

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний економічний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

Чіжов Роман

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВІМ РЕЖИМОМ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ / DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR
AUTOMATIC CONTROL OF THE THERMAL REGIME OF A GLASS
FURNACE

спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
фахове спрямування – Комп'ютеризовані системи управління та автоматика
Дипломна робота за освітньо-кваліфікаційним рівнем "бакалавр"

Виконав студент групи АКІТ-41
Чіжов Р.

Науковий керівник:
к.т.н., Гуменний П.В.

Кваліфікаційну роботу допущено до захисту:
«___» _____ 20__ р.

Завідувач кафедри
_____ А. І. Сегін

Тернопіль 2026

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"
спеціальність: 151 – Автоматизація такомп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін

“ _____ ” _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Чіжову Роману

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Розробка системи автоматичного керування тепловим режимом скловарної печі /

Development of a system for automatic control of the thermal regime of a glass furnace

затверджені наказом по університету від 1 грудня 2025р. №894

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи 25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Аналіз процесу скловаріння та теплового режиму печі.

1.1. Основні параметри теплового режиму та фактори впливу.

1.2. Аналіз існуючих систем автоматичного керування.

2. Розробка системи автоматичного керування.

2.1. Вибір структури та технічних засобів системи.

2.2. Розробка функціональної схеми автоматизації.

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Провести аналіз технологічного процесу скловаріння та особливостей функціонування скловарних печей.
2. Дослідити сучасні методи автоматичного керування тепловими режимами промислових печей та визначити вимоги до системи керування.
3. Виконати аналіз конструкції скловарної печі як об'єкта автоматизації та визначити основні параметри керування і регулювання.
4. Розробити структуру системи автоматичного керування тепловим режимом скловарної печі та обґрунтувати вибір технічних засобів автоматизації.

5. Розробити алгоритм функціонування системи автоматичного керування температурним режимом скловарної печі.
6. Оцінити ефективність розробленої системи автоматичного керування та визначити шляхи підвищення якості регулювання температурного режиму.

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Функціональна схема скловарної печі

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
2	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
3	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 1 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ СКЛОВАРІННЯ ТА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ ПЕЧІ	01.12.2025-15.01.2026	виконано
2	РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	16.01.2026-15.03.2026	виконано
3	МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ	16.03.2026-30.04.2026	виконано
4.	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату	1.05.2026-25.05.2026	виконано

Студент

Роман Чіжов

(підпис)

Керівник роботи

_____ к.т.н., доц. Петро ГУМЕННИЙ

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Чіжов Р. Розробка системи автоматичного керування тепловим режимом скловарної печі. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 151 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Західноукраїнський національний університет. Тернопіль, 2026.

У роботі розроблено систему автоматичного керування тепловим режимом скловарної печі. Досліджено технологічні особливості процесу скловаріння та принципи підтримання необхідного температурного режиму в робочому просторі печі. Проаналізовано сучасні методи автоматичного регулювання температури та обґрунтовано вибір PID-регулятора для забезпечення стабільної роботи системи. Розроблено структурну та функціональну схеми автоматизованої системи керування, виконано моделювання процесу регулювання температури та оцінено показники якості керування. Отримані результати підтверджують ефективність впровадження автоматичного керування для підвищення стабільності технологічного процесу, зниження енергоспоживання та покращення якості готової продукції.

ABSTRACT

Chizhov R. Development of a System for Automatic Control of the Thermal Regime of a Glass Furnace. – Manuscript.

Research for the Bachelor's degree in specialty 151 "Automation, Computer-Integrated Technologies", educational and professional program "Automation and Computer-Integrated Technologies" – West Ukrainian National University. Ternopil, 2026.

The study presents the development of an automatic control system for the thermal regime of a glass furnace. The technological features of the glass melting process and the principles of maintaining the required temperature conditions in the furnace working space are investigated. Modern methods of automatic temperature control are analyzed, and the use of a PID controller for ensuring stable system operation is substantiated. Structural and functional diagrams of the automated control system are developed, simulation of the temperature control process is performed, and control quality indicators are evaluated. The obtained results confirm the effectiveness of implementing automatic control to improve process stability, reduce energy consumption, and enhance the quality of finished glass products.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ СКЛОВАРІННЯ ТА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ ПЕЧІ.....	2
1.1 Особливості процесу скловаріння та роботи скловарної печі.....	2
1.2 Основні параметри теплового режиму та фактори впливу.....	8
1.3 Аналіз існуючих систем автоматичного керування.....	15
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	21
2.1 Вибір структури та технічних засобів системи.....	21
2.2 Розробка функціональної схеми автоматизації.....	26
2.3 Опис алгоритму роботи системи керування.....	30
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ.....	38
3.1 Математична модель теплового об'єкта.....	38
3.2 Розрахунок і налаштування регулятора.....	42
3.3 Аналіз ефективності роботи системи.....	48
Висновки	59
Список використаних джерел.....	62
ДОДАТОК А	1

					ДП.АКІТ1138779		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка системи автоматичного керування тепловим режимом скловарної печі Літ. Арк. Акрушів 4 ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-42/1		
Розроб.		Чіжов					
Перевір.		Гуменний П.В.					
Консульт.							
Н. Контр.		Заставний О.					
Затверд.		Сегін А.І.					

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АСУ - автоматизована система управління

АСУТП - автоматизована система управління технологічним процесом

ПІД-регулятор - пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

PLC - програмований логічний контролер

SCADA - система диспетчерського контролю та збору даних

t - час, с

T - температура, °C

Q - теплова енергія, Дж

P - потужність, Вт

η - коефіцієнт корисної дії

ΔT - зміна температури, °C

τ - постійна часу об'єкта, с

u(t) - керуючий вплив

y(t) - вихідний параметр системи

k - коефіцієнт передачі

S - площа теплообміну, м²

V - об'єм, м³

ρ - густина, кг/м³

c - питома теплоємність, Дж/(кг·K)

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Скловарна піч є складним теплотехнічним об'єктом із високою енергоємністю та значною тепловою інерційністю, у якому процеси плавлення шихти, горіння палива та теплообміну відбуваються в умовах високих температур і тривалих перехідних процесів. Якість отриманого скла значною мірою залежить від стабільності температурного режиму, тому його автоматичне регулювання є важливою умовою ефективного функціонування виробництва.

Актуальність теми обумовлена необхідністю підвищення точності та стабільності регулювання теплових режимів промислових печей в умовах зростання вимог до якості скловиробів і енергоефективності технологічних процесів. Традиційні методи ручного або напівавтоматичного керування не забезпечують достатньої точності підтримання температури, що призводить до перевитрат палива, зниження якості продукції та підвищення ймовірності технологічних відхилень. Використання сучасних систем автоматичного керування дозволяє підвищити стабільність процесу, зменшити вплив зовнішніх збурень і оптимізувати енергоспоживання.

Метою дипломної роботи є розробка та дослідження системи автоматичного керування тепловим режимом скловарної печі, яка забезпечує стабільне підтримання заданої температури, підвищення якості регулювання та енергоефективності технологічного процесу.

Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати технологічні особливості скловарної печі як об'єкта керування;
- розробити математичну модель теплового процесу;
- визначити динамічні характеристики об'єкта;
- обґрунтувати вибір типу регулятора;
- виконати розрахунок і налаштування ПІД-регулятора;

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						1
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- провести комп'ютерне моделювання системи;
- оцінити якість перехідних процесів;
- дослідити ефективність та енергоефективність системи.

Об'єктом дослідження є процес автоматичного керування тепловим режимом скловарної печі.

Предметом дослідження є математичні моделі, алгоритми та методи автоматичного регулювання температури скловарної печі із застосуванням ПІД-регулятора.

Методи дослідження

У роботі використано:

- методи математичного моделювання теплових процесів;
- методи теорії автоматичного керування;
- перетворення Лапласа;
- методи синтезу та налаштування ПІД-регуляторів;
- комп'ютерне моделювання (MATLAB/Simulink);
- аналіз перехідних процесів і критеріїв якості регулювання.

Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження розробленої системи автоматичного керування для підвищення стабільності температурного режиму скловарних печей, зменшення витрат енергоносіїв, покращення якості скломаси та підвищення загальної ефективності виробничого процесу.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ СКЛОВАРІННЯ ТА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ ПЕЧІ

1.1 Особливості процесу скловаріння та роботи скловарної печі

Скловаріння є складним багатостадійним технологічним процесом, у результаті якого із суміші сировинних матеріалів утворюється однорідна скломаса із заданими фізико-хімічними властивостями. Скло належить до аморфних матеріалів, які утворюються внаслідок охолодження розплаву без кристалізації та характеризуються високою прозорістю, хімічною стійкістю і

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

механічною міцністю. Завдяки своїм властивостям скло широко застосовується у будівництві, машинобудуванні, електроніці, хімічній промисловості та виробництві побутових виробів [1].

До основних компонентів шихти належать кварцовий пісок, сода, вапняк, доломіт та різні технологічні добавки, склад яких визначається видом готової продукції та вимогами до її характеристик. Кварцовий пісок є головним джерелом діоксиду кремнію, що формує основу структури скла. Сода використовується для зниження температури плавлення шихти та полегшення процесу скловаріння, а вапняк і доломіт забезпечують підвищення механічної міцності, термостійкості та хімічної стійкості готової продукції. До складу шихти також можуть входити барвники, освітлювачі, прискорювачі плавлення та інші спеціальні добавки, що впливають на властивості скла та технологічний процес його виробництва [2].

Якість сировинних матеріалів має суттєвий вплив на характеристики готової продукції та стабільність технологічного процесу. Наявність сторонніх домішок у кварцовому піску або порушення співвідношення компонентів шихти можуть призводити до утворення дефектів, погіршення прозорості скла та зміни його фізико-механічних характеристик. Тому перед подачею у піч сировинні матеріали проходять попередню підготовку, яка включає сушіння, подрібнення, дозування та ретельне змішування компонентів [3].

Процес скловаріння здійснюється у спеціальних теплотехнічних агрегатах - скловарних печах(рис.1.1), які забезпечують нагрівання шихти до високих температур, необхідних для плавлення матеріалів та утворення рідкої скломаси. Температура у робочому просторі печі залежно від типу скла та технологічного режиму може досягати 1400-1600°C. Саме високотемпературний режим забезпечує протікання фізико-хімічних реакцій, плавлення компонентів шихти та утворення однорідної скломаси [4].

У промисловості найбільшого поширення набули ванні скловарні печі безперервної дії, які характеризуються високою продуктивністю,

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стабільністю технологічного процесу та можливістю тривалої роботи без зупинки. Такі печі мають значний об'єм робочої ванни, у якій відбуваються процеси плавлення, освітлення та гомогенізації скломаси. Безперервний режим роботи дозволяє забезпечити рівномірність температурного поля та стабільну якість продукції.

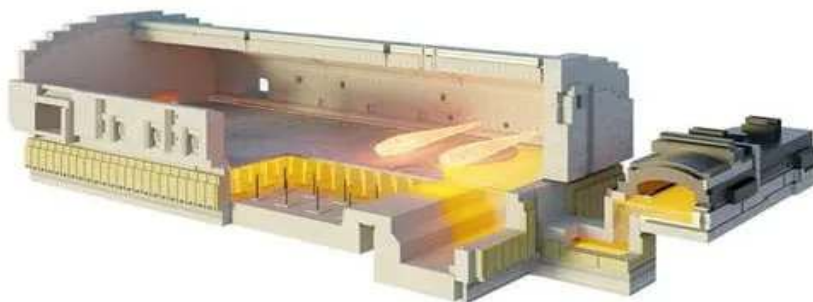


Рисунок 1.1 -3Dмодель скловарної печі

За конструктивними особливостями та способом нагрівання скловарні печі поділяються на полум'яні, електричні та комбіновані. Найбільш поширеними у промисловості є полум'яні регенеративні печі, у яких теплота відпрацьованих газів використовується для попереднього підігріву повітря, необхідного для процесу горіння. Це дозволяє суттєво знизити витрати палива та підвищити енергоефективність виробництва.

Основними етапами процесу скловаріння є нагрівання шихти, плавлення компонентів, освітлення скломаси, гомогенізація та охолодження до необхідної температури формування виробів. На початковому етапі відбувається нагрівання шихти та видалення вологи. Під час плавлення утворюється рідка скломаса, у якій поступово розчиняються тверді

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

компоненти. На стадії освітлення зі скломаси видаляються газові включення та бульбашки, що можуть негативно впливати на якість готової продукції.

Гомогенізація забезпечує вирівнювання температури та хімічного складу скломаси по всьому об'єму печі. Після цього скломаса охолоджується до температури, необхідної для подальшого формування виробів. Саме стабільність температурного режиму на кожному етапі виробництва визначає якість готового скла та ефективність технологічного процесу[5].

Для забезпечення якісного перебігу процесів скловаріння необхідно підтримувати стабільний температурний режим у різних зонах печі. Недостатня температура призводить до неповного плавлення компонентів шихти, підвищення в'язкості скломаси та утворення дефектів у готовій продукції. Надмірне перегрівання спричиняє підвищення енергетичних витрат, прискорене зношення футерівки печі та збільшення втрат тепла.

Скловарна піч є складним об'єктом автоматизації, для якого характерні значна теплова інерційність, наявність внутрішніх збурень та взаємозв'язок між окремими технологічними параметрами. Значна теплова інерційність обумовлена великою масою скломаси та конструктивних елементів печі. Через це реакція температурного режиму на зміну подачі палива відбувається із певним запізненням.

Основним регульованим параметром у процесі роботи печі є температура скломаси та газового середовища у робочому просторі печі. Температура безпосередньо впливає на в'язкість скломаси, швидкість протікання фізико-хімічних реакцій та якість готового скла. При порушенні температурного режиму можуть виникати дефекти поверхні скла, неоднорідність структури та погіршення механічних властивостей продукції.

Важливу роль у роботі скловарної печі відіграє процес горіння палива. Для забезпечення ефективного теплообміну необхідно підтримувати оптимальне співвідношення палива та повітря. Недостатня кількість повітря призводить до неповного згоряння палива та зниження ефективності процесу, тоді як надлишок повітря спричиняє додаткові теплові втрати.

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У сучасних умовах виробництва до систем керування скловарними печами висуваються підвищені вимоги щодо точності підтримання температури, надійності роботи та енергоефективності. Тому використання автоматизованих систем керування дозволяє забезпечити стабільність технологічного процесу, зменшити витрати палива та підвищити якість продукції.

Для контролю та регулювання теплового режиму застосовуються датчики температури, регулятори, виконавчі механізми та програмовані логічні контролери. Найбільш поширеними датчиками температури є термопари типу К, S та R, які забезпечують вимірювання високих температур та характеризуються достатньою точністю і надійністю.

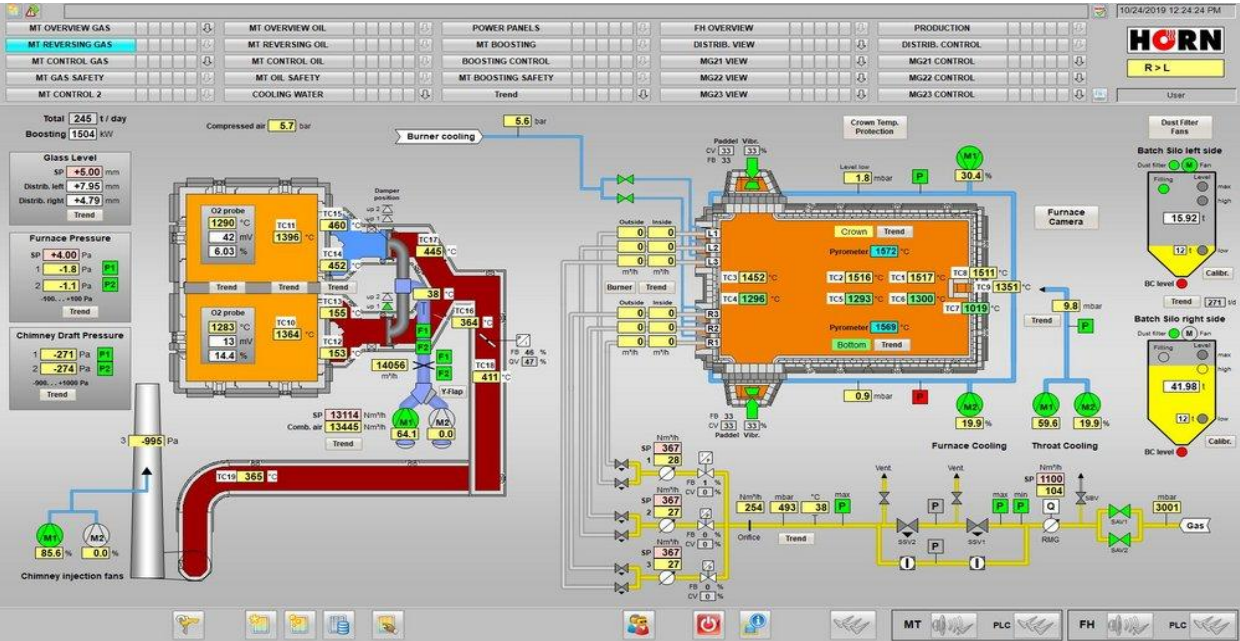
У сучасних системах автоматизації широко використовуються ПІД-регулятори, які забезпечують автоматичне підтримання температурного режиму шляхом зміни подачі палива та повітря. Використання ПІД-регулювання дозволяє зменшити похибку регулювання та підвищити стабільність роботи системи. Однак через значну теплову інерційність печі налаштування параметрів регулятора потребує ретельного аналізу характеристик об'єкта керування.

Важливим елементом сучасних автоматизованих систем є програмовані логічні контролери (PLC) та SCADA-системи. PLC-контролери забезпечують збір та обробку інформації від датчиків, реалізацію алгоритмів керування та формування сигналів для виконавчих механізмів. SCADA-системи виконують функції диспетчерського контролю, візуалізації параметрів процесу, архівування даних та формування аварійних повідомлень, які відображені на рисунку 1.2.

Одним із сучасних напрямків розвитку скловарного виробництва є впровадження енергоощадних технологій та інтелектуальних систем автоматичного керування. Для зниження енергоспоживання використовуються системи рекуперації тепла, оптимізація процесу горіння та автоматичне регулювання режимів роботи обладнання. Інтелектуальні

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системи керування дозволяють прогнозувати зміну температурного режиму



та автоматично адаптувати параметри регулювання залежно від умов роботи печі.

Рисунок 1.2 - Візуалізація параметрів теплового режиму у SCADA-системі

Значна увага приділяється також екологічним аспектам роботи скловарних печей. У процесі спалювання палива утворюються оксиди азоту, вуглецю та інші шкідливі речовини. Для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище застосовуються системи очищення димових газів, сучасні пальникові пристрої та автоматичний контроль процесу горіння.

Надійність роботи скловарної печі значною мірою залежить від стану футерівки та вогнетривких матеріалів. Високі температури та агресивне середовище поступово призводять до руйнування конструктивних елементів печі. Тому система автоматичного керування повинна забезпечувати недопущення аварійних перегрівів та контроль допустимих температурних режимів.

Таким чином, процес скловаріння потребує ефективного автоматичного керування тепловими режимами, що забезпечує стабільність роботи обладнання, економію енергетичних ресурсів та отримання продукції високої

якості. Використання сучасних засобів автоматизації, програмованих контролерів та систем диспетчерського контролю дозволяє підвищити ефективність виробництва, зменшити витрати палива та забезпечити безпечну експлуатацію технологічного обладнання.

1.2 Основні параметри теплового режиму та фактори впливу

Тепловий режим скловарної печі є одним із найважливіших параметрів технологічного процесу скловаріння, оскільки саме від стабільності температурних умов залежить якість скломаси, продуктивність обладнання та ефективність використання енергетичних ресурсів. Під тепловим режимом розуміють сукупність температурних параметрів, умов теплообміну та характеристик процесу горіння, які забезпечують нормальне протікання процесів плавлення, освітлення, гомогенізації та підготовки скломаси до формування виробів. Правильно організований тепловий режим дозволяє підтримувати необхідні фізико-хімічні властивості скломаси, зменшувати втрати тепла та забезпечувати стабільність технологічного процесу.

Скловарна піч працює в умовах високих температур і безперервного теплового навантаження, тому підтримання стабільного температурного режиму є основною умовою її ефективної роботи. Порушення теплового балансу може призводити до погіршення фізико-хімічних властивостей скла, збільшення витрат палива та зниження продуктивності технологічної лінії. Саме тому процес регулювання температури у скловарних печах має велике значення для сучасного виробництва скла та є одним із ключових напрямків автоматизації теплотехнічних процесів [6].

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

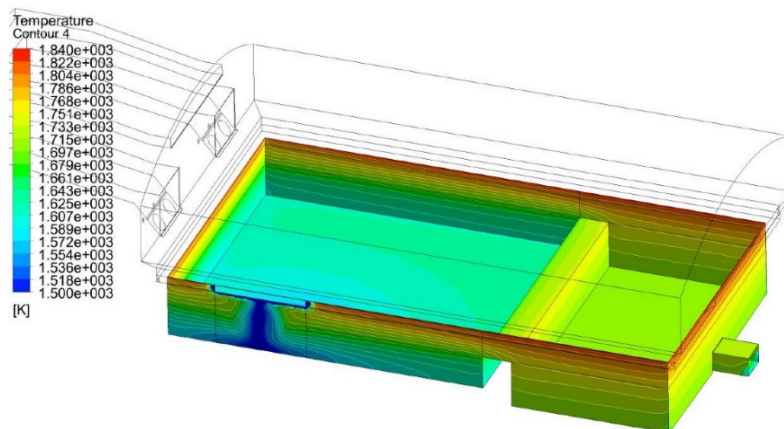


Рисунок 1.3 -Розподіл температур у скловарній печі

Основним параметром теплового режиму є температура у робочому просторі печі та температура скломаси, розподіл якої показано на рисунку 1.3. Для різних типів скла технологічні температури можуть змінюватися у широких межах залежно від складу шихти та вимог до готової продукції. У більшості випадків процес скловаріння здійснюється при температурах від 1400 °С до 1600 °С. Для виробництва спеціальних видів скла температура може бути ще вищою, що обумовлено особливостями хімічного складу та вимогами до фізичних властивостей продукції. Підтримання заданого температурного режиму необхідне для забезпечення повного плавлення шихти, інтенсивного протікання хімічних реакцій та отримання однорідної структури скломаси [7].

У процесі роботи печі температура повинна бути не лише достатньо високою, але й стабільною протягом тривалого часу. Навіть незначні відхилення температури можуть впливати на в'язкість скломаси та змінювати швидкість перебігу фізико-хімічних процесів. При недостатньому нагріванні можливе неповне плавлення компонентів шихти, утворення твердих включень та неоднорідностей у склі. Надмірне підвищення температури призводить до перевитрати енергоресурсів, посиленого зношення футерівки та скорочення терміну служби печі. Крім того, різкі температурні коливання можуть спричиняти появу внутрішніх напружень у склі, що негативно впливає на його механічну міцність та експлуатаційні характеристики.

Важливим параметром теплового режиму є рівномірність розподілу температури в різних зонах печі. У робочому просторі скловарної печі виділяють зони нагрівання, плавлення, освітлення та охолодження скломаси, кожна з яких повинна підтримувати відповідний температурний режим. У зоні нагрівання відбувається поступове підвищення температури шихти та видалення вологи, у зоні плавлення - утворення рідкої скломаси, а в зоні освітлення - видалення газових включень та вирівнювання складу скломаси. Нерівномірний нагрів може призводити до локального перегрівання або недостатнього прогріву матеріалу, що негативно впливає на якість готової продукції. Значні температурні коливання спричиняють утворення дефектів у склі, збільшення в'язкості скломаси, появу бульбашок і порушення технологічного процесу.

Одним із найважливіших факторів, що впливають на тепловий режим печі, є склад і якість шихти. Співвідношення кварцового піску, соди, вапняку та інших компонентів визначає температуру плавлення суміші та швидкість утворення рідкої скломаси. Наявність домішок або відхилення від встановленої рецептури можуть призводити до зміни теплових характеристик процесу та погіршення якості скла. Вологість сировини також має значний вплив на тепловий баланс печі, оскільки частина теплової енергії витрачається на випаровування вологи. Підвищена вологість шихти збільшує витрати палива та знижує енергоефективність виробництва [8].

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

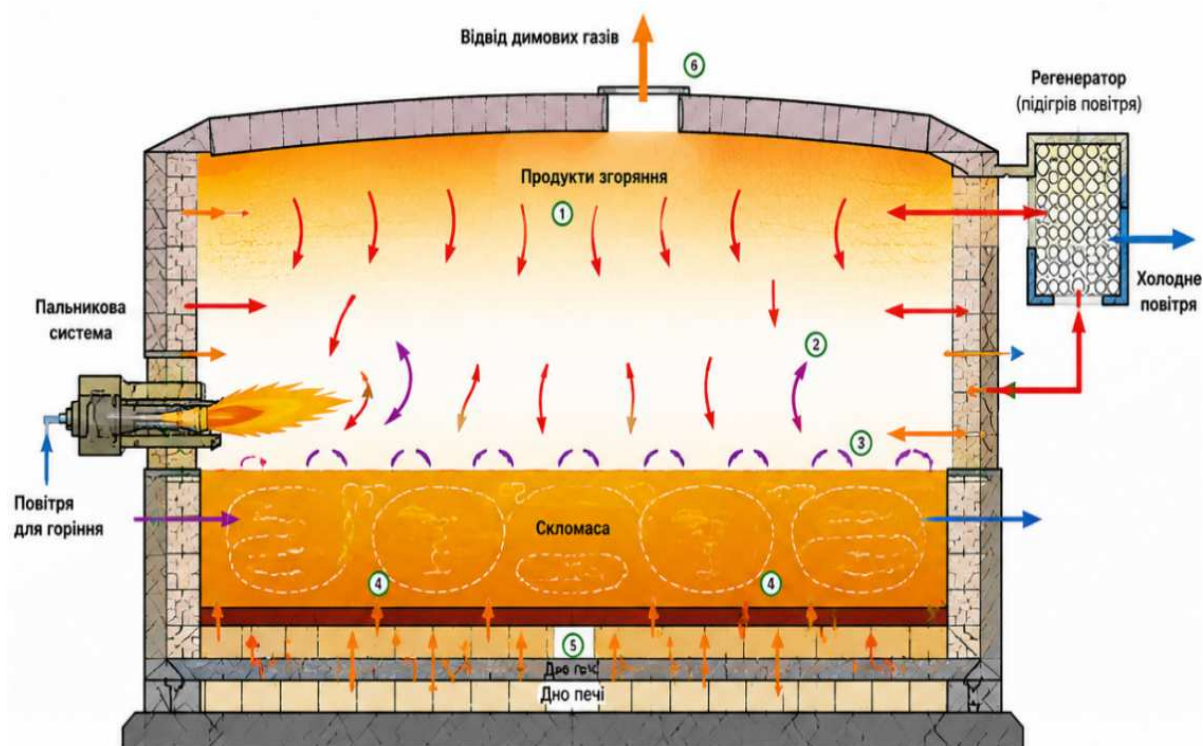


Рисунок 1.4 -Схема теплообміну у скловарній печі

Основні зони теплообміну:

1. Радіаційний теплообмін між полум'ям, димовими газами та скломасою;
2. Конвективний теплообмін у газовому просторі печі;
3. Теплообмін на поверхні скломаси (радіація конвекція);
4. Теплопередача через стінки (теплопровідність) та втрати тепла в довкілля;
5. Теплопередача через дно печі від пальників (теплопровідність);
6. Відвід тепла з димовими газами;

Опис процесів теплообміну:

- Радіація. Основне джерело передачі тепла у печі (50-70 %). Тепло від полум'я та гарячих та гарячих газів випромінюється до поверхні скломаси, стін та склепіння;
- Конвекція газів. Гарячі гази рухаються над скломасою, передаючи тепло конвекцією. Частина тепла повертається до регенератора для підігріву повітря;

- Теплообмін на поверхні. На поверхні скломаси відбувається одночасно радіаційний та конвективний теплообмін, що забезпечує нагрів і однорідність температури;
- Теплопровідність через стінки. Тепло передається через вогнетривки стінки на зовні, що призводить до втрат тепла у довкілля;
- Теплопровідність через дно. Тепло передається від пальників через дно до скломаси, забезпечуючи додатковий нагрів;
- Відвід тепла. Частина тепла виноситься димовими газами через відвідний отвір та використовується для рекуперації у регенераторі;

Суттєвий вплив на тепловий режим має тип використовуваного палива та режим його подачі. У скловарних печах можуть застосовуватись природний газ, мазут або електричний нагрів. Найбільш поширеним паливом є природний газ, який забезпечує високий коефіцієнт корисної дії та відносно низький рівень шкідливих викидів. Недостатня подача палива спричиняє зниження температури у робочому просторі печі, а надмірна - призводить до перегрівання та перевитрати енергоресурсів. Крім того, важливу роль відіграє співвідношення палива та повітря у процесі горіння, оскільки від ефективності згоряння залежить кількість теплової енергії, що передається скломасі [8].

На ефективність теплового режиму значно впливають умови теплообміну в печі (рисунок 1.4). Передача тепла здійснюється шляхом випромінювання, теплопровідності та конвекції. Найбільшу роль у скловарних печах відіграє теплове випромінювання, яке забезпечує інтенсивний нагрів шихти та скломаси. Випромінювання від полум'я та нагрітих поверхонь печі дозволяє передавати значну кількість теплової енергії безпосередньо до поверхні скломаси. Порушення умов теплообміну або забруднення поверхонь нагріву можуть знижувати ефективність передачі тепла та погіршувати стабільність технологічного процесу [8].

На стабільність теплового режиму також впливають конструктивні особливості скловарної печі, стан теплоізоляції та зношення вогнетривких

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матеріалів. Втрати тепла через стінки печі або пошкодження футерівки призводять до збільшення енергоспоживання та зниження ефективності роботи обладнання. Вогнетривкі матеріали повинні витримувати високі температури, агресивний вплив розплавленої скломаси та тривалу експлуатацію без втрати своїх властивостей. Руйнування футерівки може призводити до аварійних ситуацій та необхідності зупинки технологічного процесу [9].

Важливим фактором є також режим роботи пальникових пристроїв та система подачі повітря. Нерівномірний розподіл полум'я у робочому просторі печі може викликати локальні перегріви та нерівномірний прогрів скломаси. Для забезпечення оптимального процесу горіння використовуються автоматичні системи контролю співвідношення «паливо–повітря», що дозволяють підвищити ефективність використання теплової енергії.

Додатковими факторами впливу є продуктивність печі, швидкість подачі шихти, рівень завантаження обладнання та зовнішні збурення технологічного процесу. Збільшення продуктивності потребує більш інтенсивного теплового режиму та підвищення витрат палива. Нестабільність подачі сировини або зміна режимів роботи обладнання можуть викликати коливання температури та порушення процесу скловаріння. Крім того, на тепловий режим можуть впливати зміни температури навколишнього середовища, стан вентиляції та параметри роботи допоміжного обладнання [9].

Скловарна піч характеризується значною тепловою інерційністю, що суттєво ускладнює процес керування. Через великий об'єм скломаси та високу теплоємність матеріалів зміна температурного режиму відбувається повільно, а реакція системи на керуючі впливи має значне запізнення. У результаті навіть незначні зміни параметрів можуть через певний час викликати помітні відхилення температури. Це вимагає використання ефективних систем автоматичного регулювання та сучасних методів керування технологічним процесом [10].

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для забезпечення стабільної роботи скловарної печі необхідно здійснювати безперервний контроль температурних параметрів та оперативне регулювання подачі палива й повітря. З цією метою застосовуються термопари, датчики температури, регулятори, виконавчі механізми та програмовані логічні контролери. Найбільш поширеними є термопари типу K, S та R, які здатні працювати в умовах високих температур і забезпечують достатню точність вимірювання. Отримані сигнали надходять до контролера, де здійснюється їх обробка та формування керуючих впливів [10].

Автоматизовані системи керування дозволяють підтримувати задані режими роботи, швидко реагувати на зміни параметрів процесу та забезпечувати оптимальні умови функціонування обладнання. У сучасних системах широко використовуються ПІД-регулятори, які забезпечують точне підтримання температури шляхом автоматичної зміни подачі палива та повітря. Програмовані логічні контролери та SCADA-системи дозволяють здійснювати диспетчерський контроль, архівування параметрів процесу та візуалізацію технологічних даних [10].

Використання сучасних систем автоматизації сприяє підвищенню енергоефективності виробництва, зниженню витрат палива та покращенню якості готової продукції. Крім того, автоматичне регулювання дозволяє зменшити вплив людського фактора, підвищити надійність роботи печі та забезпечити стабільність технологічного процесу. Сучасні системи керування також дозволяють здійснювати прогнозування режимів роботи та автоматичну діагностику несправностей обладнання.

Таким чином, тепловий режим скловарної печі залежить від великої кількості взаємопов'язаних факторів, серед яких температура, умови теплообміну, склад шихти, режими подачі палива та конструктивні особливості обладнання. Ефективне керування температурними процесами є необхідною умовою стабільної, економічно ефективної та безпечної роботи скловарного виробництва. Використання сучасних засобів автоматизації та систем регулювання дозволяє забезпечити високу якість продукції,

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підвищити продуктивність обладнання та зменшити енергетичні витрати підприємства [10].

1.3 Аналіз існуючих систем автоматичного керування

У сучасному скловарному виробництві автоматичне керування технологічними процесами є необхідною умовою забезпечення стабільної роботи обладнання, підтримання необхідної якості продукції та зниження енергетичних витрат. Особливу увагу приділяють системам автоматичного керування тепловим режимом скловарних печей, оскільки температура є одним із основних параметрів, що визначають ефективність процесу скловаріння. Від точності підтримання температурного режиму залежить швидкість плавлення шихти, рівномірність прогріву скломаси, ефективність теплообміну та якість готового скла. У сучасних умовах автоматизація технологічних процесів дозволяє не лише забезпечити стабільність роботи обладнання, а й суттєво підвищити продуктивність виробництва та рівень енергоефективності [11].

На ранніх етапах розвитку скловарного виробництва регулювання температурного режиму здійснювалося переважно вручну оператором. Контроль процесу виконувався за показами вимірювальних приладів та візуальним спостереженням за станом полум'я і скломаси. Оператор вручну змінював подачу палива, інтенсивність горіння та положення заслінок системи подачі повітря. Такий спосіб керування характеризувався низькою точністю підтримання температури, значним впливом людського фактора та підвищеними витратами енергоресурсів. Крім того, ручне регулювання не дозволяло швидко реагувати на зміну параметрів процесу та компенсувати зовнішні збурення. Унаслідок цього виникали значні коливання температури, що негативно впливало на якість готової продукції та стабільність технологічного процесу [12].

З розвитком засобів автоматизації почали застосовуватись автоматичні системи регулювання, які забезпечують безперервний контроль параметрів

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технологічного процесу та автоматичне формування керуючих впливів. Використання автоматичних систем дозволило значно підвищити стабільність роботи скловарних печей, зменшити витрати палива та покращити якість продукції. Основною функцією таких систем є підтримання заданої температури шляхом зміни подачі палива, повітря або режиму роботи пальникових пристроїв. Автоматичне регулювання також дозволило знизити вплив людського фактора та забезпечити безперервність технологічного процесу.

У більшості сучасних систем автоматичного керування скловарними печами основним регульованим параметром є температура у робочому просторі печі або температура скломаси. Для вимірювання температури використовуються термопари, термоперетворювачі та пірометри, які забезпечують передачу інформації до регулятора або програмованого логічного контролера. Термопари є найбільш поширеними датчиками температури завдяки простоті конструкції, надійності та можливості роботи при високих температурах. У системах автоматизації скловарних печей найчастіше використовуються термопари типу К, S та R, що забезпечують точне вимірювання температури у широкому діапазоні [13].

На основі отриманих даних система виконує аналіз поточного стану процесу та формує сигнали керування виконавчими механізмами. До складу типової автоматизованої системи керування входять датчики, регулятори, виконавчі механізми, програмовані логічні контролери та операторські панелі. Датчики забезпечують безперервне вимірювання технологічних параметрів, а виконавчі механізми здійснюють зміну положення клапанів, регулювання подачі палива чи повітря та керування роботою пальників. Програмовані логічні контролери виконують обробку інформації, реалізацію алгоритмів керування та взаємодію між окремими елементами системи.

Одними з перших автоматичних систем були одноконтурні системи регулювання температури. Такі системи будувалися за принципом замкненого контуру, де сигнал від датчика температури надходив до регулятора, а потім

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формувався керуючий вплив на виконавчий механізм. Основною перевагою одноконтурних систем є простота реалізації та експлуатації. Проте вони мають обмежені можливості щодо компенсації зовнішніх збурень та забезпечення стабільності роботи при складних режимах функціонування печі.

Найбільш поширеними є системи автоматичного керування з ПІД-регуляторами, які дозволяють підтримувати задану температуру шляхом зміни подачі палива або повітря. Принцип роботи ПІД-регулятора ґрунтується на формуванні керуючого сигналу залежно від величини відхилення температури, швидкості зміни параметра та накопиченої похибки.

Для опису роботи ПІД-регулятора використовується рівняння:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

де:

- K_p - коефіцієнт пропорційної складової;
- K_i - коефіцієнт інтегральної складової;
- K_d - коефіцієнт диференціальної складової;
- $e(t)$ - похибка регулювання [14].

Використання ПІД-регулювання забезпечує достатню точність і стабільність роботи системи, а також можливість компенсації зовнішніх збурень. Пропорційна складова забезпечує швидку реакцію системи на зміну температури, інтегральна - усуває статичну похибку, а диференціальна - покращує динамічні характеристики та зменшує коливання температури.

Перевагами систем із ПІД-регуляторами є відносна простота реалізації, надійність та ефективність у більшості режимів роботи. Такі системи широко застосовуються у промисловості завдяки невисокій вартості впровадження та можливості інтеграції з сучасними засобами автоматизації. Однак ефективність роботи ПІД-регулятора значною мірою залежить від правильності налаштування його параметрів. Неправильне налаштування

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

може призводити до коливань температури, нестійкої роботи системи або значного запізнення реакції на зміну параметрів процесу.

Разом із тим класичні системи ПІД-регулювання мають певні недоліки при роботі зі складними тепловими об'єктами. Скловарні печі характеризуються значною тепловою інерційністю, нелінійністю характеристик та наявністю запізнення у реакції системи на керуючі впливи. Унаслідок цього виникають труднощі з точним налаштуванням параметрів регулятора та забезпеченням стабільної роботи системи при зміні технологічних режимів[14].

Через значну теплову інерційність навіть невеликі зміни подачі палива можуть впливати на температуру із певним часовим запізненням. Це призводить до появи коливань температури, перевищення заданих значень або нестабільної роботи системи. Для зменшення впливу таких факторів застосовують каскадні системи регулювання, багатоконтурні системи керування та додаткові алгоритми компенсації збурень. Каскадні системи дозволяють одночасно контролювати декілька взаємопов'язаних параметрів, наприклад температуру та витрату палива [14].

У сучасних автоматизованих системах дедалі ширше застосовуються програмовані логічні контролери та SCADA-системи, які забезпечують централізований контроль технологічного процесу, архівування даних, візуалізацію параметрів та дистанційне керування обладнанням. SCADA-системи дозволяють оператору в режимі реального часу контролювати температурні параметри, аналізувати стан обладнання та оперативно реагувати на аварійні ситуації. Використання мікропроцесорної техніки дозволяє реалізувати складні алгоритми регулювання та підвищити точність підтримання температурного режиму [15].

PLC-контролери (рисунок 1.5) виконують функції збору, обробки та передачі інформації, а також забезпечують взаємодію між різними елементами автоматизованої системи. Основними перевагами PLC є висока надійність, можливість перепрограмування, компактність та стійкість до

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

промислових умов експлуатації. Використання програмованих контролерів дозволяє реалізовувати адаптивні алгоритми керування та інтегрувати систему автоматизації у єдину інформаційну мережу підприємства[15].

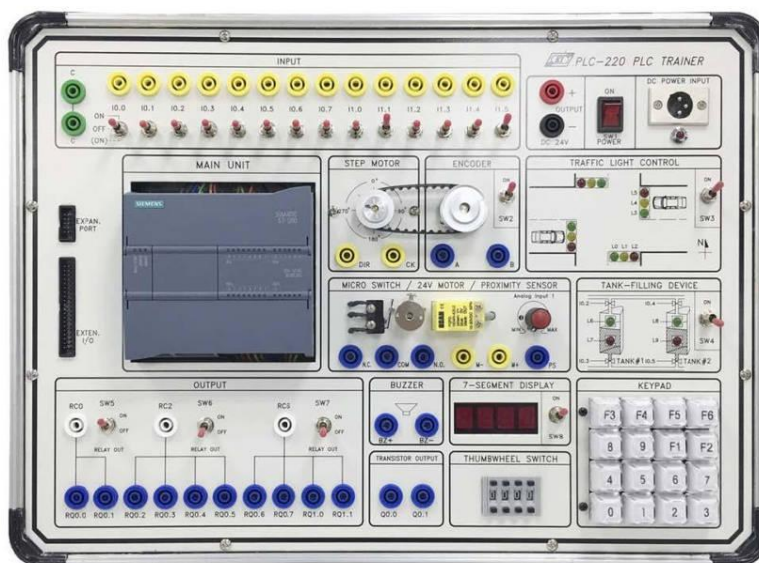


Рисунок 1.5 -Програмований логічний контролер PLC

Важливим напрямком розвитку автоматизованих систем є інтеграція засобів моніторингу, діагностики та енергетичного аналізу. Сучасні системи можуть виконувати автоматичний збір статистичних даних, аналіз витрат палива, контроль ефективності роботи пальників та прогнозування можливих відхилень технологічного процесу. Це дозволяє підвищити енергоефективність виробництва та зменшити експлуатаційні витрати.

Перспективним напрямком розвитку систем автоматичного керування є застосування адаптивних та інтелектуальних методів керування. До таких методів належать нечітке керування, нейромережеві алгоритми та системи прогнозування технологічних параметрів. Адаптивні системи здатні автоматично змінювати параметри регулювання залежно від поточного стану процесу та зовнішніх умов. Використання сучасних алгоритмів дозволяє підвищити якість регулювання, зменшити енергоспоживання та покращити стійкість системи до зовнішніх збурень [15].

Нечітке керування використовується у випадках, коли математичний опис технологічного процесу є складним або неточним. Такі системи

працюють на основі логічних правил та експертних знань, що дозволяє ефективно керувати складними нелінійними об'єктами. Нейромережеві алгоритми застосовуються для прогнозування зміни температури, аналізу технологічних параметрів та оптимізації режимів роботи обладнання. Використання штучного інтелекту дозволяє системі навчатися на основі попередніх режимів роботи та автоматично коригувати параметри керування.

Аналіз існуючих систем автоматичного керування показує, що найбільш ефективними є комплексні автоматизовані системи, які поєднують сучасні технічні засоби контролю, програмовані контролери та програмне забезпечення для моніторингу й керування технологічним процесом. Використання таких систем дозволяє забезпечити високу точність підтримання температури, зменшити витрати енергоресурсів та підвищити стабільність роботи обладнання.

Водночас існує необхідність подальшого вдосконалення систем керування тепловим режимом скловарних печей з метою підвищення точності регулювання, зменшення енергетичних витрат та забезпечення стабільної якості готової продукції. Особливо актуальним є впровадження інтелектуальних методів керування, сучасних цифрових технологій та систем прогнозування стану технологічного процесу.

Таким чином, автоматизація процесу керування тепловим режимом скловарної печі є важливим напрямком розвитку сучасного скловарного виробництва. Застосування сучасних засобів автоматизації, програмованих логічних контролерів, SCADA-систем та інтелектуальних алгоритмів керування дозволяє підвищити ефективність, надійність та економічність технологічного процесу [15].

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

2.1 Вибір структури та технічних засобів системи

Ефективність роботи системи автоматичного керування тепловим режимом скловарної печі значною мірою залежить від правильно обраної структури системи та технічних засобів автоматизації. Враховуючи складність теплових процесів, значну інерційність об'єкта керування та необхідність підтримання стабільної температури, система автоматичного керування повинна забезпечувати безперервний контроль параметрів технологічного процесу, оперативне реагування на зміни режимів роботи та високу надійність функціонування[16].

Скловарна піч належить до складних теплотехнічних об'єктів, для яких характерні нелінійність характеристик, наявність запізнення та значна теплова інерційність. У зв'язку з цим система автоматичного керування повинна мати достатню швидкодію, стійкість до зовнішніх збурень та можливість компенсації змін технологічних параметрів. Правильний вибір структури системи автоматизації дозволяє забезпечити стабільність температурного режиму, знизити витрати палива та підвищити якість готової продукції[17].

Для керування тепловим режимом скловарної печі доцільно застосовувати автоматизовану систему керування, побудовану за принципом замкненого контуру регулювання. У такій системі значення температури, отримане за допомогою вимірювальних пристроїв, безперервно порівнюється із заданим значенням. У випадку виникнення відхилення система формує керуючий сигнал, який впливає на виконавчі механізми для стабілізації температурного режиму, що можна побачити на рисунку 2.1.

Замкнена структура системи автоматичного керування дозволяє автоматично компенсувати зовнішні збурення, зміну навантаження та нестабільність параметрів технологічного процесу. У порівнянні з

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розімкненими системами така структура забезпечує вищу точність підтримання температури та кращу стійкість системи до змін режимів роботи. Особливо важливим це є для скловарних печей, оскільки процес скловаріння супроводжується значними тепловими навантаженнями та змінами фізико-хімічних властивостей скломаси.

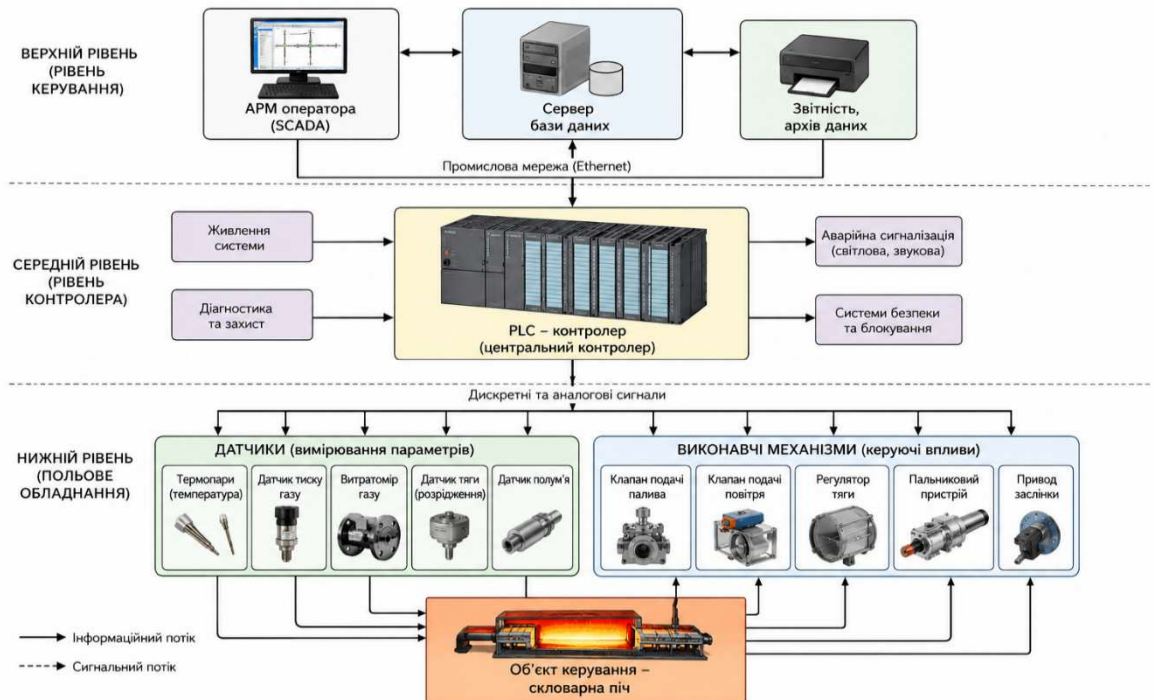


Рисунок 2.1 - Структурна схема системи автоматизації скловарної печі

Структура системи автоматичного керування включає:

- об'єкт керування - скловарну піч;
- первинні вимірювальні перетворювачі температури;
- програмований логічний контролер;
- регулюючі та виконавчі механізми;
- систему візуалізації та диспетчерського контролю.

Об'єктом керування є скловарна піч, у якій здійснюється процес плавлення шихти та формування скломаси. Основним регульованим параметром є температура у робочому просторі печі або температура скломаси. Від точності підтримання температурного режиму залежить швидкість протікання фізико-хімічних процесів, якість скла та ефективність використання енергетичних ресурсів.

Для вимірювання температури у системі застосовуються первинні вимірювальні перетворювачі - термопари та термоперетворювачі. Як первинні вимірювальні перетворювачі температури доцільно використовувати термопари, які здатні працювати в умовах високих температур та забезпечують достатню точність вимірювання. Найбільш поширеними у промислових теплотехнічних установках є термопари типу S (рис.2.2), R або K(рис.2.3), що характеризуються широким діапазоном робочих температур, високою надійністю та стійкістю до агресивного середовища [18].

Термопари типу K використовуються для вимірювання температур до 1200–1300 °С, а термопари типів S і R можуть працювати при температурах понад 1600 °С . Вибір типу датчика залежить від температурного режиму печі, вимог до точності вимірювання та умов експлуатації обладнання. Для захисту датчиків від механічних пошкоджень і впливу агресивного середовища використовуються спеціальні захисні чохла та керамічні трубки.



Рисунок 2.2 - Термопара типу S

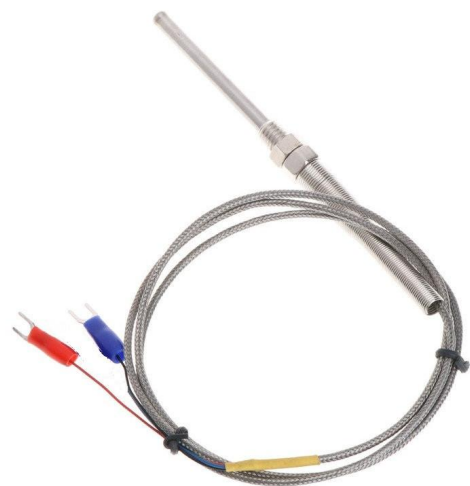


Рисунок 2.3 -Термопара типу К
Д

для обробки інформації та реалізації алгоритмів керування використовується програмований логічний контролер (PLC). Використання PLC забезпечує гнучкість налаштування системи, можливість реалізації складних алгоритмів регулювання та інтеграцію з іншими автоматизованими системами

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

підприємства. Контролер виконує функції збору даних, обробки сигналів, формування керуючих впливів та передачі інформації до операторської станції.

Сучасні PLC-контролери підтримують роботу з цифровими та аналоговими сигналами, мають модулі розширення та забезпечують обмін інформацією через промислові мережі. Це дозволяє інтегрувати систему керування скловарною піччю до загальної автоматизованої системи підприємства та забезпечити централізований контроль технологічного процесу. Крім того, сучасні контролери мають вбудовані засоби самодіагностики та захисту від аварійних режимів роботи [19].

Регулювання температурного режиму здійснюється шляхом зміни подачі палива та повітря у зону горіння. Для цього у системі використовуються виконавчі механізми, зокрема регулюючі клапани, електроприводи та частотні перетворювачі. Вони забезпечують зміну витрати палива або повітря відповідно до сигналів, сформованих контролером.

Регулюючі клапани використовуються для зміни витрати газу або рідкого палива, а частотні перетворювачі дозволяють керувати швидкістю обертання вентиляторів подачі повітря. Застосування електроприводів забезпечує плавну зміну положення заслінок і високу точність регулювання. Використання сучасних виконавчих механізмів дозволяє підвищити швидкодію системи та покращити стабільність температурного режиму.

Для підтримання стабільного температурного режиму у системі доцільно використовувати ПІД-регулятор, який дозволяє забезпечити точне та плавне регулювання температури. Завдяки використанню пропорційної, інтегральної та диференціальної складових забезпечується зменшення статичної похибки та покращення динамічних характеристик системи.

Пропорційна складова забезпечує швидку реакцію системи на зміну температури, інтегральна - усуває статичну похибку, а диференціальна - покращує стійкість системи та зменшує коливання регульованого параметра.

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Правильне налаштування параметрів ПІД-регулятора має важливе значення для забезпечення стабільної роботи системи автоматичного керування.

Важливим елементом сучасної системи автоматичного керування є SCADA-система, яка забезпечує візуалізацію параметрів технологічного процесу, архівування даних, формування повідомлень про аварійні ситуації та можливість дистанційного контролю роботи обладнання. Використання людино-машинного інтерфейсу дозволяє оператору контролювати стан технологічного процесу в режимі реального часу та оперативно реагувати на зміни параметрів.

SCADA-система також забезпечує збереження архівів температурних параметрів, формування звітів та аналіз роботи обладнання. Це дозволяє виконувати оцінку ефективності функціонування системи автоматизації, виявляти відхилення технологічного процесу та своєчасно проводити профілактичне обслуговування обладнання. У сучасних умовах виробництва SCADA-системи можуть інтегруватися з корпоративними інформаційними мережами підприємства та забезпечувати віддалений доступ до даних [20].

При виборі технічних засобів автоматизації необхідно враховувати умови експлуатації обладнання, температурний режим роботи, точність вимірювання, надійність функціонування та можливість інтеграції окремих елементів системи між собою. Усі компоненти системи повинні відповідати вимогам промислової безпеки та забезпечувати стабільну роботу в умовах безперервного виробничого процесу.

Особливу увагу необхідно приділяти захисту елементів системи автоматизації від впливу високих температур, пилу, вібрацій та електромагнітних завад. Для цього використовуються промислові шафи керування, екрановані кабелі, системи охолодження та спеціалізовані промислові пристрої, призначені для роботи у складних умовах експлуатації.

Важливим напрямком підвищення ефективності систем автоматизації є впровадження енергозберігаючих технологій. Використання сучасних алгоритмів керування та точного регулювання подачі палива дозволяє

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшити витрати енергетичних ресурсів і знизити теплові втрати. Це має важливе значення для підприємств скляної промисловості, оскільки процес скловаріння характеризується високою енергоємністю.

Таким чином, обрана структура системи автоматичного керування дозволяє забезпечити ефективний контроль і регулювання теплового режиму скловарної печі, підвищити точність підтримання температури, знизити енергетичні витрати та покращити якість готової продукції. Використання сучасних технічних засобів автоматизації, програмованих контролерів і SCADA-систем забезпечує надійність роботи системи та ефективність технологічного процесу.

2.2 Розробка функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації є одним із ключових етапів проектування системи автоматичного керування тепловим режимом скловарної печі, оскільки саме вона визначає структуру системи, взаємозв'язок між її елементами, принцип передачі інформації та формування керуючих впливів на технологічний об'єкт. Для скловарного виробництва функціональна схема автоматизації повинна забезпечувати стабільне підтримання температурного режиму, контроль основних параметрів процесу, високу точність регулювання та безпечну експлуатацію обладнання[21].

Скловарна піч належить до складних теплотехнічних об'єктів із великою тепловою інерційністю, значним запізненням реакції на зміну керуючих впливів та наявністю зовнішніх і внутрішніх збурень. У процесі роботи печі температура змінюється повільно, а реакція системи на регулювання подачі палива або повітря проявляється через певний проміжок часу. Саме тому система автоматизації повинна мати високу стійкість, надійність та здатність підтримувати стабільні режими роботи навіть за зміни технологічних умов [22].

Розробка функціональної схеми автоматизації передбачає визначення складу технічних засобів, принципів їх взаємодії та алгоритмів

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

функціонування системи. Основним регульованим параметром у системі є температура у робочому просторі скловарної печі та температура скломаси. Стабільність температурного режиму безпосередньо впливає на швидкість плавлення шихти, перебіг фізико-хімічних реакцій, в'язкість скломаси та якість готової продукції.

Для вимірювання температури у функціональній схемі використовуються термопари, які встановлюються у контрольних зонах печі. Найбільш доцільним є застосування термопар типів S, R або K, що характеризуються високою точністю, широким діапазоном вимірювання та стійкістю до дії високих температур. Термопари типу K можуть працювати при температурах до 1200–1300 °С, тоді як термопари типів S та R застосовуються для вимірювання температур понад 1600 °С, що є характерним для процесів скловаріння [23].

Первинні вимірювальні перетворювачі встановлюються у різних технологічних зонах печі - зоні плавлення, освітлення та охолодження скломаси. Це дозволяє здійснювати безперервний контроль температурного поля та аналізувати рівномірність розподілу температури у робочому просторі печі. Для захисту датчиків від агресивного середовища, механічних пошкоджень та впливу розплавленої скломаси використовуються спеціальні керамічні захисні трубки та термостійкі оболонки.

Сигнали від термопар надходять до програмованого логічного контролера, який виконує функції збору, обробки та аналізу інформації. PLC-контролер є центральним елементом системи автоматичного керування, оскільки саме він забезпечує реалізацію алгоритмів регулювання, обмін даними між елементами системи та формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів [24].

Використання програмованих логічних контролерів забезпечує високу гнучкість системи автоматизації та можливість її модернізації. Сучасні PLC підтримують роботу з аналоговими та цифровими сигналами, мають модулі розширення та забезпечують інтеграцію з промисловими мережами й

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

SCADA-системами. Це дозволяє організувати централізований контроль параметрів технологічного процесу та підвищити ефективність управління виробництвом.

У розробленій функціональній схемі використовується принцип замкненого автоматичного регулювання. Контролер безперервно порівнює поточне значення температури із заданим значенням та визначає величину відхилення. На основі отриманих даних формується керуючий сигнал, який передається до виконавчих механізмів для зміни подачі палива та повітря.

Замкнений контур регулювання дозволяє автоматично компенсувати вплив зовнішніх збурень, коливання температури навколишнього середовища, зміну продуктивності печі та нестабільність складу шихти. Завдяки постійному зворотному зв'язку система забезпечує стабільне підтримання температурного режиму та зменшує вплив людського фактора на процес керування.

Основою алгоритму регулювання є ПІД-закон керування, який широко застосовується у системах автоматизації теплотехнічних процесів. ПІД-регулятор формує керуючий сигнал на основі трьох складових: пропорційної, інтегральної та диференціальної.

Пропорційна складова забезпечує швидке реагування системи на зміну температури та формує сигнал пропорційно величині поточного відхилення. Інтегральна складова компенсує накопичену похибку регулювання та дозволяє усунути статичне відхилення температури. Диференціальна складова враховує швидкість зміни температури та забезпечує покращення динамічних характеристик системи, зменшуючи коливання регульованого параметра.

Використання ПІД-регулятора є особливо ефективним для скловарних печей, оскільки дозволяє компенсувати вплив теплової інерційності та забезпечити плавне регулювання без різких змін температури. Правильне налаштування параметрів регулятора дозволяє зменшити тривалість

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перехідних процесів, підвищити стійкість системи та забезпечити високу точність підтримання температурного режиму.

Керуючий сигнал від контролера передається до виконавчих механізмів, які здійснюють регулювання подачі палива та повітря у камеру згоряння печі. У системі можуть використовуватись регулюючі клапани, електроприводи та частотні перетворювачі. Регулюючі клапани забезпечують зміну витрати газу або рідкого палива, а частотні перетворювачі дозволяють змінювати швидкість обертання вентиляторів подачі повітря.

Застосування сучасних виконавчих механізмів (рисунок 2.4) забезпечує плавне регулювання параметрів процесу, підвищує точність керування та сприяє зниженню витрат енергоресурсів. Використання електроприводів із частотним регулюванням дозволяє підвищити енергоефективність системи та зменшити навантаження на обладнання.

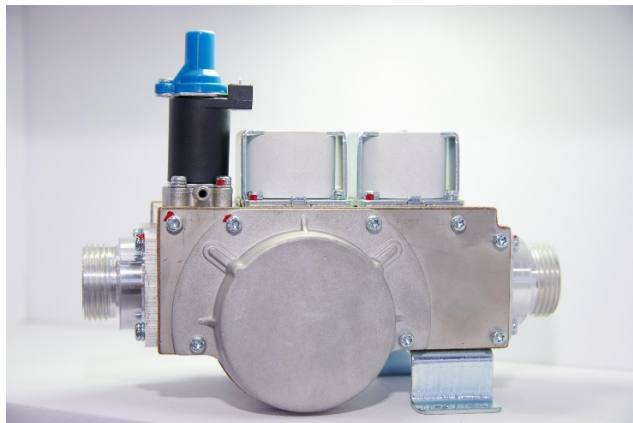


Рисунок 2.4 -Виконавчий механізм регулювання подачі газу та повітря.

Для забезпечення контролю та диспетчеризації технологічного процесу у функціональній схемі передбачається використання операторської панелі або SCADA-системи. SCADA-система забезпечує візуалізацію параметрів технологічного процесу, відображення поточного стану обладнання, архівування даних та формування аварійних повідомлень.

Оператор має можливість у режимі реального часу контролювати температуру у різних зонах печі, змінювати параметри регулювання, переглядати архіви даних та аналізувати ефективність роботи системи.

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використання SCADA-системи значно підвищує оперативність керування та дозволяє своєчасно реагувати на відхилення технологічного процесу.

Важливим елементом функціональної схеми автоматизації є система аварійного захисту та блокування. У разі перевищення допустимих температурних меж, зникнення полум'я, порушення подачі газу або виникнення несправності датчиків система автоматично формує сигнал аварії та може виконувати аварійне відключення подачі палива.

Для підвищення надійності роботи системи у схемі можуть використовуватись додаткові засоби контролю - датчики тиску, витрати газу, контролери полум'я та системи діагностики обладнання. Використання комплексного контролю дозволяє підвищити безпечність експлуатації скловарної печі та мінімізувати ризик виникнення аварійних ситуацій.

Сучасні функціональні схеми автоматизації також передбачають можливість інтеграції системи керування у загальну інформаційну мережу підприємства. Це забезпечує централізований моніторинг параметрів виробництва, дистанційний доступ до системи та можливість автоматичного формування звітів про роботу обладнання.

Таким чином, розроблена функціональна схема автоматизації забезпечує ефективний контроль та регулювання теплового режиму скловарної печі, стабільність технологічного процесу, підвищення точності підтримання температури та зменшення витрат енергетичних ресурсів. Використання сучасних технічних засобів автоматизації, програмованих логічних контролерів, SCADA-систем і ПД-регулювання дозволяє забезпечити високу надійність роботи системи, покращити якість готової продукції та підвищити ефективність скловарного виробництва [25].

2.3 Опис алгоритму роботи системи керування

Алгоритм роботи системи автоматичного керування тепловим режимом скловарної печі визначає послідовність дій та принцип взаємодії між елементами системи автоматизації, спрямованих на забезпечення стабільного

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температурного режиму у процесі скловаріння, схему алгоритму показано на рисунку 2.5. Основною метою системи є підтримання заданої температури у робочому просторі печі шляхом автоматичного регулювання подачі палива та повітря відповідно до поточного стану технологічного процесу[26].

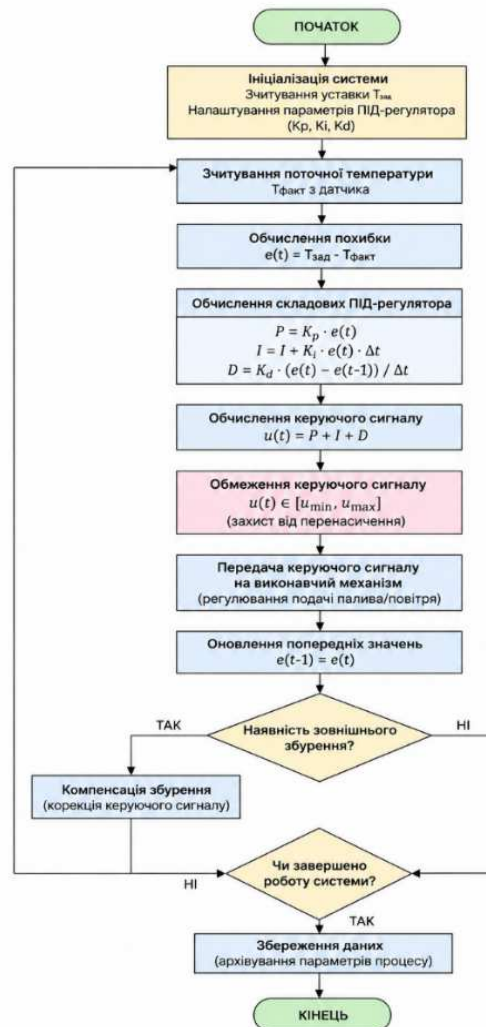


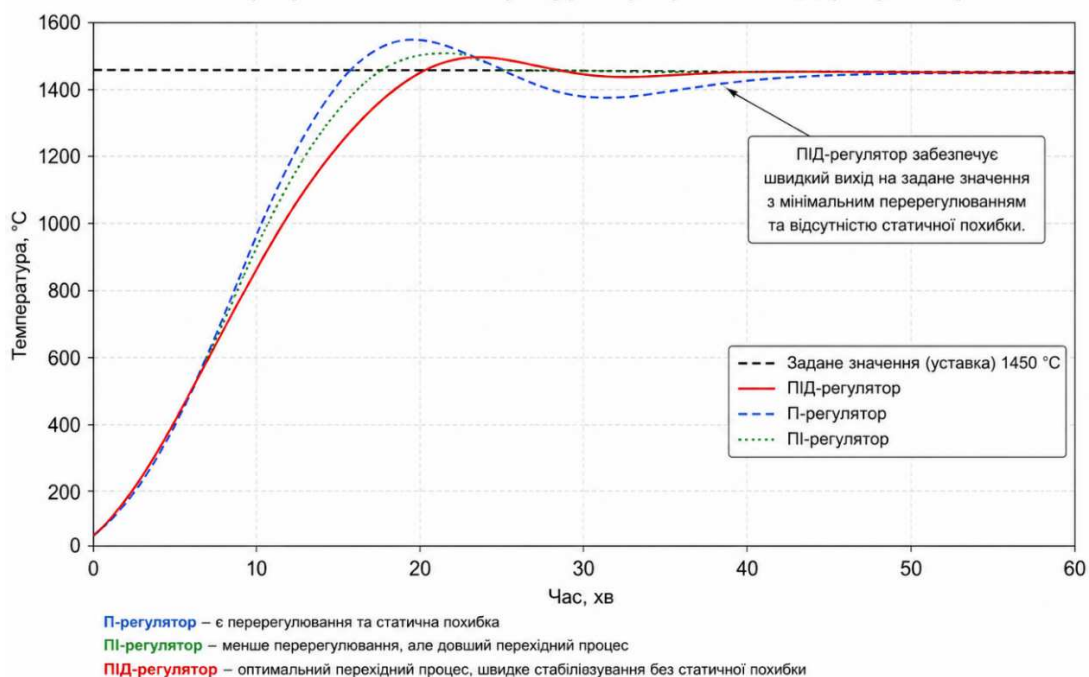
Рисунок 2.5 – Схема алгоритму роботи системи керування

Скловарна піч є складним теплотехнічним об'єктом із великою тепловою інерційністю, значним запізненням реакції на керуючі впливи та наявністю численних зовнішніх збурень. У процесі роботи печі температура змінюється поступово, а результат зміни подачі палива проявляється через певний проміжок часу. Саме тому алгоритм роботи системи керування повинен забезпечувати плавне регулювання температури, мінімізацію коливань та стійкість системи до змін технологічних параметрів [26].

На початковому етапі роботи системи оператор задає необхідне значення температури відповідно до технологічного режиму скловаріння. Встановлення температури здійснюється через операторську панель або SCADA-систему, після чого задане значення передається до програмованого логічного контролера. Контролер виконує функції збору інформації, аналізу параметрів технологічного процесу та формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів.

Після запуску системи розпочинається безперервний цикл контролю та регулювання температурного режиму. Датчики температури, встановлені у контрольних зонах скловарної печі, здійснюють постійне вимірювання температури скломаси та газового середовища у робочому просторі печі. Для вимірювання температури використовуються термопари типів S, R або K, які забезпечують високу точність вимірювання та здатні працювати в умовах високих температур [27].

Отримані сигнали від первинних вимірювальних перетворювачів надходять до програмованого логічного контролера у вигляді аналогових або цифрових сигналів. У контролері виконується перетворення та обробка інформації, фільтрація перешкод, компенсація похибок вимірювання та перевірка достовірності отриманих даних. Після цього система порівнює поточне значення температури із заданим параметром та визначає величину відхилення (рис.2.6).



Рис

унок 2.6 -Графік зміни температури при роботі ПІД-регулятора.

У випадку виникнення різниці між заданою та фактичною температурою контролер формує керуючий сигнал відповідно до алгоритму автоматичного регулювання. Якщо температура у печі знижується нижче встановленого значення, система збільшує подачу палива та повітря до камери згоряння. У результаті підвищується інтенсивність процесу горіння та збільшується кількість теплової енергії, яка надходить у робочий простір печі.

При перевищенні заданої температури система, навпаки, зменшує подачу палива або повітря, що призводить до зниження тепловиділення та стабілізації температурного режиму. Такий принцип роботи забезпечує підтримання стабільної температури у різних зонах скловарної печі та створює оптимальні умови для перебігу фізико-хімічних процесів скловаріння.

Основою алгоритму регулювання є ПІД-закон керування, який широко використовується у сучасних системах автоматизації теплотехнічних процесів [28].

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

ПІД-регулятор формує керуючий сигнал на основі трьох складових - пропорційної, інтегральної та диференціальної. Пропорційна складова забезпечує швидку реакцію системи на поточне відхилення температури від заданого значення. Чим більша величина відхилення, тим інтенсивніше система змінює подачу палива або повітря, схема наведена на рисунку 2.7.

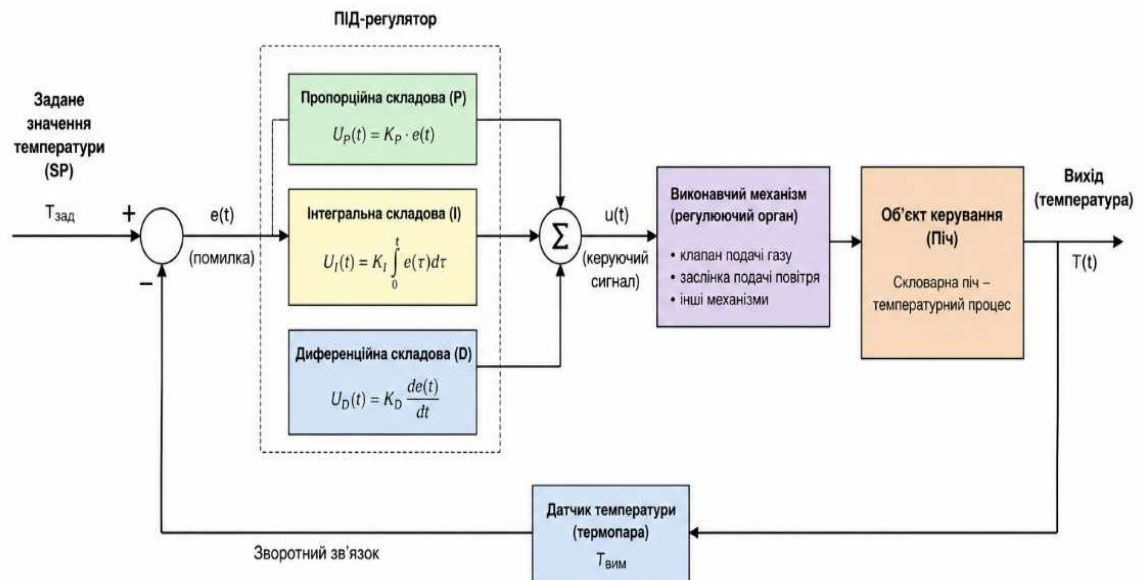


Рисунок 2.7 -Структурна схема ПІД-регулювання температури

Де:

- **SP(T_{зад})** – задане значення температури
- T(t) –поточна (виміряна) температура
- e(t) – помилка регулювання (різниця між заданим і вимірянним значенням)
- u(t) – керуючий сигнал ПІД-регулятора
- **T_{вим}** – виміряне значення температури з датчика
- **K_P, K_I, K_D** – коефіцієнти ПІД-регулятора

Призначення системи:

Підтримання заданої температури в печі шляхом автоматичного регулювання подачі газу та повітря

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інтегральна складова виконує накопичення похибки регулювання та забезпечує усунення статичного відхилення температури. Завдяки цьому система може підтримувати температуру з високою точністю навіть при тривалих зовнішніх збуреннях або зміні режимів роботи печі.

Диференціальна складова враховує швидкість зміни температури та дозволяє прогнозувати поведінку системи у найближчий момент часу. Використання диференціальної складової сприяє зменшенню коливань температури та покращує стійкість системи автоматичного керування.

Сформований контролером керуючий сигнал передається до виконавчих механізмів, які безпосередньо впливають на процес горіння у печі. У системі можуть використовуватись електроприводи, регулюючі клапани та частотні перетворювачі. Регулюючі клапани забезпечують зміну витрати газу або рідкого палива, а частотні перетворювачі дозволяють плавно регулювати швидкість обертання вентиляторів подачі повітря [29].

Плавне регулювання витрати палива та повітря є особливо важливим для скловарних печей, оскільки різкі зміни температури можуть призводити до порушення структури скломаси, збільшення теплових напружень та прискореного зношення футерівки печі. Алгоритм роботи системи враховує теплову інерційність об'єкта та забезпечує поступову зміну параметрів регулювання без різких коливань.

Для підвищення ефективності роботи системи можуть використовуватись додаткові алгоритми компенсації збурень та адаптивного регулювання. Наприклад, система може враховувати зміну складу шихти, коливання тиску газу або зміну продуктивності печі. Це дозволяє підвищити точність підтримання температури та зменшити витрати енергетичних ресурсів.

Важливим елементом алгоритму є система контролю аварійних режимів та захисту обладнання (рис.2.7). У процесі роботи система безперервно аналізує стан датчиків, виконавчих механізмів та параметри технологічного процесу. У разі перевищення допустимих температурних меж, порушення

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

подачі газу, відсутності полум'я або несправності датчиків система формує аварійний сигнал.

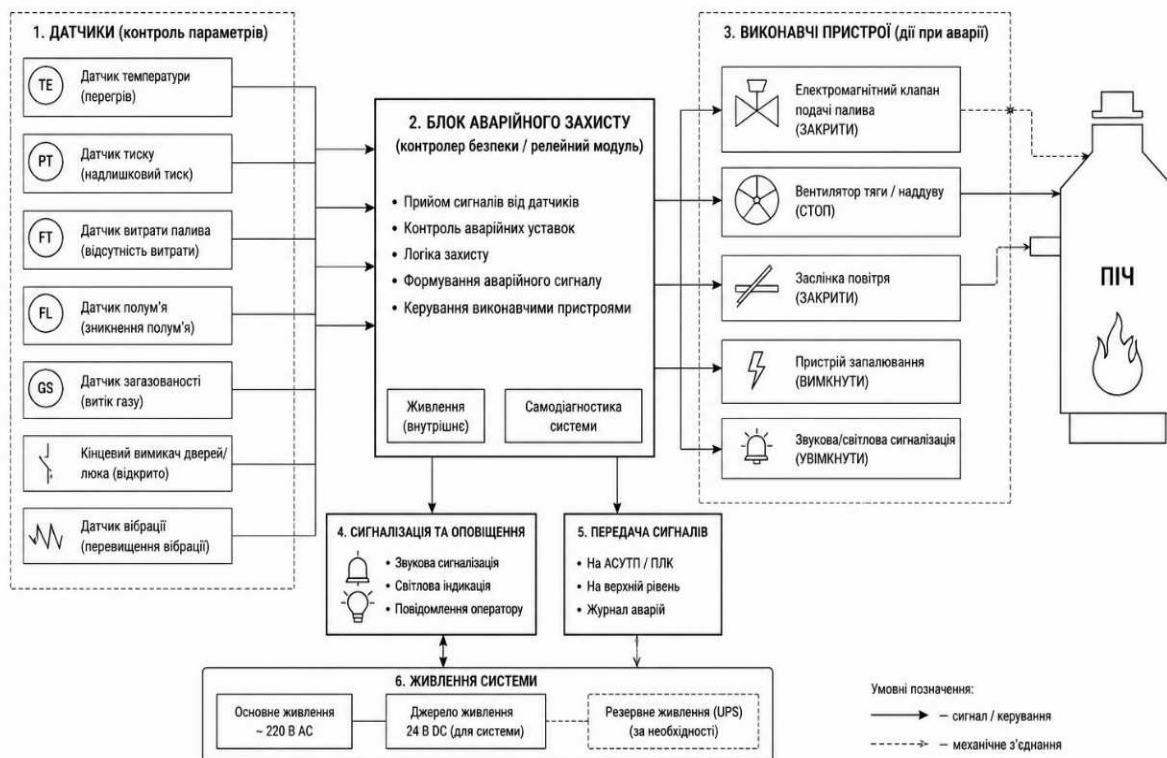


Рисунок 2.7 -Структурна схема системи аварійного захисту печі

У критичних ситуаціях алгоритм може виконувати автоматичне припинення подачі палива та переведення обладнання у безпечний режим роботи. Це дозволяє запобігти аварійним ситуаціям, пошкодженню обладнання та виникненню небезпечних умов експлуатації.

Для контролю та моніторингу роботи системи використовується SCADA-система або операторська панель. SCADA-система забезпечує відображення температурних параметрів у режимі реального часу, архівування даних, формування звітів та візуалізацію стану обладнання [29].

Оператор має можливість спостерігати за зміною температури, контролювати роботу виконавчих механізмів, змінювати параметри регулювання та отримувати повідомлення про аварійні ситуації. Використання SCADA-системи забезпечує централізований контроль технологічного процесу та підвищує ефективність роботи обслуговуючого персоналу.

Система також може забезпечувати автоматичне збереження архівів температурних параметрів, аналіз витрат палива та формування статистики роботи обладнання. Це дозволяє оцінювати ефективність функціонування системи автоматизації, виявляти відхилення технологічного процесу та виконувати профілактичне обслуговування обладнання.

Алгоритм роботи системи автоматичного керування враховує необхідність забезпечення енергоефективності технологічного процесу. Оптимізація подачі палива та повітря дозволяє зменшити теплові втрати, підвищити коефіцієнт корисної дії печі та знизити витрати енергоресурсів. Використання автоматизованого керування також сприяє зменшенню впливу людського фактора та підвищенню стабільності технологічного процесу.

Таким чином, розроблений алгоритм роботи системи автоматичного керування забезпечує стабільне підтримання температурного режиму скловарної печі, високу точність регулювання температури, ефективне використання енергетичних ресурсів та безпечну експлуатацію обладнання. Використання програмованих логічних контролерів, ПД-регулювання, сучасних виконавчих механізмів та SCADA-систем дозволяє підвищити надійність функціонування системи автоматизації та забезпечити стабільність процесу скловаріння [30].

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ

3.1 Математична модель теплового об'єкта

Для дослідження процесу автоматичного керування тепловим режимом скловарної печі необхідним етапом є побудова математичної моделі об'єкта керування. Математична модель дозволяє описати закономірності зміни температури у робочому просторі печі, визначити динамічні характеристики теплового об'єкта та оцінити ефективність роботи системи автоматичного регулювання. Використання математичного моделювання дає можливість виконати аналіз перехідних процесів, дослідити вплив зовнішніх збурень та здійснити вибір оптимальних параметрів регулятора без втручання у реальний технологічний процес[31].

Скловарна піч є складним теплотехнічним об'єктом, у якому відбуваються процеси нагрівання шихти, плавлення компонентів, гомогенізації скломаси та підтримання стабільного температурного режиму. Для такого об'єкта характерні значна теплова інерційність, наявність внутрішніх і зовнішніх збурень, а також запізнення реакції системи на зміну керуючих впливів. Значна теплова інерційність пояснюється великим об'ємом скломаси, високою теплоємністю вогнетривких матеріалів та складністю теплообмінних процесів у печі [31].

Основним регульованим параметром у системі є температура у робочому просторі печі або температура скломаси. Керуючим впливом виступає зміна подачі палива та повітря до камери згоряння, що безпосередньо впливає на кількість теплової енергії, яка надходить до печі. До основних збурюючих факторів належать зміна складу шихти, нестабільність подачі палива, коливання температури навколишнього середовища та зміна продуктивності обладнання.

Під час побудови математичної моделі теплового об'єкта використовуються основні закони теплотехніки та теорії автоматичного

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керування. У загальному випадку процес зміни температури у печі описується рівнянням теплового балансу:

$$C \frac{dT(t)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t)$$

де:

C -теплова ємність об'єкта;

$T(t)$ -температура у печі;

$Q_{in}(t)$ - кількість теплової енергії, що надходить до печі;

$Q_{out}(t)$ - теплові втрати [32].

Дане рівняння характеризує зміну температури у часі залежно від різниці між підведеною тепловою енергією та втратами тепла через футерівку, газоходи й теплообмін із навколишнім середовищем. У процесі роботи печі значна частина теплової енергії витрачається на нагрівання шихти, плавлення компонентів та підтримання необхідної температури скломаси.

Для аналізу систем автоматичного керування складні теплотехнічні процеси часто подають у вигляді спрощених математичних моделей. Скловарну піч доцільно розглядати як аперіодичну ланку першого порядку із транспортним запізненням, оскільки така модель достатньо точно описує її динамічні властивості. Передаточна функція теплового об'єкта у цьому випадку має вигляд:

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1} e^{-\tau s}$$

де:

k - коефіцієнт підсилення об'єкта;

T - постійна часу;

τ - час запізнення;

s - оператор Лапласа [33].

Коефіцієнт підсилення характеризує ступінь зміни температури при зміні подачі палива. Постійна часу визначає швидкість реакції системи на

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керуючий вплив, а параметр запізнення враховує часову затримку між зміною витрати палива та фактичним підвищенням температури у печі.

Наявність транспортного запізнення є однією з основних особливостей теплових об'єктів. У скловарній печі тепла енергія спочатку передається продуктам згоряння, потім футерівці та скломасі, тому реакція температури на зміну режиму роботи пальників виникає не миттєво. Це ускладнює процес автоматичного регулювання та може спричиняти коливання температури при неправильному налаштуванні параметрів регулятора.

Через значну інерційність теплового процесу температура у печі змінюється плавно, без різких стрибків. Саме тому система автоматичного керування повинна забезпечувати поступове регулювання подачі палива та повітря. Надмірно швидка зміна керуючого сигналу може викликати нестійкість системи та перевищення допустимих температурних меж.

Під час математичного моделювання важливо враховувати нелінійність теплових процесів. Теплофізичні характеристики скломаси змінюються залежно від температури, а ефективність теплообміну залежить від режиму горіння та властивостей матеріалів. Однак для спрощення аналізу у більшості випадків використовується лінеаризована модель, побудована поблизу робочої точки технологічного процесу.

Для опису перехідних процесів системи автоматичного керування застосовуються методи операційного числення та перетворення Лапласа. Це дозволяє визначати реакцію системи на ступінчасті або імпульсні керуючі впливи, оцінювати стійкість системи та виконувати аналіз якості регулювання.

Одним із важливих показників математичної моделі є перехідна характеристика об'єкта. Вона показує зміну температури у часі після зміни подачі палива. Для теплових об'єктів перехідна характеристика має плавний аперіодичний характер із вираженим часовим запізненням. Аналіз перехідної характеристики дозволяє визначити параметри регулятора та оцінити динамічні властивості системи.

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для дослідження характеристик системи автоматичного керування широко використовуються сучасні програмні засоби комп'ютерного моделювання. Найбільш поширеними є середовища MATLAB Simulink, LabVIEW та інші системи імітаційного моделювання. Використання комп'ютерних моделей дозволяє виконувати дослідження системи без необхідності проведення експериментів на реальному обладнанні [34].

Імітаційне моделювання дозволяє дослідити реакцію системи на зміну параметрів регулювання, оцінити вплив зовнішніх збурень та перевірити стійкість системи автоматичного керування. За допомогою моделювання можна визначити оптимальні параметри ПД-регулятора, мінімізувати перерегулювання та скоротити час перехідного процесу.

При побудові математичної моделі необхідно враховувати також теплові втрати через футерівку та конструктивні елементи печі. Втрати тепла впливають на енергетичну ефективність технологічного процесу та визначають необхідну потужність системи нагріву. Недостатній рівень теплоізоляції призводить до збільшення витрат палива та погіршення стабільності температурного режиму.

У сучасних системах автоматизації математична модель може використовуватись не лише для аналізу, а й для реалізації адаптивного або прогнозуючого керування. У таких системах модель об'єкта дозволяє прогнозувати зміну температури та формувати керуючі сигнали з урахуванням майбутнього стану процесу. Це особливо важливо для теплових об'єктів із великим запізненням та складною динамікою.

Таким чином, математична модель теплового об'єкта дозволяє описати основні закономірності процесу скловаріння, визначити динамічні характеристики скловарної печі та дослідити особливості автоматичного регулювання температурного режиму. Використання математичного моделювання забезпечує можливість аналізу перехідних процесів, оптимізації параметрів системи керування та підвищення ефективності роботи автоматизованої системи [35].

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Розрахунок і налаштування регулятора

Для забезпечення стабільного температурного режиму скловарної печі необхідно правильно вибрати тип регулятора та виконати обґрунтоване налаштування його параметрів. Враховуючи значну теплову інерційність скловарної печі, наявність часових запізнень, нелінійність теплових процесів та високі вимоги до точності підтримання температури, у системі автоматичного керування доцільно застосовувати ПІД-регулятор. Використання ПІД-закону регулювання дозволяє забезпечити високу якість перехідних процесів, достатню стійкість системи та ефективну компенсацію зовнішніх збурень[36].

Скловарна піч як об'єкт автоматичного керування характеризується значною теплоємністю та повільною реакцією на зміну подачі палива. У процесі скловаріння навіть незначні відхилення температурного режиму можуть негативно впливати на процес плавлення шихти, однорідність скломаси та якість готової продукції. Саме тому система регулювання повинна забезпечувати плавне та точне підтримання температури у заданих межах.

ПІД-регулятор формує керуючий сигнал залежно від величини похибки регулювання, її накопичення у часі та швидкості зміни. Загальний закон ПІД-регулювання описується рівнянням:

$$u(t) = K_p e(t) + K_{I\int} e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

де:

$u(t)$ - керуючий сигнал;

$e(t)$ - похибка регулювання;

K_p - коефіцієнт пропорційної складової;

$K_{I\int}$ - коефіцієнт інтегральної складової;

K_d - коефіцієнт диференціальної складової[38].

Пропорційна складова забезпечує реакцію системи на поточне значення похибки регулювання. Зі збільшенням коефіцієнта K_p підвищується швидкодія системи, однак надмірне збільшення цього параметра може спричинити появу коливань та погіршення стійкості системи. Для теплотехнічних об'єктів важливо забезпечити оптимальне співвідношення між швидкодією та стійкістю, оскільки різкі зміни температури негативно впливають на роботу скловарної печі.

Інтегральна складова призначена для усунення статичної похибки регулювання. Вона накопичує похибку у часі та забезпечує точне досягнення заданого значення температури. Використання інтегрального каналу особливо важливе для теплових об'єктів із повільними динамічними процесами, оскільки дозволяє компенсувати тривалі відхилення температурного режиму. Водночас надмірне значення коефіцієнта K_i може викликати значне перерегулювання та збільшення тривалості перехідного процесу [37].

Диференціальна складова враховує швидкість зміни похибки регулювання та дозволяє покращити динамічні характеристики системи. Її використання сприяє зменшенню коливань температури та підвищенню стійкості системи автоматичного керування. Для теплових процесів диференціальна складова дозволяє компенсувати вплив інерційності об'єкта та зменшити ймовірність виникнення коливальних процесів [37].

Передаточна функція ПІД-регулятора у операторній формі має вигляд:

$$W_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

де:

T_i - час інтегрування;

T_d - час диференціювання;

s - оператор Лапласа [38].

Передаточна функція характеризує математичний зв'язок між вхідним та вихідним сигналами регулятора й використовується для аналізу

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

динамічних характеристик системи автоматичного керування. Застосування операторного методу дозволяє досліджувати стійкість системи, аналізувати перехідні процеси та виконувати синтез систем автоматичного регулювання.

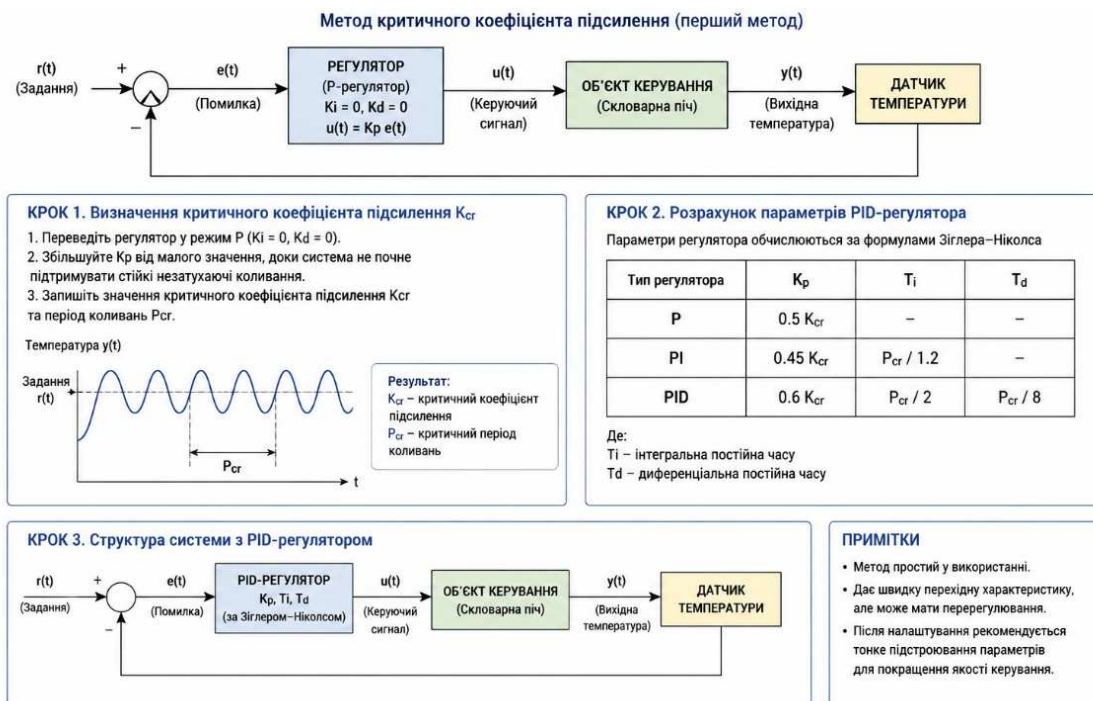


Рисунок 3.1 -Схема налаштування регулятора методом Зіглера–Ніколса

Для налаштування параметрів ПІД-регулятора використовуються різні методи, серед яких найбільш поширеним є метод Зіглера–Ніколса, які показано на рисунку 3.1. Суть методу полягає у визначенні критичного коефіцієнта підсилення системи та періоду незгасаючих коливань, після чого параметри регулятора визначаються за емпіричними співвідношеннями (рисунок 3.2). Даний метод дозволяє отримати початкові значення параметрів регулятора, які надалі можуть уточнюватися під час моделювання або експериментального налаштування системи [36].

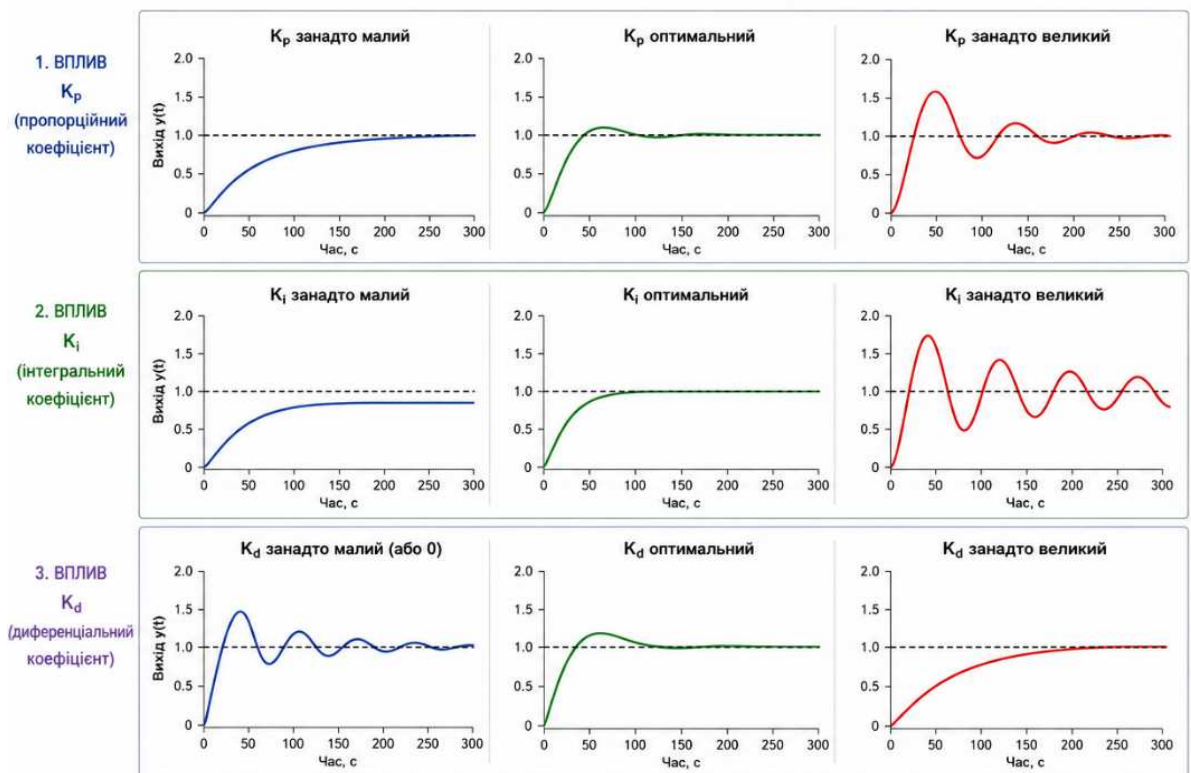


Рисунок 3.2 -Графік впливу коефіцієнтівPID-регулятора на перехідний процес системи

Вплив K_p :

- Збільшення K_p прискорює процес і зменшує статичну похибку;
- Занадто великий K_p викликає перерегулювання та коливання;
- Занадто малий K_p – повільна реакція, велика статична похибка;

Вплив K_i :

- Збільшення K_i усуває статичну похибку;
- Занадто великий K_i викликає великі коливання і збільшує час встановлення;
- Занадто малий K_i не усуває статичну похибку повністю;

Вплив K_d :

- Збільшення K_d зменшує перерегулювання і коливання;
- Занадто великий K_d робить систему надто інертною (повільна реакція);
- Занадто малий K_d не приглушує коливання;

Загальні висновки:

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

- K_p впливає на швидкість реакції та перерегулювання;
- K_i впливає на усунення статичної похибки ;
- K_d впливає на приглушення коливань та стабільність системи;

Правильно підібрані коефіцієнти забезпечують швидке досягнення заданого значення без перерегулювання та з мінімальною похибкою.

Під час налаштування регулятора особливу увагу необхідно приділяти динамічним властивостям скловарної печі. Через значну теплову інерційність навіть незначна зміна подачі палива може призводити до зміни температури із певним часовим запізненням. Це створює додаткові труднощі під час налаштування регулятора та потребує вибору оптимальних параметрів, які забезпечують плавний характер перехідного процесу.

Одним із головних критеріїв якості роботи системи автоматичного керування є забезпечення мінімального часу перехідного процесу при відсутності значного перерегулювання. Для скловарних печей надмірне перерегулювання є небажаним, оскільки різкі температурні коливання можуть викликати порушення технологічного процесу, погіршення якості скла та прискорене зношування футерівки печі. Тому параметри регулятора повинні забезпечувати плавний вихід системи на заданий режим роботи.

Після попереднього розрахунку параметрів регулятора проводиться моделювання системи автоматичного керування. Для цього можуть використовуватися сучасні програмні засоби моделювання, зокрема MATLAB Simulink або інші спеціалізовані середовища. Імітаційне моделювання дозволяє оцінити реакцію системи на зміну керуючих впливів, визначити тривалість перехідного процесу, величину перерегулювання та перевірити стійкість системи [39].

На основі результатів моделювання виконується коригування параметрів регулятора з метою покращення якості регулювання. Основними показниками якості системи є:

- час перехідного процесу;
- величина перерегулювання;

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- статична похибка;
- стійкість системи;
- плавність зміни температури.

У сучасних системах автоматизації налаштування ПІД-регулятора може виконуватися автоматично за допомогою функцій автонастроювання, реалізованих у програмованих логічних контролерах. Використання PLC-контролерів дозволяє автоматично визначати оптимальні параметри регулювання залежно від поточного стану технологічного процесу. Це значно спрощує введення системи в експлуатацію та забезпечує адаптацію системи до зміни режимів роботи обладнання [40].

Важливим напрямком удосконалення систем автоматичного керування є використання адаптивних алгоритмів регулювання. Такі алгоритми дозволяють автоматично змінювати параметри регулятора залежно від умов роботи об'єкта керування та характеристик технологічного процесу. Для теплових об'єктів із нестабільними параметрами це дозволяє забезпечити вищу точність підтримання температури та покращити енергоефективність системи.

Застосування правильно налаштованого ПІД-регулятора дозволяє знизити витрати палива, забезпечити рівномірність температурного поля у робочому просторі печі та підвищити якість готової продукції. Крім того, стабільне підтримання температурного режиму сприяє зменшенню теплових перевантажень обладнання та підвищує надійність роботи скловарної печі [37].

Таким чином, правильний розрахунок та налаштування ПІД-регулятора є однією з основних умов ефективної роботи системи автоматичного керування тепловим режимом скловарної печі. Використання сучасних методів налаштування та програмних засобів моделювання дозволяє забезпечити високу якість регулювання, підвищити енергоефективність виробництва та покращити стабільність технологічного процесу.

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Аналіз ефективності роботи системи

Після побудови математичної моделі теплового об'єкта та виконання налаштування параметрів ПД-регулятора необхідно провести аналіз ефективності роботи системи автоматичного керування тепловим режимом скловарної печі. Основною метою такого аналізу є оцінка якості регулювання температури, дослідження динамічних характеристик системи, визначення її стійкості та оцінка ефективності компенсації зовнішніх збурень. Проведення аналізу дозволяє визначити відповідність системи вимогам технологічного процесу скловаріння та оцінити доцільність використання обраної структури автоматичного керування [41].

Ефективність системи автоматичного керування значною мірою визначається здатністю підтримувати стабільний температурний режим у робочому просторі печі. Для процесу скловаріння температурний режим є одним із найважливіших технологічних параметрів, оскільки від нього залежить швидкість плавлення шихти, однорідність скломаси, інтенсивність теплообміну та якість готової продукції. Нестабільність температури може призводити до порушення процесу гомогенізації скломаси, утворення дефектів скла та збільшення витрат енергоресурсів.

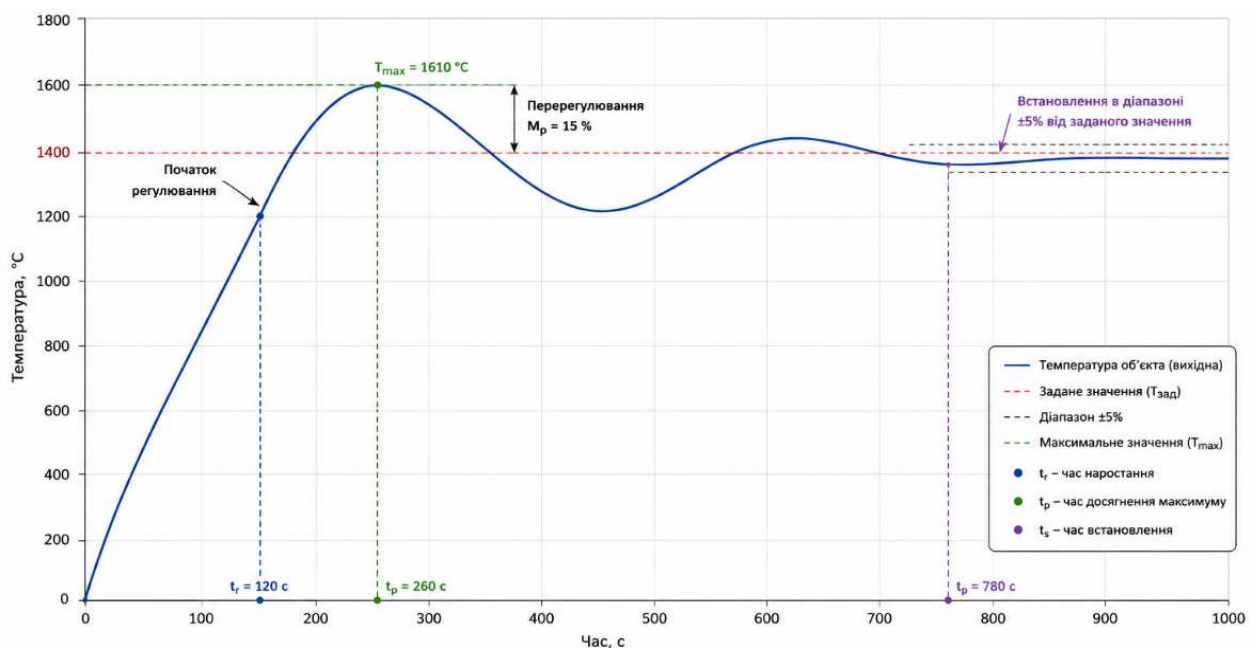


Рисунок 3.3 - Графік перерегулювання температури

Де:

- – задане значення температури;
- $T_{\max}$ – максимально досягнута температура;
- M_p – перерегулювання, %;
- t_r – час наростання(10...90%);
- t_p – час досягнення максимуму;
- t_s – час встановлення (вхід у діапазон $\pm 5\%$ та залишення його);

У даному прикладі:

$$M_p = \frac{1610 - 1400}{1400} * 100\% = 15\%$$

Одним із головних показників якості системи автоматичного керування є величина похибки регулювання (рисунок 3.3). У правильно налаштованій системі фактичне значення температури повинно максимально наближатися до заданого значення, а відхилення не повинні перевищувати допустимих технологічних меж. Мінімізація похибки регулювання дозволяє забезпечити стабільність технологічного процесу та покращити якість скломаси[42].

Для оцінки ефективності роботи системи проводиться аналіз перехідних процесів(рисунок 3.4), які виникають під час зміни заданої температури або при дії зовнішніх збурень. Перехідний процес характеризує реакцію системи автоматичного керування на зміну режиму роботи та дозволяє оцінити динамічні властивості системи. У процесі дослідження аналізуються такі показники якості:

- час перехідного процесу;
- величина перерегулювання;
- статична похибка;
- стійкість системи;
- плавність регулювання температури [42].

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

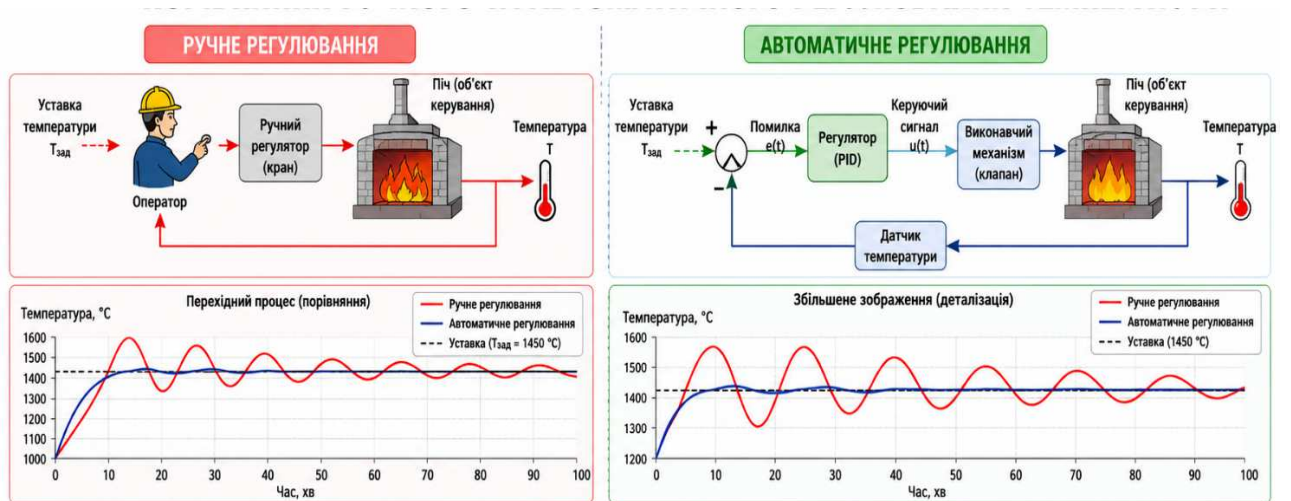


Рисунок 3.4 -Порівняння ручного та автоматичного регулювання температури

Порівняльний аналіз показує суттєві відмінності між ручним та автоматичним способами керування температурним режимом скловарної печі. При ручному регулюванні спостерігається значне перерегулювання, яке може досягати 15–30 %, що призводить до надмірного нагріву або охолодження печі. Крім того, температурні коливання є сильними та тривалими, а час встановлення необхідного режиму становить від 40 до 80 хвилин.

Автоматичне регулювання на основі PID-регулятора забезпечує значно кращі показники якості. Перерегулювання не перевищує 0–5 %, коливання температури є незначними та швидко затухають, а час встановлення режиму скорочується до 10–20 хвилин. Також підвищується точність підтримання температури: відхилення від заданого значення становить лише $\pm 2\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$, тоді як при ручному керуванні воно може досягати $\pm 30\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Важливою перевагою є мінімальна участь оператора в процесі керування, що зменшує вплив людського фактора на роботу системи.

Використання автоматичної системи регулювання температури забезпечує низку технічних та економічних переваг:

- високу точність підтримання заданої температури;
- мінімальне перерегулювання та швидке затухання коливань;
- скорочення часу виходу системи на робочий режим;

- підвищення стабільності технологічного процесу плавлення скла;
- зменшення впливу людського фактора та ймовірності помилок оператора;
- зниження витрат енергоносіїв і палива завдяки оптимізації режимів роботи;
- підвищення безпеки експлуатації скловарної печі;
- покращення якості готової продукції за рахунок стабільного температурного режиму;
- збільшення ресурсу технологічного обладнання завдяки зменшенню теплових перевантажень.

Проведене порівняння показало, що автоматичне регулювання температури значно перевершує ручне керування за основними показниками якості. Застосування PID-регулятора забезпечує швидке досягнення заданої температури, високу точність її підтримання та мінімальні коливання в процесі роботи. Це дозволяє створити стабільний тепловий режим у скловарній печі, знизити енергоспоживання, підвищити безпеку експлуатації та покращити якість готової продукції. Таким чином, впровадження автоматизованої системи керування температурою є доцільним та економічно обґрунтованим рішенням для сучасного виробництва скла.

Одним із найважливіших критеріїв оцінки ефективності системи є швидкодія. Система автоматичного керування повинна забезпечувати достатньо швидке досягнення заданого температурного режиму без виникнення значних коливань температури. Надмірно повільне регулювання може призводити до порушення технологічного режиму скловаріння та збільшення тривалості виробничого циклу. Водночас надто швидке реагування системи може викликати нестійкі процеси, температурні коливання та перевантаження виконавчих механізмів.

Для теплотехнічних об'єктів важливе значення має плавність зміни температури. Скловарна піч характеризується значною тепловою інерційністю, тому різкі зміни подачі палива можуть спричинити

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перегрівання окремих зон печі та порушення рівномірності температурного поля. Використання ПІД-регулятора дозволяє забезпечити більш плавний характер регулювання та зменшити амплітуду температурних коливань.

Особливу увагу під час аналізу ефективності приділяють оцінці стійкості системи автоматичного керування. Система вважається стійкою, якщо після виникнення зовнішнього збурення вона повертається до встановленого режиму роботи без наростання коливань. Для систем керування тепловими процесами стійкість є однією з основних вимог, оскільки нестійкий режим роботи може призвести до значних відхилень температури та аварійних ситуацій [43].

Значний вплив на динамічні характеристики системи має теплова інерційність скловарної печі. Через велику теплоємність конструктивних елементів печі зміна температури відбувається із певним часовим запізненням. Це ускладнює процес регулювання та потребує ретельного налаштування параметрів регулятора. У результаті проведеного аналізу (рисунок.3.5) встановлено, що використання ПІД-регулятора дозволяє компенсувати вплив теплової інерційності та забезпечити стабільний режим роботи системи.

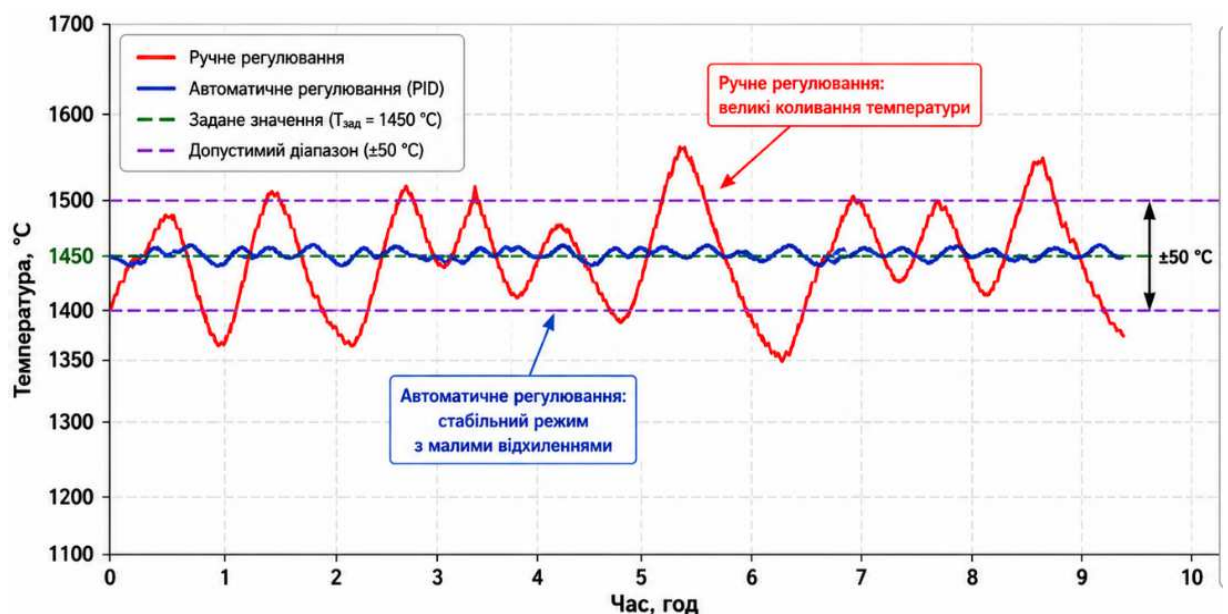


Рисунок 3.5 -Графік стабільності температурного режиму у печі

Для оцінювання ефективності роботи системи керування температурою було проведено аналіз показників стабільності температурного режиму скловарної печі при ручному та автоматичному регулюванні.

Результати показали, що при ручному регулюванні середнє значення температури становить 1448 °С, при цьому максимальна температура досягає 1595 °С, а мінімальна знижується до 1320 °С. Амплітуда температурних коливань складає 275 °С, а стандартне відхилення становить 60,2 °С, що свідчить про значні відхилення від заданого режиму та нестабільність технологічного процесу.

При використанні автоматичного регулювання на основі PID-регулятора середня температура підтримується на рівні 1450 °С, що практично повністю відповідає заданому значенню. Максимальна температура становить 1488 °С, мінімальна — 1412 °С, а амплітуда коливань зменшується до 76 °С. Стандартне відхилення температури становить лише 12,6 °С, що свідчить про високу стабільність роботи системи.

Порівняння отриманих результатів показує, що впровадження автоматичного регулювання дозволяє зменшити амплітуду температурних коливань на 72 %, а величину стандартного відхилення — на 79 %. У результаті температурний режим стає приблизно у 4,8 раза стабільнішим порівняно з ручним керуванням.

Аналіз стабільності температурного режиму підтвердив високу ефективність автоматичного регулювання температури скловарної печі. Використання PID-регулятора забезпечує підтримання температури в межах допустимого діапазону ± 50 °С від заданого значення з мінімальними відхиленнями та швидким пригніченням коливань.

Стабільний температурний режим є важливою умовою якісного плавлення скломаси та отримання продукції з однорідними характеристиками. Зменшення температурних коливань дозволяє знизити теплові напруження у футерівці печі, що сприяє збільшенню терміну служби обладнання та зменшенню витрат на його обслуговування.

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крім того, підвищення стабільності процесу позитивно впливає на енергоефективність виробництва, знижує кількість браку та забезпечує більш раціональне використання енергетичних ресурсів. Отже, застосування автоматичної системи керування температурою на базі PID-регулятора є технічно та економічно доцільним рішенням для забезпечення надійної та ефективної роботи скловарної печі.

У процесі дослідження встановлено, що застосування автоматичного регулювання дозволяє значно зменшити коливання температури у робочому просторі печі. Стабільність температурного режиму позитивно впливає на процес плавлення шихти та гомогенізацію скломаси. Завдяки рівномірному розподілу температури покращується якість готової продукції та зменшується ймовірність утворення технологічних дефектів скла.

Важливим результатом впровадження системи автоматичного керування є підвищення енергоефективності процесу скловаріння. Автоматичне регулювання подачі палива та повітря дозволяє забезпечити більш раціональне використання теплової енергії та зменшити втрати, пов'язані з перегріванням печі або нестабільністю процесу горіння, що показано графіком на рисунку 3.7. Оптимізація режимів роботи пальникових пристроїв дозволяє знизити витрати палива та скоротити експлуатаційні витрати підприємства [44].



Рисунок 3.6 -Графік енергоспоживання до і після автоматизації

Для оцінювання ефективності впровадження автоматизованої системи керування температурним режимом було проведено аналіз енергоспоживання

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

скловарної печі до та після автоматизації. Отримані результати свідчать про суттєве підвищення енергоефективності роботи обладнання завдяки використанню автоматичного регулювання температури.

До впровадження системи автоматичного керування середнє енергоспоживання печі становило 1400 кВт·год. Після впровадження автоматизованої системи цей показник знизився до 850 кВт·год, що відповідає скороченню витрат електроенергії на 550 кВт·год або приблизно на 39 %.

Аналіз добового споживання показав, що при ручному керуванні піч споживала близько 33 600 кВт·год за добу, тоді як після автоматизації цей показник зменшився до 20 400 кВт·год. Таким чином, добова економія електроенергії склала 13 200 кВт·год.

У перерахунку на місячний період роботи (30 діб) споживання електроенергії скоротилося з 1 008 000 кВт·год до 612 000 кВт·год, що забезпечило економію 396 000 кВт·год. Річне енергоспоживання зменшилося з 12 264 000 кВт·год до 7 446 000 кВт·год, а загальна річна економія склала 4 818 000 кВт·год, що також відповідає зниженню витрат приблизно на 39 %.

За умови вартості електроенергії близько 4 грн за 1 кВт·год орієнтовний економічний ефект від впровадження автоматизованої системи становить приблизно 481 800 грн на рік.

Результати аналізу підтверджують високу ефективність автоматизації системи керування температурним режимом скловарної печі. Використання автоматичного регулювання дозволило значно знизити енергоспоживання та забезпечити більш раціональне використання енергетичних ресурсів.

Середнє споживання електроенергії зменшилося на 39 %, що свідчить про суттєве підвищення енергоефективності виробничого процесу. Досягнуто більш стабільного режиму роботи печі, зменшено теплові втрати та усунено надлишкові витрати енергії, характерні для ручного керування.

Крім безпосередньої економії електроенергії, автоматизація сприяє підвищенню якості продукції, зниженню кількості браку та збільшенню

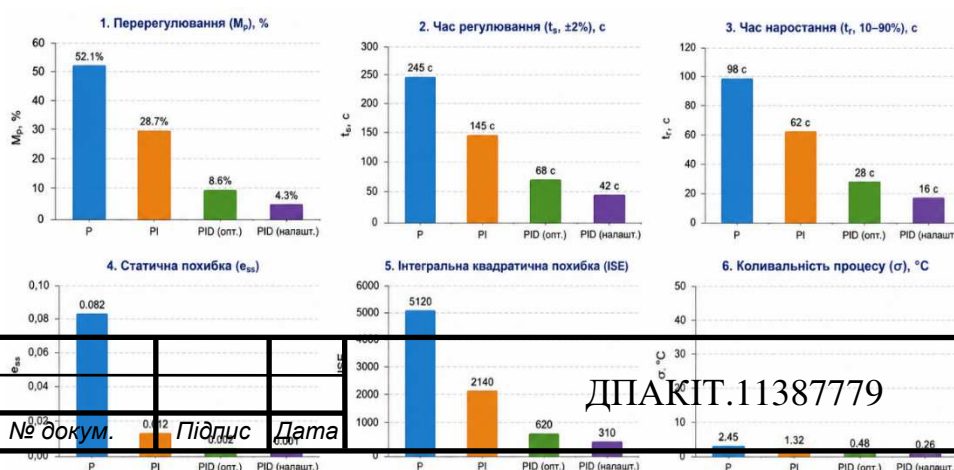
					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ресурсу технологічного обладнання завдяки підтриманню стабільного температурного режиму. Отже, впровадження автоматизованої системи керування температурою є технічно доцільним та економічно вигідним рішенням для сучасного скловарного виробництва.

Крім економічного ефекту, автоматизація процесу керування позитивно впливає на надійність роботи обладнання. Система забезпечує безперервний контроль параметрів технологічного процесу, своєчасне виявлення відхилень та формування сигналів попередження для оператора. Це дозволяє зменшити ризик виникнення аварійних ситуацій та підвищити безпечність експлуатації скловарної печі.

Сучасні автоматизовані системи керування забезпечують також функції архівування технологічних параметрів, моніторингу стану обладнання та дистанційного контролю. Використання SCADA-систем дозволяє оператору контролювати температурний режим у режимі реального часу, аналізувати зміну параметрів процесу та оперативно реагувати на виникнення аварійних ситуацій. Це підвищує ефективність роботи обслуговуючого персоналу та забезпечує централізований контроль технологічного процесу [45].

Для оцінки ефективності системи можуть використовуватись результати комп'ютерного моделювання. Імітаційне моделювання дозволяє дослідити поведінку системи автоматичного керування при різних режимах роботи, визначити реакцію системи на зовнішні збурення та оцінити якість регулювання температури (рисунк 3.7). Аналіз перехідних характеристик підтверджує, що розроблена система забезпечує стабільне підтримання температурного режиму та відповідає вимогам технологічного процесу



скловаріння [44].

Рисунок 3.7 - Діаграма показників якості регулювання

Для оцінювання ефективності різних типів регуляторів було проведено порівняння основних показників якості регулювання. Аналіз виконано для пропорційного (P), пропорційно-інтегрального (PI), оптимально налаштованого PID-регулятора та практично налаштованого PID-регулятора.

Результати дослідження показали, що пропорційний регулятор характеризується найбільшим перерегулюванням (52,1 %), найдовшим часом регулювання (245 с), значною статичною похибкою (0,082) та високою інтегральною квадратичною похибкою ($ISE = 5120$). Це свідчить про недостатню якість регулювання та значні відхилення від заданого режиму.

Застосування PI-регулятора дозволяє покращити характеристики системи. Перерегулювання зменшується до 28,7 %, час регулювання скорочується до 145 с, а статична похибка становить 0,012. Проте якість регулювання все ще залишається недостатньою для забезпечення високої стабільності температурного режиму.

Найкращі результати демонструють PID-регулятори. Для оптимально налаштованого PID-регулятора перерегулювання становить лише 8,6 %, час регулювання — 68 с, час наростання — 28 с, а інтегральна квадратична похибка зменшується до 620. Практично налаштований PID-регулятор забезпечує ще кращі показники: перерегулювання 4,3 %, час регулювання 42 с, час наростання 16 с, статична похибка 0,001 та інтегральна квадратична похибка 310.

Також спостерігається суттєве зменшення коливальності процесу. Якщо для P-регулятора стандартне відхилення становить $2,45^{\circ}\text{C}$, то для практично налаштованого PID-регулятора цей показник знижується до $0,26^{\circ}\text{C}$.

Проведене порівняння показників якості регулювання підтверджує переваги використання PID-регулятора для керування температурним режимом скловарної печі. Саме PID-регулятор забезпечує найменше

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перерегулювання, найкоротший час встановлення режиму, мінімальну статичну похибку та найнижчу коливальність процесу.

Отримані результати свідчать, що оптимально та практично налаштований PID-регулятор забезпечує найкращі показники якості регулювання за всіма розглянутими критеріями. Це дозволяє підтримувати стабільний температурний режим, підвищити точність керування технологічним процесом та забезпечити ефективну роботу скловарної печі.

Результати аналізу показують, що використання автоматичного керування дозволяє:

- підвищити точність підтримання температури;
- зменшити коливання температурного режиму;
- скоротити витрати палива;
- покращити якість скломаси;
- підвищити надійність роботи обладнання;
- зменшити вплив людського фактора.

Важливим фактором є також підвищення екологічної ефективності виробництва. Завдяки оптимізації процесу горіння зменшується кількість шкідливих викидів у навколишнє середовище та покращуються умови експлуатації теплотехнічного обладнання. Раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів сприяє зменшенню негативного впливу виробництва на довкілля.

Таким чином, проведений аналіз ефективності роботи системи автоматичного керування показує, що використання ПІД-регулятора та сучасних засобів автоматизації забезпечує стабільне підтримання теплового режиму скловарної печі, підвищення якості готової продукції та зниження енергетичних витрат. Застосування автоматизованої системи керування дозволяє підвищити ефективність технологічного процесу, забезпечити надійну та безпечну роботу обладнання, а також покращити економічні показники виробництва.

Висновки

У дипломній роботі виконано дослідження та розробку системи автоматичного керування тепловим режимом скловарної печі з метою підвищення ефективності процесу скловаріння, забезпечення стабільності температурного режиму та покращення якості готової продукції. У процесі виконання роботи проведено аналіз технологічних особливостей виробництва скла, характеристик скловарних печей та факторів, що впливають на перебіг теплотехнічних процесів у робочому просторі печі.

У теоретичній частині роботи розглянуто основи технології скловаріння, принципи функціонування скловарних печей та особливості їх роботи як об'єктів автоматизації. Встановлено, що основними характеристиками скловарної печі є значна теплова інерційність, наявність часових запізнень та складність забезпечення стабільного температурного режиму. Проведений аналіз існуючих систем автоматичного керування показав доцільність використання сучасних засобів автоматизації та програмованих логічних контролерів для забезпечення ефективного регулювання теплових процесів.

У роботі розроблено функціональну схему автоматизації системи керування тепловим режимом скловарної печі. Запропонована система забезпечує безперервний контроль температури у робочому просторі печі, автоматичне регулювання подачі палива та повітря, а також моніторинг основних параметрів технологічного процесу. Для реалізації системи керування передбачено використання датчиків температури, програмованого логічного контролера, ПІД-регулятора, виконавчих механізмів та SCADA-системи.

Розроблено алгоритм роботи системи автоматичного керування, який базується на принципі замкненого регулювання температурного режиму. Використання ПІД-регулятора дозволяє забезпечити високу точність

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підтримання температури, зменшити статичну похибку регулювання та покращити динамічні характеристики системи. У роботі розглянуто принципи налаштування параметрів регулятора та особливості їх вибору для теплотехнічних об'єктів із великою тепловою інерційністю.

У процесі дослідження побудовано математичну модель скловарної печі як аперіодичної ланки першого порядку із запізненням. На основі математичного моделювання виконано аналіз характеристик системи автоматичного керування та оцінено якість перехідних процесів. Результати дослідження показали, що запропонована система забезпечує стабільне підтримання температурного режиму, зменшення коливань температури та підвищення стійкості роботи технологічного обладнання.

Проведений аналіз ефективності роботи системи підтвердив, що автоматизація процесу керування тепловим режимом дозволяє підвищити якість скломаси, зменшити кількість дефектної продукції та забезпечити більш раціональне використання енергетичних ресурсів. Використання автоматичного регулювання сприяє підвищенню надійності роботи обладнання, зменшенню теплових перевантажень і покращенню умов експлуатації скловарної печі.

Виконана оцінка економічної ефективності впровадження системи автоматичного керування показала, що використання сучасних засобів автоматизації є економічно доцільним. Основний економічний ефект досягається за рахунок зниження витрат палива, скорочення кількості браку, підвищення продуктивності праці та зменшення витрат на технічне обслуговування обладнання. Встановлено, що впровадження автоматизованої системи керування дозволяє підвищити ефективність виробництва та забезпечити стабільність технологічного процесу.

Таким чином, поставлені у дипломній роботі завдання виконано у повному обсязі. Розроблена система автоматичного керування тепловим режимом скловарної печі забезпечує підвищення ефективності процесу скловаріння, стабільність температурного режиму, покращення якості готової

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

продукції та зниження експлуатаційних витрат, що підтверджує доцільність її
впровадження у виробничих умовах.

Список використаних джерел

1. Glass. Encyclopaedia Britannica.
URL:<https://www.britannica.com/technology/glass> (дата звернення: 07.05.2026).
2. Shelby J. E. Glass Science and Technology. 2nd ed. Cambridge : Royal Society of Chemistry, 2005. 291 p.-
URL:<https://doi.org/10.1039/9781847552590>.
3. Панасюк В. В. Підготовка сировини у скляній промисловості : навчальний посібник. Львів : Львівська політехніка, 2018. 198 с.
4. Коваленко І. М. Теплотехнічні процеси у скловарних печах : монографія. Київ : Наукова думка, 2021. 340 с.
5. Бондарчук С. О. Технологія виробництва скла : підручник. Дніпро : НТУ «ДП», 2022. 284 с.
6. Згурський В. В. Основи автоматизації теплотехнологічних процесів : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 220 с.
7. Ковальчук І. М. Теплові процеси та теплообмін у промислових печах : монографія. Київ : Наукова думка, 2021. 312 с.
8. Faber A. J. Glass Furnaces: Design and Operation. London : Society of Glass Technology, 2002.
9. Бондаренко О. В. Конструкція та експлуатація промислових печей : підручник. Львів : Львівська політехніка, 2019. 288 с.
10. Bacci di Capaci R., et al. Model-Based Control of a Glass Melting Furnace. IFAC-PapersOnLine. 2024. Vol. 58, Issue 14, pp. 253–258.-
URL:<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.08.042> (дата звернення: 12.05.2026).
11. Гавриленко В.І. Автоматизація технологічних процесів у промисловості. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 356 с.

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 12.Савченко О.М. Системи автоматичного керування тепловими процесами. Харків: ХНУРЕ, 2019. 290 с.
- 13.Петренко Ю.В. Вимірювальні прилади та датчики в промисловій автоматизації. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. 240 с.
- 14.Åström K. J., Hägglund T.PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 2nd ed. Research Triangle Park : ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 1995.- URL:<https://www.control.lth.se>(дата звернення: 13.05.2026).
- 15.Шевчук А.В. Інтелектуальні системи керування та SCADA-технології. Київ: Ліра-К, 2023. 280 с.
- 16.Савчук Р. В. Автоматизація технологічних процесів у промисловості: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 312 с.
- 17.Ковальчук О. М., Литвиненко В. П. Системи автоматичного керування технологічними процесами. Харків: ХНУРЕ, 2020. 278 с.
- 18.Fraden J.Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. 5th ed. Cham : Springer, 2016.- URL:<https://doi.org/10.1007/978-3-319-19303-8>(дата звернення: 13.05.2026).
- 19.Гаврилюк В. І. Програмовані логічні контролери в промисловій автоматизації. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. 245 с.
- 20.Бойко О. В. SCADA-системи та диспетчерське керування технологічними процесами. Київ: Видавничий дім «Політехніка», 2022. 260 с.
- 21.ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. - Київ : УкрНДНЦ, 2016. - 26 с.
- 22.Ковальчук П. А. Теорія автоматичного керування технологічними процесами : навч. посіб. - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. - 340 с.

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 23.Бойко М. С., Гончарук В. В. Датчики та вимірювальні системи в промисловості : навч. посіб. - Львів : НУ «Львівська політехніка», 2019. - 276 с.
- 24.Сидоренко О. В. Програмовані логічні контролери в системах автоматизації : навч. посіб. - Харків : ХНУРЕ, 2020. - 298 с.
- 25.Шевченко І. М. SCADA-системи та сучасні технології автоматизації виробництва : навч. посіб. - Дніпро : НТУ «ДП», 2022. - 250 с.
- 26.Дьяконов В. П. Системы автоматического управления технологическими процессами / В. П. Дьяконов. - Київ: Техніка, 2018. - 368 с.
- 27.Мельник В. І. Термопари та термометрія високих температур у промисловості. - Харків: ХНУРЕ, 2020. - 214 с.
- 28.Савченко І. М. Автоматизація теплотехнічних процесів і Під-регулювання. - Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2021. - 312 с.
- 29.Stuart A. BoyerSCADA: Supervisory Control and Data Acquisition. Research Triangle Park : ISA (International Society of Automation), 2010. - URL:<https://www.isa.org>(дата звернення: 14.05.2026).
- 30.Гончарук П. В.SCADA-системи в промисловій автоматизації. - Одеса: ОНПУ, 2022. - 256 с.
- 31.Бутковський О. В.Математичне моделювання технічних систем. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. - 340 с.
- 32.Клименко М. П.Теплотехнічні процеси та теплообмін у промислових печах. - Харків: ХНУМГ, 2019. - 276 с.
- 33.Åström K. J., Hägglund T.Advanced PID Control. Research Triangle Park : ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.- URL:<https://www.control.lth.se>(дата звернення: 14.05.2026).
- 34.Яковенко Д. А.Комп'ютерне моделювання систем керування в MATLAB/Simulink. - Київ: НАУ, 2022. - 288 с.
- 35.Сидоренко В. Л.Аналіз та синтез систем автоматичного керування. - Одеса: ОНПУ, 2018. - 295 с.

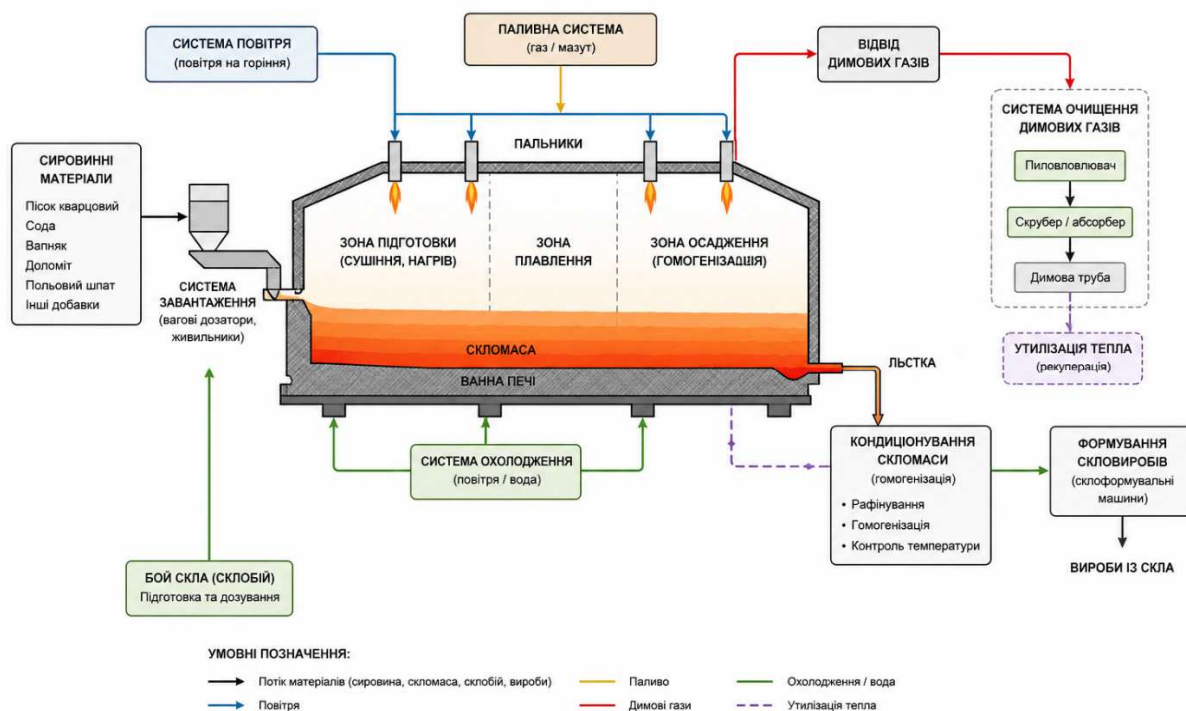
					ДПАКІТ.11387779	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 36.Сидоренко В. П. Системи автоматичного керування: теорія та практика. Харків : НТУ «ХПІ», 2021. 356 с.
- 37.Ткаченко М. В. Теплотехнічні процеси та автоматизація промислових печей. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 298 с.
- 38.Ковела І. М. Автоматичні системи регулювання з цифровими ПІД-регуляторами, увімкненими за схемами послідовної та послідовно-паралельної корекції // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». - 2002. - № 460 : Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. - С. 3-11. - URL: <https://ena.lpnu.ua/items/cdad6bf7-295c-429a-9f13-d1d93fcb62fe> (дата звернення: 15.05.2026).
- 39.Демченко А. С. Комп'ютерне моделювання в MATLAB/Simulink для інженерних систем. Одеса : ОНПУ, 2022. 312 с.
- 40.Кравченко І. В. PLC та SCADA системи в промисловій автоматизації. Дніпро : НМетАУ, 2021. 274 с.
- 41.Ситніков О. В. Моделювання та автоматичне керування тепловим режимом скловарної печі ванного типу : дис. ... канд. техн. наук :05.13.07 - Автоматизація процесів керування / О. В. Ситніков ; КПІ ім.Ігоря Сікорського. - Київ, 2023. - 200 с.URL:<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/60257> (дата звернення: 11.06.2026).
- 42.Системи автоматичного керування : підручник / Національний університет «Львівська політехніка». - Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2019. - 410 с.
- 43.Оппенгейм А. В., Вілскі А. С. Сигнали та системи : підручник / А. В. Оппенгейм, А. С. Вілскі ; пер. з англ. - Київ : Видавництво «Ліра-К», 2015. - 600 с.URL: <https://lira-k.com.ua/product/signal-y-ta-sistemy-oppenheim-willsky>(дата звернення: 11.06.2026).
- 44.Імітаційне моделювання систем керування в MATLAB/Simulink : навчальний посібник / КПІ ім. Ігоря Сікорського. - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 250 с.

					ДПАКІТ.11387779	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

45. SCADA-системи та промислова автоматизація : навчальний посібник /
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського,
2021. - 300 с.

Функціональна схема скловарної печі



ДП.АКІТ1138779

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка системи автоматичного керування тепловим режимом скловарної печі		
Розроб.	Чижов						
Перевір.	Гуменний П.В.				ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-42/1		
Консульт.							
Н. Контр.	Заставний О.						
Затверд.	Сегін А.І.						
					Літ.	Арк.	Акрушіє
						66	