали; застосовуються віброізоляційні та вібропоглинаючі конструкції відповідно до вимог [20].

Для покращення повітряного середовища встановлюється місцева витяжна вентиляція відповідно до вимог [21]. Захист від ураження електричним струмом забезпечується комплексом заходів: захисні кожухи на струмоведучих частинах; магнітні пускачі та КРП на щитах; суцільні та сітчасті огороження відповідно до вимог [22].

Як додаткові засоби захисту застосовуються діелектричні коврики, рукавички, захисне заземлення відповідно до вимог [23; 24].

Розрахунок захисного заземлення виконано для мережі напругою 6 кВ з ізолюваною нейтраллю. Розрахунковий струм однофазного замикання на землю за формулою (2.9) [25]:

$$I_z = U \times (L_k / 6 + L_v / 35) = 6 \times (5,38 / 6 + 0) = 5,38 \text{ А} \quad (2.9)$$

де U - фазна напруга мережі, кВ;

L_k - загальна довжина кабельних ліній, км;

L_v - загальна довжина повітряних ліній, км.

Допустимий опір заземлення при малому струмі замикання ($< 500 \text{ А}$) за формулою (2.10) [25]:

$$R_z \leq 125 / I_z = 125 / 5,38 = 23,2 \text{ Ом, але не більше } 4 \text{ Ом} \quad (2.10)$$

Оскільки до заземлення приєднані корпуси обладнання напругою менш 1000 В, приймається $R_z = 4 \text{ Ом}$. Питомий опір ґрунту $\rho = 40 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Опір одиночного вертикального трубчастого заземлювача ($l = 3 \text{ м}$, $d = 0,05 \text{ м}$, $H_0 = 0,8 \text{ м}$) за формулою (2.11):

$$R_0 = (\rho / 2\pi l) \times [\ln(2l/d) + 0,5 \times \ln((4H_0 + l) / (4H_0 - l))] \approx 10,5 \text{ Ом} \quad (2.11)$$

Кількість заземлювачів за формулою (2.12):

$$n = R_0 / (R_3 \times \eta_3) = 10,5 / (4 \times 0,65) \approx 4 \text{ шт} \quad (2.12)$$

Результуючий опір заземлювального пристрою за формулою (2.13):

$$R_{3п} = (R_0/n \times R_{п}) / (R_0/n + R_{п}) \approx 3,6 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом} \quad (2.13)$$

Умова $R_{3п} < R_3$ виконується, що підтверджує достатність прийнятого рішення [25].

2.8.3 Пожежна безпека

Цех Блюмінг відноситься до категорії пожежної небезпеки «Г» відповідно до вимог [26]. Пожежна небезпека зумовлена наявністю розгалуженої мережі газопроводів, кабельного господарства та мастил. Комплекс заходів пожежної безпеки включає:

- встановлення автоматичних пожежних сповіщувачів типу ІП105 відповідно до вимог [27];
- встановлення пожежних кранів через кожні 50 м з витратою 2,5 л/с відповідно до вимог [28];
- використання вогнегасників та піногенераторів для гасіння в маслопідвалах відповідно до вимог [29];
- розміщення евакуаційних планів та проведення регулярного інструктажу персоналу відповідно до вимог [30].

Таблиця 2.12

Пожежні засоби цеху

Засіб пожежогасіння	Кількість	Розташування
Вогнегасники ВВ-1	6 шт.	Електромашинні приміщення
Вогнегасники ВВ-2	6 шт.	Електромашинні приміщення
Піногенератори ГВП-600	2 шт.	Маслопідвали
Піногенератори ПТ-50	2 шт.	Маслопідвали
Пожежні крани	20 шт.	Через кожні 50 м
Пожежні щити	12 шт.	Один на 5000 м ²

Комплекс заходів пожежної безпеки включає автоматичні системи пожежної сигналізації, окремі вентиляційні системи для електротехнічних приміщень з відключенням вентиляторів при пожежі, евакуаційні плани та регулярне навчання персоналу. Засоби пожежогасіння розташовані рівномірно по периметру цеху та забезпечують нормований час доступу до вогнища займання.

ВИСНОВКИ

Виконана кваліфікаційна робота присвячена розробці автоматизованої системи керування тепловим режимом рекуперативних нагрівальних колодязів обтискного цеху Блюмінг на сучасній апаратній та програмній базі. За результатами виконаної роботи зроблено такі висновки:

1. Проведений аналіз існуючої системи керування підтвердив, що застарілі аналогові регулятори та вимірювальні прилади з терміном служби 18–20 років не забезпечують нормованої точності підтримання теплових режимів та унеможливають цифрову реєстрацію параметрів [9; 10]. Виявлені недоліки обумовлюють надмірне споживання паливно-енергетичних ресурсів і підвищені втрати металу на чад.

2. Розроблено дворівневу АСУТП на базі ПЛК Siemens SIMATIC S7-1500 (нижній рівень) та промислових комп'ютерів SIMATIC IPC477E зі SCADA-системою WinCC (верхній рівень). Архітектура системи відповідає сучасним вимогам Industry 4.0.

3. Реалізовано каскадну схему регулювання контуру «газ–повітря» з корекцією за залишковим вмістом O_2 у димових газах за допомогою цирконієвого зонда. Підтримання коефіцієнта надлишку повітря $\alpha = 1,05–1,15$ мінімізує утворення окалини та забезпечує повноту спалювання палива [12; 13].

4. Розроблено математичний критерій готовності злитка до прокатки на основі стабілізації мінімальної витрати газу під час стадії витримування (формула 2.1). Це виключає понаднормативне «пересиджування» злитків [14].

5. Описано алгоритм комплексних технологічних блокувань та «технологічного відсічення» при падінні тиску газу, тиску повітря, зникненні живлення або сигналу від датчика контролю полум'я. Алгоритм реалізовано в ПЛК незалежно від стану комп'ютерів верхнього рівня [9].

6. Інтеграцію в Industry 4.0 реалізовано через PROFINET з підтримкою MRP для передачі даних на рівень SCADA та OPC UA для передачі архівних трендів на MES-рівень із захищеним шифруванням [13].

7. Розрахунок налаштувань ПІ-регулятора показав: $R_{p_opt} = 2,3 \times K_{об}$; $T_{у_opt} = 4,44$ с. Розрахункове залишкове відхилення $6,1 \text{ нм}^3/\text{год}$ не перевищує допустимого $6,5 \text{ нм}^3/\text{год}$ [14].

8. Розглянуто заходи з охорони праці та пожежної безпеки. Результиуючий опір заземлення $3,6 \text{ Ом}$ відповідає нормативній вимозі $R_z \leq 4 \text{ Ом}$ відповідно до вимог [25].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. World Steel Association. Steel Statistical Yearbook 2023. URL: <https://worldsteel.org> (дата звернення: 15.03.2026).
2. Лиходід В. П., Шведов К. В. Підвищення енергоефективності у виробництві сталі // Металургійна та гірничорудна промисловість. 2021. № 3. С. 12–18.
3. Кравченко В. М., Єгоров О. Б. Енергозберігаючі технології в металургії // Вісник Приазовського ДТУ. Серія: Технічні науки. 2020. Вип. 40. С. 89-97.
4. Закон України «Про енергозбереження» від 01.07.1994 р. № 74/94-ВР (зі змінами).
5. Річний звіт «Арселор Міттал Кривий Ріг» за 2022 рік. URL: <https://ukraine.arcelormittal.com> (дата звернення: 15.03.2026).
6. Поволоцький Д. Я., Кудрін В. А. Нагрівальні пристрої прокатних цехів. М.: Металургія, 1984. 280 с.
7. Соломін Н. М. Конструкція та проектування нагрівальних колодязів. М.: Металургія, 1970. 228 с.
8. Лузгін В. І. Нагрівальні печі металургійного виробництва. Єкатеринбург: УГТУ-УПІ, 2007. 258 с.
9. Siemens AG. SIMATIC S7-1500 System Manual. Erlangen: Siemens, 2023. URL: <https://support.industry.siemens.com> (дата звернення: 15.03.2026).
10. Клімовицький М. Д., Копелович О. П. Автоматичний контроль і регулювання в чорній металургії. М.: Металургія, 1976. 787 с.
11. Проектування систем автоматизації технологічних процесів: Довідковий посібник / За ред. А. С. Ключова. М.: Енергія, 1980. 512 с.
12. Підвищення ефективності горіння палива при безперервному контролі вмісту кисню / Обозан В. Я. та ін. // Металургійна теплотехніка: Зб. наук. праць НМетАУ. Дніпропетровськ: Пороги, 2005. Кн. 2. С. 420–425.
13. OPC Foundation. OPC Unified Architecture Specification, Part 1. Release 1.05.03. 2022. URL: <https://opcfoundation.org> (дата звернення: 15.03.2026).

14. Лукас В. А. Теорія автоматичного управління. М., 1990. 415 с.
15. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 14.07.2020 № 1631 «Про затвердження Гігієнічних нормативів виробничих факторів».
16. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Київ, 1999.
17. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення. Норми проектування. Київ: Мінбуд, 2006.
18. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Чинні з 01.07.2021 р.
19. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. Київ, 1999.
20. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. Київ, 2001.
21. ДСП 201-97. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря. Київ, 1997.
22. ДСТУ EN 60204-1:2019. Безпека машин. Електрообладнання машин. Частина 1: Загальні вимоги. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
23. ДСТУ EN 61557-1:2019. Електричне обладнання низької напруги. Засоби вимірювань та контролю. Київ, 2019.
24. ДСТУ EN 50522:2019. Заземлення електроустановок. Загальні вимоги та основи проектування. Київ, 2019.
25. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. Київ, 1997.
26. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. Київ: Мінрегіон, 2017.
27. ДСТУ EN 54-1:2014. Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 1. Київ, 2014.
28. ДСТУ EN 671-1:2018. Стаціонарні системи пожежогасіння. Пожежні крани. Частина 1. Київ, 2018.
29. ДСТУ EN 3-7:2018. Вогнегасники переносні. Характеристики та вимоги. Київ, 2018.

30. Наказ МВС України від 30.12.2014 № 1417 «Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні».



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

151-3д-2026вр6

Автор

151-3д-2026вр6

Науковий керівник / Експерт

Модло Є

ID документа

334133452

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту

6/2/2026

Дата редагування

—

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



КП 1

6256

Кількість слів



КЦ

46360

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті.

Спотворення в тексті можуть мати намісний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		7
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		5

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Копію тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Копію тексту

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	кількість ідентичних слів (фрагментів)
1	https://studfile.net/preview/2091578/page/4/	13 (0.21 %)

**ЗГОДА здобувача вищої освіти
Державного університету економіки і технологій про перевірку
кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату
та розміщення в Репозитарії Університету**

Я, *Горланов Олександр Володимирович*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу.

Засвідчую, що кваліфікаційна бакалаврська робота Автоматизація металургійного виробництва. Розробка комплексу технічних засобів автоматизованої системи керування нагрівальними колодязями блюмінгу виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомлений. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформований, що відповідно до «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» зазначена робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ). З умовами такого розміщення ознайомлений.

1.06.2026