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 (бакалаврського) рівня освіти
(рівень вищої освіти)

на тему Проект автоматизації тепловими режимами у нагрівальних печах. Система автоматичного регулювання витратою палива

Виконав: студент 4 курсу, групи 6.1743-с2
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Полежаєв Є.В.

Керівник доцент, к. т. н. Барішенко О.М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент _____

Запоріжжя 2026

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 (бакалаврський)
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ
Полежаєв Євгеній Владиславович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Проект автоматизації тепловими режимами у нагрівальних печах. Система автоматичного регулювання витратою палива
керівник роботи Барішенко О.М, доцент, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «23» грудня 2025 року № 1833-с
2. Строк подання студентом роботи 14 червня 2026 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 існуючого рівня автоматизації; розробка схеми інформаційних потоків; розробка технічного завдання; структура програмно-технічного комплексу; проєктування системи регулювання витратою палива; розробка технічної документації; техніко-економічних показники; охорона праці, пожежна безпека
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): функціональна схема автоматизації, принципові електричні схеми, монтажно-комутаційна схема, схема зовнішніх з'єднань креслень) презентація роботи

6. Консультанти розділів роботи.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	доцент, Барішенко О.М.		
2	доцент, Барішенко О.М.		
3	доцент, Барішенко О.М.		
4	доцент, Барішенко О.М.		
5	доцент, Барішенко О.М.		
6	доцент, Барішенко О.М.		
7	доцент, Барішенко О.М.		

7 Дата видачі завдання 14.04.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючого рівня автоматизації	21.04-27.04.26	
2	Розробка схеми інформаційних потоків	28.04-04.05.26	
3	Розробка технічного завдання	05.05-07.05.26	
4	Вибір структури та складу програмно-технічного комплексу	08.05-10.05.26	
5	Проєктування системи регулювання температури	08.05-14.05.26	
6	Розробка технічної документації	15.05-18.05.26	
7	Розрахунок системи автоматизації та показників її надійності	19.05-21.05.26	
8	Розрахунок техніко-економічних показників	22.05-23.05.26	
9	Розгляд питань охорони праці та техногенної безпеки	24.05-25.05.26	
10	Розробка презентації роботи, проходження нормконтролю, підготовка доповіді	26.05 – 16.06.26	

Студент _____ Євгеній ПОЛЕЖАЄВ
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) _____ Олена БАРІШЕНКО
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Андрій КОЛОСОК
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Полежаєв Є. В. Проект автоматизації тепловими режимами у нагрівальних печах. Система автоматичного регулювання витратою палива.

Кваліфікаційна робота бакалавра на здобуття вищої освіти за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка», науковий керівник О. М. Барішенко, Запорізький національний університет, Інженерний науково-навчальний інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем. Запоріжжя, 2026.

Метою роботи є проєктування дворівневої системи автоматичного керування (САК) тепловими режимами та контуру автоматичного регулювання витрати палива промислової нагрівальної газової печі марки для оптимізації споживання енергоресурсів, підвищення якості термообробки металу та забезпечення безпеки виробництва.

У ході виконання роботи було: проаналізовано нагрівальну піч як об'єкт автоматизації з транспортним запізненням та розподіленими параметрами; сформульовано повний комплекс технічних та експлуатаційних вимог до контурів регулювання температури, тиску та захисних блокувань; виконано математичне моделювання теплових процесів; здійснено раціональний вибір комплексу технічних засобів; доведено економічну доцільність інвестицій: капітальні витрати становлять 1187500 грн, чистий річний прибуток – 346875 грн, а термін окупності проєкту складає 3,42 роки.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, сіми розділів, висновків, переліку джерел посилання з 42 найменування, викладена на 81 сторінках машинописного тексту, включаючи 22 рисунків, 2 таблиць, та 9 аркушів графічного матеріалу.

Ключові слова: нагрівальна газова піч, автоматизація теплових режимів, САР витрати палива, програмований логічний контролер, ПІД-регулятор, моделювання, протиаварійний захист, техніко-економічна ефективність.

ЗМІСТ

ВСТУП 6
1. ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ 8
1.1 Технологічний опис об’єкта автоматизації 8
1.2 Технологічний процес 10
1.3 Постановка задачі проєктування системи автоматизації 14
2 ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ 17
2.1 Вимоги до функціональних характеристик 17
2.2 Вимоги до технологічних захистів та блокувань 19
2.3 Вимоги до технічного та програмного забезпечення 20
2.4 Експлуатаційні вимоги та умови роботи 20
2.5 Вимоги до ергономіки та безпеки персоналу 21
3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ 23
3.1 Аналіз печі як об'єкта керування з розподіленими параметрами 24
3.2 Експериментальна ідентифікація за кривою розгону 25
3.3 Моделювання об’єкта управління 27
4 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ 32
4.1 Схема інформаційних і матеріальних потоків 32
4.2 Функціональна схема системи автоматизації 34
4.3 Вибір і обґрунтування комплексу технічних засобів автоматизації 36
5 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ 48
6. ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 60
6.1 Аналіз потенційних небезпек 60
6.2 Заходи по забезпеченню безпеки 62
6.3 Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці 65
6.4 Екологічна безпека 66
7. ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ 69
ВИСНОВКИ 75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 77

ВСТУП

Сучасний розвиток промислового комплексу України та його інтеграція у світовий економічний простір вимагають від вітчизняних підприємств кардинального підвищення конкурентоспроможності продукції. У сферах металургії та машинобудування нагрівальні й термічні газові печі є ключовими, але водночас і найбільш енергоємними агрегатами. В умовах нестабільності та постійного зростання цін на енергоносії, традиційні підходи до управління тепловими процесами, що базуються на ручній праці або застарілих локальних засобах автоматизації, стають неефективними та збитковими.

Ефективність роботи нагрівальної печі безпосередньо залежить від точності підтримання її теплового режиму. Нагрівання металевих виробів під подальшу обробку тиском (кування, штампування, прокатка) або термічну обробку (відпал, загартування, відпуск) вимагає суворого дотримання технологічних графіків. Навіть незначні відхилення від заданої температури призводять до появи браку (перегріву, перепалу чи недогріву металу), збільшення утворення окалини та надмірної витрати палива.

Впровадження сучасних систем автоматичного регулювання (САР) витратою палива дозволяє вирішити комплекс взаємопов'язаних задач:

1. Оптимізація співвідношення «паливо-повітря» для забезпечення повного згоряння газу та максимального ККД печі.

2. Стабілізація температурного поля в робочому просторі печі для гарантування високої якості готової продукції.

3. Зниження динамічних навантажень на футеровку та пальникові пристрої, що подовжує термін експлуатації обладнання.

Мінімізація шкідливих викидів (оксидів азоту та вуглецю) в атмосферу.

Мета проєкту – розробка та дослідження ефективної системи автоматичного регулювання тепловим режимом нагрівальної газової печі (контуру регулювання витрати палива), яка забезпечить мінімізацію питомих

витрат енергоресурсів при одночасному підвищенні продуктивності агрегату та якості нагріву металу.

Для досягнення поставленої мети в проєкті вирішуються такі задачі:

1. Аналіз нагрівальної печі як об'єкта автоматизації та керування.

2. Обґрунтування та вибір структури системи автоматичного регулювання витрати палива.

3. Вибір сучасних технічних засобів автоматизації (датчиків, виконавчих механізмів, мікропроцесорного контролера).

4. Розрахунок та налаштування параметрів регулятора для забезпечення оптимальних показників якості перехідних процесів.

Об'єкт дослідження – теплові та гідродинамічні процеси в нагрівальній газовій печі.

Предмет дослідження – САР витратою палива (газу) на основі сучасних засобів мікропроцесорної техніки.

Практична цінність проєкту полягає в тому, що запропоновані рішення дозволяють скоротити термін окупності модернізації печі до 2–4 років лише за рахунок прямої економії палива, значно зменшуючи вплив «людського фактора» та підвищуючи безпеку виробництва.

1. ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Технологічний опис об’єкта автоматизації

Класифікація термічних печей проводиться за такими основними ознаками:

– технологічне призначення;

– спосіб механізації завантаження, вивантаження або переміщення садки;

– тепловий режим роботи печі;

– джерело теплової енергії;

– середовище нагрівання.

Зовнішній вигляд термічної нагрівальної газової печі представлений на рис. 1.1.

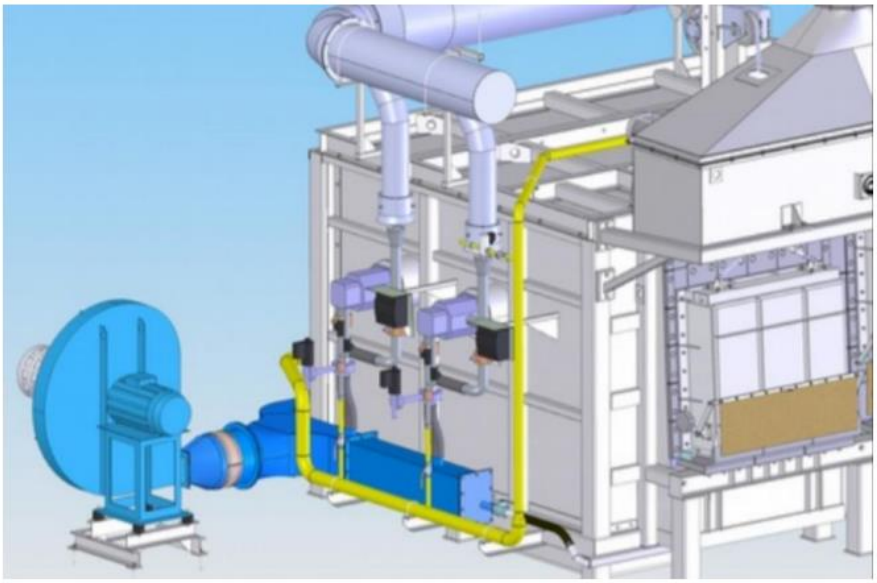


Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд термічної нагрівальної газової печі [22]

Технологічне призначення визначається тими операціями термічної обробки, які можна проводити в даній печі. Є спеціалізовані печі, призначені для виконання тільки однієї операції, низької або високої відпустки, цементації, азотування тощо. Але більша частина печей використовується для різних операцій термічної обробки: відпалу, нормалізації, загартування, високої

відпустки. Тому технологічна ознака не є визначальною в класифікації печей. За виробничим призначенням печі діляться на промислові та лабораторні.

За способом механізації садочні печі діляться на вісім конструкційних груп:

– з нерухомим подом і завантаженням через вікно в передній стінці вручну або зовнішнім механізмом (часто такі печі називають камерними);

– з висувним подом;

– ковпакові;

– вертикальні, включаючи шахтні;

– елеваторні (з підйомним подом);

– з пересувною камерою (контейнерні);

– ямні;

– двокамерні та багатокамерні.

У термічних печах тепло нагрівання садки передається випромінюванням конвенції і рідше, теплопровідністю. За способами передачі тепла печі можна розділити на групи по середовищу і температурі нагріву [21].

За середовищем нагріву печі підрозділяються на:

– газове наповнення (продукти повного згоряння паливо, повітря, контрольовані атмосфери);

– з рідкими теплоносіями (печі – ванни);

– з псевдозрідженим або «киплячим» шаром;

– вакуумні.

Середовище нагріву залежить від технологічної операції, і з урахуванням впливу на поверхню металу, що нагрівається середовища можна розділити на:

– окислюючі (продукти згоряння, повітря);

– захисні, пристрої для захисту від окислення;

– спеціальні, які використовуються для операцій хіміко - термічної обробки (ХТО);

– вакуум, що захищає в основному від окислення.

З урахуванням середовища нагріву термічні печі по робочій температурі діляться на три групи:

– з високою температурою нагріву ($t_{печі}$ > 700 °С) з теплопередачою переважно випромінюванням в газонаповнених печах і тільки випромінюванням в вакуумних;

– з середньою температурою ($t_{печі}$ = 500-700 °С), де частина тепла передається випромінюванням, а частина – конвекцією; з низькою температурою ($t_{печі}$).

1.2 Технологічний процес

Під час термічної обробки значно підвищується якість виробів, або з'являються додаткові властивості, які дають можливість знизити зносостійкість металу в процесі експлуатації. Термічну обробку проходять всі види холодного та гарячого прокату: дроти, листи, рельси, труби стрічки, швелера та інші.

Термічну обробку можна поділити на такі види:

1. Гарячекатаний лист:

– гартування або нормалізація з подальшою відпусткою;

– високий відпуск або відпал;

– рейки – ізотермічна витримка, відпуск, нормалізація;

2. Сортовий прокат – ізотермічний і повний відпал, нормалізація, патентування (загартовування);

3. холоднокатана стрічка і лист – рекристалізаційний відпал [23].

Всі види термообробки поділяються на дві великі групи: простий нагрів до відповідної температури з подальшим викидом у повітря – нормалізація або у рідкі середовища – гарт.

2. Нагрівання до відповідної температури з подальшою тривалою ізотермічною витримкою, та на завершальному етапі з регламентованим

охолодженням або за обставин охолодження разом з піччю (відпал).

На рис. 1.2 представлено приклади режимів термообробки.

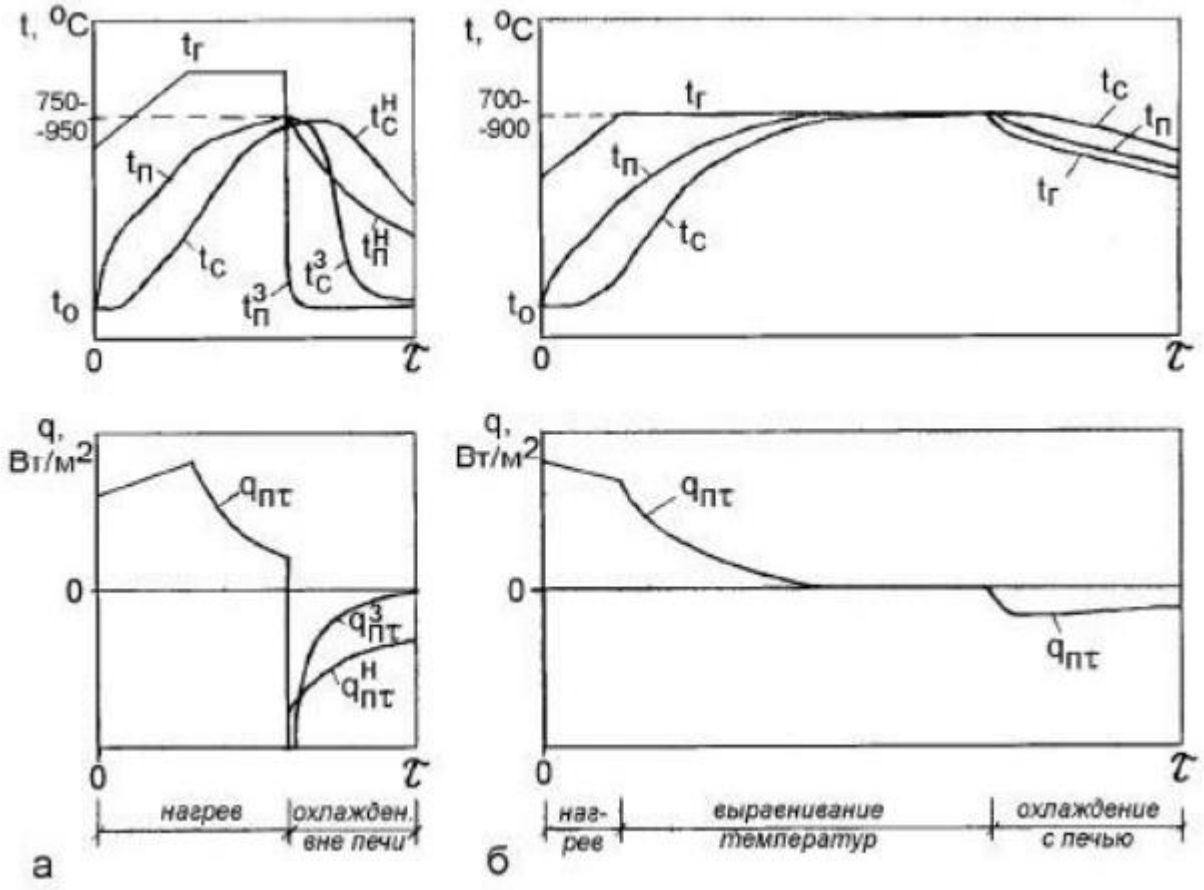


Рисунок 1.2 – Характерні режими термообробки в термічних печах

Пояснення до рис. 1.2:

а – загартовування (індекс «З») та нормалізація (індекс «Н»);

б – відпал;

$t_г$ – температура диму;

t_0 – початкова температура садки;

$t_п$ – температура поверхні садки;

$t_с$ – температура металу в середині;

$q_{пτ}$ – щільність потоку тепла на поверхні садки в процесі нагрівання [24].

Термічна обробка є невіддільною частиною технологічного циклу виробництва виробів як із різних марок сталей, так і з кольорових металів та їхніх сплавів. Залежно від характеру внутрішніх структурних змін, термічну обробку

поділяють на такі базові види: відпал першого та другого родів, загартування (з поліморфним перетворенням або без нього), відпуск, а також старіння.

1. Відпал.

Відпал – це технологічний процес, який передбачає нагрівання матеріалу до заданої температури (яка може бути вищою або нижчою за критичні точки фазових перетворень), витримку за цієї температури та подальше контрольоване повільне охолодження. Головною метою відпалу є формування однорідної (рівноважної) мікроструктури. Внаслідок цього знижуються міцність і твердість матеріалу, але суттєво зростає його пластичність, що полегшує подальшу механічну обробку.

Відпал першого роду. Проводиться без урахування фазових перетворень (перекристалізації) у матеріалі, оскільки вони або взагалі не відбуваються, або не чинять вирішального впливу на кінцеві властивості виробу (наприклад, рекристалізаційний відпал для зняття внутрішніх напружень).

Відпал другого роду. Базується на обов'язковому проходженні фазових перетворень під час нагрівання та охолодження (наприклад, повний або неповний відпал сталі для подрібнення зерна).

2. Загартування.

Загартування спрямоване на отримання нерівноважних (метастабільних) структур у матеріалах, де спостерігається змінна розчинність компонентів у твердому стані, відбуваються поліморфні перетворення або розпад високотемпературного твердого розчину за евтектоїдною реакцією.

Для конструкційних та інструментальних матеріалів загартування є основним етапом зміцнення або підготовчою операцією перед фінішним термічним обробленням. Залежно від умов охолодження та технологічних особливостей, загартування класифікують на:

– безперервне;
– ступінчасте;
– ізотермічне;

– із самовідпуском;

– із обробкою холодом;

– із поліморфним перетворенням;

– повернення після старіння.

3. Відпуск.

Відпуск є фінішною термічною операцією, якій обов'язково піддають деталі після загартування з поліморфним перетворенням. Процес полягає в нагріванні сплаву до температур, що не перевищують критичні точки фазових перетворень, тривалій витримці (як правило, не менше однієї години) та подальшому охолодженні. Це дозволяє сформувати задану структуру та знизити внутрішні напруження.

Охолодження зазвичай відбувається на спокійному повітрі. Проте, для легованих сталей з метою запобігання розвитку відпускної крихкості (при високому відпуску) застосовують примусове охолодження у воді або оливі.

4. Старіння.

Старіння – це процес термічної обробки, основою якого є розпад пересиченого твердого розчину за рахунок дисперсного твердіння. Цей метод застосовують для підвищення міцнісних характеристик і надійності сплавів, які попередньо пройшли загартування без поліморфного перетворення.

Залежно від температурних умов розрізняють:

– природне старіння – тривала витримка матеріалу за кімнатної температури (близько 20 °С);

– штучне старіння – витримка матеріалу за підвищених температур у спеціальних термічних печах для прискорення дифузійних процесів.

1.3 Постановка задачі проєктування системи автоматизації

Для характеристики об'єкта найбільш важливими є техніко – економічні показники та якісні. На техніко - економічні показники впливають:

– витрата газу;

– електрична потужність, що споживається встановленого електрообладнання.

На якісні показники сильно впливає:

– режим роботи пальників;

– алгоритм підтримки температурного режиму роботи.

Якість і точність підтримки температури і тиску визначає якість продукції, яка випускається і при оптимізації алгоритмів керування дозволяє значно економити газ і електрику. Для певних процесів теплової обробки потрібні термічні печі газового типу. При цьому найпереконливішим аргументом є короткий час нагрівання внаслідок високої потужності.

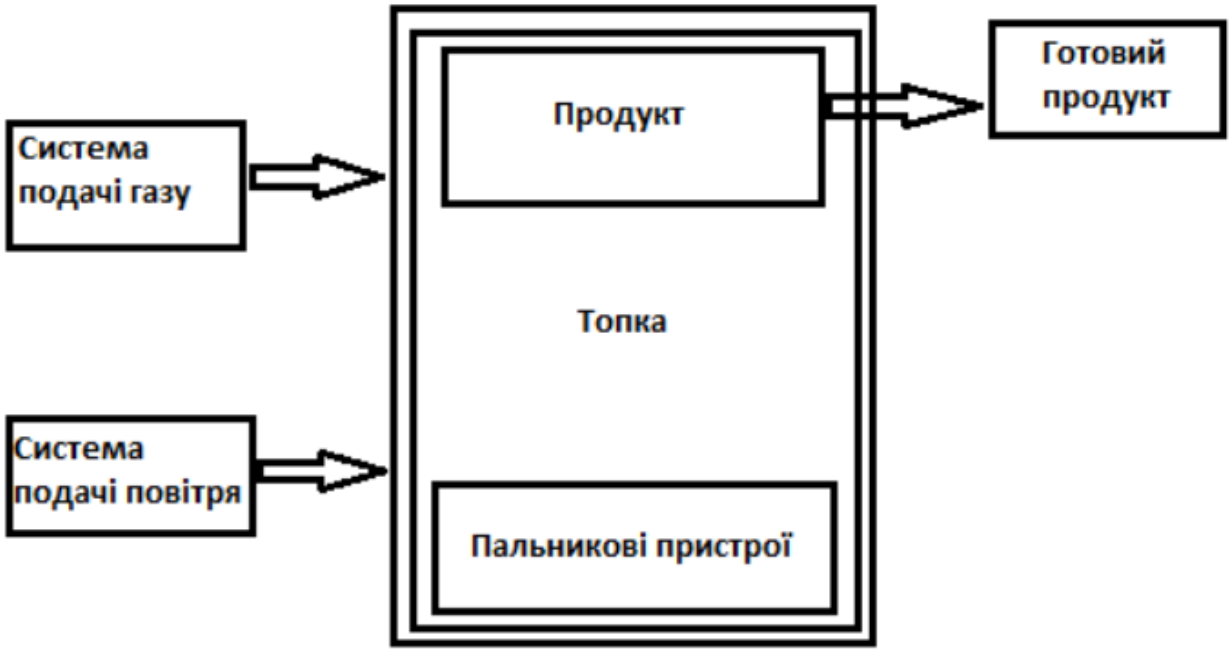


Рисунок 1.3 – Структурна схема термічної газової печі

Призначенням системи автоматизованого регулювання (САР) є комплексне забезпечення працездатності теплового агрегату, збір та первинна обробка вимірювальної інформації, а також її представлення у заданому вигляді. Функціонування системи реалізується за допомогою контрольно-вимірювальних приладів (КВП), виконавчих механізмів, програмно-технічних комплексів, а також пристроїв захисного блокування.

Функції та завдання системи керування.

1. Інформаційні функції системи:

– безперервний збір, цифрова обробка, архівування та візуалізація даних про поточний стан технологічного обладнання;

– оперативне інформування персоналу, що обслуговує, про хід проходження технологічного процесу та виникнення позаштатних ситуацій.

2. Параметри, що підлягають постійному контролю:

– температура в робочому просторі печі;

– тиск газу та повітря на вхідних колекторах;

– величина тиску (розрідження) безпосередньо у камері печі;

– поточне положення робочої заслінки печі;

– наявність смолоскипа (факела) на кожному пальниковому пристрої.

3. Контури автоматичного регулювання:

– САР температури в робочій зоні печі;

– САР тиску (газового середовища) всередині печі.

Функції технологічного захисту та безпеки:

– автоматизоване розпалювання газових пальників за заданим алгоритмом;

– аварійне відключення пальників у разі відкриття заслінки печі;

– автоматичне відсікання подачі палива при падінні тиску газу або повітря нижче критично допустимих меж;

– припинення подачі газу на конкретний пальниковий пристрій у разі згасання його факела.

Функції візуалізації та реєстрації (тренди та індикація):

– задані (уставки) та фактичні значення температури й тиску в печі;

– поточний тиск енергоносіїв (газу та повітря) перед пальниками;

– дискретний стан (увімкнено/вимкнено/аварія) кожного пальника.

Структура комплексу технічних засобів (КТЗ).

Архітектура розроблюваної системи керування базується на дворівневій структурі.

Нижній (польовий) рівень: включає локальні засоби вимірювання (давачі, первинні вимірювальні перетворювачі) та виконавчі механізми, які змонтовані безпосередньо на технологічному обладнанні. На цьому рівні забезпечується перетворення фізичних величин у стандартизовані аналогові сигнали постійного струму (4-20 мА), а також комутація силових кіл керування приводами.

Середній рівень: реалізований на базі програмованих логічних контролерів (ПЛК).

Основні функції середнього рівня:

– циклічне опитування датчиків, фільтрація завад, перевірка вірогідності даних та їх усереднення;

– обчислення керуючих впливів за закладеними алгоритмами (наприклад, ПІД-закону) та видача командних сигналів на виконавчі механізми нижнього рівня;

– двосторонній обмін даними з операторською станцією верхнього рівня (передача масивів технологічної інформації та прийом команд ручного чи дистанційного керування).

Обсяг проєктування в межах даної роботи обмежується розробкою рішень для нижнього та середнього рівнів системи керування.

Висновки. У даному розділі було детально розглянуто особливості функціонування комп’ютерної моделі промислової термічної нагрівальної газової печі, а саме контуру регулювання витрати палива.

2 ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Проєктована система автоматичного регулювання (САР) тепловими режимами нагрівальної газової печі має відповідати комплексу технологічних, технічних, експлуатаційних та безпекових вимог. Головною метою цих вимог є забезпечення енергоефективності, надійності, безперебійності роботи обладнання та високої якості термічної обробки металу.

2.1 Вимоги до функціональних характеристик

Система автоматизації повинна забезпечувати виконання таких основних функцій:

Функції автоматичного регулювання:

– підтримання заданої температури в робочому просторі печі відповідно до технологічного графіка (відхилення не більше ніж ±5 °С у сталому режимі);

– оптимальне керування співвідношенням витрат «паливо-повітря» (газ/повітря) для забезпечення повноти згоряння газу та максимального ККД пальникових пристроїв;

– стабілізація тиску (розрідження) в робочій камері печі в межах 10-30 Па для запобігання підсмоктуванню холодного повітря або вибиванню гарячих газів.

Функції контролю та вимірювання:

– безперервний моніторинг температури у зонах печі, тиску газу та повітря в підвідних колекторах, тиску в камері, а також положення регулювальних органів і заслінки;

– опитування аналогових датчиків із періодичністю (циклом контролера) не більше ніж 100 мс.

Функції логіко-програмного керування:

– реалізація алгоритму автоматичного покрокового розпалювання пальників (вентиляція топки, перевірка умов безпеки, підпал високовольтною іскрою, контроль факела);

– блокування роботи пальників за умов порушення технологічних регламентів.

Додатково система автоматизації повинна підтримувати можливість оперативного переналаштування технологічних уставок та графіків нагріву безпосередньо з робочого місця оператора за умови наявності відповідного рівня доступу.

Алгоритми ПІД-регулювання, що реалізуються в ПЛК Modicon M241, мають передбачати функцію безударного переходу з автоматичного режиму керування на ручний і навпаки для гнучкого локального втручання в процес. Усі виміряні аналогові величини перед безпосереднім використанням у контурах регулювання повинні проходити програмну цифрову фільтрацію від випадкових високочастотних завад та наведень.

Програмне забезпечення середнього рівня має забезпечувати автоматичний розрахунок і ведення статистики напрацювання годин для кожного пальникового пристрою з метою оптимізації графіків технічного обслуговування.

Функції логіко-програмного керування також повинні включати автоматичний контроль герметичності запірних газових клапанів перед кожним пуском печі.

Мережевий інтерфейс системи має гарантувати безперебійну високошвидкісну передачу поточних параметрів на верхній рівень для їх візуалізації на панелі Weintek та синхронізації з загальнозаводською базою даних. На випадок тимчасового обриву зв'язку з операторською станцією контролер повинен продовжувати автономне виконання поточного технологічного кроку за раніше завантаженим графіком.

2.2 Вимоги до технологічних захистів та блокувань

Система захисту повинна функціонувати незалежно від основного контуру регулювання та забезпечувати миттєве автоматичне відсікання подачі газу (закриттям швидкодіючого електромагнітного клапана) у таких аварійних випадках:

– падіння тиску газу в підвідному газопроводі нижче аварійної межі;

– зниження тиску повітря перед пальниками нижче допустимого рівня;

– згасання смолоскипа (факела) робочого пальника (контролюється датчиком полум'я);

– повне зникнення електроживлення системи автоматизації;

– відкриття завантажувальної заслінки печі (аварійне вимкнення пальників для захисту персоналу та обладнання).

Для забезпечення максимальної надійності схему аварійного відсікання газу необхідно реалізувати за принципом знеструмлення (fail-safe): запірні електромагнітні клапани ВН4М-1КЕ повинні закриватися під дією механічної зворотної пружини в момент зняття з них керуючої напруги. Логіка роботи захисних блокувань має пріоритет над будь-якими командами дистанційного чи автоматичного регулювання, повністю блокуючи контур керування дросельними клапанами ДХ до усунення першопричини аварії. Після спрацювання будь-якого з тригерів захисту повторний запуск пальникової системи та відновлення подачі палива повинні здійснюватися виключно вручну оператором печі після обов'язкової попередньої вентиляції робочого простору. Тимчасові затримки на спрацювання захистів за тиском газу та повітря мають бути мінімальними, але при цьому програмно відфільтрованими від короткочасних пульсацій, щоб уникнути хибних зупинів агрегату під час динамічних перехідних процесів. Інформація про першопричину аварійного відключення печі (першосигнал відсечки) має миттєво фіксуватися в енергонезалежному лозі ПЛК Modicon M241 та архівуватися для подальшого

аналізу службою КВПіА. Крім того, підсистема захисту повинна постійно контролювати справність самих каналів зв'язку з датчиками полум'я Kromschroder та реле тиску, генеруючи команду на зупинку печі у разі виявлення обриву або короткого замикання в лініях вимірювання.

2.3 Вимоги до технічного та програмного забезпечення

Вимоги до апаратного забезпечення (нижній та середній рівні).

Датчики: повинні мати уніфікований вихідний сигнал 4 – 20 мА або цифровий інтерфейс (Modbus RTU). Первинні перетворювачі температури (термопари) мають відповідати температурному діапазону печі (до 1100 °С), мати відповідне захисне виконання чохлів.

Програмований логічний контролер (ПЛК): має мати модульну архітектуру, модулі захисту від перенапруги та завад на входах/виходах. Об'єм пам'яті та швидкодія процесора повинні забезпечувати виконання обчислень ПІД-регуляторів без затримок. Контролер повинен мати резерв вільних каналів вводу-виводу не менше 15-20 %.

Виконавчі механізми: електроприводи регулювальних заслінок повинні мати функцію плавного позиціонування та кінцеві вимикачі обмеження ходу.

Вимоги до програмного забезпечення (ПЗ):

– ПЗ ПЛК повинно базуватися на стандартних мовах програмування МЕК 61131-3 (наприклад, LAD, FBD або ST);

– наявність алгоритмів фільтрації аналогових сигналів від завад та захисту від «брязкоту» контактів для дискретних сигналів.

2.4 Експлуатаційні вимоги та умови роботи

Система повинна бути розрахована на безперервний цілодобовий режим роботи 24/7. Середній час напрацювання на відмову (MTBF) технічних засобів середнього рівня має становити не менше 50000 годин.

Оскільки обладнання працює в умовах цеху, шафа керування з ПЛК повинна мати клас захисту не нижче IP54 (захист від пилу та бризок води). Компоненти нижнього рівня (датчики та виконавчі механізми) повинні витримувати підвищену температуру навколишнього середовища (до +60 °C) та вібрації.

Живлення системи має здійснюватися від мережі змінного струму 220 В (50 Гц). Обов'язкове передбачення джерела безперебійного живлення (ДБЖ/UPS) для забезпечення роботи ПЛК та датчиків протягом щонайменше 15-30 хвили у разі зникнення основної напруги для безпечного переведення печі в аварійний зупин.

2.5 Вимоги до ергономіки та безпеки персоналу

Конструкція шаф керування та пультів повинна виключати можливість випадкового дотику персоналу до струмоведучих частин (напруга понад 42 В).

Система повинна мати світлову та звукову сигналізацію про вихід параметрів за межі попереджувальних та аварійних уставок.

Інтерфейс (якщо передбачено локальну панель оператора) має бути інтуїтивно зрозумілим, із чітким розділенням параметрів на робочі, налаштувальні та аварійні.

Для підвищення безпеки експлуатації всі металеві неколісні частини електрообладнання, які можуть опинитися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, підлягають обов’язковому захисному заземленню (зануленню) відповідно до вимог ПУЕ. Організація робочого місця оператора печі повинна враховувати антропометричні та психофізіологічні характеристики персоналу, забезпечуючи оптимальну оглядовість та зручність доступу до

органів керування. Графічний інтерфейс користувача на базі сенсорної панелі Weintek має базуватися на принципах колірного кодування: зелений колір сигналізує про нормальний технологічний режим, жовтий – про попереджувальні відхилення, а червоний – про виникнення аварійної ситуації.

Головне вікно (мнемосхема) повинно відображати лише найбільш критичні параметри, такі як температура в зонах печі та стан пальників, для запобігання перевантаженню уваги оператора зайвою інформацією. Додатково в системі необхідно передбачити багаторівневий захист від некоректних дій обслуговчого персоналу (так званий «захист від дурня») шляхом програмного блокування введення завідомо помилкових чи небезпечних значень уставки. Всі елементи аварійної зупинки агрегату, зокрема кнопки типу «Гриб» (Mushroom-head Emergency Stop), мають бути легкодоступними, пофарбованими в яскраво-червоний колір на жовтому фоні та захищеними від випадкового натискання.

Висновки. У другому розділі було сформульовано та систематизовано повний комплекс вимог до проєктувальної системи автоматичного регулювання тепловими режимами нагрівальної газової печі. Сформульовані вимоги є технічним завданням для подальшого вибору конкретних засобів автоматизації, розрахунку параметрів регуляторів та побудови структурно-функціональної схеми САК.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ

Промислова нагрівальна газова піч типу за своїми фізико-хімічними властивостями є вкрай складним, нелінійним об’єктом моделювання з розподіленими параметрами та суттєвим часовим запізненням. Динаміка теплових процесів у робочому просторі печі визначається складними явищами одночасного теплообміну випромінюванням від смолоскипів пальників, конвекцією димових газів та теплопровідністю крізь масивну вогнетривку футеровку й метал завантажених виробів.

Для побудови адекватної системи автоматичного регулювання такий об'єкт розглядають як багатозв'язну структуру, де зміна витрати газу безпосередньо впливає не лише на температуру, а й на гідродинамічний режим та тиск усередині камери.

Значна акумулююча здатність внутрішньої кладки й металевої садки зумовлює високу теплову інерційність, що математично вимагає опису об'єкта диференціальними рівняннями високих порядків. Наявність чистого запізнення, викликаного часом проходження дифузійних процесів горіння та рухом газів до зон вимірювання, суттєво ускладнює забезпечення стійкості замкненого контуру керування.

З метою практичного інженерного синтезу регуляторів у середовищі GNU Octave реальну розподілену модель апроксимують еквівалентною лінійною ланкою третього порядку з чистим запізненням, де послідовно враховують інерційні сталі часу газопальникового комплексу, самої робочої камери та захисного кожуха термопари. Моделювання за каналами збурення, такими як коливання тиску газу в магістралі, зміна маси садки або підсмоктування атмосферного повітря при підйомі заслінки, дозволяє оцінити завадостійкість системи. Отримана в результаті ідентифікації передавальна функція дає змогу точно розрахувати оптимальні параметри налаштування цифрового ПІД-регулятора в ПЛК, мінімізуючи перерегулювання та час перехідного процесу.

Таким чином, якісне динамічне моделювання печі виступає першочерговим етапом для уникнення браку металу та забезпечення розрахованого дворічного терміну окупності всього проєкту модернізації.

Для побудови якісної системи автоматичного регулювання (САР) температури та витрати палива необхідно мати математичний опис нагрівальної печі як об'єкта керування. Моделювання дозволяє встановити кількісний зв'язок між вхідним впливом (зміна витрати газу) та вихідною величиною (температура в робочій зоні печі).

Промислова термічна піч за своїми фізичними властивостями є складним, нелінійним об'єктом із розподіленими параметрами та значним запізненням. Теплообмін у печі здійснюється одночасно радіацією (випромінюванням), конвекцією від димових газів та теплопровідністю крізь футеровку та масив металу деталей.

3.1 Аналіз печі як об'єкта керування з розподіленими параметрами

Основними каналами передачі впливів є:

– канал керування: «Витрата палива (газу) $V_г \rightarrow$Температура в печі Т».

– канал збурення: «Витрата повітря $V_п \rightarrow$ Температура в печі Т», «Маса завантаженого металу G $\rightarrow$ Температура в печі Т», а також підсмоктування холодного повітря через нещільності або відкриту заслінку.

Для інженерних розрахунків контурів автоматизації (зокрема, ПІД-регуляторів) складну модель із розподіленими параметрами апроксимують лінійною динамічною моделлю із зосередженими параметрами у вигляді інерційної ланки n-го порядку із запізненням. Найчастіше використовують модель першого або другого порядку з чистим запізненням, що описується передавальною функцією:

$$W(s) = \frac{\text{К}_0}{T_0 s + 1} e^{-\tau s}, \qquad (3.1)$$

де K_0 – коефіцієнт підсилення;

T_0, – постійні часу (інерційність системи подачі полива, термічної інерції самої конструкції печі).

Для другого порядку:

$$W(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) + \text{К}} e^{-\tau s}, \qquad (3.2)$$

де K_0 – коефіцієнт передачі об'єкта;

T_0, T_1, T_2 – сталі часу (інерційність теплової камери та футеровки);

τ – транспортне (чисте) запізнення, зумовлене часом згоряння палива, рухом газів та інерційністю датчика (термопари);

s – оператор Лапласа.

3.2 Експериментальна ідентифікація за кривою розгону

Найбільш точним методом визначення параметрів K_0, T_0 та τ для діючого або спроєктованого обладнання є метод експериментальної ідентифікації шляхом зняття кривої розгону (перехідної характеристики).

Суть методу полягає в тому, що на печі, яка працює у сталому тепловому режимі при початковій температурі $\text{T}_{\text{поч}}$, здійснюють стрибкоподібну зміну положення регулювального клапана газу на величину ΔX (наприклад, відкриття на +10 %). Це спричиняє зміну витрати палива на величину $\Delta\text{V}_\text{г}$. За допомогою КВП фіксують зміну температури в часі до моменту, поки вона не стабілізується на новому рівні $\text{T}_{\text{кін}}$.

Графік отриманої перехідної характеристики має виражену S-подібну форму, характерну для теплових об'єктів із запізненням.

На рисунку 3.1 наведена крива розгону теплового об’єкту керування із запізненням по каналу витрата гагу → температура.

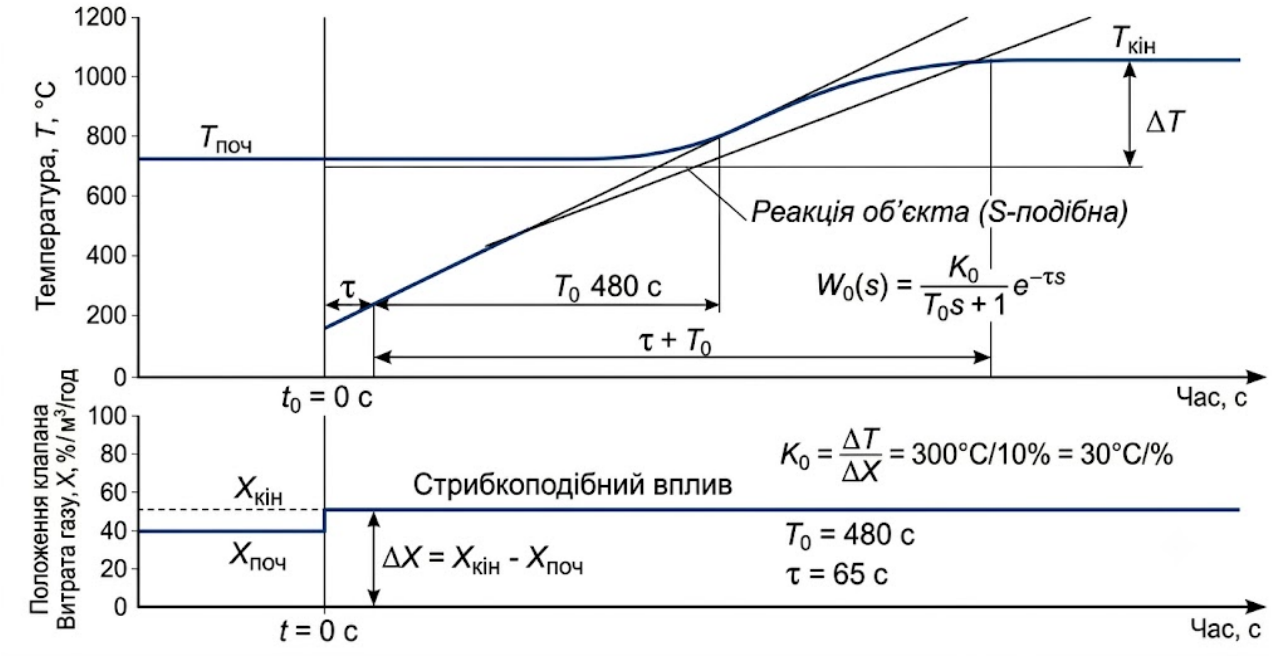


Рисунок 3.1 – Крива розгону теплового об’єкту керування із запізненням по каналу витрата гагу → температура

Внаслідок аналізу аналогічних теплових агрегатів та розрахунку кривої розгону для каналу керування «витрата газу (%) → температура (°С)» отримано такі усереднені параметри:

Коефіцієнт передачі: K_0 = 4,5 °С %

Стала часу інерції: T_0 = 480 с (8 хвилин);

Чисте запізнення: τ = 65 с.

Підставляючи отримані параметри у рівняння моделі першого порядку із запізненням, маємо передавальну функцію об'єкта керування:

$$W(s) = \frac{4{,}5}{480s + 1} e^{-65s}$$

Обґрунтування вибору моделі.

Отримане відношення запізнення до сталої часу становить:

$$\frac{\tau}{T_0} = \frac{65}{480} = 0{,}135 \qquad (3.3)$$

Оскільки відношення $\frac{\tau}{T_0}$ лежить у межах від 0,1 до 1,0, дана піч відноситься до об'єктів із середнім запізненням. Для керування такими об'єктами класичний пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор є оптимальним вибором, оскільки диференціальна складова дозволить компенсувати негативний вплив запізнення τ на стійкість системи, а інтегральна – повністю усуне статичну помилку регулювання.

Отримана математична модель W(s) буде використана у наступних розділах проєкту для синтезу та розрахунку оптимальних параметрів налаштування ПІД-регулятора контуру витрати палива.

3.3 Моделювання об’єкта управління

Типової системи третього порядку, яка моделює процес нагріву печіз електричним ТЕНом, де враховується інерція самого нагрівача та інерція датчика температури.

Уявімо замкнену систему, що складається з трьох послідовних інерційних ланок:

1) Нагрівач (ТЕН): має сталу часу $T_1 = 10$ сек.
2) Бак з водою (об'єкт): має велику теплоємність, стала часу $T_2 = 100$ сек.
3) Термодатчик: має власну інерцію захисного кожуха, стала часу $T_3 = 2$ сек.

Добуток інерційних ланок з коефіцієнтом підсилення K:

$$W(s) = \frac{K}{(10s+1)(100s+1)(2s+1)}$$

Якщо ми замикаємо систему жорстким від'ємним зворотним зв'язком, передавальна функція набуває вигляду:

$$W_{\text{замк}}(s) = \frac{W_{\text{роз}}(s)}{1 + W_{\text{роз}}(s)} = \frac{K}{2000s^3 + 1220s^3 + 112s + (1+K)}$$

Структурна схема замкненої системи терморегулювання на рис. 3.2.

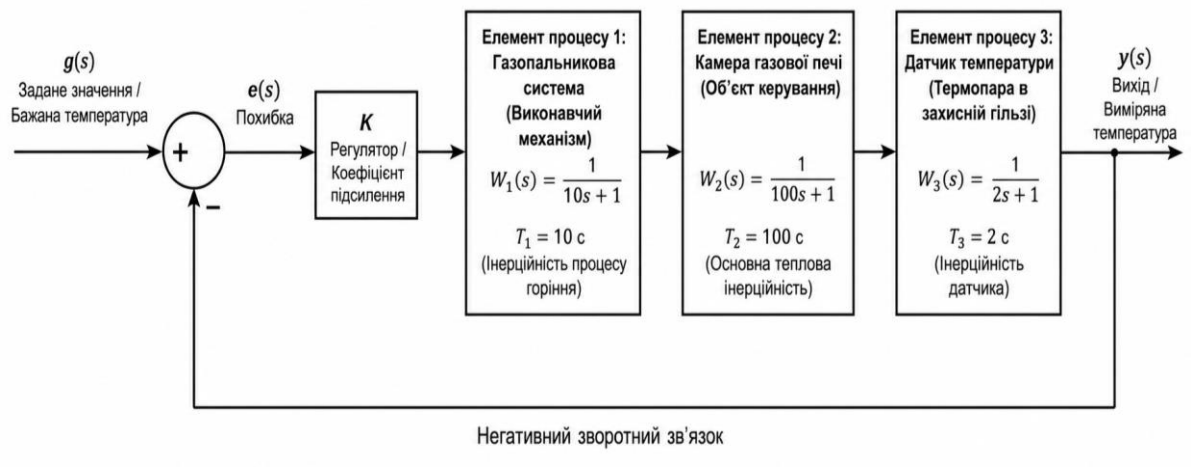


Рисунок 3.2 – Структурна схема замкненої системи регулювання палива

Моделювання в Octave-online дозволяє розрахувати оптимальні параметри керування ще до монтажу обладнання. Для цієї системи безпечним є діапазон K, при якому перерегулювання не перевищує 10–20%, а час встановлення є мінімальним для даного технологічного процесу.

Змоделюємо систему в програмі Octave-online.

Код програми:

```
% Вихідні дані (сталі часу)
T1 = 10;
T2 = 100;
T3 = 2;

% Коефіцієнт підсилення (можете змінити для експерименту)
K = 5;

% 1. Опис розімкненої системи W_роз(s)
% Кожна ланка: 1 / (Ti*s + 1)
s = tf('s');
W1 = 1 / (T1*s + 1);
W2 = 1 / (T2*s + 1);
W3 = 1 / (T3*s + 1);

W_open = K * W1 * W2 * W3;

% 2. Формування замкненої системи (feedback з одиничним зворотним
зв'язком)
W_closed = feedback(W_open, 1);

% Вивід передавальної функції в консоль
disp('Передавальна функція замкненої системи:');
W_closed

% 3. Моделювання перехідної характеристики
t = 0:1:1000; % Час моделювання від 0 до 1000 секунд
[y, t] = step(W_closed, t);

% 4. Побудова графіка
figure;
plot(t, y, 'linewidth', 2);
title(['Перехідна характеристика системи терморегулювання (K = ',
num2str(K), ')']);
xlabel('Час (сек)');
ylabel('Температура (нормована)');
grid on;

% Додатково: аналіз стійкості (корені характеристичного рівняння)
poles = pole(W_closed);
disp('Полюси замкненої системи:');
disp(poles);
Передавальна функція замкненої системи:
```

```
Transfer function 'W_closed' from input 'u1' to output ...

                    5
 y1:  -------------------------------
      2000 s^3 + 1220 s^2 + 112 s + 6
```

Полюси замкненої системи:

-0.5121 + 0i

-0.0490 + 0.0588i

-0.0490 - 0.0588i

Полюси замкненої системи:

$s_1 = -0{,}5121$

$s_{2,3} = -0{,}0490 \pm 0{,}0588i$

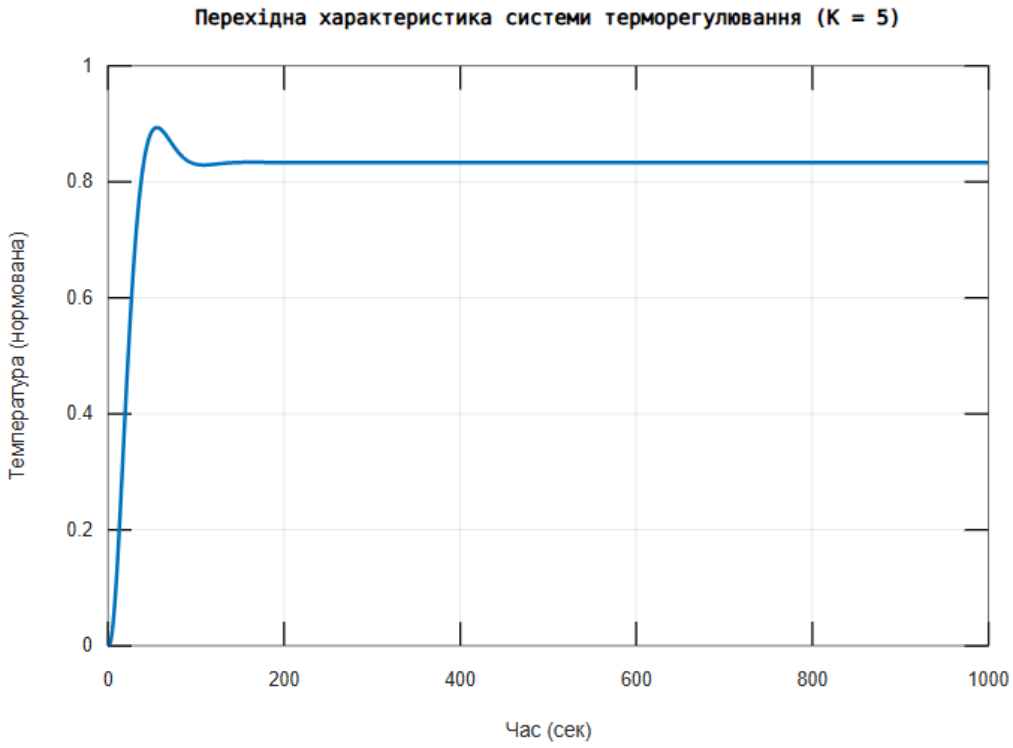


Рисунок 2 – Перехідна характеристика системи регулювання палива (К = 5)

Аналіз стійкості: оскільки всі полюси замкненої системи мають від'ємні дійсні частини (Re(s) < 0), система є асимптотично стійкою. Наявність комплексно-спряжених коренів $s_{2,3}$ свідчить про те, що перехідний процес у

системі матиме затухаючий коливальний характер, що є типовим для теплових об'єктів при підвищених коефіцієнтах підсилення.

У системі з жорстким зворотним зв'язком завжди присутня статична помилка.

$$e_s = \frac{1}{1 + K}$$

Щоб зменшити помилку, треба збільшувати K, але це погіршує стійкість. Це «дилема регулювання», яка на практиці вирішується введенням інтегральної складової (ПІ-регулятора).

Висновки. Система третього порядку, на відміну від простих інерційних ланок, має характерний S-подібний перехідний процес. Це означає, що температура починає зростати не миттєво, а з певною затримкою (інерція системи), оскільки енергія має послідовно пройти через ТЕН та стінки датчика.

Найбільша стала часу (T_2 = 100 сек) визначає загальну інерційність системи. Саме вона «сповільнює» процес.

Наявність малих сталих часу (T_1, T_3) у замкненому контурі створює фазове зсунення, що призводить до появи коливальності.

Для даної системи існує межа стійкості.

При малих K: система стійка, процес аперіодичний (плавний).

При середніх K: з'являється перерегулювання (температура «проскакує» задане значення), але з часом стабілізується.

При $K > K_{crit}$: система втрачає стійкість. Замість підтримки температури ми отримаємо автоколивання з амплітудою, що постійно зростає, що в реальних умовах призведе до аварійного відключення або поломки ТЕНа

4 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

4.1 Схема інформаційних і матеріальних потоків

Схема інформаційних і матеріальних потоків є фундаментальною основою для побудови ефективної архітектури АСК ТП нагрівальної газової печі. Матеріальні потоки в даній системі представлені безпосереднім фізичним рухом енергоносіїв, сировини та продуктів згоряння на польовому рівні технологічного процесу. До них відносяться подача природного газу та атмосферного повітря через підвідні колектори до рекуперативних пальників Recumat M250, переміщення масиву металевих виробів через робочий простір камери печі, а також відведення відпрацьованих димових газів у димохід. Паралельно з матеріальним рухом у системі організовано безперервний рух інформаційних потоків, які забезпечують двосторонній зв'язок між польовим обладнанням та керуючим ПЛК.

Інформаційні потоки висхідного напрямку формуються первинними датчиками КВПіА, які перетворюють фізичні параметри матеріальних середовищ – температуру, тиск і витрату – у стандартизовані аналогові сигнали 4 -20 мА або цифрові масиви даних Modbus. Ці дані надходять на середній рівень автоматизації, де процесор контролера здійснює їх фільтрацію, перевірку на достовірність та обчислення керуючих впливів за ПІД-законом. Низхідні інформаційні потоки являють собою командні сигнали, які ПЛК передає на виконавчі механізми, зокрема на частотний перетворювач для зміни положення заслінок ДХ та на вибухозахищені клапани. На верхньому рівні системи інформаційні потоки за протоколом Industrial Ethernet (Modbus TCP) забезпечують інтерактивну взаємодію з панеллю оператора, передаючи поточні тренди для візуалізації та приймаючи уставки температурних графіків від персоналу. Чітка синхронізація матеріальних і інформаційних потоків дозволяє оптимізувати коефіцієнт використання палива до 85 %, гарантуючи безпеку

роботи та унеможливлюючи виникнення браків під час термічної обробки металу.

Щоб визначити всі вхідні і вихідні сигнали мікропроцесорної системи управління і здійснити проектне компонування контролера для розподіленої АСУ ТП, необхідно на основі розглянутих алгоритмів автоматичного регулювання технологічних параметрів нагрівальної газової печі, САР витрати палива.

Схему інформаційних і матеріальних потоків САР приведена на рис. 4.1.

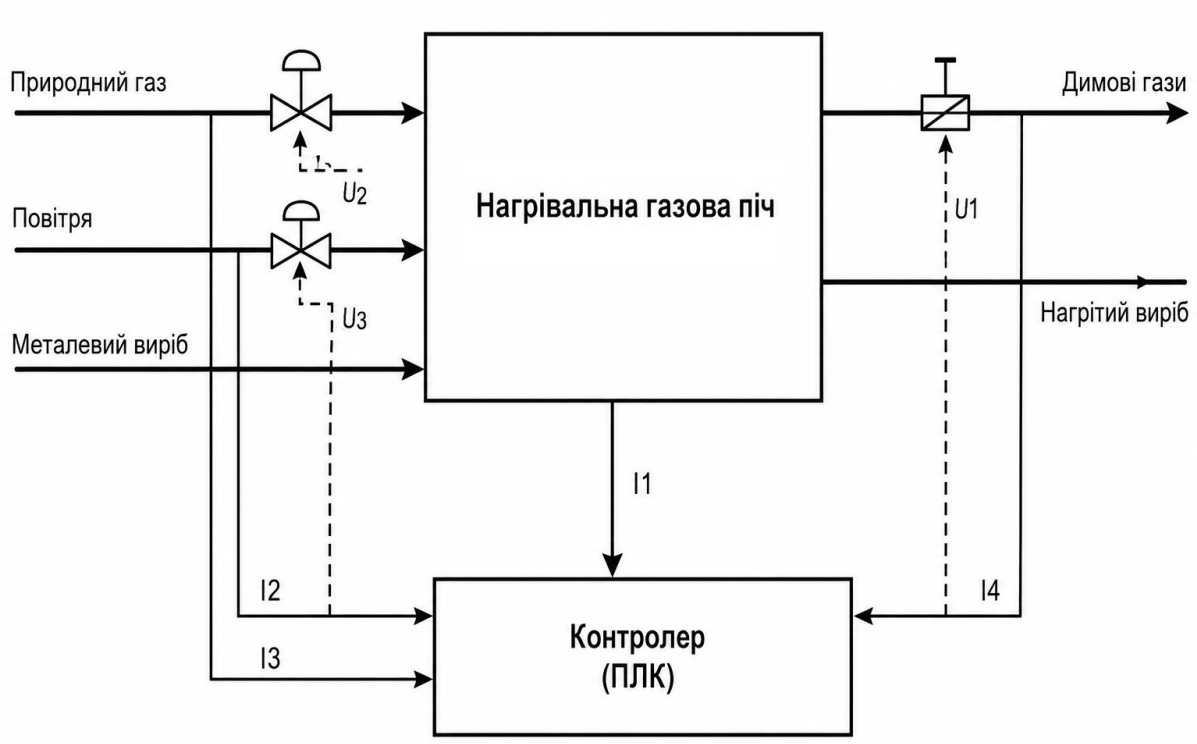


Рисунок 4.1 – Схему інформаційних і матеріальних потоків САР

Потоки інформаційних сигналів:

I_1 – сигнал з первинного перетворювача температури робочого простору;

I_2 – сигнал з первинного перетворювача витрати природного газу;

I_3 – сигнал з первинного перетворювача витрати повітря;

I_4 – сигнал з первинного перетворювача тиску димових газів.

Потоки клерувальних сигналів:

U_1 – сигнал керування шибером димових газів;

U_2 – сигнал керування клапаном подачі природного газу;

U_3 – сигнал керування клапаном подачі повітря.

4.2 Функціональна схема системи автоматизації

Повітря на пальники подається за допомогою вентилятора радіального типу по трубопроводу повітря. В процесі подачі повітря на пальники відбувається попереднє очищення та фільтрація від можливих домішок. Для вимірювання витрати повітря, що надходить на пальники використовується витратомір вихрового типу, який буде підбиратися порівняльним шляхом в наступному розділі.

Давач буде встановлений в трубопроводі і подаватиме вихідний уніфікований сигнал на контролера, де сигнал програмно обробляється відповідно заданій програмі. Сигнал з витратоміра вихрового типу, який встановлений на трубопроводі повітря буде прирівнюватися у відповідному відношенні до сигналу з витратоміра ультразвукового типу, який розміщено на трубопроводі газу.

В кінцевому результаті після обробки обох сигналів відповідною програмою, буде встановлено співвідношення газу до повітря та сформується сигнал керування, цей сигнал через RS-485 прямує до перетворювача частоти, який керує частотою напруги живлення двигуна вентилятора, змінюючи кількість подачі повітря.

Функціональна схема контуру регулювання витрати палива наведена на рис. 4.2.

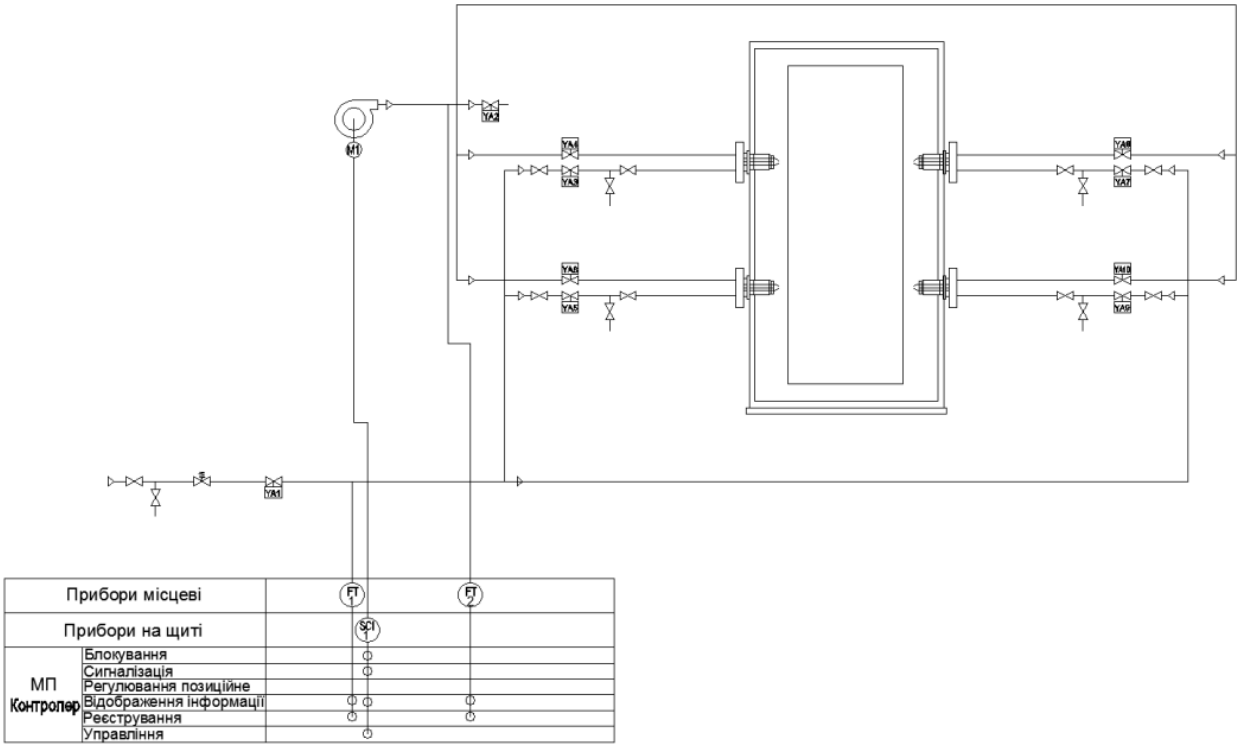


Рисунок 4.2 – Функціональна схема контуру регулювання витрати палива

Якщо з якихось технічних причин відбулося загасання одного з факелів то сигнал з БУП, через RS – 485 надсилає інформацію до контролера. В свою чергу контролер відповідно заданій програмі миттєво надсилає дискретний сигнал, що подається на електромагнітний клапан, який перекриває подачу газу на пальник. Аварійна ситуація призводить до дії звукову сирену, а також відбувається відображення стану аварії на операторській панель та Supervisory Control And Data Acquisition системі на ПК.

Функціональна схема контуру аварійного перекриття трубопроводу подачі газу наведена на рис. 4.3.

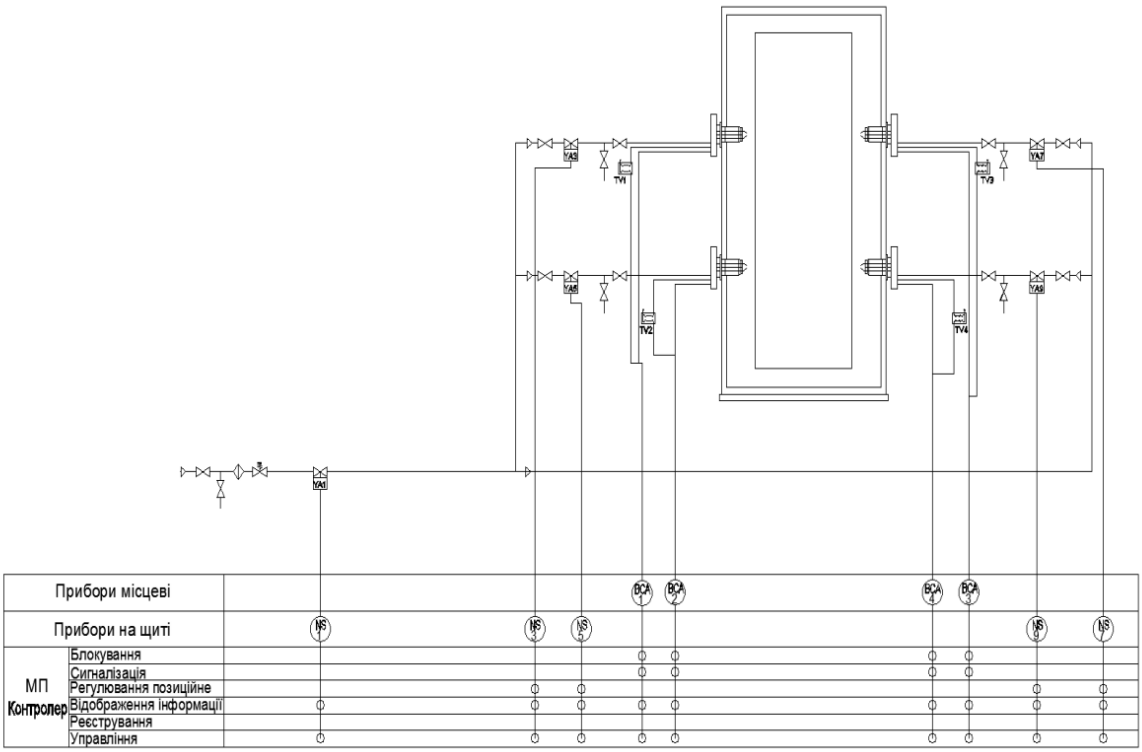


Рисунок 4.3 – Функціональна схема контуру аварійного перекриття трубопроводу подачі газу

4.3 Вибір і обґрунтування комплексу технічних засобів автоматизації

Основою апаратного забезпечення системи керування є комплекс технічних засобів (КТЗ). До його складу входить сучасна елементна база автоматизації: первинні датчики, нормуючі перетворювачі, допоміжна і функціональна апаратура з уніфікованими вхідними та вихідними сигналами, а також мікропроцесорний програмований логічний контролер (ПЛК).

1. Вимірювальні пристрої (первинні давачі).

Для реалізації ПІД-регулювання контролеру необхідно безперервно отримувати точні дані про витрату енергоносіїв, тиск та поточну температуру (яка є головним зворотним зв'язком):

Контроль витрати газу: витратомір вихрового типу Rosemount 8600D (вихідний сигнал 4 – 20 мА з протоколом HART). Він забезпечує високу точність

(1 % для газу) у широкому динамічному діапазоні та не потребує обслуговування імпульсних ліній.

Представляючи фундаментальну технологію вимірювань, вихрові витратоміри Rosemount пропонують великий вибір різних опцій, які дозволяють вирішити будь - які технологічні завдання. Вихровий витратомір Rosemount 8600 D підвищує надійність і знижує вартість монтажу шляхом зведення до мінімуму можливих місць витоку і усунення необхідності в імпульсних лініях[16]. Витратомір Rosemount 8600 D володіє такими технічними особливостями:

– простота установки;

– скорочення монтажних витрат;

– широкий діапазон вимірювань;

– підвищена надійність;

– потокові витратоміри дозволяють усунути використання імпульсних ліній;

– калібрування на місці експлуатації і установка на нуль не потрібні;

– випробувані на герметичність і налаштовані на заводі;

– додатковий вимір масової витрати за допомогою одного пристрою;

– проста діагностика;

– суцільнолита конструкція виключає можливість витоків.



Рисунок 4.4 – Витратомір вихрового типу Rosemount 8600D

Технічні характеристики:

– температура середовища застосування: -50 - +250 ° С;

– типові розміри: 25 – 250 мм;

– матеріал контактування з вимірюваним середовищем: нержавіюча сталь CF8M та CF3M;

– вихідний сигнал: 4 –20 мА з HARD, та масштабований імпульсний сигнал;

– похибка об’ємної витрати: +/- 0,75% для рідин, +/- 1% для газу та пари, +/- 5;

– похибка масової витрати: +/- 5% при використанні вбудованого давача температури.

Технологія вимірювання витрати за допомогою вихрового принципу забезпечує точність вимірювання в розширеному діапазоні значень витрати.

Контроль температури в печі (головний зворотний зв'язк): термоелектричний перетворювач ОВЕН ДТПХхх5М.І. (із вбудованим нормуючим перетворювачем НВТ-3, вихід 4 – 20 мА, термопара типу N ніхросил–нісил). Дозволяє вимірювати температуру до +1250 °С (робоча температура печі 1100 °С), а пластмасова чи металева головка забезпечує захист класу IP54/IP65.



Рисунок 4.5 – Перетворювач термоелектричний ОВЕН ДТПХхх5М.І

Контроль тиску газу та повітря перед пальниками: перетворювач тиску ОВЕН ПД 150 (вихід 4 – 20 мА/RS-485 Modbus RTU). Використовується для

точного вимірювання напору газу та повітря в колекторах, що необхідно для коректного розрахунку співвідношення «паливо-повітря».

До складу перетворювач термоелектричного входять:

– термозонд (первинний перетворювач) – перетворювач термоелектричний (ДТП) або термоперетворювач опору (ДТС);

– вимірювальний перетворювач НВТ-3.

Використання в складі пристрою мікропроцесорного перетворювача НВТ-3 дає можливість встановити через USB-інтерфейс бажаний діапазон виміру температури в межах діапазону вимірювання конкретного термозонда.

Технічні характеристики:

Діапазон температур, що вимірюються: – 40...+1250 °С;

Похибка: ±1,0;

Матеріал захисної арматури сталь: Nicrobell D;

Діапазон вихідного струму 4...20 мА;

Вид залежності «струм від температури»: лінійна;

Нелінійність перетворення не менше: ±0,2 %;

Розрядність цифро – аналогового перетворення не менше: 12 біт;

Номінальна статична характеристика (НСХ) – N (НН) ніхросил – нісил;

Максимальний допустимий опір навантаження (при напрузі живлення 36В): 1250Ом;

Матеріал комутаційної головки пластмасова: пластмасова, металева;

Діапазон допустимої напруги живлення: 12...36 В, (номінальна = 24 В);

Опір лінії зв’язку: не більше 100 Ом;

Час встановлення робочого режиму: не більше 30 хв;

Значення теплової інерції: 20...40 с;

Виконання сенсора відносно корпусу: ізольований;

Номінальне значення опору навантаження (при напрузі живлення 24В):500 Ом ±5 %;

Тип нарізного штуцера: метрична або трубна нарізь;

Ступінь захисту: IP54 (виконання з пластмасовою комутаційною головкою), IP65 (виконання з металевою комутаційною головкою та ДТС125М).

2. Керуючі та обчислювальні пристрої (Середній рівень).

Програмований логічний контролер: Schneider Electric Modicon M241.

Обґрунтування вибору: як ви правильно зазначили у вашому аналізі, цей ПЛК є значно універсальнішим за ОВЕН ПЛК154. Він має велику кількість вбудованих швидких аналогових та дискретних каналів, високу швидкодію (22 нс на інструкцію), вбудований Ethernet-порт (Modbus TCP) та готові бібліотеки для реалізації ПІД-регуляторів. Це виключає потребу в докупівлі додаткових модулів розширення та гарантує надійність зв'язку.



Рисунок 4.6 – Промисловий контролер Modicon M241

Modicon M241 призначений для обладнання і високопродуктивних компактних машин з вбудованими функціями контролю швидкості та положення. Вбудований порт Ethernet з функціями FTP і web-сервера дозволяє легко інтегрувати ПЛК M241 в архітектури систем управління для віддаленого моніторингу та техобслуговування машин завдяки використанню програмних додатків для планшетів, смартфонів, комп'ютерів та ПК. Логічний контролер Modicon M241 має кращий в своєму класі зв'язко з 5 вбудованими портами. Порти Ethernet дозволяють отримати необмежений доступ до вашого комп'ютера

в будь - якому місці і в будь - який час, спрощуючи експлуатацію, за допомогою мобільних пристроїв [28].

«Потужна продуктивність в 22нс / інструкцію: 2х – ядерний процесор 333МГц, 64Мб RAM, 128Mb Flash, програма до 128 000 інструкцій. Максимальна конфігурація: до 488 дискретних входів \ виходів або до 114 аналогових каналів.»

Технічні хаактеристики:

– Ethernet порт RJ-45 (10/100 Мбіт / с MDI / MDIX) з протоколами Ethernet / IP (адаптер), Modbus TCP (Клієнт / Сервер), UDP, SNMP, TCP і SoMachine; USB порт для програмування;

– послідовних порти Modbus RTU Master/ASCII або Slave: SL1 з харчуванням 5В/200мА для HMI налаштовується в RS485 або RS232, SL2 налаштований на RS485;

– CANopen master до 1 Мбіт/с з конфігуратором і бібліотеками інтегрованими в ПЗ (для моделей TM241CEC);

– Модулі розширення безпеки (аварійні канали кінцевиків, датчиків, і кнопок);

– Дві версії базового ПЛК Modicon M241 на 24 і 40 входів/виходів з розширенням по внутрішній шині дискретними і аналоговими входами/ виходами;

– Картриджі розширення аналогових входів/виходів і додатків вбудовуються в корпус базового ПЛК;

– Модулі комунікації Ethernet (до 4х портів додатково), Profibus DP Slave;

– Веб і FTP сервер, веб-візуалізація, DHCP-сервер 8 швидких входів (HSC) високошвидкісні лічильники 200 кГц і 4 швидких виходу (PTO, PWM, FG) до 100кГц SD карта пам'яті (до 256Мб) для резервного копіювання та перенесення додатків, оновлення прошивки, реєстрації даних.

– Швидка і проста конфігурація: одулі пускача двигуна Tesys SoLink (управління пускорегулирующими апаратами по мережі);

– Розширена лінійка аналогових і дискретних модулів (розширення по внутрішній шині до 14 модулів TM3);

– Вбудований ПІД-регулятор і бібліотеки управління переміщенням, підйомно – транспортним та пакувальним обладнанням;

– Ethernet і Profibus. Інтуїтивно зрозуміле ПЗ EcoStruxure Machine Expert (раніше SoMashine) скорочує час розробки для контролерів MachineStruxure:

Єдина середовище програмування для кожної складової вашої машини: стандартні і безпечні логічні схеми, дизайн руху і HMI конфігурація Завантаження програм на всі пристрої в один клік Скорочення часу проектування завдяки заздалегідь визначеним шаблонах і функціональним блокам Інтуїтивно зрозуміле програмування в ПО SoMachine Технологія EcoStruxure Machine Expert (SoMachine) на базі CoDeSys є однією з найсучасніших і найпотужніших концепцій на ринку.

3. Виконавчі механізми та запірно-регулююча арматура.

Регулювання витрати (керуючий орган): дросельний клапан ДХ у зв'язці з перетворювачем частоти Lenze 8200 SMD (потужністю 1,5 кВт для приводів регулювальних заслінок або вентилятора). Клапан здійснює точне плавну зміну перерізу трубопроводу за аналоговим сигналом завдання 4 – 20 мА від ПЛК.

ЧП Lenze 8200 SMD відповідає стандартним вимогам:

– захист функцій;

– компактний дизайн;

– гальмування, розгін, реверсування.

Також цей перетворювач є найпростішим в налаштуванні параметрів.

Технічні характеристики:

– витримує перевантаження в 150% на протязі 60 секунд;

– дискретні виходи – 1 вихід релейного типу;

– дискретні входи – 1 Стоп/Старт та три дискретні;

– аналогові виходи – 1 аналоговий 0 – 20 VDC, 0 -10 VDC;

– аналоговий вхід - 1 програмований 4 -20 мА, 0 – 20 мА, 0 -10 VDC;

– інтерфейс RS – 485.



Рисунок 4.7 – Перетворювач частоти Lenze 8200 SMD

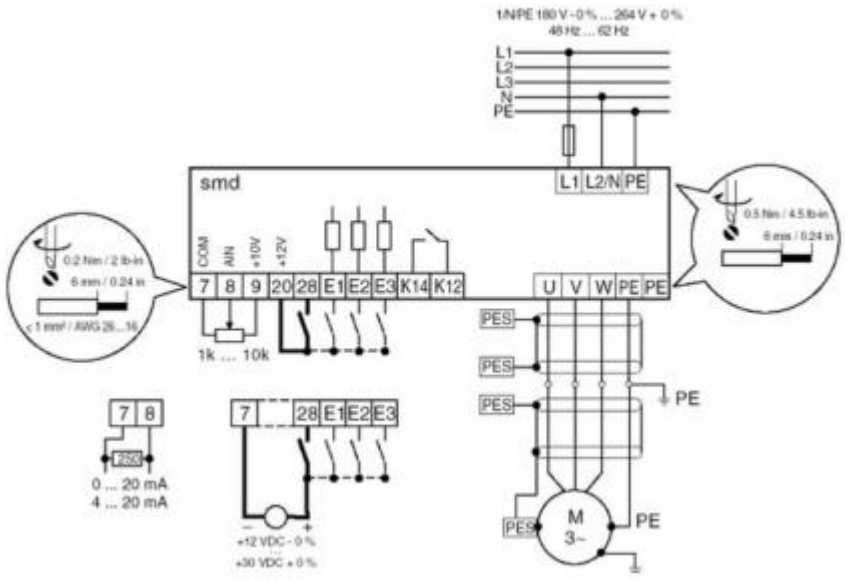


Рисунок 4.8 – Перетворювач частоти Lenze 8200 SMD

Параметричні значення:

– режими уповільнення та розгону;

– незалежне налаштування часу зупинки та часу розгону;

– несуча частота 4 – 10 кГц;

– максимальна частота 240;

– ПІ – регулятор процесу;

– гальмування за допомогою постійного струму;

– потужність перетворювач частоти Lenze 8200 SMD – 1500 кВт;

– фіксовані швидкості;

– аналогове завдання 0 – 20 мА або 4 – 20 мА;

– фіксована швидкість (з ревером).

Спалювання палива: рекуперативний пальник Recumat M250 (номінальна потужність 160 кВт). Оскільки він має вбудований рекуператор, це підвищує КВП до 85 % за рахунок підігріву повітря димовими газами, що безпосередньо впливає на окупність печі (2–4 роки), яку ви описували у вступі.

Характеристики рекуператорний пальник Recumat M250.

Потужність:

– номінальна потужність (стандарт): 160 кВт;

– мінімальна / максимальна потужність: 120 кВт/190 кВт.

Газоподібне паливо:

– природний газ: природний газ H, природний газ L, метан;

– інші гази: пропан, бутан та інші не агресивні гази.

Максимальна температура використання:

– прямий нагрів – 1150 °C;

– непрямий нагрів – 1000 °C.

в обхід ПЛК.

5. Верхній рівень та програмне забезпечення

Людино-машинний інтерфейс (HMI): сенсорна TFT-панель Weintek MT-8071iE (7", 800 · 480). Підключається до ПЛК Modicon M241 через інтерфейс Ethernet (Modbus TCP), забезпечує візуалізацію фактичної витрати палива, трендів температури та поточного стану пальників.

Інженерне середовище: EcoStruxure Machine Expert (SoMachine). Використовується як єдина платформа для написання логіки ПЛК (програмування ПІД-контуру) та розробки графічного інтерфейсу для панелі

Weintek.



Рисунок 4.9 – Зовнішній вигляд TFT дисплей Weintek MT-8071iE

Панель оператора MT-8071iE виробництва Weintek має:

Кольоровий TFT сенсорний екран 7 ", розширення 800x480;

– 32-бітний процесор RISC 600MHz, RAM DDR 128Mb, DOM 128Mb onBoard;

– 2 x COM-порту, інтерфейси RS-485, 1 x COM-порт, інтерфейс RS-232, USB2.0 а також 1 x 10/100 Ethernet (Base-T);

– захист IP65 по передній панелі, живлення 24VDC;

Безкоштовне програмне забезпечення EasyBuilderPro V4.10.04 [29, 30].

Комунікаційні можливості операторської панелі MT8071iE реалізовані за допомогою 2-х COM-портів з подвійною ізоляцією інтерфейсів RS-485, 1-го COM-порту RS-232, мережевого порту Ethernet 10/100 Base-T і шини USB2.0. Великий список сумісних контролерів і зовнішніх пристроїв забезпечує універсальність використання панелей оператора MT8071iE.

Сукупність усіх вищенаведених характеристик і переваг операторської панелі MT8071iE, дозволяє рекомендувати дану панель для використання в автоматизованих системах контролю та управління, як продуктивне, надійне і недороге рішення.

Промисловий стандарт Industrial Ethernet забезпечує побудову високопродуктивних та ефективних комунікаційних мереж на підприємствах

відповідно до міжнародних специфікацій IEEE 802.3 (дротові мережі) та IEEE 802.11 (бездротові локальні мережі WLAN).

Ethernet є базовою технологією глобальної мережі Інтернет. Сучасні концепції корпоративних мереж (Intranet, Extranet), які раніше використовувалися виключно в офісному сегменті, сьогодні успішно впроваджуються на рівні промислового виробництва для інтеграції АСК ТП у загальну структуру управління підприємством.

На даний момент технологія Ethernet охоплює понад 80% світового ринку промислових мереж із тенденцією до подальшого зростання. Ключовими перевагами її застосування є:

– повна відповідність міжнародному стандарту IEEE 802.3, адаптованому під жорсткі умови експлуатації;

– можливість об'єднання компонентів автоматизації (ПЛК, HMI) з персональними комп'ютерами верхнього рівня та бездротовими вузлами в єдині гомогенні та гетерогенні структури;

– реалізація відкритих мережевих рішень із високим потенціалом до подальшого масштабування;

– висока пропускна здатність та швидкість передачі даних у реальному часі;

– створення надійної бази для впровадження сучасних IT-технологій у промисловість (Web-технології, e-mail сповіщення, WAN-з'єднання).

Для розробки логіки керування, налаштування та введення в експлуатацію проєктувальної системи автоматизації обрано єдине інтегроване інженерне середовище EcoStruxure Machine Expert (раніше SoMachine) від компанії Schneider Electric. Цей програмний комплекс дозволяє в межах одного проєкту реалізувати логічні алгоритми, контури керування рухом, людино-машинний інтерфейс (HMI) та мережеві функції взаємодії компонентів. Платформа є оптимальним рішенням для створення гнучких і масштабованих систем керування промисловим обладнанням.

Пакет програмного забезпечення містить два базові компоненти: середовище розробки прикладного коду для контролерів та інструментарій створення графічного інтерфейсу операторських панелей. Завдяки повній інтеграції забезпечується швидке наскрізне розшарювання (експорт) змінних між ПЛК та HMI, функціонує вбудований OPC-сервер, а також доступна розширена бібліотека готових функціональних блоків.

Концепція єдиного програмного середовища реалізує принцип: «один інструмент – один файл проєкту – одне з'єднання – одне завантаження».

Мінімізація витрат на проєктування та обслуговування обладнання за рахунок використання інтегрованого ПЗ досягається завдяки:

– застосуванню спільного інструментарію для ПЛК, графічних панелей та периферійних пристроїв;

– одноетапному встановленню всіх необхідних програмних компонентів;

– спрощенню процедури пусконалагодження – завантаження конфігурації у всі пристрої мережі виконується в один клік через одне фізичне підключення;

– забезпеченню наскрізного та прозорого доступу до всіх мережевих вузлів системи.

Висновки. У даному розділі було виконано обґрунтований вибір та детальний аналіз комплексу технічних засобів автоматизації, сигналізації, захисних блокувань, а також спеціалізованого програмного забезпечення для системи автоматичного керування тепловим режимом нагрівальної газової печі.

Всі обрані апаратні та програмні засоби повністю сумісні між собою, відповідають критеріям промислової надійності та створюють цілісний комплекс для ефективного та безпечного керування теплотехнічним об'єктом.

5 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

В системі САР нагрівальних печів застосовуються програмовані логічні контролери фірми Schneider electric, при створенні керуючих програм для яких застосовується мова програмування EcoStruxure Machine Expert.

Базовий пакет EcoStruxure Machine Expert призначений для створення проектів, що вирішують завдання автоматизації окремих верстатів, ділянок, технологічних процесів.

Розглянутий пакет дозволяє проводити розробку як програмних, так і апаратних засобів в межах одного проекту, в результаті чого на основі вимог до програмної та апаратної частин відбувається створення і конфігурація необхідних коштів і мереж, робочих програм і блоків даних для вирішення задач автоматизації.

Для створення програмного забезпечення потрібно розробити:

- структуру програми;
- управління даними автоматичного процесу;
- структуру даних;
- передачу даних;
- документацію програми і проекту.

Основними утілітами пакета EcoStruxure Machine Expert, котрі доступні в папці^

- Manager;
- LAD, STL, FDB – Programming S7;
- Memory Card Parameter Assignment;
- NetPro – Configuring Networks;
- PID Control Parameter Assignment;
- S7 SCL – Programming S7 Blocks;
- S7-GRAPH – Programming Sequential Control System;
- S7-PDIAG – Configuring Process Diagnostic;

– S7-PLCSIM Simulating Modules;

– Setting the PG-PC Interface;

– Configure Workspace [19].

Основною програмою EcoStruxure Machine Expert є Manager, який дозволяє виробляти основні операції з проектом, такі як створення, збереження, відкриття, а також керувати роботою проекту, запускати різні утиліти, пов'язувати їх між собою і т. д.

Одна із основних умов нормального нагрівання металевих злитків – підтримка встановлених температур в регенеративному нагрівальному печі, це найбільш важливий параметр печі, що контролюється. Для регенеративних печів в найбільш відповідальних точках робочого простору підтримуються постійні температури.

Температура в печі змінюється з ряду причин, наприклад, в результаті зміни режиму навантаження печі, зміни витрати палива та умов його горіння, аеродинамічного режиму печі і т.д. Всі збурення призводять до порушення режиму нагрівання і, як наслідок, виходу продукції низької якості або браку. Підтримка температур по довжині печі нерозривно пов’язана з регулюванням інших параметрів печі.

В процесі нагріву злитків динамічна характеристика об’єкта змінюється в залежності від режиму нагріву. Температура в печі змінюється в результаті зміни режиму навантаження печі, зміни витрати палива та умов його горіння, аеродинамічного режиму печі.

Для підтримки температури, щодо виставленого завдання, необхідно управляти приводом клапана, що регулює подачу палева.

У випускній кваліфікаційній роботі бакалавра розроблений код FBD-програми управління САР температури робочого простору в інструментальному середовищі EcoStruxure Machine Expert [20].

Розглянемо і досліджуємо систему регулювання температури робочого простору.

Характеристики ПІД-регулятора, зображеного на рисунку 5.1.

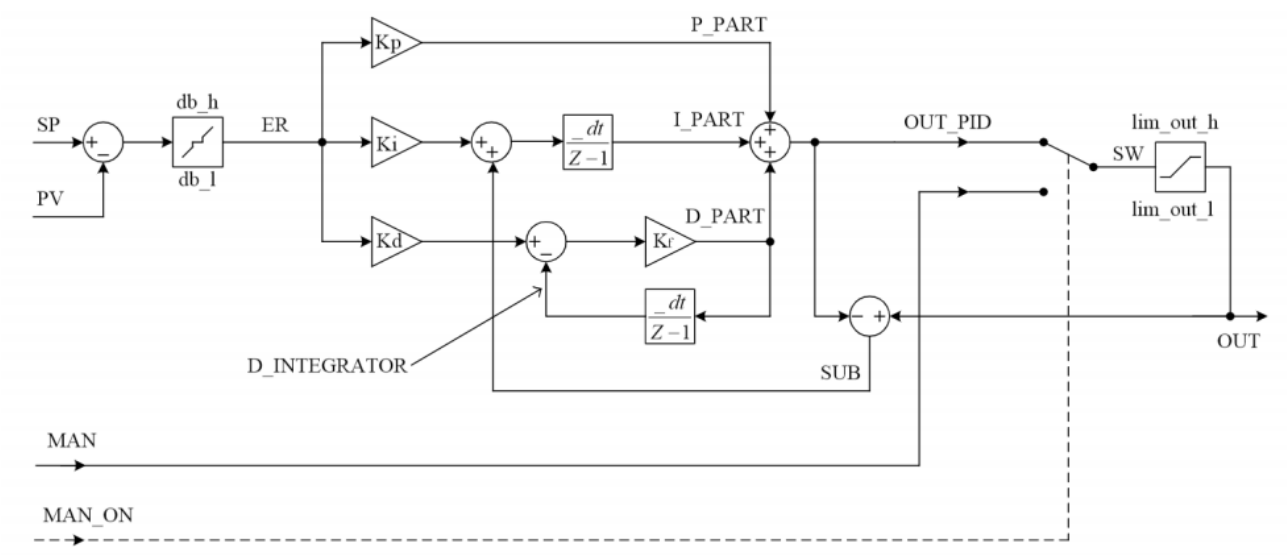


Рисунок 5.1 – ПІД-регулятор із зазначенням імен змінних в програмі

Дискретна передавальна функція регулятора:

$$W(Z)=Kp + Ki*Ts/(Z-1) + Kd*Kf/(1+Kf*Ts/(Z-1))), \quad (5.1)$$

де Ts – шаг крок за часом.

Еквівалентна непреривна передавальна функція:

$$W(Z) = Kp + Ki/s + Kd*Kf/(1/(1+Tf*s)), \quad (5.2)$$

де Tf = 1/Kf.

Захист від переповнення інтегральної складової методом зворотнього розрахунку.

Зона невутливості до похибки регулювання для усунення невеликих коливані регулятора в ставноленному режимі роботи.

Амплітудне обмеження вихідного сигналу для попередження подачі сигнала управління, який перевищує фізичні можливості виконавчого механізму.

Вбудований в диференційну складову фільтр нізких частот, для усунення

діфірінціювання шумів вимірювання.

Фільтр шума – дискретне аперіодичний ланцюг першого порядку.

Перемикання режимів управління РУЧНОЙ/АВТОМАТ.

Безударний перехід з ручного режиму в автоматичний.

Не безударний перехід з автоматичного режима в ручний [23].

Примусове обнуління інтегратора інтегральної складової при $K_i = 0$.

Примусове обнуління інтегратора диференціальної складової при Kd = 0.

Програма оптимізована під мінімальне використання постійного зберігання змінних в оперативній пам’яті.

Числове інтегрування методом правих прямокутників.

Нема жодної операції ділення.

Протестовано на PLC Schneider Electric Modicon M241в блоці OB35 (Ts =0,1 с).

Згідно рисунку 5.1 напишемо програмний код ПІД-регулятора на мові SCL.

```
//Начало программі.
FUNCTION_BLOCK FB187
TITLE = ‘ПІД регулятор’;
VERSION : ’4.1’;

VAR_INPUT// Вхідні змінні.
PV:REAL; //Змінений сигнал від датчика.
SP:REAL; //Уставка для регулятора.
Kp:REAL; //Пропорційне посилення.
Ki:REAL; //Інтегральне посилення (зворотньо пропорціно часу інтегрування).
Kd:REAL; //Діференційне посилення.
Kf:REAL; //Коефіцієнт вільрації для диф. складової (зворотно пропорційний постійній часу фільтрації).
db_h:REAL; //Верхня зона нечутливості помилки.
```

db_l:REAL; //Нижня зона нечутливості помилки.

lim_out_h; //Верхне обмеження виходa регулятора.

lim_out_l; //Нижнє обмеження виходa регулятора.

_dt:REAL; //Шаг розрахунку в секундах (для OB35=0.1).

MAN:REAL; //Ручне завдання вихідного сигнала.

MAN_ON:BOOL; //Ввімкнути ручне керування.

END_VAR

VAR_OUTPUT// Вихідні змінні.

OUT:REAL; // Віхід регулятора.

END_VAR

VAR //Внутрішні хмінні (що зберугаються).

I_PART:REAL:=0.0; //Інтегратор 1 для інтегральної складової.

D_SNTEGRATOR:REAL: =0.0; //Інтегратор 2 для диференційної складової.

END_VAR

VAR_TEMP //Внутрішні змінні (що не зберігаються).

ER:REAL; //Помилка регулювання.

OUT_PID:REAL; //Вихід з ПІД алгоритма.

SW:REAL; //Вихід з перемикача «Ручний/Автоматичний».

SUB:REAL; //Відрахування для обмеження інтегральної складової по амплітуді.

P_PART:REAL; //Пропорційна складова регулятора.

D_PART:REAL; //Диференційна складова регулятора.

END_VAR

ER:SP-PV; //Розрахунок помилки регулювання.

IF((db_l<ER)AND(ER<db_h) //Зона нечутливості до помилки.

```
THEN
ER:=0.0
END_IF
IF (Kd<>0.0)
THEN
D_PART:= ((ER*Kd) - D_INTEGRATOR) * Kf; //Дифференційна складова.
ELSE
D_PART:= 0.0; //Якщо не використовуємо, тоді не враховуємо.
END_IF;

P_PART:=Kp * ER; //Пропорційна складова.

OUT_PID:=P_PART + I_PART + D_PART; //Вихід ПІД-регулятора.

//Ручне управління
IF (MAN_ON) //Переключення режима роботи «Ручной/Автоматичний».
THEN
SW:=MAN; //Включення ручного режиму, якщо MAN_ON=1.
ELSE
SW:=OUT_PID; //Включення автоматичного режиму, якщо MAN_ON=0.
END_IF;
//Амплітудний обмежувач
IF (SW>=lim_out_h) //Обмеження виходу зверху.
THEN
OUT:=lim_out_h;
END_IF;
IF (SW>=lim_out_l) //Обмеження виходу знизу.
THEN
OUT:=lim_out_l;
END_IF;
```

```
IF ((lim_out_l<SW)AND(SW<lim_out_h) //Вихід без обмежень.
THEN
OUT:=SW;
END_IF;

SUB:=OUT - OUT_PID; //Відрахування для обмеження інтегральної складової за амплітудою.

IF (Kd<>0.0)
THEN
D_INTEGRATOR:=D_INTEGRATOR + (_dt * D_part); //Інтегратор диіеренційної складової.
ELSE
D_INTEGRATOR:=0.0; //Якщо не використовується, тоді обнуляємо.
END IF;

IF (Ki<>0.0) //Інтегратор інтегральної складової регулятора.
THEN
I_PART:=I_PART + (((Ki * ER) + SUB)* _dt);
ELSE
I_PART:=0.0; // Якщо не використовується, тоді обнуляємо.
END_IF;

END_FUNCTION_BLOCK

//Кінець програми.
```

Для FBD блока ПІД-регулятора проведені наступні види тестування:

– тестування реакції пропорційної складової на сигнал помилки, який лінійно змінюється;

– тестування реакції інтегральної складової на ступінчастий сигнал помилки;

– тестування реакції диференційної складової на ступінчастий сигнал помилки;

– тестування зони не чуттєвості помилки;

– тестування амплітудного обмежувача вихідного сигнала;

– тестування переключення режимів управляння РУЧНОЙ/АВТОМАТ;

– тестування обмеження інтегральної складової;

– тестування безударного переходу з ручного режиму в автоматичний;

– тестування обнуління інтегральної складової при зміні закону регулювання;

– тестування обнуління диференційної складової при зміні закону регулювання.

В SIMATIC Manager відкриваємо папку вихідних кодів програм Sources. Створимо в папці Sources вихідний SCL файл (рисунок 5.2).

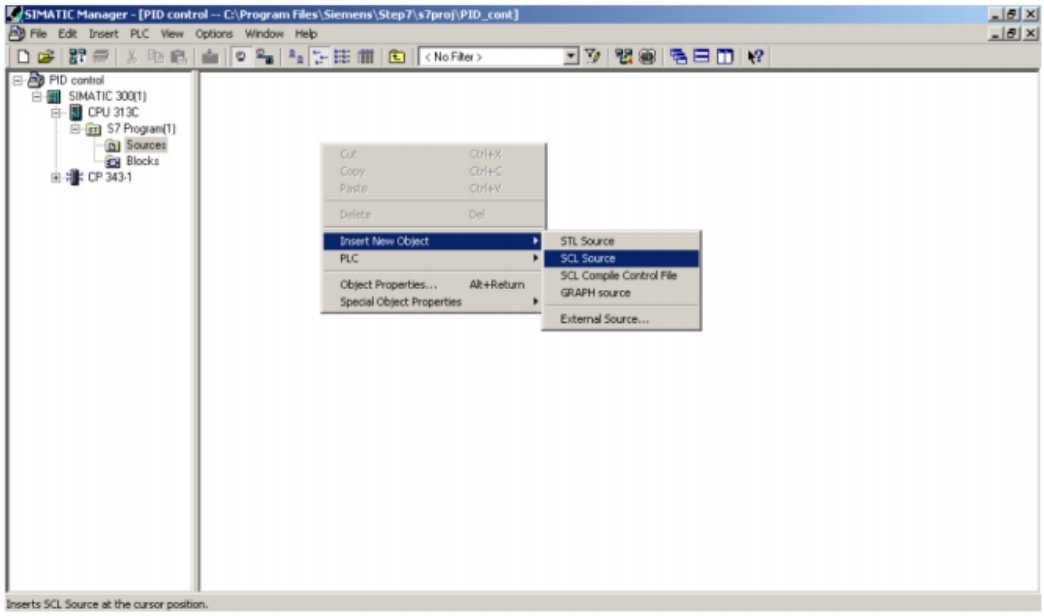


Рисунок 5.2 – Створення вихідного файлу SCL

Скопіюємо вихідний код нажав File->Compil чи нажав відповідну піктограму, рисунок 5.3.

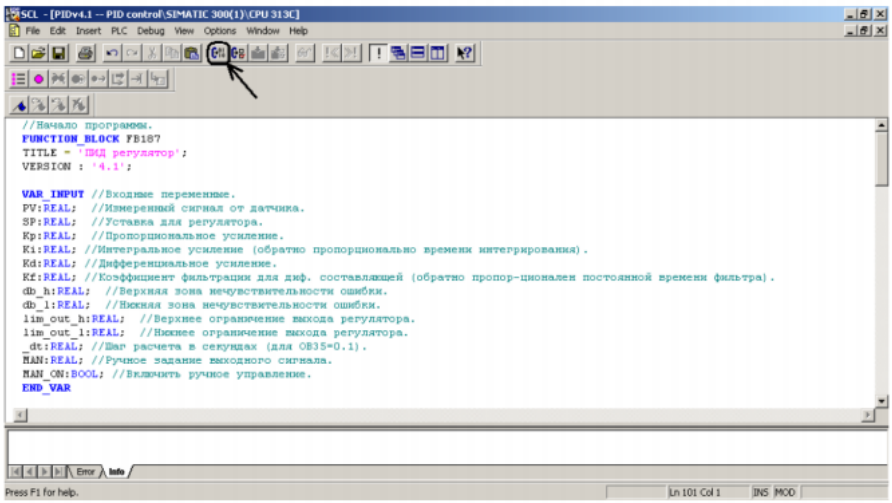


Рисунок 5.3 – Компілювання програми

В результаті компіляції отримаємо блок FB187. Даний блок можна вставляти в редактор мови FBD.

Програма ПІД-регулятора повинна виконуватися циклічно, через однакові проміжки часу. Для цього створюємо організаційний блок – переривання, котрий буде виконуватися кожні 0,1 с. Для переривання кожні 0,1 необхідно створити блок з іменем OB35, рисунок 5.4.

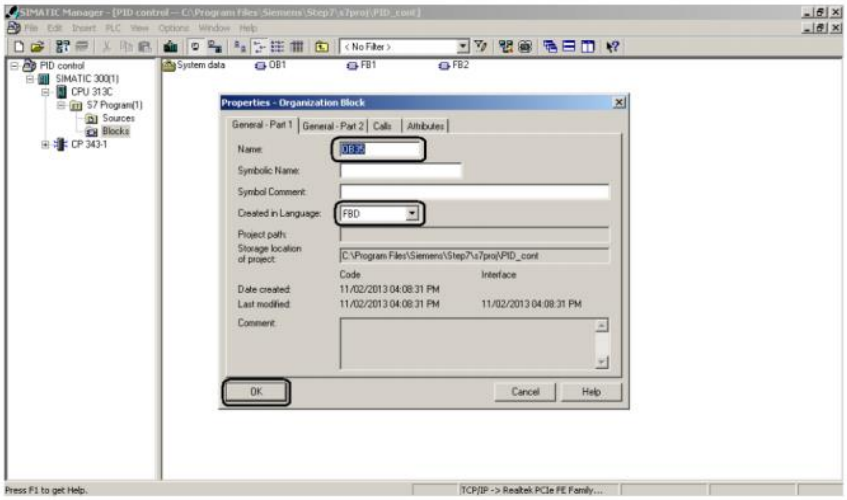


Рисунок 5.4 – Створення організаційного блоку

Для збереження змінних в ОЗП контролера використовуються блоки даних. Блок даних представлений у вигляді структури. Змінні призначені для з'єднання між собою блоків на мові FBD. Токож к змінним з блоку даних може бути підключена SCADA-система.

Будуємо блок даних в папці Blocks меню Insert New Object ->Data Block, та дамо ім'я блоку DB2-PID.

Відкриваємо створений блок даних DB2.

Заповнюємо таблицю зі змінними, як показано на рисунку 5.5. В полі Initial value необхідно ввести початкове значення змінних. Після заповлення таблиці збережемо і закриваємо це вікно. Далі к цьому блоку даних будуть підключатися OPC клієнт. Нова строчка таблиці автоматично додається після повного заповнення поточної строки. Замість числових значень «0.000000e+000» можна написати «0.0».

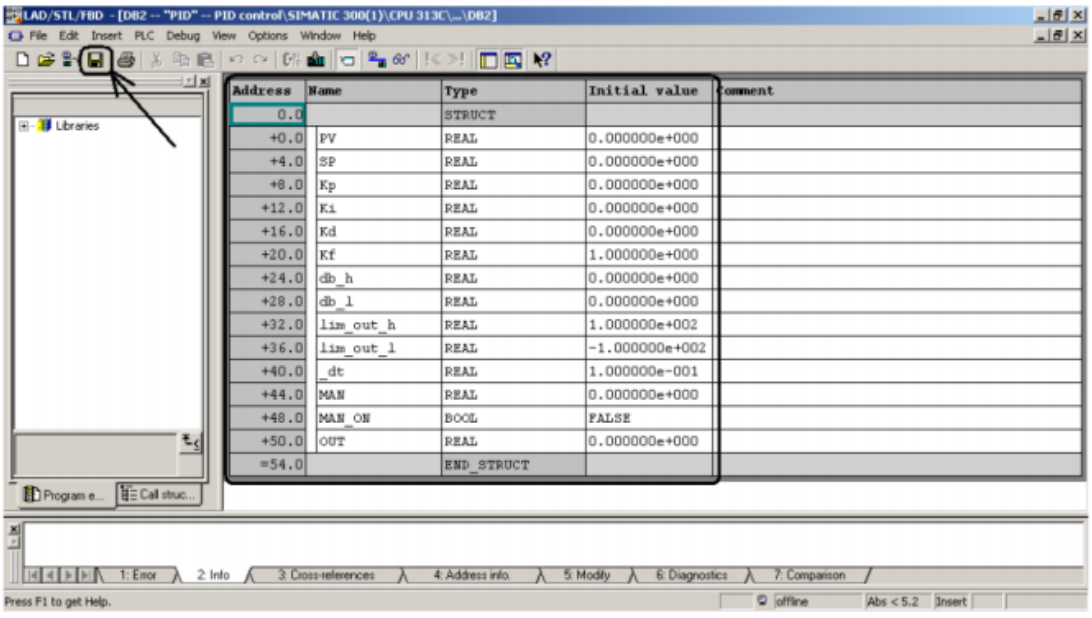


Рисунок 5.5 – Редагування блоку даних

Тепер можна приступати до написання програми на мові FBD.

Відкриваємо організаційний блок OB35. Створюємо блок FB187 в Network 1. Вставка в програму блока регулятора наведена на рисунку 5.6.

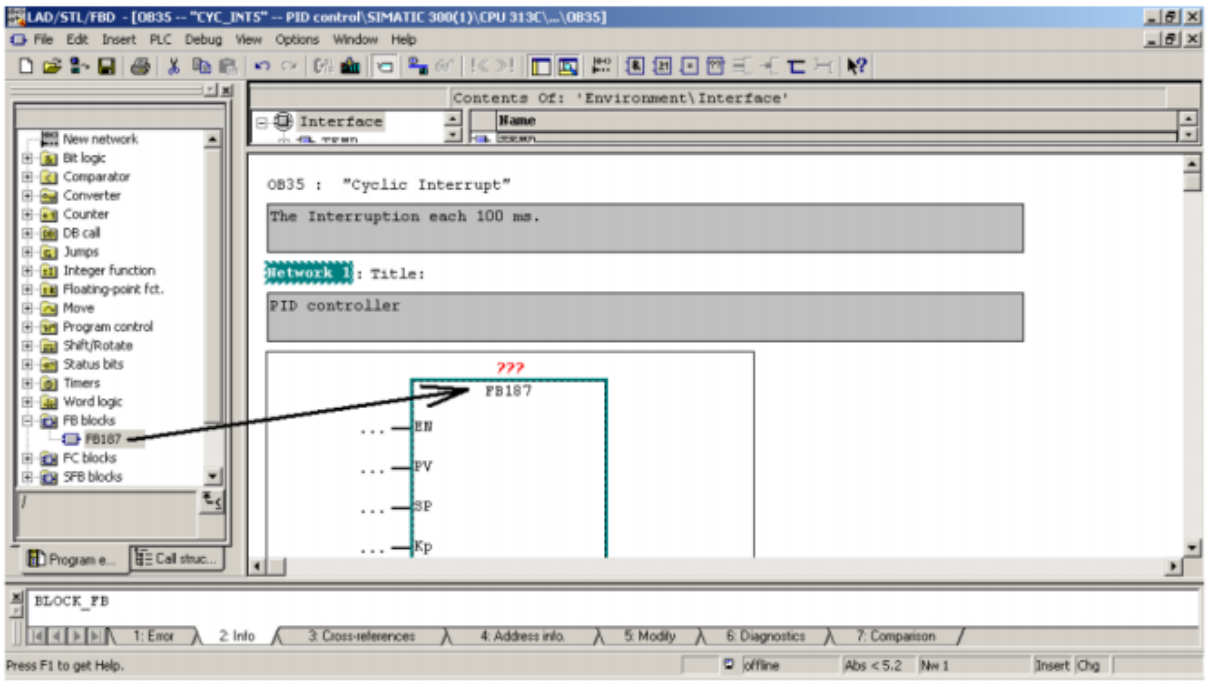


Рисунок 5.6 – Вставка в програму блока регулятора

Заповнимо імена змінних для FB187 згідно таблиці 5.1

Таблиця 5.1 – Змінні блока FB187

Входи і виходи FB187	Відповідна змінна чи константа
EN	M0.1
PV	«PID».PV
SP	«PID».SP
Kp	«PID».Kp
Ki	«PID».Ki
Kd	«PID».Kd
Kf	«PID».Kf
db_h	«PID». db_h
db_l	«PID». db_l
lim_out_h	«PID». lim_out_h
lim_out_l	«PID». lim_out_l
dt	0.1
MAN	«PID». MAN
MAN_ON	«PID». MAN_ON
OUT	«PID». OUT

В верхньому полі над блоком FB187 необхідно вписати блок даних для внутрішніх змінних регулятора. Вкажемо блок DB1. Через те блока DB1 ще не існує, програма запропонує нам його створити.

Після присвоєння всіх змінних блок регулятора виглядає, як показано на рисунку 5.7.

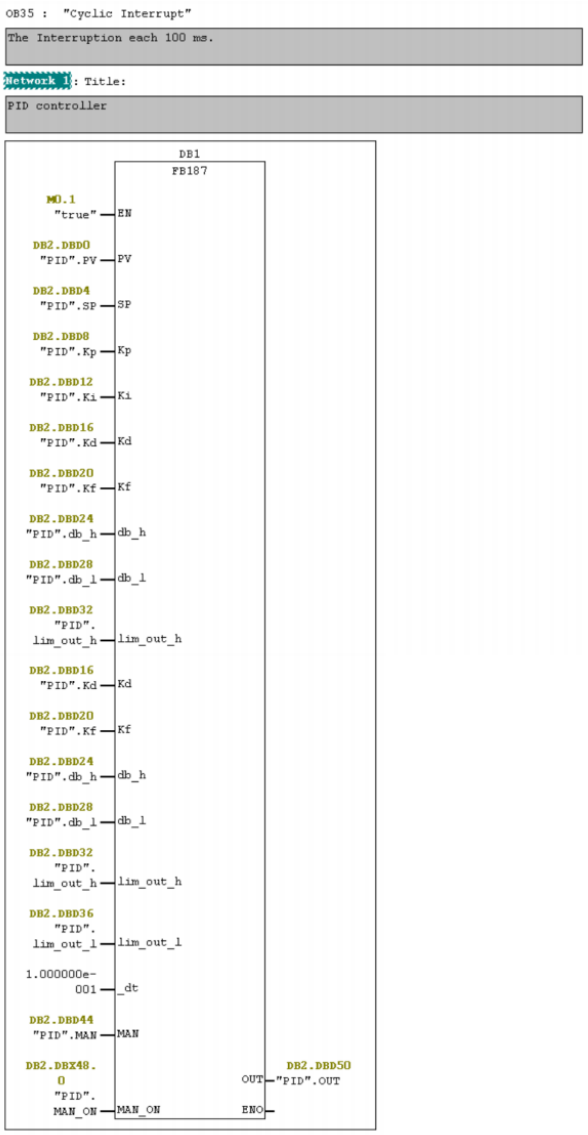


Рисунок 5.7 – Блок регулятора на мові FBD

Висновки. В даному розділі розроблена програма САР температури в робочому просторі нагрівального регенеративного печі на базі програмування контролера Modicon M241 в програмному середовищі EcoStruxure Machine Expert.

6. ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

6.1 Аналіз потенційних небезпек

Робота оператора АСУ ТП передбачає виконання посадових обов’язків у приміщенні операторської, обладнаному персональними комп’ютерами (далі ПК) з візуальними дисплейними терміналами (далі ВДТ), шафами управління та іншим електрообладнанням. Тому нижче розглянемо заходи по забезпеченню безпеки, виробничої санітарії, гігієни праці і пожежної безпеки для приміщення операторської.

На основі аналізу роботи існуючого обладнання і посадових обов’язків фахівця у приміщенні обладнаному ПК з ВДТ, виявлені небезпечні та шкідливі виробничі фактори, здатні привести до травм або ушкодження здоров’я працівників.

Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

– можливість ураження електричним струмом, при виконанні посадових обов’язків внаслідок порушення правил з електробезпеки або помилкових дій персоналу, що може призвести до електротравм різного ступеню важкості або навіть до летального наслідку;

– механічне травмування внаслідок нераціонального розташування робочих місць, що є порушенням вимог ергономіки;

– підвищене нервово-психічне навантаження, внаслідок специфіки роботи, а саме постійний контакт з клієнтами, колегами по роботі, керівництвом, контрагентами при вирішенні робочих питань (деякі з них можуть бути конфліктними, суперечливими), що може викликати емоційний дискомфорт, внутрішнє роздратування та емоційну нестабільність під час короткотривалих певних негативних ситуацій, та може призвести до захворювань нервової системи, зниження наснаги на працю та стресових станів та помилкових дій;

– оскільки робота користувача ПК вимагає тривалого статичного

напруження м’язів спини, шиї, рук і ніг тому не раціональна або неправильна конструкція, організація та обладнання комп’ютеризованого робочого місця не забезпечує правильного та комфортного положення при роботі за комп’ютером, що може привести до швидкої втоми, а як наслідок до помилок, зниженню працездатності та кістково-м’язовим порушенням;

– недостатнє або надмірне освітлення робочих місць, в зв'язку з несправністю, або хибним вибором освітлювальних приладів, в зв'язку з неправильним розташуванням робочих місць по відношенню до джерел природного та штучного освітлення, що призводить до помилкових дій, погіршення зору або ефекту засліплення;

– незадовільні параметри мікроклімату в робочих приміщеннях (підвищена або знижена температура, вологість і рухливість повітря), у зв'язку з відсутністю, хибним вибором та використанням не якісних або нераціональних систем вентиляції, кондиціювання повітря, приводить до підвищеної стомлюваності, а як наслідок до помилок, зниженню працездатності, а також може бути причиною простудних захворювань;

– неправильні або нераціональні дії персоналу в умовах надзвичайних ситуацій, внаслідок не своєчасного оповіщення, неякісної підготовки персоналу правилам дій в умовах надзвичайних ситуацій або якісної організації дій персоналу керівництвом, призводять до паніки, невиправданих травм та загибелі людей;

– можливість загоряння, в зв'язку з порушенням правил протипожежної безпеки, використанням несправного електрообладнання, або відсутністю систем пожежної сигналізації і пожежогасіння, що призводить до пожежі, а як наслідок може бути причиною опіків та травм різного ступеню важкості або навіть летального наслідку, а також значних матеріальних збитків;

– монітор ПК є джерелом практично всіх видів електромагнітного випромінювання: іонізуючі випромінювання при визначеній дозі можуть викликати виникнення злоякісних пухлин; електромагнітні поля наднизької

частоти впливають на імунну систему, та можуть стимулювати канцерогенез молочних залоз і шкіри, тощо;

– від постійної роботи за клавіатурою ПК нервові закінчення подушечок пальців німіють, виникає слабкість, в подушечках «бігають мурашки», це може привести до пошкодження суглобового і зв'язкового апарату кисті, а надалі захворювання кисті можуть стати хронічними та розвитися «тунельний синдром» [28].

6.2 Заходи по забезпеченню безпеки

Приміщення, у якому здійснюються заходи пов’язані з виконанням посадових обов’язків та проведенням досліджень та розрахунків (розробкою, модернізацією, удосконаленням, тощо), є спеціалізованим (приміщенням операторської АСУ ТП, дослідницького центру, лабораторії, тощо) яке обладнане ПК з ВДТ.

У приміщенні операторської застосовується широке різноманіття електроприладів: персональні комп'ютери, шафи САР, принтери, ксерокси, факси, освітлювальні прилади, кондиціонери, побутові електроприлади тощо. Небезпека ураження електричним струмом при використанні цих приладів з'являється при недотриманні заходів обережності, а також при відмові або несправності цього обладнання. Наслідки ураження електричним струмом залежать від багатьох факторів: опору організму, величини, тривалості дії, роду і частоти струму, шляхів його проходження через життєво важливі органи, умов зовнішнього середовища.

Для запобігання ураження електричним струмом встановлено електроустаткування, яке відповідає вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин», «Правил улаштування електроустановок» (далі – «ПУЕ-2017»), ДСТУ Б В.2.5-82:2016 «Електробезпека в будівлях і

спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом», НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок», НАПБ А.01.001-14 «Правила пожежної безпеки в Україні» та буде використовуватися згідно вимог НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок» (далі – «ПБЕЕ»), НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (далі – «ПБЕЕС») та НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями».

Згідно «ПУЕ-2017», за ступенем небезпеки ураження електрострумом, приміщення операторської належить до 1-го класу, тобто є приміщенням без підвищеної небезпеки, у якому відсутні умови, що створюють підвищену та особливу небезпеку.

Згідно глави 1.7 – «Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом» – «ПУЕ-2017», обладнання операторської має основну ізоляцію струмо провідних частин, яка забезпечує захист від прямого дотику та подвійну, яка складається з основної та додаткової ізоляції, для забезпечення захисту від ураження електричним струмом у разі пошкодження основної ізоляції.

Відповідно до вимог п. 6.7.4. НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» усі доступні для доторкання металеві деталі електрообладнання у приміщенні з ПК, які можуть опинитись під напругою, у випадку пошкодження ізоляції, з'єднані з заземлюючим пристроєм.

Оскільки операторське приміщення за ступенем небезпеки ураження електрострумом належить до 1-го класу, тому відповідно до вимог п. 6.7.6 НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» та додатку №1 до НПАОП 40.1-1.01-97 «ПБЕЕ» користувачі ПК пройшли інструктаж з електробезпеки з оформленням в журналі інструктажу та мають І групу з електробезпеки.

Ймовірність механічного травмування може виникнути внаслідок нераціонального розташування робочих місць, захаращення робочих місць або у зв'язку з недбалістю та неуважністю обслуговуючого персоналу. Для виключення травматизму згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні

правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» зроблено більш зручне та раціональне розташування робочих місць, таким чином збільшена відстань між ними, яка відповідає нормованим значення (площа на одне робоче місце має становити не менше ніж 6,0 м^2, а об'єм не менше ніж 20,0 м^3). Поверхня підлоги є рівною, неслизькою, з антистатичними властивостями.

У зв’язку із стресовими ситуаціями та нервово-емоційними навантаженнями у працівників може виникнути ймовірність захворювань загально-невротичного характеру.

З метою зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії, запобігання втоми, згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» для робітників із застосування ЕОМ, передбачені регламентовані перерви для відпочинку тривалістю 15 хвилин через кожні дві години, а також обладнані побутові приміщення для відпочинку під час роботи, кімната психологічного розвантаження. В кімнаті психологічного розвантаження передбачені пристрої для приготування й роздачі тонізуючих напоїв, а також місця для занять фізичною культурою

Для оптимізації відносин у колективі проводяться тренінги з залучанням психологів на теми: «Адаптація у новому колективі», «Поведінка в суспільстві».

Для запобігання кістково-м’язових порушень робочі місця користувачів ПК у приміщенні оператора АСУ ТП відповідають ергономічним вимогам з урахуванням характеру і особливостей трудової діяльності згідно з ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин».

Висота робочої поверхні столу з ПК регулюється в межах 680 – 800 мм, а

ширина і глибина – забезпечує можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: ширина – 600 – 1400 мм,

глибина – 800 – 1000 мм). Робочий стіл має простір для ніг висотою 600 мм, шириною – 500 мм, глибиною (на рівні колін) – 450 мм, на відстані витягнутої ноги – 650 мм.

Для того, що зменшити навантаження на руки від тривалої роботи на комп'ютері та зменшити ризик виникнення синдрому зап'ястного каналу, достатньо виконувати рекомендації по організації робочого місця і режиму роботи, щогодини робити короткі перерви, передбачені ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин», регламентовані перерви для відпочинку тривалістю 15 хвилин через кожні дві години, під час яких бажано виконати кілька вправ для кистей рук.

6.3 Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці

Захистом від електромагнітних іонізуючих випромінювань є обмеження часу перебування в електромагнітному полі и нормування інтервалів годин, протягом яких людина покидає небезпечна зону. Дотримання норм ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» дозволяє забезпечити дотримання допустимої дози, і залучити природні захисні ресурси людини, які за відсутності випромінювання відновлюють функції організму.

Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці для приміщення оператора АСУ ТП (дослідницької лабораторії, дослідницького центру, тощо) обладнаного ПК з ВДТ розроблені відповідно до вимог Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» і

НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров’я працівників під час роботи з екранними пристроями».

Основними причинами недостатньої або надмірної освітленості робочих місць є несправність або хибний вибір освітлювальних приладів, неправильне розташування робочих місць по відношенню до джерел освітлення. Незадовільна освітленість на робочому місці або на робочій зоні може бути причиною зниження продуктивності та якості праці, отримання травм. Недостатнє або надмірне освітлення викликає зоровий дискомфорт, що виражається у відчутті незручності або напруженості. Тривале перебування в умовах зорового дискомфорту призводить до розсіювання уваги, зменшення зосередженості, зоровій і загальній втомі.

У приміщенні обладнаному ПК з екранним пристроєм (далі – «ЕП»), згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» та ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення» передбачене природне та штучне освітлення.

Природне освітлення здійснено через світлові прорізи, які орієнтовані на південь і забезпечують коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5%. Для захисту від прямих сонячних променів, які створюють прямі та відбиті відблиски на поверхні екранів і клавіатури, передбачено сонцезахисні пристрої, на вікнах встановлені жалюзі.

6.4 Екологічна безпека

Екологічна безпека при експлуатації та автоматизації промислової нагрівальної газової печі є критично важливим складником загального інженерного проєкту, оскільки спалювання значних обсягів природного газу безпосередньо впливає на стан навколишнього природного середовища. Основним джерелом антропогенного навантаження на атмосферу в даному

технологічному процесі є димові гази, які за відсутності належного контролю містять токсичні компоненти, такі як оксиди азоту, монооксид вуглецю та мікрочастинки сажі.

Впровадження розробленої системи автоматичного регулювання контуру «паливо-повітря» на базі контролера Modicon M241 дозволяє радикально знизити екологічні ризики шляхом точного динамічного дозування компонентів горючої суміші.

Завдяки безперервному моніторингу витрат газу вихровим витратоміром Rosemount 8600D, мікропроцесорна система підтримує оптимальний коефіцієнт надлишку повітря, що забезпечує повне хімічне згоряння вуглеводнів та зводить до мінімуму генерацію чадного газу. Особливу роль в екологізації об'єкта відіграють обрані рекуперативні пальники Recumat M250, конструкція яких мінімізує локальні перегріви в зоні горіння і цим пригнічує механізм утворення термічних оксидів азоту.

Оскільки значна частина тепла відхідних газів повертається назад у технологічний цикл для підігріву дутьового повітря, загальне валове споживання природного газу печею знижується на двадцять п'ять відсотків, що пропорційно зменшує емісію парникового вуглекислого газу в атмосферу міста Запоріжжя. Додатковим чинником екологічної безпеки є автоматизація контролю тиску всередині камери печі за допомогою тягонапороміра ОВЕН ПД 150, що виключає аварійні викиди або неконтрольоване вибивання розпечених димових газів через нещільності робочої заслінки безпосередньо в простір цеху.

Програмні алгоритми ПЛК також забезпечують екологічний моніторинг тривалості роботи пальників та інтегровані з підсистемою протиаварійного захисту на базі блоків Kromschroder IFD 244, яка миттєво припиняє подачу палива при виявленні будь-яких відхилень у процесі факельного спалювання. Таким чином, перехід від застарілих методів ручного управління до сучасної цифрової САР дозволяє підприємству не лише досягти високих економічних показників, а й суворо дотримуватися вимог природоохоронного законодавства

України щодо обмеження викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних джерел.

Висновки. У даному розділі було проведено комплексний аналіз умов праці та розроблено конкретні технічні й організаційні заходи щодо забезпечення безпеки оператора при експлуатації нагрівальної газової печі відповідно до чинного законодавства України з охорони праці. Для надійного захисту персоналу від ураження електричним струмом було обґрунтовано та розраховано параметри захисного заземлення для шаф КВПіА, корпусів контролера Modicon M241 та силових електроприводів вентиляційних агрегатів згідно з вимогами ПУЕ. З метою нівелювання ризиків вибухо- та пожежонебезпеки, які є критичними для об'єктів газового господарства, було впроваджено автономну підсистему протиаварійного захисту на базі швидкодіючих клапанів ВН4М-1КЕ та блоків Kromschroder, яка миттєво відсікає подачу палива при згасанні факела або падінні тиску. Ергономічна організація робочого місця та розробка інтуїтивно зрозумілого Людино-машинного інтерфейсу на панелі Weintek MT-8071iE із чітким колірним кодуванням сигналів дозволили мінімізувати психофізіологічне й зорове навантаження на оператора та запобігти виникненню помилкових дій. Завдяки розрахунку ефективної припливно-витяжної вентиляції та застосуванню сучасної футеровки корпусу печі, параметри мікроклімату й рівень теплового випромінювання на робочих місцях було приведено у повну відповідність до жорстких вимог санітарних норм ДСН 3.3.6.042-99. Спроєктовані рішення доводять, що автоматизація теплових режимів дозволяє не лише підвищити економічну ефективність виробництва, а й кардинально покращити умови праці, замінити важку ручну працю машинною та повністю гарантувати безпеку обслуговчого персоналу.

7 ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

Метою даного розділу є оцінка економічної доцільності впровадження розробленої системи автоматичного регулювання (САР) тепловими режимами та витратою палива промислової нагрівальної газової печі. Модернізація передбачає перехід до сучасної архітектури промислової автоматизації на базі мікропроцесорного ПЛК Schneider Electric Modicon M241, сенсорної панелі Weintek MT-8071iE, високоефективних рекуперативних пальників Recumat M250 з блоками керування Kromschroder IFD 244, вихрових витратомірів Rosemount 8600D та сучасних засобів КВПіА.

Впровадження сучасної дворівневої системи автоматичного регулювання (САР) тепловими режимами та витратою палива на базі мікропроцесорного ПЛК Schneider Electric Modicon M241 та рекуперативних пальників Recumat M250 забезпечує комплексний позитивний ефект. Головні техніко-економічні переваги реалізації даного інженерного рішення поділяються на прямі (енергетичні) та непрямі (технологічні й експлуатаційні):

1. Пряма економія паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР).

Завдяки прецизійному безперервному контролю витрат газу за допомогою вихрового витратоміра Rosemount 8600D та автоматичному регулюванню співвідношення «паливо-повітря», забезпечується повне згоряння газу з мінімальним коефіцієнтом надлишку повітря (α). Це унеможливлює перевитрату палива на надлишкове прогрівання баластного повітря.

Використання пальників Recumat M250 із вбудованими індивідуальними теплообмінниками дозволяє утилізувати тепло димових газів безпосередньо на виході з печі, підігріваючи повітря для горіння. Це підвищує коефіцієнт використання палива (КВП) з традиційних 40 % до 85 %, забезпечуючи пряме зниження споживання природного газу на 25–30 %.

2. Підвищення технологічної ефективності та якості продукції.

Застосування ПІД-закону регулювання в ПЛК дозволяє підтримувати задану температуру в робочих зонах печі з точністю до ±5 °С у сталих режимах. Це гарантує рівномірне прогрівання масиву металевих виробів по всьому об'єму, що є критичним для подальших операцій кування, штампування або прокатки.

Точне підтримання тиску (розрідження) в камері печі в межах 10 - 30 Па запобігає підсмоктуванню холодного атмосферного повітря. Це мінімізує окислення поверхні металу (чад сталі) та суттєво зменшує утворення окалини, підвищуючи вихід придатного продукту та знижуючи витрати на подальшу механічну обробку.

3. Експлуатаційна надійність, безпека та пролонгація ресурсу обладнання.

Плавне регулювання положення дросельних клапанів ДХ за допомогою засобів частотного керування Lenze 8200 SMD виключає різкі температурні скачки (теплові удари) в робочій камері. Це значно подовжує термін служби вогнетривкої футеровки печі та пальникових каменів, знижуючи витрати на капітальні та поточні ремонти.

Інтеграція блоків Kromschroder IFD 244 та швидкодіючих клапанів BH4M-1KE забезпечує миттєве автономне відсікання газу при виникненні аварійних ситуацій (згасання факела, падіння тиску, відкриття заслінки), повністю нівелюючи ризик виробничого травматизму та руйнування агрегату.

4. Зниження екологічного податку.

За рахунок оптимізації хімізму горіння та використання передових технологій спалювання в пальниках Recumat, обсяг викидів шкідливих токсичних речовин (оксидів азоту NO_x та монооксиду вуглецю CO) в атмосферу знижується до практично нульових значень, що зменшує екологічні платежі підприємства.

Капітальні вкладення (К) складаються з вартості обладнання, допоміжних матеріалів, а також витрат на монтаж і пусконалагоджувальні роботи:

$$K = K_{обл} + K_{мат} + K_{монт}, \qquad (7.1)$$

Кошторис витрат на придбання обладнання та матеріалів наведено в табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Кошторис витрат на придбання обладнання та матеріалів

Найменування статті витрат / обладнання	К-сть, шт/комп.	Вартість, грн.
Логічний контролер ПЛК Modicon M241 із модулями вводу-виводу	1 комп.	95 000
Рекуперативні пальники Recumat M250 (з вбудованими рекуператорами)	2 шт.	420 000
Блоки управління пальниками Kromschroder IFD 244 та датчики полум'я	1 комп.	85 000
Вихровий витратомір газу Rosemount 8600D	1 шт.	110 000
Перетворювачі тиску ОВЕН ПД 150 та термопари ОВЕН ДТПХ з НВТ-3	1 комп.	55 000
Перетворювач частоти Lenze 8200 SMD (1.5 кВт) та клапани ВН4М, ДХ	1 комп.	120 000
Шафа КВПіА (IP54), комутаційне обладнання ПАЗ, ДБЖ, кабелі	1 комп.	65 000
Всього витрат на обладнання та матеріали (Кобл)	-	950 000
Проєктно-конструкторські роботи (10% від вартості Кобл)	-	95 000
Монтажні, шеф-монтажні та пусконалагоджувальні роботи (15% від Кобл)	-	142 500
ЗАГАЛЬНІ КАПІТАЛЬНІ ВКЛАДЕННЯ (К)		1 187 500

Сумарні капітальні вкладення в проект:

$$K = 1187500 \text{ грн.}$$

Розрахунок експлуатаційних витрат.

Експлуатаційні витрати до і після впровадження проекту включають амортизаційні відрахування, витрати на поточний ремонт та обслуговування. Для автоматизованих систем мікропроцесорного типу річні витрати на обслуговування значно менші через відсутність рухомих контактів і високу надійність.

Норма амортизації для засобів обчислювальної техніки та автоматики становить $N_a = 12\%$.

$$A = K \cdot \frac{N_a}{100\%} = 1187500 \cdot 0{,}12 = 142500 \ \frac{\text{грн.}}{\text{рік}}. \qquad (7.2)$$

Витрати на поточне обслуговування та ТР (Р).

Приймаються в розмірі 4% від капітальних вкладень:

$$P = 1255000 \cdot 0{,}04 = 47500 \ \frac{\text{грн.}}{\text{рік}}. \qquad (7.3)$$

Разом річні експлуатаційні витрати на систему САР ($C_{САР}$):

$$C_{САР} = 142500 + 47500 = 190000 \ \frac{\text{грн.}}{\text{рік}}. \qquad (7.4)$$

Розрахунок економічного ефекту.

Економічний ефект досягається за рахунок двох факторів:

Економія від впровадження рекуперативних пальників та оптимізації горіння ($\Delta C_{пал}$): Завдяки автоматичному регулюванню співвідношення «паливо-повітря» через ПЛК та підігріву повітря в пальниках Recumat M250, забезпечується пряме зниження витрати природного газу. При річному обсязі споживання газу печчю до модернізації на рівні 65000 м^3/ рік, забезпечується

економія палива у розмірі не менше 25 %. При промисловому тарифі на газ у 19,50 грн./м^3, чистий грошовий ефект становить:

$$\Delta C_{пал} = 65000 \cdot 0{,}25 \cdot 19{,}50 = 316875 \text{ грн./рік.} \quad (7.5)$$

Технологічний ефект та зниження браку металу ($\Delta C_{техн}$): прецизійне підтримання температурного графіка (± 5 °C) ПІД-регулятором та стабілізація тиску в камері мінімізують утворення окалини, унеможливлюють недогрів або перепал сталі перед куванням/прокаткою. Експертна оцінка цеху щодо зменшення технологічного браку та уникнення аварійних зупинів печі становить:

$$\Delta C_{техн} = 220000 \text{ грн./рік.}$$

Загальна річна економія від впровадження ($\Delta C_{заг}$):

$$\Delta C_{заг} = 316875 + 220000 = 536875 \text{ грн./рік.}$$

Чистий річний економічний ефект (прибуток) системи (Е): Розраховується як різниця між загальною економією та експлуатаційними витратами на утримання автоматики:

$$Е = 536875 - 190000 = 346875 \text{ грн./рік.}$$

Розрахунок показників ефективності інвестицій.

Термін окупності проекту ($Т_{ок}$) показує час, за який капітальні вкладення повністю повернуться за рахунок генерованого чистого прибутку:

$$Т_{ок} = \frac{К}{П} = \frac{1187500}{376875} = 3{,}42 \text{ років.} \quad (7.7)$$

Коефіцієнт економічної ефективності (Е):

$$E = \frac{E_{вод}}{К} = \frac{346875}{1187500} = 0{,}292 \quad (7.8)$$

Отримане значення E = 0,292 перевищує нормативний коефіцієнт ефективності для галузі відновлюваної енергетики та автоматизації ($E_н$ = 0,15), що свідчить про доцільність капіталовкладень.

Висновок. Проведені техніко-економічні розрахунки повністю підтвердили високу фінансову та експлуатаційну спроможність модернізації нагрівальної печі

При загальних капітальних витратах у розмірі 1187500 грн. на придбання та монтаж передового комплексу технічних засобів на базі ПЛК Modicon M241, рекуперативних пальників Recumat M250 та інтелектуальних датчиків КВПіА, чистий річний економічний ефект становить 346875 грн. Проєкт повністю окупається за 3,42 роки (що повністю вкладається в прогнозовані експертами 2–4 роки, зазначені у вступі). Розрахований коефіцієнт ефективності інвестицій (0,292) суттєво перевищує нормативний, що доводить економічну раціональність та високу доцільність реалізації даного інженерного проєкту.

ВИСНОВКИ

У даному дипломному (науково-дослідному) проєкті було розроблено, математично змодельовано та техніко-економічно обґрунтовано сучасну високоефективну систему автоматичного регулювання (САР) тепловими режимами та витратою палива промислової нагрівальної газової печі моделі.

За результатами виконання роботи було отримано такі основні науково-технічні та практичні результати:

1. Виконано детальний аналіз нагрівальної газової печі як складного, нелінійного об'єкта керування з розподіленими параметрами та транспортним запізненням. Визначено основні канали передачі керуючих впливів («витрата газу $\rightarrow$ температура в робочому просторі печі») та канали збурень, що дозволило сформувати чітке технічне завдання на автоматизацію.

2. Сформульовано комплекс функціональних вимог до створюваної САР. Визначено жорсткі технологічні межі регулювання параметрів: точність підтримання температури в межах ±5 °C у сталому режимі, оптимізація коефіцієнта надлишку повітря для повноти згоряння палива, а також підтримання надлишкового тиску в камері печі в діапазоні 10 – 30 Па для запобігання підсмоктуванню холодного повітря.

3. Побудовано математичну модель теплового процесу у вигляді динамічної системи третього порядку із запізненням, яка враховує інерційність горіння пальникової системи (T_1 = 10 с), теплоємність камери печі (T_2 = 100 с) та інерцію захисного кожуха термопари (T_3 = 2 с). Проведене в середовищі GNU Octave моделювання та аналіз полюсів замкненої системи підтвердили її асимптотичну стійкість та затухаючий коливальний характер перехідного процесу, що обґрунтувало доцільність застосування класичного ПІД-закону регулювання.

4. Обґрунтовано та обрано комплекс технічних засобів (КТЗ) автоматизації на основі передової елементної бази. Систему побудовано на базі

високопродуктивного мікропроцесорного ПЛК Schneider Electric Modicon M241 та сенсорної операторської панелі Weintek MT-8071iE, об'єднаних через промислову мережу Industrial Ethernet (Modbus TCP) у єдиному інженерному середовищі EcoStruxure Machine Expert. Польовий рівень укомплектовано прецизійними вихровими витратомірами Rosemount 8600D, інтелектуальними тягонапоромірами ОВЕН ПД 150 та термопарами ОВЕН ДТПХ з нормуючими перетворювачами (4 – 20 мА).

5. Розроблено надійну підсистему протиаварійного захисту (ПАЗ) та безпеки, яка функціонує на базі блоків керування пальниками Kromschroder IFD 244, датчиків-реле тиску серії DG та швидкодіючих вибухозахищених клапанів ВН4М-1КЕ. Забезпечено миттєве автономне перекриття подачі газу в разі виникнення будь-яких критичних ситуацій (згасання факела, падіння тиску газу/повітря, відкриття завантажувальної заслінки), що мінімізує виробничий травматизм.

6. Впроваджено високоефективну енергозберігаючу технологію спалювання палива за рахунок інтеграції сучасних рекуперативних пальників Recumat M250. Завдяки утилізації тепла димових газів для підігріву повітря на горіння, коефіцієнт використання палива (КВП) печі збільшено з традиційних 40 % до 85 %

7. Проведені техніко-економічні розрахунки повністю підтвердили високу фінансову доцільність модернізації. При сумарних капітальних інвестиціях у розмірі 1187500 грн. на повне переоснащення печі, очікуваний чистий річний економічний ефект (прибуток) за рахунок економії газу та зниження технологічного браку металу становить 346875 грн. Проєкт характеризується високою ефективністю капіталовкладень (коефіцієнт ефективності E = 0,292 при нормативному 0,15) та коротким терміном окупності, який становить 3,42 роки.

Таким чином, розроблена система автоматизації є цілісним, технічно зрілим, безпечним та економічно вигідним інженерним рішенням, яке повністю відповідає сучасним вимогам курсу на енергомодернізацію промислового комплексу України та впровадження кіберфізичних систем керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Конституція України : офіц. текст. Київ : КМ, 2013. 96 с.

2. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 р. № 2694-XII Голос України. 2017. 27 верес. (№ 178-179). С. 10–22.

3. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. Вид. офіц. Київ. 1998. 45 с. (Інформація та документація).

4. 90/270/ЄЕС. Про мінімальні вимоги безпеки та здоров'я при роботі з екранними пристроями. [Чинний від 1990-05-29]. Брюссель. : Рада Європейських співтовариств, 1990. 14 с.

5. ПУЕ-2021. Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86; чинний з 2021-01-01]. К. : Міненерговугілля України, 2021. 617 с. (Інформація та документація).

6. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с. (Інформація та документація).

7. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок [Чинний від 2002-01-01]. Київ : Мінпраці України, 2001. 45 с. (Інформація та документація).

8. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. [Чинний від 2014-12-30]. Київ : МВС України, 2014. 91 с. (Інформація та документація).

9. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. [Чинний з 1997-10-06]. Київ : Держнаглядохоронпраці, 1997. 97 с. (Інформація та документація).

10. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. [Чинний з 1998-01-09]. Київ : Мінпраці України, 1998. 89 с. (Інформація та документація).

11. НПАОП 0.00-7.15-18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров’я працівників під час роботи з екранними пристроям. [Чинний від 2018-05-18]. Київ : Мінсоцполітики України, 2018. 6 с. (Інформація та документація).

12. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. [Чинний з 2019-03-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 133 с. (Інформація та документація).

13. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Чинний від 1999-12-01]. Київ : МОЗ України, 1999. 106 с. (Інформація та документація).

14. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с. (Інформація та документація).

15. ДСТУ EN 2:2014. Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT). [Чинний з 01.01.2016]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 7 с. (Інформація та документація).

16. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [Чинний від 2017-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. 66 с. (Інформація та документація).

17. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Київ : Мінрегіон України, 2017. 47 с. (Інформація та документація).

18. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. [Чинний від 2015-07-01]. Київ : Мінрегіон України, 2014. 191 с. (Інформація та документація).

19. Правила експлуатації та типових норм належності вогнегасників. [Чинний від 2018-02-23]. Київ : МВС України, 2018. 23 с. (Інформація та документація).

20. Авраменко В. С., Авраменко А. С. Проектування інформаційних систем : навч. посібник. Черкаси : ЧНУ ім. Б. Хмельницького, 2017. 434 с.

21. Автоматизированные системы управления технологическими процессами: справочник/ Под ред. Тимофеева Б.Б. Киев : Техника, 1983. 351 с.

22. Вимоги до ергономіки та технічної естетики. URL: http://wikipage.com.ua/1x400f.html (дата звернення: 13.02.2024).

23. Вимоги до системи. URL: https://mydocx.ru/2-120435.html (дата звернення: 13.11.2022).

24. Будник А. Ф. Типове обладнання термічних цехів та дільниць: навч. посіб. : Суми, СумДУ, 2008. 212 с.

25. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник вид. 5-те, доп. К. : Знання, 2014. 373 с.

26. Збірник наукових праць студентів, аспірантів і молодих вчених «Молода наука – 2020» : у 5 т. / Запорізький національний університет. – Запоріжжя : ЗНУ, 2020. Т.5. 280 с.

27. Зінченко Ю. М., Барішенко О. М. Теорія автоматичного управління : навч. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2010. 35 с.

28. Ніколаєнко А. М. Технічні засоби автоматизації. Цифрові регулятори : навч. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2009. 84 с.

29. 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.

30. 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.

31. Металургійна теплотехніка : збірник наукових праць Національної металургійної академії України. Дніпро : «ПП Грек О.С.», 2020. 364 с.

32. Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Розрахунок ректифікаційної установки періодичної дії. Проектування насадкової колони.» з курсу «Процеси та апарати хімічних виробництв» для студентів III–IV курсів; уклад. В. М. Задорожній, В. І. Зражевський, С. О. Опарін. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2010. 38 с.

33. Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації: методичні вказівки до курсового проекту для студентів спеціальності 151 «Автоматизація так комп'ютерно-інтегровані технології» / ред. А. М. Ніколаєнко. Запоріжжя : ЗДІА, 2016. 34 с.

34. Мочалін В. Н., Кочнев Н. В. Моделювання та дослідження систем автотичних управління з використанням ПЕОМ : нав. посіб. Череповець : ЧГІІ, 2005. 178 с.

35. Ткачук К. Н., Халімовський М. О., Зацарний В. В., Зеркалов Д. В., Сабарно Р. В., Полукаров О. І., Коз'яков В. С., Мітюк Л. О. Основи охорони праці : підручник. 2-ге вид. Київ: Основа, 2006. 448 с.

36. Основи проектування систем автоматизації з елементами САПР : метод. вказ. до практ. зан. / уклад. В.Г. Трегуб. Київ : НУХТ, 2008. 67 с.

37. Ніколаєнко А.М. Програмування ПЛК у Softlogic-системі. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 203с.

38. Солодовников В.В., Коньков В.Г. Мікропроцесорні автоматичні системи регулювання. Київ: Вища школа, 2021. 255 с.

39. Полянський Г.О. Методичні вказання к розрахунку надійності систем автоматизованого керування. Запоріжжя : ЗДІА, 2003. 24с.

40. Проектування систем керування : конспект лекцій для студентів спеціальності «Автоматизоване управління технологічними процесами»; уклад. М. З. Кваско, Я. Ю. Жураковський, А. І. Жученко, В. В. Миленький, Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 279 с.

41. Промислові мікропроцесорні мережі. URL: http://um.co.ua/8/8-11/8-110801.html (дата звернення: 15.02.2026).

42. Рішан О. Й. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади: Курс лекцій для студентів спеціальностей: 7.092501 «Автоматизоване управління технологічними процесами» та 7.092502 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва» ден. та заочн. форм. навчан. Київ : НУХТ, 2007. 162 с.

43. Трегуб В. Г. Проектування, монтаж та експлуатація систем автоматизації : навч. посіб. Київ : НМКВО, 2015. 80 с.

44. Емпіріко-теотетичні методи дослідження систем управління. URL: http://examen.od.ua/upravlen/page117.html (дата звернення 22.02.26).

45. Інформаційні технології в металургії. URL: it.edu.ua/news/16-05- 2025-informatsijni-tekhnologiji-v-metalurgiji-ta-mashinobuduvanni-itmm-2025 (дата звернення 15.06.26).

46. Металургійні підприємства України. URL: http://www.steeltorg.com.ua/mp/mp_27.php (дата звернення 20.05.26).

47. Вимоги до системи. URL: https://mydocx.ru/2-120435.html (дата звернення: 13.03.2026).

48. Електрична піч опору. Матеріал з Вікіпедії – вільної енциклопедії: URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Електрична_піч_опору (дата звернення 13.05.2026).

49. Rothman, L.S. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database / L.S. Rothman, I.E. Gordon, R.J. Barber, H. Dothe, R.R. Gamache, A. Goldman, V.I. Perevalov, S.A. Tashkun, J. Tennyson // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. –2015. –Vol. 111. –pp. 2139-2150.

50. Каталог продукції Овен - [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://owen.ua/uploads/92/catalog_2018-2019.pdf (дата звернення 13.05.2026).

51. Відомість про Термоелектричні перетворювачі ТППУ/1-0679-ПП - [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: http://www.teploautomatica.ru/sites/default/files/device_files/rukovodstvo_po_ekspluatacii.pdf

52. Відомість про Давач тиску Aplisens PC-28 I - [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://aplisens.com.ua/data/pdfs/PC-28.pdf 11) Відомість про Давач тиску Aplisens PC-50 I - [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://aplisens.com.ua/data/pdfs/PC-50.pdf . (дата звернення 16.06.2026).