

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій

Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

Ступінь вищої освіти "магістр"

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

Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

КІНЬ Ірина Ігорівна

Система автоматизації процесу виробництва скла / System of automation of the glass
production process

керівник роботи д.т.н., професор Н.Я.Возна

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Ступінь вищої освіти "магістр"
Спеціальність: 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін

“ ____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

КІНЬ Ірина Ігорівна

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

_____ Система автоматизації процесу виробництва скла / System of automation of
the glass production process _____

_____ керівник роботи _____ д.т.н., професор Н.Я.Возна _____

затверджені наказом по університету від 12 грудня 2023 р. № 753

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи:

30 листопада 2024р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

- _____ 1. Характеристики технологічного процесу виготовлення скловиробів _____
_____ 2. Технологічні параметри скловарної печі _____

3. Характеристики мікроконтролера

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз технологічного процесу
2. Проєктування системи автоматизації та вибір технічних засобів
3. Розрахунок параметрів регулювання температури скловарної печі

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Технологічна схема варіння скла
2. Технологічна схема випалювання тари
3. Технологічна схема автоматизації
4. Структурна схема об'єкту регулювання
5. Структурна схема замкненої САР

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Возна Н.Я. д.т.н., професор, професор кафедри СКС		
2	Возна Н.Я. д.т.н., професор, професор кафедри СКС		
3	Возна Н.Я. д.т.н., професор, професор кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 20 жовтня 2023р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу	11.2024р. – 12.2024р.	
2	Проектування системи автоматизації та вибір технічних засобів	01.2025р. – 04.2025р.	
3	Розрахунок параметрів регулювання температури скловарної печі	04.2025р. – 10.2025р.	

Студент

Кінь І.І.

(підпис)

Керівник роботи

д.т.н., проф. Возна Н.Я.

(підпис)

РЕФЕРАТ

Кінь І.І. Система автоматизації процесу виробництва скла. – Рукопис.

Дослідження на здобуття ступеня вищої освіти «магістр» за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітньо-професійна програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2024.

У роботі проаналізовано технологічний процес виготовлення скловиробів, де основна увага приділена аналізу характеристик та параметрів скловарної печі, побудовані структури систем управління, регулювання, контролю, розроблена функціональна схема автоматизації, обґрунтовано вибір технічних засобів, зокрема контролера LAGOON-7000, розраховані параметри регулювання температури скловарної печі.

ABSTRACT

Kin I. System of automation of the glass production process. - Manuscript.

Research on obtaining the degree of higher education "master" in specialty 174 "Automation and computer-integrated technologies", educational and professional program. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2024.

The work analyzes the technological process of manufacturing glass products, where the main attention is paid to the analysis of the characteristics and parameters of the glass furnace, the structures of management, regulation, and control systems are built, the functional scheme of automation is developed, the choice of technical means, in particular the LAGOON-7000 controller, is justified, the temperature control parameters of the glass furnace are calculated.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ.....	9
1.1 Схема технологічного процесу виготовлення скловиробів.....	10
1.2 Опис та характеристики скловарної печі.....	18
1.3 Регульовані параметри в печі.....	20
1.3.1 Температури протікання виробничих процесів.....	21
1.3.2 Атмосфера скловарної печі.....	22
1.3.3 Тиск і тяга.....	23
1.3.4 Рівень скломаси.....	25
1.3.5 Регенератори.....	26
2. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ	27
2.1 Структура систем управління, регулювання, контролю.....	27
2.2 Розроблення функціональної схеми автоматизації	29
2.3 Вибір технічних засобів	33
2.3.1 Контролер LAGOON-7000.....	34
2.3.2. Термопара.....	39
2.3.3 Вимірювальний перетворювач тиску APLISENS PC-28.....	41
2.3.4 Заслінки поворотні DANFOSS APORIA.....	42

2.3.5 Трансмітер SITRANS T universal transmitter 7NG-3040.....	44
2.3.6 Електричний привод клапана метелик ESW-16.....	45
2.3.7 Електродвигун АД 112 М4.....	45
2.3.8 Перетворювач частоти "Delta Electronics" моделі VFD150B43A.....	46
2.3.9 Лазерна система вимірювання і регулювання рівня скла в печі	49
 3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ.....	 51
3.1 Математична модель системи автоматичного регулювання температури скловарної печі	51
3.2 Вимоги до якісних показників функціонування САР.....	54
3.3 Апроксимація перехідної характеристики об'єкту управління	56
3.4 Розрахунок регулятора САР.....	59
3.5 Моделювання та оптимізація САР.....	60
3.6 Аналіз чутливості САР температури.....	63
ВИСНОВКИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68
ДОДАТКИ.....	71

ВСТУП

Актуальність досліджень. Сучасні хіміко-технологічні процеси вирізняються складністю, високою швидкістю протікання, чутливістю до відхилень режимних параметрів, а також небезпечними умовами праці та ризиками вибухів і пожеж через специфіку оброблюваних речовин. З підвищенням навантаження на апарати та потужності обладнання виконувати такі процеси вручну, особливо при високих тисках і температурах, стає неможливим. Навіть досвідчені оператори не завжди можуть вчасно реагувати на відхилення процесу, що може спричинити втрату якості продукції, псування сировини, допоміжних матеріалів і призвести до аварійних ситуацій, таких як пожежі, вибухи, або значні викиди шкідливих речовин в атмосферу. Деякі процеси можливі лише при повній автоматизації.

Автоматизація передбачає моніторинг, регулювання, сигналізацію та блокування критичних параметрів за допомогою спеціалізованих автоматичних пристроїв. Питання автоматизації на сьогодні є особливо актуальним [1-4]: в умовах жорсткої конкуренції перевагу має той, хто впроваджує досконаліше обладнання. Використання автоматизації сприяє покращенню якості продукції, зростанню продуктивності праці, підвищенню рівня безпеки та зниженню втрат. На цей час автоматизовано процеси зважування сировини, змішування компонентів шихти, роботи завантажувачів шихти у печах, контроль параметрів скловарної печі.

Автоматичне регулювання температури скломаси в діапазоні 1300-1500°C здійснюється через управління подачею газу до пальників. Керуючий сигнал формується на основі даних з датчиків температури та витрати газу, і передається на виконавчий механізм, який регулює заслінку подачі газу до пальників [4-7].

Метою роботи є створення автоматизованої системи регулювання температури, яка забезпечуватиме необхідну точність контролю, високу надійність, знижене споживання теплоносія та стабільну якість скломаси. У автоматизованому виробничому процесі роль оператора зводиться до налаштування, обслуговування

та контролю роботи засобів автоматизації, а також до моніторингу їхнього функціонування.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз технологічного процесу скловаріння та визначити ключові параметри, що підлягають регулюванню;
- оцінити поточний рівень автоматизації на підприємствах даної галузі;
- дослідити компоненти системи автоматичного керування температурою в скловарній печі;
- вивчити структуру систем контролю, регулювання та управління;
- здійснити вибір технічних засобів для реалізації автоматизації.

Об'єктом дослідження є скловарна піч, яка виступає основним агрегатом у виробництві скла, де здійснюється теплова обробка сировинних матеріалів, формування скломаси та виготовлення склотари.

Предметом дослідження є САУ регенеративною скловарною піччю безперервної дії з поперечним напрямком руху полум'я та проточною системою.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в комплексному підході до аналізу і вдосконалення процесу автоматизації варіння скла, що включає дослідження, оцінку та розробку нових рішень для підвищення ефективності та якості виробництва.

Практичне значення отриманих результатів полягає в автоматизації процесу варіння скла, яка охоплює автоматичне регулювання, технологічні блокування та сигналізацію. Це забезпечує безперервний контроль і підтримку процесів у скловарній печі, включаючи подачу природного газу, подачу повітря, регулювання рівня і тиску, а також функціонування автономного контуру та інших необхідних параметрів.

Апробація. Кінь.І. Комп'ютеризовані системи автоматизації технологічних процесів у промисловому виробництві / Ірина Кінь, Андрій Дунець, Роман Дякун // Збірник матеріалів науково-практичного симпозіуму «Технології інтернету речей: системи та рішення» (ТІР СТ - 2024), Тернопіль, 2024. - С.32-35.

Дякун Р. Автоматизація процесу виробництва склотари / Роман Дякун, Ірина Кінь // Збірник матеріалів науково-практичного симпозіуму «Технології інтернету речей: системи та рішення» (ТІР СТ - 2024), Тернопіль, 2024. - С.67-70.

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВАРІННЯ СКЛА В ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА СКЛОТАРИ

Хімічна промисловість займає провідне місце за рівнем автоматизації серед інших галузей, оскільки її виробничі процеси відзначаються безперервністю і швидким розвитком перехідних режимів [1, 2, 4, 8-12]. Практично всі операції на хімічних установках механізовані, що сприяє широкому впровадженню автоматизації.

Автоматизація технологічних параметрів дає суттєві переваги, серед яких:

- зменшення кількості робочого персоналу та підвищення продуктивності праці;
- зміна характеру роботи обслуговуючого персоналу;
- підвищення точності підтримки температурних параметрів у скловарній печі;
- підвищення безпеки праці та надійності обладнання;
- поліпшення економічності роботи скловарної печі.

Автоматизація процесу варіння скла охоплює автоматичне регулювання, технологічні блокування та сигналізацію для забезпечення стабільності безперервних процесів.

Автоматичне регулювання забезпечує безперебійний перебіг процесів у скловарній печі, зокрема контроль за подачею природного газу, повітря, регулюванням рівня і тиску, а також функціонування автономного контуру. Системи автоматичного контролю з використанням показуючих приладів відстежують і відображають ці параметри безперервно, дозволяючи персоналу контролювати процеси зі зручних центральних пультів управління.

Технологічні блокування забезпечують послідовність операцій під час запуску й зупинки механізмів, запобігаючи неправильним діям під час обслуговування. У разі аварійних ситуацій блокування послідовно вимикають відповідне обладнання, захищаючи його від пошкоджень.

Системи технологічної сигналізації інформують персонал про поточний стан обладнання, заздалегідь попереджають про досягнення критичних параметрів та повідомляють про аварійні ситуації. Для цього використовується як звукова, так і світлова сигналізація, що сприяє швидкому реагуванню на зміни в технологічному процесі.

1.1 Схема технологічного процесу виготовлення скловиробів

Традиційна технологія промислового виробництва скла включає кілька етапів: підготовку сировинних матеріалів, складання шихти, варіння скла, охолодження скломаси, формування виробів, а також їх відпал та подальшу обробку (термічну, хімічну або механічну). Після завершення обробки продукція проходить контроль якості, упаковується та відправляється на зберігання. [3, 4, 7, 8].

Узагальнена технологічна схема промислового способу отримання склотари, яка ілюструє всі ключові етапи процесу зображена на рисунку 1.1.

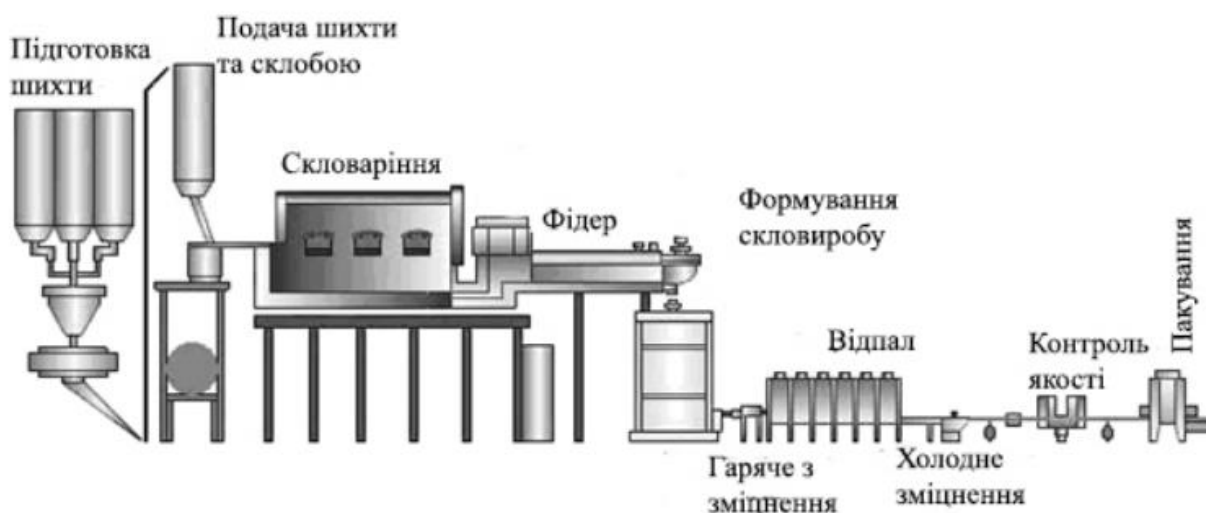


Рисунок 1.1 – Технологічна схема промислового способу отримання склотари

Процес виготовлення склотари складається з таких етапів [1, 2]:

Перший етап: підготовка шихти до подачі в піч.

Технологічна схема підготовки шихти (рисунок 1.2) включає такі компоненти: 1 – система транспортерів; бункери запасу з: 2 – піском; 3 – кальцинованою содою; 4 – вапняком; 5 – іншими добавками, зокрема барвниками; 6 – змішувач; 7 – склобій.

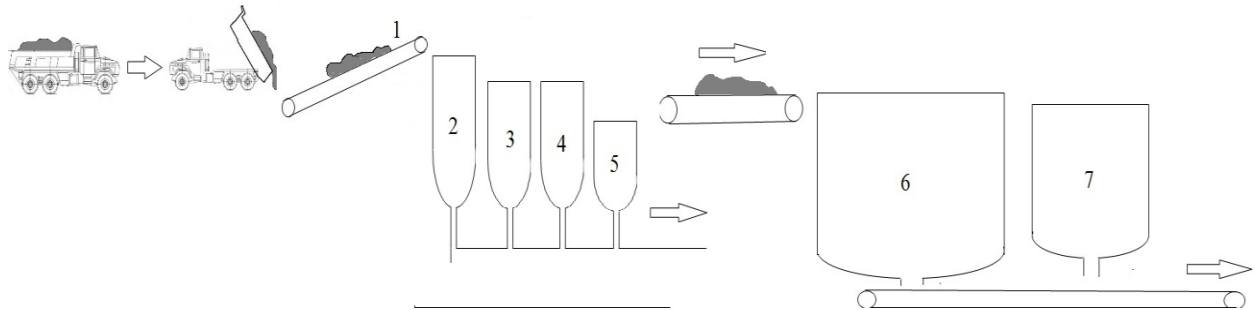


Рисунок 1.2 – Схема підготовки шихти до подачі в піч

Підготовка сировини: скло для виготовлення тари створюють із суміші природних корисних копалин: 71% кремнезему (кварцового піску), 14% натрію (кальцинованої соди), 11% кальцію (вапняку) і 4% інших компонентів, зокрема барвників. Основну підготовку сировини здійснюють на скловарних заводах, що охоплює такі процеси:

- подрібнення матеріалів, які надходять великими шматками (наприклад, вапняк);
- сушіння вологих матеріалів (пісок, вапняк);
- просіювання всіх матеріалів через сита потрібного розміру.

Якщо пісок надходить із збагачувальних фабрик, він лише просіюється. Після цього всі підготовлені матеріали надходять у бункери для зберігання, звідки їх подають на дозування.

Приготування скляної шихти: шихта – це однорідна суміш підготовлених і зважених компонентів, створених за заданою рецептурою. Сучасне приготування шихти відбувається в механізованих цехах із повним циклом операцій з підготовки та усереднення сировини. До складу цеху входять склад сировини, приймальний павільйон та дозувально-змішувальне відділення, що включає витратні бункери,

систему подачі матеріалів із силосів, автоматичні ваги, змішувачі, транспортувальні пристрої та бункери зберігання шихти.

Ключові стадії підготовки скляної шихти:

- дозування компонентів;
- змішування та зволоження шихти;
- додавання склобою;
- контроль якості.

Другий етап: варіння скла.

Технологічна схема варіння скла приведена на рисунку 1.3, де 1 – скловарна піч, 2 – ножиці.

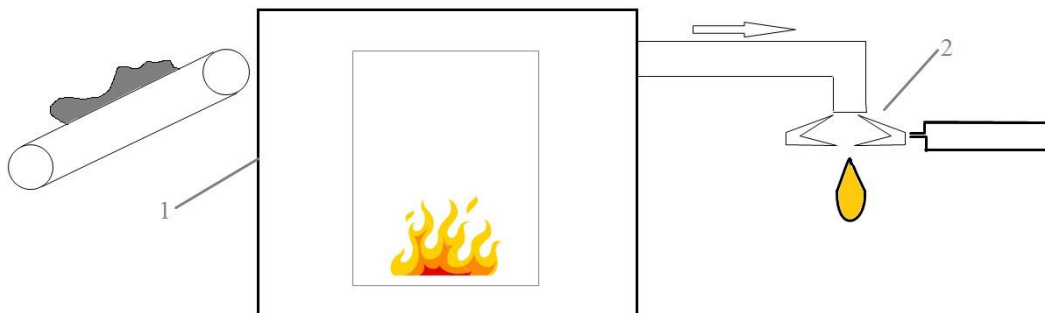


Рисунок 1.3 - Технологічна схема варіння скла

Суміш сировини та склобою постійно перемішується в скловарній печі, яка нагрівається до 1570°C і працює безперервно - 24 години на добу, сім днів на тиждень, з терміном служби 8–10 років. Після 24 годин плавлення подана в піч сировина перетворюється на скло. Розплавлене скло розділяють на краплі певної ваги і форми, які потім направляють до формувальних машин.

Процес варіння скла - це термічний етап, де суміш різнорідних компонентів перетворюється на однорідний розплав. Основні етапи цього процесу:

1. Силікатоутворення: на цьому етапі утворюються силікати та інші проміжні сполуки, і для звичайного скла він завершується при $950\text{--}1150^{\circ}\text{C}$.

2. Склоутворення: спек, утворений на попередньому етапі, плавиться при підвищенні температури, завершується силікатоутворення і відбувається

розчинення залишкового кварцу, що формує прозорий, але ще неоднорідний розплав із великою кількістю бульбашок. Етап завершується при 1200–1250°C.

3. Освітлення (дегазація): видаляються газові домішки у вигляді пухирців, і процес завершується при 1500–1600°C.

4. Гомогенізація: на цьому етапі відбувається усереднення складу, що робить розплав хімічно однорідним. Цей процес відбувається паралельно з освітленням і при таких самих температурах.

5. Студка (охладження): температура знижується на 300–400°C, щоб забезпечити потрібну в'язкість для подальшого формування скла.

Розподіл процесу на ці етапи умовний, оскільки в промислових умовах вони перекриваються. Лише перший і п'ятий етапи розмежовані в часі та просторі, тоді як перші два етапи йдуть одночасно до завершення склоутворення, а третій і четвертий - безперервно.

Третій етап: формування виробу.

Формування скла є ключовою стадією виробництва після варіння, і разом ці два етапи визначають механізоване скляне виробництво, його спеціалізацію, технічний рівень і економічну ефективність. На цьому етапі скляні краплі набувають форми за допомогою стиснутого повітря. Коли скло маса досягає готовності, її охолоджують до температури, при якій вона набуває в'язкості, і починається етап видування скляних форм. Порція відрізається за допомогою спеціальних ножиць і подається через розподільник на вільну секцію для формування.

Формування пляшки відбувається у два етапи: спочатку формується зовнішня поверхня, а потім внутрішня. На етапі видування спочатку створюється заготовка пляшки, близька до форми готового виробу, у чорновій формі. Після формування горла з чорнової форми роздувається сама кулька до остаточного формування (рисунок 1.4).

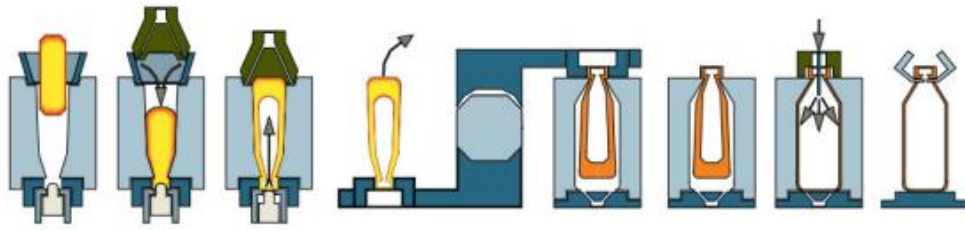


Рисунок 1.4 – Схема видування виробу

Після цього готова пляшка переміщується на охолоджувальну платформу. Коли пляшки та банки виходять із формувальної машини, їхня температура становить близько 1060°F. Увесь процес видування займає лише кілька секунд.

Четвертий етап: випалювання.

Для додаткової термічної обробки (відпалу) вироби подаються в тунельну піч прямого нагрівання (Lehr).

Технологічна схема випалювання тари приведена на рисунку 1.5.

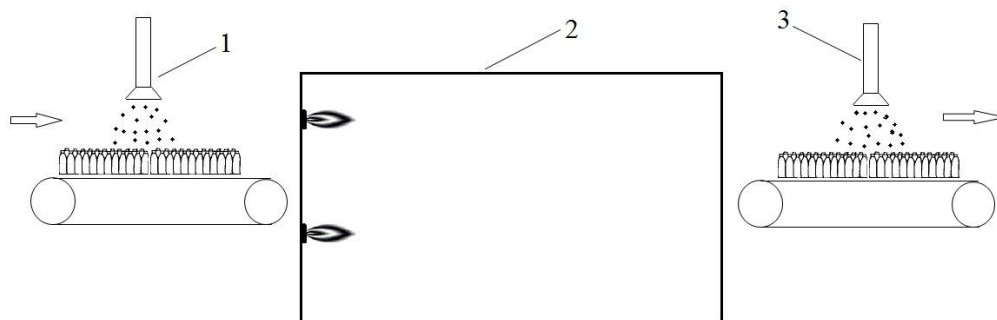


Рисунок 1.5 - Технологічна схема випалювання тари

На рисунку 1.5 позначено такі елементи: 1 – система нанесення захисного покриття перед відправленням у піч відпалу, 2 – піч відпалу (Lehr), 3 – система нанесення захисного покриття після виходу з печі відпалу.

Щоб забезпечити міцність і твердість щойно сформованих виробів, їх нагрівають і потім поступово охолоджують за спеціальною процедурою у печі відпалу. Цей процес триває від 30 хвилин до 2 годин. Для підвищення стійкості пляшок і банок їх покривають захисним шаром двічі: перший раз перед

відправленням у піч, коли вони ще гарячі, і вдруге - після виходу з печі. На цьому завершується виробничий процес виготовлення склотари.

Комбіноване захисне покриття та процес відпалу скловиробів.

Захисно-зміцнюючий ефект посилюється при нанесенні комбінованих покриттів: на гарячому конвеєрі вироби обробляються спеціальними речовинами, а в холодній зоні печі відпалу наносять силіцієорганічні або органічні покриття. Таке комбіноване покриття значно зменшує кількість биття склотари під час транспортування та на мийно-розливальних лініях харчових підприємств, підвищуючи її міцність і експлуатаційну надійність на 15–30%.

Для нанесення покриття на поверхню скляних виробів використовуються спеціальні установки. Речовина надходить із резервуара за допомогою насоса, а її подачу контролює датчик протоку, який подає сигнал «Аварія» при зупинці подачі. Речовину подають у систему вентиляторів, які змішують її з повітрям та обробляють склотару.

Під час формування та охолодження скловиробів між зовнішніми та внутрішніми шарами виникає температурна різниця через низьку теплопровідність скла. Це призводить до появи напружень стиску та розтягу через нерівномірне охолодження. Швидкість зняття напружень пропорційна текучості скла і обернено пропорційна його в'язкості.

Коли скло повністю охолоджується і температура стає рівномірною по всьому об'єму, напруження або зникають, або залишаються. Напруження не виникають, якщо охолодження відбувається при температурі, де виключені в'язкі деформації. У випадку загартованого або відпаленого скла можуть залишатися залишкові напруження, які залежать від швидкості охолодження, товщини стінок виробу та температури, від якої починається охолодження.

Процес відпалу складається з чотирьох стадій.

1. Попереднє нагрівання або охолодження виробів до вищої температури відпалу.
2. Витримка при цій температурі.
3. Повільне охолодження в інтервалі відпалу.

4. Швидке охолодження до нормальної температури.

Система для нанесення полімерного покриття.

Система складається з двох резервуарів з полімером, які підключені паралельно: один резервуар працює, інший - резервний. Стиснене повітря, контрольоване манометром, подається в резервуар, витискаючи рідину через ультразвуковий датчик витрати, який регулює відкриття електромагнітного клапана. Полімер розпилюється форсункою між рядами склотари, забезпечуючи легке тертя виробів один об одного, що полегшує їх упаковку та транспортування.

П'ятий етап: контроль якості.

Для забезпечення високої якості продукції кожен виріб проходить ретельну перевірку за допомогою спеціалізованого обладнання, зокрема технологій оптичного відеоспостереження та світлової інспекції. Особливу увагу приділяють перевірці горловини, товщини скла, розмірів та загального вигляду пляшки. Вироби, що не відповідають стандартам, автоматично знімаються з конвеєра та повертаються на етап плавлення.

Шостий етап: пакування та відвантаження.

Важливим економічним чинником скляної промисловості, в тому числі і склотарного виробництва, є упаковка, транспортування та зберігання готової продукції. У зв'язку з цим розробляються нові способи і пристрої для автоматичного і напів автоматичного пакування, механізованого транспортування і раціонального зберігання упакованої продукції. Метою даних розробок є максимально можливе запобігання забрудненню і пошкодженню скляної тари.

Для пакування виробів в пакети з термоусадочної плівки застосовують різні пристрої і конвеєрні лінії (рисунки 1.6).

Лінія працює наступним чином. Піддони подаються механізмом 1 і після передачі на конвеєр 2 транспортуються до пристрою формування пакету. Згруповані в кілька рядів вироби 3 укладальником з грайферною головкою 4 передаються для формування пакета 5 з одночасною подачею прокладок.

Сформований пакет по конвеєру 2 надходить в установку запакування 7. Чохли з термоусадочною поліетиленовою плівкою формуються з розмотуючого рулону 6. Запакованим пакет надходить в установку термічної усадки плівки 8, де в якості нагрівача може використовуватися рамка 9 з лампами інфрачервоного випромінювання. Рухаючись по вертикалі, рамка забезпечує розігрів і усадку плівки по висоті пакета. Далі готовий пакет-піддон 11, обтягнутий плівкою, подається за допомогою роликового конвеєра 10 до місця навантаження в транспортні засоби.

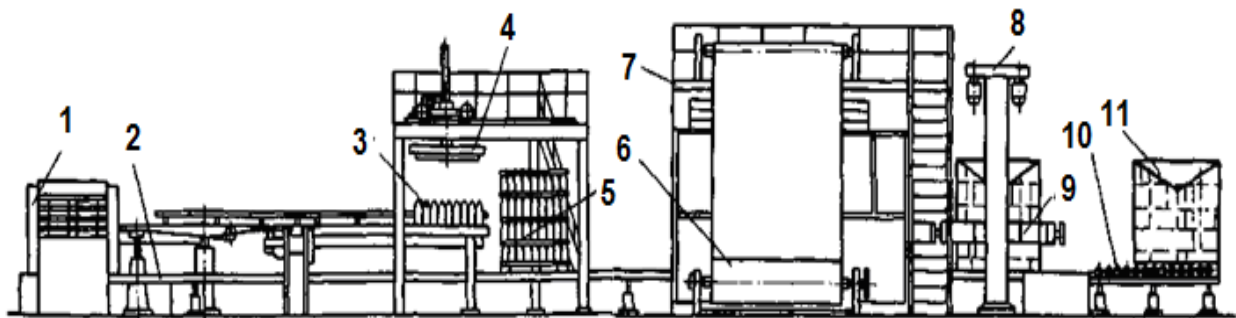


Рисунок 1.6 - Лінія для пакування виробів

Після упакування вся склотара за допомогою підйомників перевозиться на склад готової продукції, звідки потім завантажується на транспортні засоби, які доставляють продукцію замовнику.

1.2 Опис та характеристики скловарної печі

Для виготовлення скляних виробів використовують скловарні печі різних конфігурацій, які відрізняються за конструкцією, продуктивністю та режимом роботи. Скловарна піч є основним обладнанням у скляному виробництві. У ній відбуваються процеси термічної обробки сировини, отримання скломаси та формування склотари [5, 7, 9].

В цілому піч поділяється на три зони:

- зона варіння, де температура регулюється вручну;

- зона освітлення, де автоматично підтримується необхідна температура;
- робоча зона, у якій температуру також контролюють вручну.

Загальний вигляд скловарної печі показаний на рисунку 1.7.

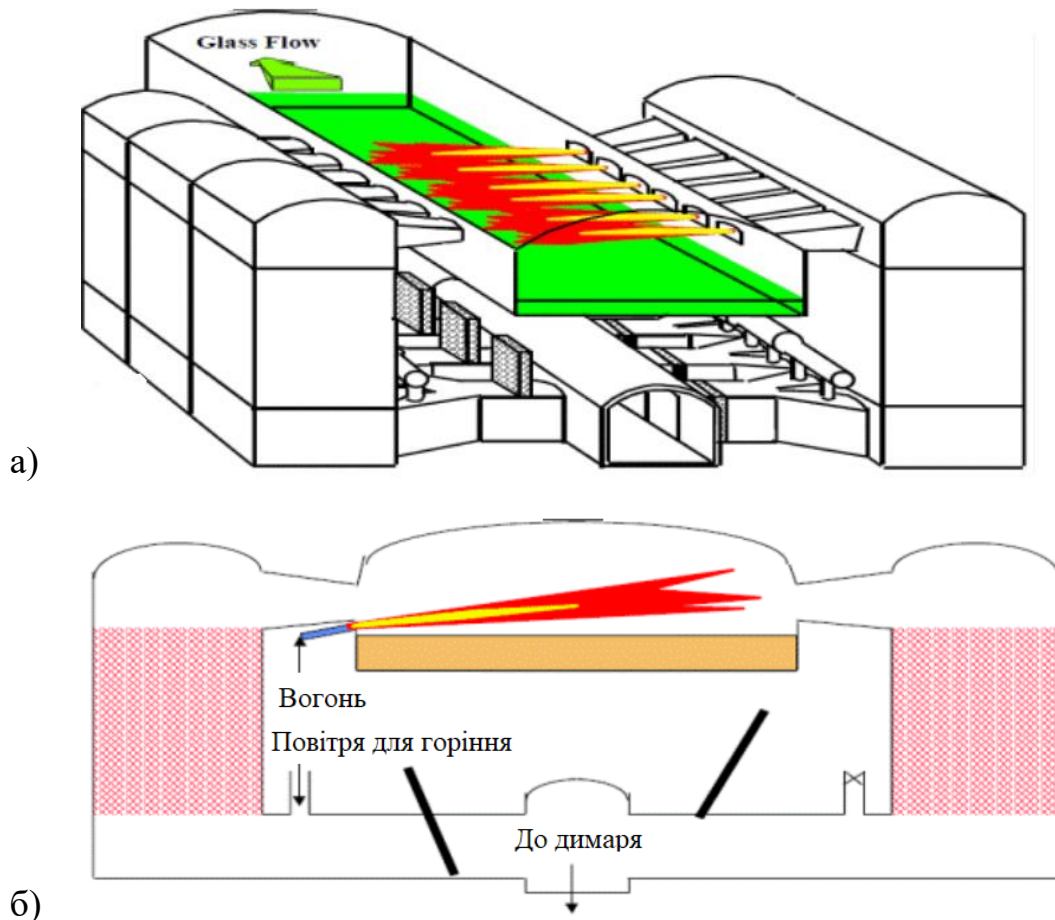


Рисунок 1.7 – Типова конструкція скловарної печі (а) та її поперечний переріз (б).

Ванна скловарної печі є складним теплотехнічним пристроєм, конструкція якого визначається методом нагрівання, напрямком руху димових газів і способом поділу басейну та полум'яного простору. Вона включає робочу камеру, пальники, систему для використання тепла димових газів, перевідні клапани, фундамент, опори та каркас. У великих регенеративних печах вогонь рухається поперечно, а в менших - може мати підковоподібний або поздовжньо-поперечний напрямок. Для виготовлення склотари зазвичай обирають печі з поперечним напрямком полум'я, оскільки вони дозволяють краще регулювати тепловий режим по всій довжині печі, створюючи оптимальні умови в зонах варіння.

У печах із поперечним напрямком вогню використовуються секційні регенератори, що дають можливість регулювати температуру підігріву повітря для

кожного пальника. Найвищу продуктивність забезпечують проточні печі з бурлінням скломаси без виробного басейну, де перемішування та освітлення скломаси відбуваються у тонкому шарі. Бурління у зоні варіння прискорює процеси утворення силікатів і скла, а тонкошарове освітлення сприяє кращому прогріванню скломаси та інтенсифікації процесу. Завдяки цьому проточні печі забезпечують високу продуктивність при невеликих розмірах.

Основною вимогою до конструкції високопродуктивних скловарних печей з полум'яним нагрівом є здатність підтримувати температуру до 1600-1650°C для процесу варіння скла. Це впливає на конструкцію завантажувальних кишень, пальникових пристроїв і потоків. Завантажувальні кишені повинні бути герметичними для запобігання виходу полум'я та проникнення холодного повітря. Особливу увагу потрібно приділити правильному розташуванню полум'я і високому ступеню підігріву повітря (до 1400-1500°C).

Для варіння скломаси обираємо безперервну регенеративну проточну піч із поперечним напрямом полум'я, оснащену однією парою пальників, які розміщені з боків - по три пальники з кожного боку на кожну зону. Горіння здійснюється почергово з різних боків із перемиканням полум'я кожні 30 хвилин, а варильний і робочий басейни з'єднані протоком.

Технічні характеристики печі.

Варіння відбувається через взаємодію палаючого газу із надлишком повітря ($\alpha=1,1,2$). Повітря проходить через регенератори, де нагрівається до 900°C. Якість проварювання контролюється системою барботування із 13 точками, розташованими в шаховому порядку. Скломаса подається через три фідери з незалежним опаленням природним газом і трьома робочими зонами.

Тепловий режим.

Температура у просторі вогню контролюється термопарою ТПП. Вимірювання температури відбувається за показами термопар, які щогодини контролюються термоелектричними перетворювачами, встановленими в пересіченні кожної зони печі на 50 мм нижче рівня склепіння. Температура нагріву верхніх і нижніх насадок регенераторів контролюється термоелектричними

перетворювачами, встановленими в рубашках регенераторів. Покази вимірювальних приладів архівуються контролером і реєструються кожні 30 хвилин. Температура диму визначається термопарою, встановленою у кладці піднасадочного каналу. Полум'я перемикається дистанційно або автоматично кожні 20 хвилин.

1.3 Регульовані параметри в печі

Скловаріння потребує високих температур, тому для їх вимірювання застосовуються виключно термоелементи, які не потребують ремонту. Термопари розміщені у вогнетривкій сталевій трубці, що вставлена в керамічну захисну трубку. Термопари для вимірювання температури у варильній частині, залежно від температурних значень, належать до типу ТПП, а в зонах з нижчими температурами використовуються термопари типу ТХА. Оскільки термопари занурюються в скломасу, керамічна захисна трубка має платиновий кожух.

Температура у скловарній печі вимірюється і реєструється в наступних точках:

- склепіння варильної частини,
- дно варильної частини,
- склепіння регенеративної камери,
- верхня частина насадки регенератора,
- середня частина насадки регенератора,
- простір під насадкою регенеративної камери,
- виробна частина,
- димовий канал перед трубою.

1.3.1 Температури протікання виробничих процесів

Температурний градієнт має ключове значення у процесі варіння та освітлення скломаси, впливаючи на розподіл шихти, якість скломаси, витрати енергії та термін служби печі. Точно визначити температурний градієнт заздалегідь

складно, оскільки він залежить від індивідуальних характеристик кожної скловарної печі. При виборі оптимальної температурної кривої варіння важливо забезпечити рівномірне підвищення температури від мінімальної, на місці подачі шихти, до максимальної, біля потоку.

Для вибору температурної кривої встановлюються такі орієнтовні значення:

- температура зводу над зоною освітлення: 1550–1600°C (термоелемент розташований у газовому просторі);
- температура дна біля завантажувальної кишені: 1180–1280°C (термоелемент розміщений у вогнетриві);
- температура дна перед перешкодою: 1260–1320°C (термоелемент у вогнетриві);
- температура у виробничому басейні: 1200–1350°C (термоелемент занурений у скломасу);
- температура у фідерному каналі: 1150–1250°C (термоелемент занурений у скломасу).

Через природне старіння термоелементів з часом виміряні значення температури можуть стати менш точними. Тому температуру верхньої будови печі необхідно перевіряти оптичним пірометром раз на зміну. Ці вимірювання для відтворюваності повинні проводитись у тому ж місці зони освітлення, поряд із термоелементом.

Всі зафіксовані температурні значення мають бути задокументовані. Якщо різниця між показаннями термоелемента та пірометра зростає, термоелемент необхідно замінити.

За нормальних умов роботи температура верхньої будови печі має підтримуватися автоматично на постійному рівні. Для додаткової безпеки система вимірювання температури оснащена аварійним сигналом. Якщо температура виходить за встановлені межі, спрацьовує як звукова, так і візуальна сигналізація.

1.3.2 Атмосфера скловарної печі

Для стехіометричного згоряння одного нормального кубічного метра (Nm^3) природного газу потрібно $9,5 \text{ Nm}^3$ повітря. Для досягнення повного згоряння газу, якісного процесу варіння та захисту регенеративних камер атмосфера печі повинна бути злегка окисною.

Рекомендований коефіцієнт надлишку повітря становить $1,1\text{--}1,12$, що забезпечує подачу $10,5\text{--}10,7 \text{ Nm}^3$ повітря на 1 Nm^3 природного газу. Через негерметичність печі відбувається підсмоктування зовнішнього повітря, що впливає на обсяг необхідного повітря для горіння. Тому фактична потреба в повітрі визначається шляхом вимірювання рівня O_2 у димових газах.

Контроль атмосфери печі здійснюється шляхом вимірювання O_2 у димових газах. Відповідний зонд встановлений у задній стінці регенеративної камери. Для захисту камери рівень O_2 в димових газах повинен становити $2\text{--}3\%$. Щоб уникнути догорання газу в регенеративних камерах, рівень CO в димових газах повинен бути близьким до 0 ppm . Доцільно проводити аналіз димових газів щотижня.

Система контролю співвідношення газ/повітря та температури показана на рисунку 1.8, де TG1 – температура в зоні освітлення, GRV – клапан регулювання подачі газу, NRZ – витратомір газу, LRK – клапан регулювання подачі повітря, LMD – трубка Вен турі, PID3 – регулятор співвідношення газ/повітря, PID4 – регулятор подачі повітря, PID5 – регулятор температури, IW – дійсне значення, IS – задане значення.

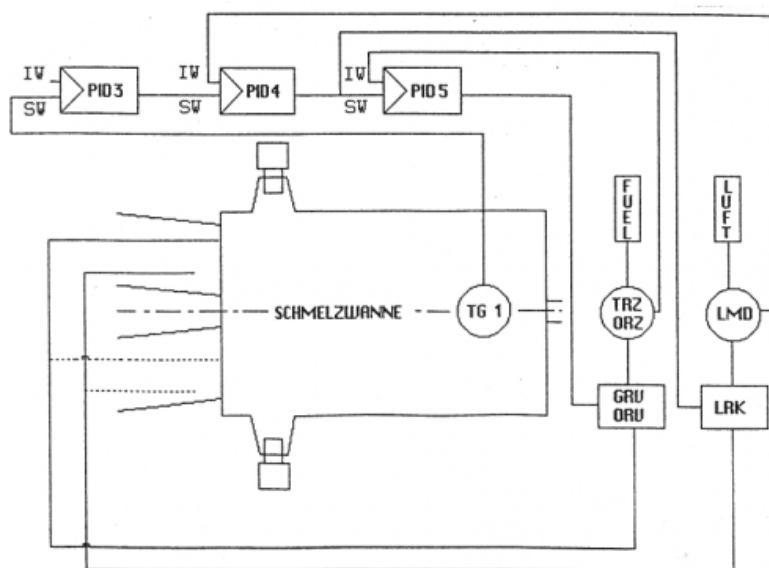


Рисунок 1.8 - Схема регулювання співвідношення газ/повітря і температури:

1.3.3 Тиск і тяга

Надійна система регулювання тиску в газовому просторі печі є ключовим фактором для ефективного використання енергії, що подається в піч. Важливо, щоб при низькому тиску газового простору підсмоктування зовнішнього повітря через щілини завантажувальної кишені залишалося в допустимих межах. Водночас слід уникати високого тиску, оскільки це призводить до швидшого зносу вогнетривких матеріалів і збільшує втрати енергії.

Крім того, необхідно компенсувати тягу димоходу, яка змінюється внаслідок коливань атмосферного тиску, сили вітру та зовнішньої температури.

Баланс між тягою і тиском газового простору в скловарній печі не може бути постійним, оскільки він залежить від природних факторів.

Основна вимога полягає в тому, щоб тиск газового простору біля завантажувальної кишені залишався нейтральним, тобто близьким до нуля ($P_a = \pm 0$). Для цього датчик тиску, розташований у бічній стінці поруч із задньою стінкою на висоті близько 600 мм над поверхнею скломаси, повинен показувати значення в межах $+3\text{--}5 \text{ Pa}$ (або $+0,3\text{--}0,5 \text{ мм вод'яного стовпа}$). Оптимальне значення тиску визначається та фіксується після прогріву печі.

На рисунку 1.9 приведена система вимірювання тиску в печі, де DMS – зонд виміру тиску в печі, LRK2 – клапан регулювання тиску в печі, PID2 – регулятор тиску в печі, IW – дійсне значення, IS – задане значення.

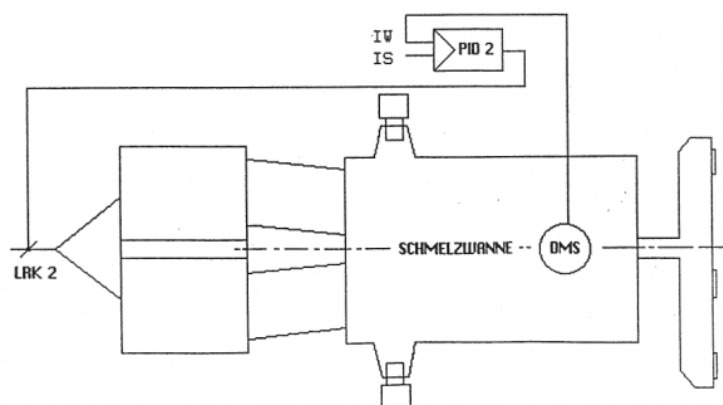


Рисунок 1.9 - Схема роботи регулятора тиску в печі

Автоматична система контролю й регулювання тиску підтримує стабільний рівень тиску за допомогою клапана, що працює безперервно, при цьому важливо правильно підібрати розмір труби для забезпечення природної тяги.

Система вимірювання тиску пов'язана з аварійною системою, яка подає звуковий і візуальний сигнал у разі виходу тиску за встановлені межі. Також слід регулярно очищувати димові канали та труби від конденсаційних продуктів для забезпечення належної тяги для відведення продуктів згоряння.

1.3.4 Рівень скломаси

Для процесу скловаріння важливо підтримувати стабільний рівень скломаси, оскільки його коливання негативно впливають на якість варіння. Тому подача шихти вібраційним завантажувачем і ритм подачі повинні бути налаштовані так, щоб рівень скломаси залишався у вузьких межах.

У цій скловарній печі датчик рівня скломаси розташований праворуч, у зоні вироблення між першою та другою лінією, приблизно за 4,8 м від поздовжньої осі ванни. Чутлива частина датчика налаштована на рівень скломаси близько 1440 мм у місці вимірювання.

Система регулювання рівня скломаси показана на рисунку 1.10, де GTE – лазерна система вимірювання і регулювання рівня скломаси, PID6 – регулятор рівня, EM – загрузчик шихти, IW – дійсне значення, IS – задане значення

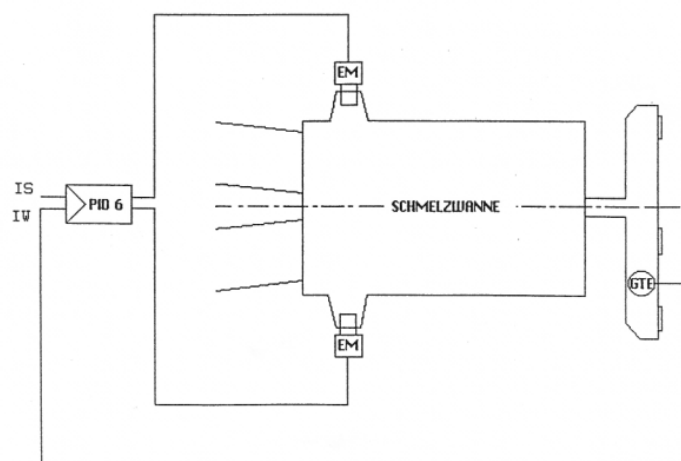


Рисунок 1.10 - Схема регулювання рівня скломаси

Ритм подачі шихти слід регулювати так, щоб коливання рівня скломаси не перевищували 0,2 мм. При зміні асортименту продукції або налаштуванні обладнання можливі коливання рівня, що перевищують встановлені межі. Проте навіть у цьому випадку потрібно прагнути мінімізувати коливання, оскільки значні відхилення можуть призвести до інтенсивної корозії вогнетривів на рівні скломаси. Раз на зміну необхідно візуально перевіряти рівень скломаси.

1.3.5 Регенератори

Регенератори виконують функцію теплообміну між димовими газами та повітрям для горіння. Чим вища температура повітря, яке вводиться в піч, тим ефективніше відбувається згоряння пального. Температура вимірюється термопарами, розташованими у зводі регенератора, біля верхніх рядів насадок і на дні утримувачів насадок. Під час відсмоктування димових газів насадки регенераторів нагріваються, а при подачі повітря горіння тепло передається від насадок до цього повітря. Обидва етапи чітко відрізняються за зафіксованими температурами.

При відсмоктуванні димових газів температура у верхній частині насадки або в зводі регенератора має становити 1360 °С, хоча в окремих випадках вона може підніматися до 1420 °С. Загалом, температура в регенераторах при газовому опаленні вища, ніж при опаленні мазутом, а температура повітря для горіння при подачі на 40-60 °С нижча.

Різниця температур між основою утримувачів насадок та самими насадками більша, оскільки вплив урівноваження тут є сильнішим. Температура димових газів над основою утримувачів насадок становить приблизно 450 °С.

Температура і підігрів повітря горіння мають бути однаковими у регенераторах, розташованих на протилежних сторонах, що забезпечує рівномірність процесу. Використовуючи окрему установку для регулювання часу переходу, можна поступово урівноважити температуру в регенеративних камерах.

Якщо одна з камер нагрівається більше, друга охолоджується через довший час подачі повітря горіння, що сприяє вирівнюванню температур.

2. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

2.1 Структура систем управління, регулювання, контролю

У системі автоматизації використовується розподілена автоматизована система управління технологічним процесом. Функції контролю та регулювання виконуються окремими пристроями, такими як мікропроцесорні контролери і комп'ютери, що реалізує дистрибутивну структуру управління процесом [13-15].

Керування технологічним процесом можливе з кількох точок за допомогою різних контролерів, що свідчить про децентралізований підхід до управління. Це забезпечує як ручний (місцевий, дистанційний з операторної), так і автоматичний режими керування.

Система управління реалізує інформаційні, керуючі, захисні, діагностичні та сервісні функції, має ієрархічну структуру і складається з кількох рівнів.

Перший (нижній) рівень складається з датчиків, що контролюють параметри, виконавчих механізмів та мікропроцесорних керуючих пристроїв.

Другий рівень представлений електронними обчислювальними машинами (ЕОМ), які є частиною автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора.

Програмований контролер (мікропроцесорний керуючий пристрій) виконує наступні функції:

- збір та первинна обробка інформації, отриманої від первинних вимірювальних пристроїв;
- моніторинг стану процесу та обладнання;
- управління технологічними процесами;
- цифрове регулювання параметрів процесів;
- формування відхилень параметрів від номінальних значень;
- передача обробленої інформації та результатів на автоматизоване робоче місце (АРМ) оператора через інтерфейс зв'язку;
- управління виконавчими механізмами запірних та регулюючих органів;

- прийом команд та установок від верхнього рівня управління.

АРМ оператора забезпечує виконання таких функцій:

- відображення, автоматичну реєстрацію та архівування актуальної інформації про технологічні параметри та стан обладнання;
- реєстрацію та архівування аварійних повідомлень, а також дій оператора при управлінні об'єктом;
- дистанційне керування виконавчими механізмами запірних і регулюючих органів;
- генерацію диспетчерських рапортів у вигляді твердих копій на паперових носіях.

Станція оператора складається з:

- IBM PC з відеотерміналом;
- принтера;
- функціональної клавіатури;
- стандартної (системної) клавіатури;
- телефонів для зв'язку.

Системи контролю та управління в рамках автоматизації передбачають регулювання наступних параметрів на скловарній печі:

- рівень скломаси;
- температура в зоні освітлення;
- витрата повітря;
- тиск димових газів;
- концентрація кисню в димових газах.

Система також забезпечує контроль і відображення на дисплеї комп'ютера наступних параметрів під час варіння скломаси:

- температура в зонах варіння, освітлення та робочій зоні;
- тиск димових газів у печі;
- витрата паливного газу;
- витрата повітря;
- концентрація кисню в димових газах;

- рівень скломаси;
- температура повітря в регенераторах;
- температура димових газів, що виводяться з печі;
- розрідження у димовій трубі;
- тиск газу в трубопроводі;
- тиск повітря.

Системи захисту, блокування і сигналізації включають:

- сигналізацію при зниженні тиску паливного газу;
- сигналізацію при зниженні тиску повітря;
- сигналізацію при згасанні полум'я на пальниках;
- сигналізацію при підвищенні тиску в печі.

Системи управління охоплюють:

- електроприводи повітродувки В1, В2, конвеєра К1 та завантажувачів шихти

31;

- програмне управління перекладом полум'я на пальниках;
- управління запірними клапанами на загальному трубопроводі паливного

газу.

2.2 Розроблення функціональної схеми автоматизації

Для розробки функціональної схеми автоматизації важливо визначити, які параметри технологічного процесу потребують регулювання, сигналізації та контролю [15-17]. Для цього слід створити карту технологічних параметрів, яка формується на основі аналізу фізичних процесів, що відбуваються в печі. У першому розділі був детально розглянутий процес варіння скла на скляному виробництві.

На технологічній схемі (рисунок 2.1) показані параметри, які регулюються та контролюються у всіх зонах печі: повітрепровід, газопровід, димопровід, регенератор 1, регенератор 2, завантажувачі шихти, ванна скловарної печі.

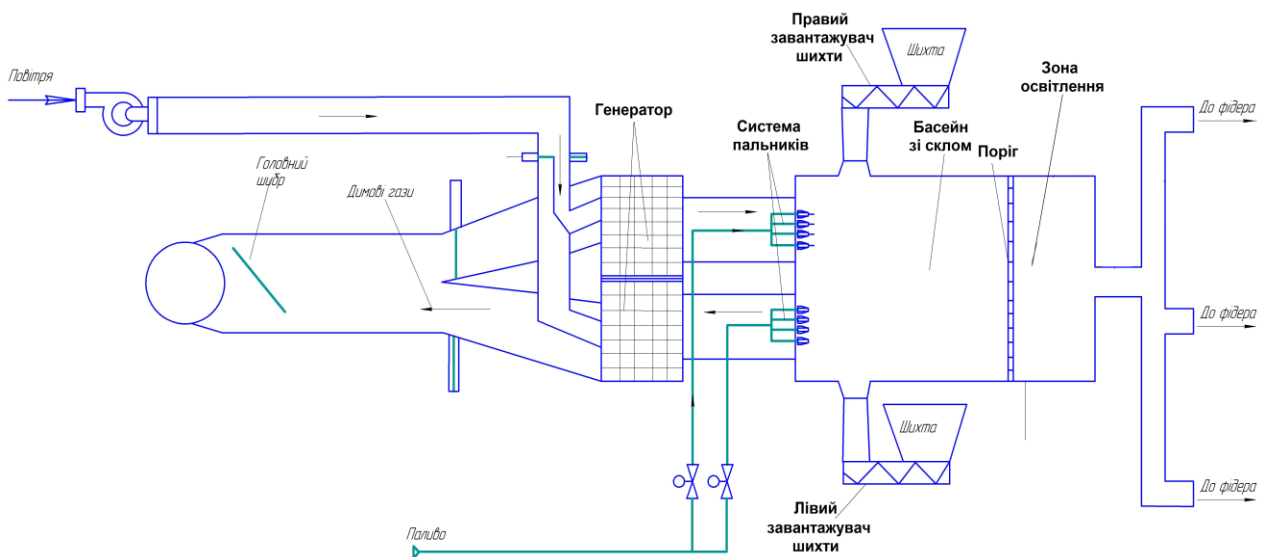


Рисунок 2.1 – Технологічна схема автоматизації

На основі технологічної схеми автоматизації формується функціональна схема автоматизації. Ця схема повинна відповідати всім вимогам і функціям, що зазначені в технологічній карті. Функціональна схема систем автоматизації технологічних процесів є документом, який ілюструє функціональну та блочну структуру цих систем, а також обладнання об'єкта керування приладами і засобами автоматизації. У цій схемі подано спрощене зображення агрегатів, що підлягають автоматизації, а також пристроїв, засобів автоматизації та управління, які представлені умовними позначеннями відповідно до чинних стандартів, а також лінії зв'язку між ними.

Функціональна схема автоматизації технологічного процесу варіння скла складається з шести контурів регулювання та п'яти контурів контролю. Регулювання і контроль за технологічним процесом здійснюється на основі промислового контролера "Lagoon", а проект автоматизації розроблений у SCADA-системі Trace Mode. Сигнали з датчиків передаються на клемно-блочні з'єднувачі модулів нормування аналогових сигналів, після чого оброблені та перетворені клеми виводу дискретних і аналогових сигналів управління подаються на входні модулі (ВМ).

Схема автоматизації технологічного процесу варіння скла передбачає [14-17]:

1) 6 контурів автоматичного регулювання:

- тиску в печі;
- рівня в печі;
- температури в печі;
- витрати газу на пальники;
- співвідношення газ/повітря;
- керування процесом перевodu напрямку полум'я;

2) 5 контурів контролю:

- розрідження перед головним шибером;
- температури перед порогом;
- температури біля пальників;
- температури регенератора;
- температури регенератора.

Контур 1. Контур регулювання тиску в печі.

Основною метою регулювання є підтримка заданого тиску в печі. Вимірювальний перетворювач тиску APLISENS PC-28 виконує роль чутливого елемента в цій системі. Сигнал, отриманий з виходу датчика, надходить до блоку аналогового вводу I7017, який передає його до контролера. Тут значення обробляється за допомогою графічних блокових діаграм (FBD) та порівнюється із встановленими межами. Якщо ці межі перевищуються, формуються регулюючі сигнали, що надходять до блоку аналогового виводу I7024. Цей блок відправляє керуючий сигнал на пускач актуатора головного шибера, що забезпечує регулювання положення заслінки до необхідного кута.

Контур 2. Автоматичного регулювання рівня в печі.

У разі підвищення рівня скломаси в печі сигнал від чутливого елемента рівня передається до блоку аналогового вводу I7017. Цей блок надсилає сигнал до контролера, де значення обробляється з використанням графічних блокових діаграм (FBD) та порівнюється з установленими межами. Якщо рівень виходить за ці межі, генеруються регулюючі сигнали, які направляються до блоку аналогового

виводу I7024. З цього блоку формується керуючий сигнал для пускачів, які забезпечують підтримку рівня в варочному басейні печі за допомогою двох загрузчиків шихти.

Контур 3. Автоматичного регулювання температури в печі.

Основною метою регулювання є підтримка заданої температури в печі. Чутливим елементом у цій системі є термопара типу ТПП(S). Уніфікований сигнал з виходу датчика направляється до блоку аналогового вводу I7017, який передає інформацію контролеру. У контролері значення обробляється за допомогою програм на основі функціональних блоків (FBD) і порівнюється з установленими межами. Якщо значення виходить за ці межі, формуються регулюючі сигнали, які надходять до блоку аналогового виводу I7024. Від цього блоку подається керуючий сигнал для регулювання подачі газу на пальники, що впливає на співвідношення газ/повітря.

Контур 4-5. Регулювання витрати газу і співвідношення газ – повітря у скловарній печі.

Система автоматичного регулювання підтримує оптимальне співвідношення витрат газу і повітря в межах, що забезпечують ефективне спалювання пального та правильні термічні характеристики полум'я. Для цього регулюється обсяг повітря, що надходить для горіння в печі, в залежності від кількості газу при заданому коефіцієнті надлишку повітря (відношенні між фактичним обсягом повітря і теоретично необхідним). Корекція витрат газу та повітря враховує їх температуру.

Вимірювання витрат газу і повітря здійснюється за допомогою трубки Вентурі, сигнал з якої перетворюється на уніфікований формат за допомогою перетворювача і передається до відповідного мікропроцесорного регулятора. Регулятор порівнює поточні значення витрат з установленими нормами, і у разі виявлення відхилень формує безперервний ШІМ-модульований сигнал для виконавчого механізму. Цей сигнал контролює відкриття та закриття регулювальних заслінок у газопроводі та трубопроводі подачі повітря.

Контур 6. Автоматичний перевід напрямку полум'я по часовій програмі.

Системи автоматичного регулювання напрямку полум'я використовуються

для оптимізації роботи регенераторів, які використовують тепло від відпрацьованих димових газів.

Ця система автоматично виконує всі необхідні дії для реверсивування полум'я в печі, без потреби в ручному втручанні обслуговуючого персоналу або за його командою. Такий підхід мінімізує час на переведення полум'я, що сприяє зниженню теплових втрат і виключає можливість помилок у часі між переводами. При комплексній автоматизації основних технологічних параметрів, що впливають на роботу скловарної печі, система також забезпечує відключення регулюючих систем на період перехідного процесу.

2.3 Вибір технічних засобів

Основною особливістю запропонованої автоматизованої системи керування (АСК) є використання промислового контролера “Lagoon” та перехід на централізований облік технологічного процесу. Децентралізоване управління здійснюється за допомогою мікропроцесорних засобів - контролера та комп'ютера, що дає можливість архівувати важливі параметри протягом певного періоду, підвищувати якість керування, інтегрувати управління різними частинами процесу в єдину систему та зменшити потребу в обслуговуючому персоналі [17-18].

Аналізуючи структурні схеми взаємозв'язку параметрів, типові схеми автоматизації та вимоги технологічного регламенту, важливо визначити контури вимірювання, сигналізації, захисту, блокування та регулювання. При виборі цих контурів необхідно врахувати, що система автоматизації повинна відповідати всім вимогам технологічного процесу та забезпечувати безпечні умови праці для співробітників.

Застосування запропонованої автоматизованої системи керування (АСК) дозволить знизити витрати на сировину, оскільки більш точне дотримання параметрів технологічного процесу підвищить продуктивність виробництва склотари. Це стане можливим завдяки покращенню якості продукції, що, в свою чергу, призведе до зменшення кількості бракованих виробів не менше ніж на 1%.

Крім того, зменшиться кількість небезпечних та надзвичайних ситуацій, а також час, необхідний для планових і позапланових ремонтів. Введення АСК також покращить умови праці для персоналу, зменшуючи їх перебування в зонах, де мають місце шкідливі фактори для організму.

2.3.1 Контролер LAGOON-7000

Контролер Lagoon-7000 має вигляд конструктивно завершеного компактного модуля [19]. Він може бути підключений до модулів видаленого і розподіленого введення-виводу серії I-7000. Ці особливості дозволяють контролеру та модулям введення-виводу розташовуватись в різних місцях, що дає можливість їх встановлення безпосередньо поряд із первинними датчиками та виконавчими пристроями.



Рисунок 2.2 - Контролер LAGOON-7000

На сьогоднішній день Lagoon-7000 є одним із найменших і найекономічніших контролерів, сумісних з PC. Він оснащений майже всіма основними компонентами стандартного комп'ютера: процесором AMD 80188 з тактовою частотою 40 МГц, 256 КБайтами оперативної пам'яті SRAM, електронним Flash-дискон об'ємом 512 КБайт (аналог жорсткого диска), годинником реального часу та чотирма послідовними портами. За швидкісними характеристиками Lagoon-7000 не поступається комп'ютеру з процесором Intel 80286.

Контролер працює на основі операційної системи Datalight's ROM-DOS, яка сумісна з MS-DOS 6.2. Окрім стандартних функцій, ця система підтримує

додаткові можливості, такі як автоматичне завантаження при включенні живлення, робота з Flash-диском, дистанційне завантаження програм та термінальний режим.

Конструктивно Lagoon-7000 виконаний у пластиковому корпусі з негорючої пластмаси. На корпусі є роз'єм типу DB-9 і клемний з'єднувач із гвинтовою фіксацією. Контролер може бути встановлений на панелі або на стандартній 35-мм DIN-рейці. Він не вимогливий до живлення; достатньо подати нестабілізовану напругу в діапазоні 10-30 В постійного струму, при цьому споживана потужність складає всього 2-3 Вт. Контролер працює в діапазоні температур від -20 °С до +70 °С.

Основні технічні характеристики контролера приведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики контролера LAGOON-7000

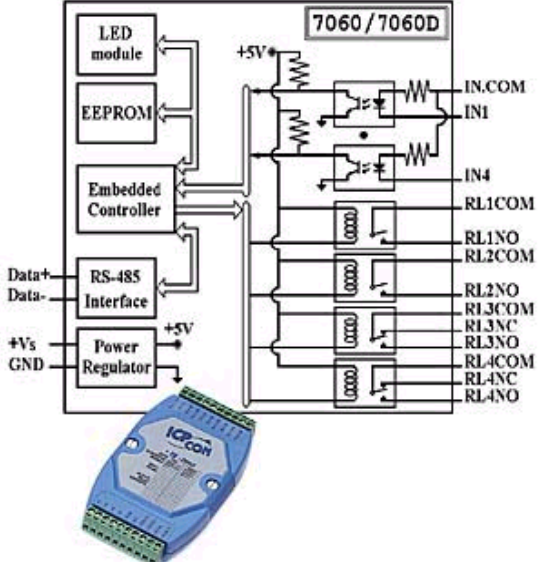
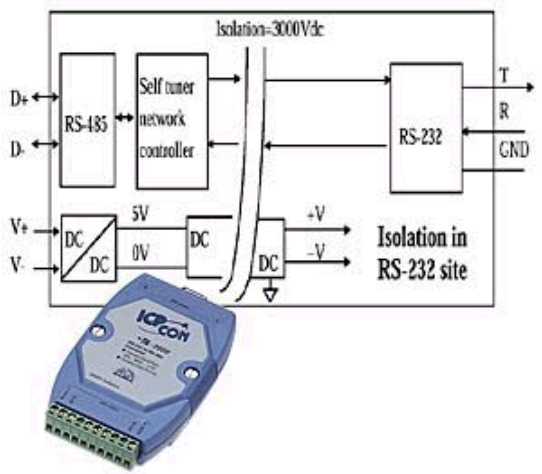
Конструкція		Пластиковий корпус
Вид монтажу		Монтаж на DIN-рейку, монтаж на стіні
Процесор		
Тип процесора		AMD80188
Максимальна частота процесора		40МГц
Роз'єми	Живлення	Гвинтові клеми
	Інші	DB9; Гвинтові клеми
Керування та індикація		
Індикатори		Світлодіоди
Живлення		
Напруга живлення		+10...+30В
Споживана потужність		2-3Вт
Програмне забезпечення		
Програмне забезпечення	Операційна система	Datalight's ROM-DOS
	Системне	Бібліотека програмування
	Інструментальна система	Trace Mode
Умови експлуатації		
Умови експлуатації	Температура	-20..+70°C
Розміри і маса		

Розміри	Ширина	72мм
	Довжина	122мм
	Висота	25мм
Маса		0.2кг

Для забезпечення зв'язку контролера з різними об'єктами застосовуються комунікаційні модулі серії I-7000, включаючи модулі аналогового вводу/виводу та модулі дискретного вводу/виводу (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 - Комунікаційні модулі для зв'язку контролера з об'єктами.

1	I-7017 - 8-канальний модуль аналогового вводу з ізоляцією. Конструкція: модуль з послідовним інтерфейсом; монтаж на DIN-рейку; пластиковий корпус.	
2	I-7024 - 4-канальний модуль аналогового виводу, 12 біт ЦАП, ізоляція. Конструкція: модуль з послідовним інтерфейсом; монтаж на DIN-рейку; пластиковий корпус.	

3	I-7060 - модуль дискретного 4-канального вводу і 4-канального виводу з ізоляцією. Конструкція: модуль з послідовним інтерфейсом; монтаж на DIN рейку; пластиковий корпус; каналів дискретного вводу 4; каналів дискретного виводу 4.	
4	I-7520 Конвертер RS-232 у RS-485 з автоматичним контролем за напрямком передачі даних для RS-485, гальванічна ізоляція 3кВ по RS-232. Конструкція: конвертер RS-232; вихід (Інтерфейс): RS-485; вихід (Портів):1; вихід (Гальванічна ізоляція): 3000В	

АСЕ-540А – промислове джерело живлення змінного струму (рисунок 2.3), вихід +24В/2А, вихідна потужність 48 Вт.



Рисунок 2.3 - АСЕ-540А –джерело живлення змінного струму

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики АСЕ-540А

Тип джерела живлення		Змінного струму
Конструкція		Стальний корпус
Вхід		
Змінні напруга	Діапазон	85..264В
	Частота	47..62Гц
	Струм	0.6А (230В)
Вихід		
Вихідна потжність		48Вт
Вихідні напруги		+24В
Вихід 1	Напруга	+24В
	Максимальне навантаження	2А
	Номінальне навантаження	1.7А
	Пульсації та шуми	240мВ
	Стабільність від входу	-1..+1%
	Стабільність від виходу	-1..+1%
	Захист від перенапруги	26..31В
Умови експлуатації	Температура	-20..+70°C
	Висота	0..10000фут
Умови зберігання	Температура	-40..+85°C

Розмір і маса		
Розміри	Ширина	100мм
	Висота	40мм
	Глибина	161мм
Маса		0.682 кг

2.3.2. Термопара

Термопара - це спайка двох різних металів або напівпровідників, на неспаяних кінцях якої виникає електромоторуюча сила (ЕРС.) постійного струму. Величина цієї ЕРС залежить від різниці температур між спайкою та вільними кінцями. Термопари використовуються для вимірювання температури, у тому числі з цифровою обробкою вихідного сигналу: спайка поміщається в досліджуване середовище, а електричний сигнал з вільних кінців зчитується.

Найбільше розповсюдження отримали термопари на основі платини-платинородію, хромель-алюмінію, хромель-кадмію, а також вольфрам-молібденів, які використовуються для вимірювання високих температур. Термопара є давно відомим, надійним і порівняно економічним приладом для вимірювання температури. Проте, основним недоліком термопари є обмежена точність вимірювань, оскільки досягти похибки менше 1°C є досить складно.

Термопари класифікуються за призначенням: промислові, науково-дослідні, для вимірювання температури харчових продуктів, а також для медичних досліджень тощо. Вони зазвичай вмонтовуються в пробники (щупи).

В характеристиках термопари типу ТПП (S) (рисунок 2.4) використовуються термоелектроди з платини та родію (з вмістом 10% родію) [20].

Платино-родієві термопари типу S використовуються в умовах високих температур, зазвичай до 1600°C. Їхня широка експлуатація обмежена через низьку чутливість (10 мкВ/°C) та високу вартість. Проте завдяки своїй високій стабільності термопари S стали стандартом для калібрування при вимірюванні температури плавлення золота, яка становить 1064,43°C. Загальний робочий діапазон термопари S варіюється від -50°C до 1768°C.



Рисунок 2.4 - Термопара: тип ТПП (S)

Термопара ТХА/1-2088-12Х18Н10Т (рисунок 2.5) є ще одним прикладом термопар, що використовуються в промисловості. Найпоширенішими типами термопар у промислових застосуваннях є хромель-алюмель (а на Заході - хромель-константан, тип Е) [18, 20].

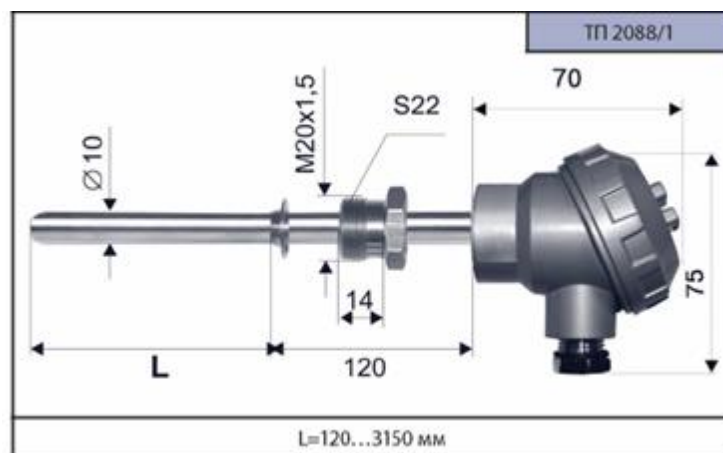


Рисунок 2.5 - Термопара ТХА/1-2088-12Х18Н10Т

Термопара термоелектрична хромель-алюмель ТХА/1-2088-12Х18Н10Т призначена для вимірювання температури рідких, газоподібних, а також неагресивних і слабо агресивних середовищ, включаючи тверді матеріали, які не руйнують захисну арматуру.

Хромель-алюмелеві термопари мають найбільшу диференціальну чутливість серед промислових термопар, що робить їх ідеальними для точних вимірювань температури, а також для фіксації малих різниць температур. Вони демонструють винятково високу термоелектричну стабільність при температурах до 800-900°C.

Це обумовлено тим, що зміни термоелектрорушійної сили (ЕРС) хромелевого та алюмелевого термоелектродів відбуваються в одному напрямку, що дозволяє компенсувати один одного.

Ці термопари призначені для роботи в окисних і інертних середовищах. Вміст кисню в окисній атмосфері повинен становити кілька відсотків або його присутність повинна бути практично відсутня. При вмісті кисню менше 2-3% (об'ємних) у хромелі відбувається різке посилення селективного окислення, що призводить до суттєвого зниження термо-ЕРС хромеля. Крім того, інтеркристалічна корозія може викликати крихкість матеріалу. Тривале перебування у вакуумі при високих температурах також негативно впливає на термо-ЕРС хромеля через випаровування хрому.

Теплочутливим елементом термопари є одне або два вимірювальних опори, розташовані в ніжці вимірювального вкладиша, які з'єднані внутрішньою проводкою з клемником голівки типу В відповідно до стандарту DIN. Сигнал вимірювання отримується завдяки змінам величини опору, що виникають внаслідок коливань температури. Датчики монтуються за допомогою нарізного кріплення в гільзу або прямого приварного патрубку на трубопроводі тощо. Технічний ресурс термопар становить кілька десятків тисяч годин, але основним недоліком є їх висока чутливість до деформації.

2.3.3 Вимірювальний перетворювач тиску APLISENS PC-28

Перетворювач тиску PC-28 [21] (рисунок 2.6) призначений для вимірювання розрідження, а також надлишкового і абсолютного тиску газів, парів та рідин.

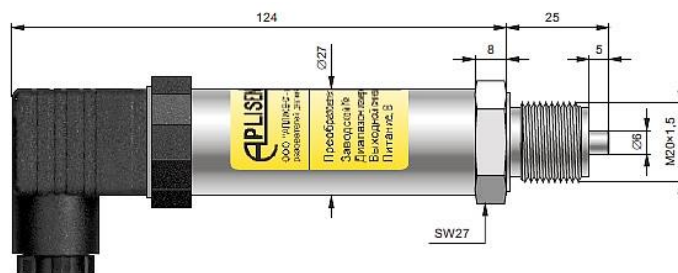


Рисунок 2.6 - Перетворювач тиску PC-28

Межі вимірювання перетворювача тиску РС-28 становлять від -0,1 до 100 МПа, з мінімальною шириною діапазону 1,6 кПа. Вихідний сигнал може бути в форматах $(4 \div 20)$ мА або $(0 \div 10)$ В, а також має вибухозахищене виконання 0ExiaIICT6X.

Вимірювальний елемент являє собою кремнієву монолітну структуру, яка вбудована в приймач тиску. Ця структура відокремлена від вимірюваної середовища розділовою мембраною та заповнена спеціальною манометричною рідиною.

Електронна схема, що освітлюється силіконовим компаундом, розміщена в корпусі з рівнем захисту від IP65 до IP67, в залежності від обраного електричного з'єднання. Споживач має можливість коригувати "нуля" і діапазон вимірювань у межах до 10% за допомогою потенціометрів, не взаємодіючи з іншими налаштуваннями.

Оскільки перетворювач має невелику масу, його можна безпосередньо монтувати на об'єкті. Для вимірювання тиску пари або інших гарячих середовищ рекомендується використовувати сильфонні або імпульсні трубки. Використання спеціального манометричного вентиля перед перетворювачем спрощує монтаж, а також допомагає при коригуванні нуля і обнуленні або під час заміни перетворювача в процесі роботи об'єкта.

2.3.4 Заслінки поворотні DANFOSS APORIA (рисунок 2.7).

Технічний опис [22]: з'єднання: для установки між фланцями, допустимий робочий тиск PFA для води (постачання, розподіл і споживання води), бар: до 6, температура, °C: -15 ... +85, робоче середовище: природний газ (до +60°C), інші гази (до +85°C).



Рисунок 2.7 - Заслінки поворотні DANFOSS APORIA

Особливості заслінок:

- корпус виконаний з чотирма центруючими або різьбовими вушками для надійної фіксації;
- шлицьове з'єднання цільного штока з диском забезпечує передачу великого крутного моменту без мертвого ходу;
- самоцентруючий диск гарантує високу герметичність у закритому положенні та подовжує термін служби футеровки;
- подвійне ущільнення: забезпечує високу герметичність штока;
- термін служби значно збільшений завдяки наявності верхніх і нижніх антифрикційних підшипників;
- взаємозамінність усіх деталей, включаючи диски, осі та футеровки, що спрощує експлуатацію та знижує витрати на технічне обслуговування;
- безпечне технічне обслуговування: надійна фіксація штока за допомогою стопорного пружинного кільця;
- легкорозбірна система забезпечує простоту технічного обслуговування;
- монтаж: можлива установка в будь-якому монтажному положенні, крім штоком вниз.

2.3.5 Трансмітер SITRANS T universal transmitter 7NG-3040 (рисунок 2.8)



Рисунок 2.8 - Трансмітер SITRANS T universal transmitter 7NG-3040

Трансмітер SITRANS T 7NG-3040 є вимірювальним перетворювачем з універсальною входною схемою, призначеним для підключення до різних чутливих елементів та джерел сигналу, таких як термометри опору, термопари, потенціометричні датчики та мВ-датчики [23].

Принцип дії: сигнал, що надходить від потенціометричного давача, датчика напруги, струму або термопари, перетворюється в цифровий сигнал за допомогою АЦП. Цей сигнал аналізується в мікроконтролері, коригується відповідно до характеристик сенсора і потім перетворюється у вихідний струм (в межах 0/4 до 20 мА) або вихідну напругу (0/2 до 10 В) через цифрово-аналоговий перетворювач. Характеристики сенсора, а також параметри електроніки і дані для налаштування вимірювального перетворювача зберігаються в незалежній пам'яті.

Для живлення можуть використовуватися постійна або змінна напруга. Завдяки мостовому випрямлячу в мережевому блоці забезпечується гнучкість у підключенні допоміжних джерел живлення. Використання захисного проводу є необхідним для забезпечення безпеки.

HART-модем або HART-комунікатор дозволяють змінювати та вводити параметри вимірювального перетворювача відповідно до HART-протоколу. Це дає змогу конфігурувати пристрій безпосередньо на місці вимірювання через вихідні клеми HART. Робоча індикація сигналізує про режим роботи вимірювального перетворювача, а сигналізатор граничної величини сповіщає про помилки сенсора або перевищення встановлених меж.

Крім того, контрольне гніздо на виході струму дозволяє перевіряти струм за допомогою вимірювального приладу.

2.3.6 Електричний привод клапана метелик ESW-16

Електричні лінійні приводи типу ESW-16 (рисунок 2.9) [18] розроблені для забезпечення контролю руху, закриття компонентів і інших пристроїв, де потрібні великі сили. Вони можуть використовуватися для управління елементами системи в безперервних технологічних процесах, а також у приміщеннях з вибуховим ризиком.



Рисунок 2.9 - Електричний привод клапана метелик ESW-16

2.3.7 Електродвигун АД 112 М4

Трифазний загальнопромисловий асинхронний двигун (рисунок 2.10) призначений для приводу механізмів і широко застосовується в промисловості та сільському господарстві, зокрема для виробництва верстатів, транспортерів, конвеєрів, холодильних і вакуумних установок, підйомних механізмів, систем промислової вентиляції, а також насосної техніки тощо [18]. Двигуни працюють при частоті мережі 50-60 Гц і напрузі 220 - 440 В. Ступінь захисту електродвигунів становить IP 54, а струмовводу – IP 55. Клас ізоляції – F, режим роботи – тривалий (S1). Доступні різні виконання електродвигунів серії АД 112, включаючи

конструктивні варіанти на лапах (ІМ 1081), з фланцем (ІМ 3081), комбіновані (ІМ 2081) та з другим вільним кінцем валу (ІМ 1082, 2082, 3082).



Рисунок 2.10 - Електродвигун АД 112 М4

Енергетичні показники (коефіцієнт корисної дії, ККД) забезпечують економію активної та реактивної потужності під час експлуатації механізмів у споживача. Це досягається завдяки оптимальному проектуванню, вибору розмірів активних частин, контролю повітряного зазору та конструктивним особливостям обмоток двигуна. Масогабаритні характеристики забезпечують зручність при монтажі та експлуатації, досягаючи цього за рахунок використання передових програм для електромагнітних, аеродинамічних та механічних розрахунків, розроблених фахівцями з багаторічним досвідом проектування асинхронних електродвигунів. Сервісний фактор гарантує стабільну, надійну та тривалу роботу двигунів навіть при перевантаженні механізмів на 15%. Це досягається завдяки ефективному охолодженню та використанню системи ізоляції не нижче класу «F», при цьому реальний перегрів обмотки статора не перевищує норми для ізоляції класу «B» (допустимий перегрів - 80°C).

2.3.8 Перетворювач частоти "Delta Electronics" моделі VFD150B43A

Перетворювач частоти моделі VFD150B43A (рисунок 2.11) призначений для регулювання швидкості обертання трифазних асинхронних двигунів потужністю до 15 кВт. Він особливо рекомендується для використання в обладнанні, що потребує високої точності підтримання швидкості обертання за допомогою датчиків швидкості. Завдяки своїй розширеній функціональності, цей

перетворювач частоти може бути застосований для вирішення різноманітних завдань автоматизації, включаючи стругальні верстати, штампувальні преси, прокатні стани, кранове устаткування, в'язальні машини, стрічкові конвеєри, ліфти та інше [24].



Рисунок 2.11 - Перетворювач частоти VFD150B43A

Функціональні можливості перетворювача частоти VFD150B43A.

1. Винесення пульта управління – можливість дистанційного управління.
2. Автоматичне енергозбереження – функція, що знижує споживану енергію під час роботи з насосами і вентиляторами.
3. Вольт-частотний і векторний алгоритми управління:
 - діапазон регулювання швидкості обертання до 1:40 при M-const.
 - у розімкненій системі точність підтримки швидкості $\pm 3\%$ при зміні моменту навантаження до 90% від номінального.
 - у замкнутій системі точність підтримки швидкості $\pm 0.05\%$ при аналогічних умовах.
 - забезпечення 150% номінального моменту при частоті виходу від 1 Гц.
4. Автоматичне підхоплення швидкості – здатність адаптуватися до швидкості обертового двигуна.
5. Автоматичний підйом початкового пускового моменту і компенсація ковзання.
6. Вбудований ПД регулятор – ефективна робота в замкнутій системі автоматичного регулювання, наприклад, по тиску чи витраті в системах тепло- і водопостачання.

7. Вбудований ПЛК – для гнучкого налаштування процесу.
8. Задання швидкості за допомогою сумі окремих аналогових сигналів управління з можливістю перемикання між ними.
9. Автоматичне покрокове управління з програмованим часом кроку/циклу і вибором однієї з 15 заданих частот обертання.
10. Можливість роботи з цифровим датчиком швидкості – інкрементальним енкодером (з використанням плати розширення PG02, що легко встановлюється всередину перетворювача).
11. Вбудований лічильник імпульсів із зовнішнього датчика.
12. Функція простого позиціонування.
13. Вбудований дросель шини постійного струму – для стабільності роботи.
14. Управління трьома додатковими електродвигунами.
15. Незалежне задання і вибір 4-х часів розгону/гальмування – для оптимізації роботи двигунів.
16. Режим автоматичного вибору найменшого часу розгону і гальмування.
17. Вбудований послідовний інтерфейс RS-485 (протокол Modbus) зі швидкістю передачі до 38 400 бод.
18. Входи управління:
 - 11 дискретних входів (з яких 6 багатофункціональних програмованих).
 - 3 аналогових входи (4-20 мА, 0-10 В, -10 до +10 В).
19. Керуючі виходи:
 - 1 релейний вихід.
 - 1 програмований аналоговий вихід.
 - 1 імпульсний вихід з частотою імпульсів, пропорційною вихідній частоті.
 - 1 оптотранзисторний вихід.

2.3.9 Лазерна система вимірювання і регулювання рівня скла в печі

Принцип роботи системи базується на відомій фізичній залежності: промінь світла, що падає на дзеркало, відбивається від нього, причому кут падіння дорівнює кута відбивання.

У цій системі лазерний випромінювач та приймальний детектор зберігають своє положення та механічно зв'язані з пенею. При зміні рівня скла в печі лазерний промінь, сформований в оптичній системі лазера, що знаходиться в спеціальному корпусі з водяним охолодженням, спрямовується на поверхню скла. Після відбиття промінь попадає на приймальний детектор, який перетворює його в електричний сигнал. Цей сигнал надходить до регулятора (комп'ютера) для подальшої обробки та візуалізації.

Таким чином, система формує замкнуте коло зворотного зв'язку, що забезпечує повністю автоматизований контроль завантаження шихти в піч і підтримує постійний рівень з точністю до десятих долей міліметра.

Стабільність рівня залежить від стабільності подачі шихти завантажувачем, параметрів регулятора та якості процесу варіння в печі.

Система живиться від джерела постійної напруги 24 В. Потужність лазерного променя безпечна для людського ока, а довжина хвилі поляризованого променя світла складає 560 нм. Для нормальної роботи системі необхідне водяне охолодження, температура якого не повинна перевищувати 25 °С, з витратою від 50 до 100 літрів на годину.

Недотримання цих вимог може призвести до пошкодження системи або зниження потужності лазера, що, в свою чергу, може викликати аварію системи рівнеміра. Принцип роботи системи ілюструється на рисунку 2.12.

Крім того, важливо, щоб поверхня скла, на якій працює лазер, була чистою та однорідною, без забруднень, газів та плаваючих домішок.

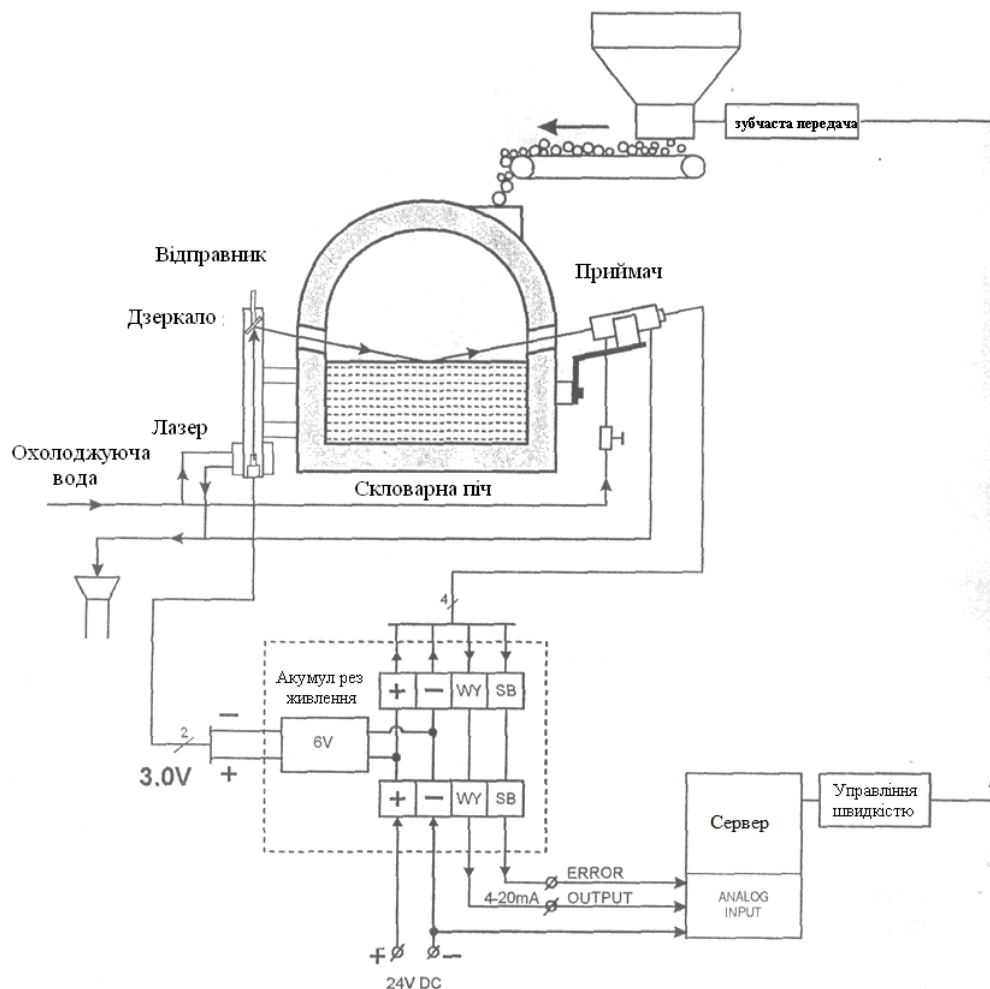


Рисунок 2.12 – Лазерна система вимірювання і регулювання рівня скла в печі

У разі виникнення завад потрібно провести дослідження процесу варіння та усунути причину їх появи. Відбитий від поверхні скла лазерний промінь містить додаткову інформацію про хід процесу варіння, зокрема можливість спостереження за газуванням і визначення його інтенсивності.

У випадку аварії системи завантаження або при великих перешкодах слід вручну виміряти рівень скла та встановити його на задану величину, після чого можна знову активувати автоматичний режим роботи рівнеміра.

Промінь лазера має бути розміщений у центральній частині оптики приймача. Відхилення променя від центрального положення вгору або вниз відображає зміну рівня скла відносно заданого значення.

3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

3.1 Математична модель системи автоматичного регулювання температури скловарної печі

Об'єктом регулювання у цьому проєкті є ванна печі для скловаріння з підковоподібним напрямком полум'я. Основні параметри, що підлягають регулюванню в печі (рисунок 3.1), включають: температуру, тиск і рівень скломаси. Зміни цих параметрів залежать від керуючих дій (витрати газу, повітря та подачі шихти) і зовнішніх збурень.

Для забезпечення якісного та економічного управління процесом скловаріння необхідно провести ідентифікацію об'єкта керування і налаштувати контури системи автоматичного регулювання (САР).

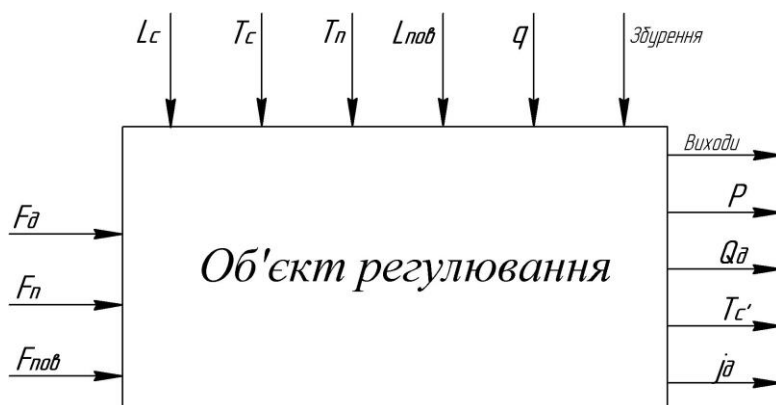


Рисунок 3.1 - Структурна схема об'єкту регулювання

Найбільшу складність становить аналіз динамічних характеристик, що відображають залежність між температурою димових газів (t_d) і температурою скломаси на виході з варильної частини ($t_c(L)$). При визначенні передаточної функції будемо виходити з таких припущень: температура продукту рівномірно розподілена вздовж печі, а в поперечному перерізі потоку температурний градієнт відсутній; теплопровідність стінок печі дозволяє розглядати стінку як елемент із зосередженими координатами; теплофізичні параметри скломаси та стінок є

сталими.

Рівняння теплового балансу для потоку скломаси на елементарному відрізку печі (dl) записується так:

$$M_c c_c dl (dt_c/dt) + M_c c_c dl v (dt_c/dl) = F_1 \alpha_1 (t_{ct} - t_c) dl$$

або

$$T_c (dt_c/dt) + v T_c (dt_c/dl) = t_{ct} - t_c,$$

де $T_c = M_p c_c / (F_1 \alpha_1)$; M_c - маса скломаси, приведена до 1 м потоку; c_c - питома теплоємність скломаси; α_1 - коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній поверхні печі; F_1 - внутрішня поверхня теплообміну; v - швидкість руху скломаси.

Рівняння теплового балансу для стінки має вигляд:

$$M_{ct} c_{ct} dl (dt_{ct}/dt) = F_2 \alpha_2 (t_p - t_{ct}) dl - F_1 \alpha_1 (t_{ct} - t_c) dl$$

або:

$$T_{ct} (dt_{ct}/dt) + t_{ct} (1 + \chi) = t_p + \chi t_c, \quad (3.1)$$

де $T_{ct} = M_{ct} c_{ct} / (F_2 \alpha_2)$; $\chi = F_1 \alpha_1 / F_2 \alpha_2$; M_{ct} - маса 1 м стінки; c_{ct} - питома теплоємність стінки; α_2 - коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні печі; F_2 - зовнішня поверхня теплообміну.

В рівнянні (3.1) перейдемо до відхилень змінних від їх заданих значень і позначимо: $y_3 = t_c - t_c^0$; $y_2 = t_{ct} - t_{ct}^0$; $x = t_p - t_p^0$.

Для отримання передаточної функції ланки по диференціальним рівнянням в частинних похідних застосуємо перетворення Лапласа по t , позначивши зображення вхідних і вихідних координат $x(t, l)$, $y_2(t)$, $y_3(t, l)$ відповідно через $X(p, l)$, $Y_2(p)$ і $Y_3(p, l)$. Після перетворення по Лапласу рівняння матимуть вигляд:

$$T_p p Y_3 + v T_p (dY_3/dl) + Y_3 = Y_2, \quad (3.2)$$

$$T_{ct} p Y_2 + Y_2 (1 + \chi) = Y_3 \chi + X. \quad (3.3)$$

Виключивши з рівнянь (3.2) і (3.3) Y_2 , отримаємо звичайне диференціальне рівняння першого порядку, коефіцієнти якого являються функціями комплексної змінної:

$$v a(p) (dY_3/dl) + Y_3 = b(p) X. \quad (3.4)$$

При граничній умові $Y_3(p, l) = 0$ для $l = 0$ і при $X(l) = \text{const}$ результат набуде вигляду:

$$Y_3(p,l)=X(p)b(p)[1-\exp(-(l/va(p)))]. \quad (3.5)$$

Оскільки ми шукаємо значення температури на виході із скловарної частини печі, (при $l=L$), отримаємо:

$$Y_3(p,l)=X(p)b(p)[1-\exp(-(\tau/a(p)))], \text{ де } \tau=L/v$$

або

$$W_3(p)=Y_3(p,l)/X(p)=b(p)[1-\exp(-(\tau/a(p)))]. \quad (3.6)$$

Змінну $b(p)$ можна представити в вигляді:

$$b(p)=1/((T_2(p)+1)(T_3(p)+1)). \quad (3.7)$$

Еквівалентні сталі часу T_2 і T_3 виявляються близькими за значенням до $T_{ст}$ і T_c , причому найбільша стала часу лежить в інтервалі $[T_c, T_c+T_{ст}]$.

Коефіцієнт $1/a(p)$ наближено апроксимується лінійним двочленом:

$$1/a(p) \approx p+a'.$$

Тоді,

$$\exp(-(\tau/a(p)))=\exp(-p+a')=b'\exp(-\tau p), \text{ де } b'=\exp(-a'\tau). \quad (3.8)$$

Тоді формула передавальної функції набуде вигляду:

$$W_3(p)=(1-b'\exp(-\tau p))/((T_2(p)+1)(T_3(p)+1)). \quad (3.9)$$

Загальна передавальна функція скловарної печі по каналу $G_n - t_c'$ становитиме:

$$W(p)=W_k(p)W_3(p)W_4(p).$$

Динамічні характеристики печі по каналу $t(0)-t(L)$ виражаються рівнянням (3.9) при умові, що температура димових газів незмінна і рівна t^o_d , тобто $X=0$, а температура скламаси на вході в піч (при $l=0$) є вхідною координатою. Тоді рівняння і граничні умови запишуться в вигляді:

$$va(p)(dY_3/dl)+Y_3=0; Y_3(0)=t(0). \quad (3.10)$$

Рішення рівняння (3.10) дає:

$$Y_3(L,p)=Y_3(0,p)\exp[-L/(va(p))],$$

Звідки

$$W_5(p)=Y_3(L,p)/Y_3(0,p)=\exp[-L/(va(p))].$$

Якщо теплова ємність стінки нескінченно мала, то з врахуванням співвідношення (3.8) отримуємо передавальну функцію підсилюючої ланки з запізненням:

$$W_5(p)=b'\exp(-p\tau) \quad (3.11)$$

Повну передавальну функцію скловарної печі по каналу збурення $t-t'$ отримаємо на основі (3.8) з врахуванням вхідної і вихідної камер:

$$W_{31}(p)=W_4^2(p)W_5(p). \quad (3.12)$$

Аналіз динаміки зміни температури скломаси при коливаннях рівня L_p є складним через нелінійну залежність між цими параметрами. Коефіцієнти диференціальних рівнянь (3.1) і (3.2) є функціями вхідної координати: зокрема, швидкість руху скломаси пропорційна її рівню, а коефіцієнт тепловіддачі має нелінійну залежність від L_c . Після лінеаризації рівнянь із певними спрощеннями можна отримати наближену передаточну функцію для каналу $G_{п-t'}$. Вона має вигляд:

$$W_3(p)=k_2(1-\exp(-p\tau))/p. \quad (3.13)$$

3.2 Вимоги до якісних показників функціонування САР

Одноконтурна САР температури в скловарній печі, що розраховується, призначена для автоматичної підтримки параметрів об'єкту управління на заданому рівні при нанесенні збурень в роботі об'єкту [15-17]. Структурна схема замкненої САР з вказівкою типових видів збурень наведена на рисунку 3.2.

$$\frac{y}{y^*}(s) = \frac{W_p(s) \cdot W_{об}(s)}{1 + W_{об}(s) \cdot W_p(s)}; \quad \frac{y}{\lambda_{вн}}(s) = \frac{W_{об}(s)}{1 + W_{об}(s) \cdot W_p(s)}; \quad \frac{y}{\lambda_{н}}(s) = \frac{1}{1 + W_{об}(s) \cdot W_p(s)}$$

$$W_{об}(s) = \frac{K_{об} \cdot e^{-\tau_{об} \cdot s}}{T_{об} \cdot s + 1}; \quad W_p(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s}\right);$$

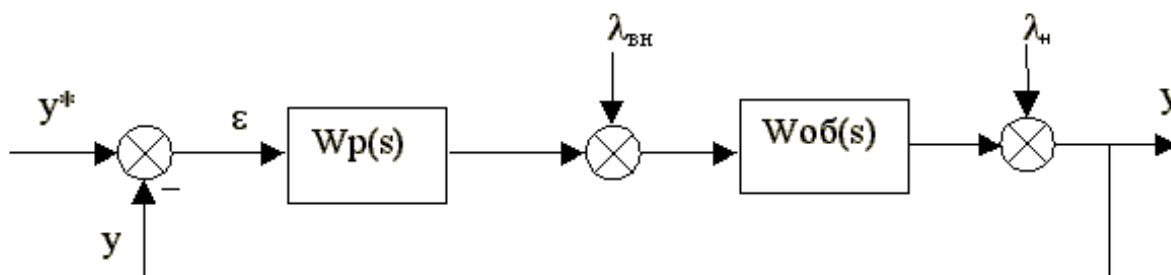


Рисунок 3.2 - Структурна схема замкненої САР

На рисунку 3.2 застосовані позначення: $\varepsilon = (y^* - y)$ - розузгодження (розбаланс); $\lambda_{\text{вн}}$ - внутрішні збурення (збурення); $\lambda_{\text{н}}$ - зовнішні збурення (збурення по навантаженню); $W_p(s)$ - передавальна функція регулятора; $W_{\text{об}}(s)$ - передавальна функція об'єкта.

Перехідні процеси при збуреннях $\lambda_{\text{вн}}$ і заданні відрізняються, тому для цих процесів оптимальні різні налаштування. Водночас, перехідні процеси по каналах “ $y^* \rightarrow \varepsilon$ ” та “ $\lambda_{\text{н}} \rightarrow y$ ” є ідентичними, оскільки об'єкт має однакові передавальні функції для обох каналів.

$$\frac{\varepsilon}{y^*} = \frac{y}{\lambda_{\text{н}}} = \frac{1}{1 + W_{\text{об}} \cdot W_p},$$
 тому оптимальні настроювання для зазначених збурень однакові.

З низки причин доцільно було б налаштовувати регулятор з урахуванням збурення за навантаженням, оскільки це збурення є більш реальним з технологічної точки зору та складнішим у порівнянні із збуренням $\lambda_{\text{вн}}$; крім того, перехідний процес збігається з перехідним процесом при збуренні за завданням щодо неузгодженості ε . Однак історично склалося так, що типове збурення розглядається як стрибок з боку об'єкта регулювання, оскільки воно співпадає з основним регулюючим каналом об'єкта: “ $u \rightarrow y$ ”. Водночас, збурення $\lambda_{\text{н}}$ можуть мати різне походження та різний характер.

Розрахунок настроювань регуляторів орієнтований саме на стрибок з боку об'єкта регулювання [25, 26].

У замкнених САР розрізняють такі типові перехідні процеси:

- а) аперіодичний ($A_{\text{пер}}$);
- б) із 20%-перерегулюванням (20%- η);
- в) із мінімумом лінійного інтегрального критерію ($\min I_{\text{кв}}$).

Аперіодичний процес рекомендується у випадках, коли динамічний викид не є критичним, але важливо мінімізувати час регулювання. Процес із 20%-м перерегулюванням (мінімумом лінійного інтегрального критерію) вибирають для

зменшення динамічного викиду, коли незначна підвищена коливальність і тривалість процесу є прийнятними. Найчастіше застосовують процес із 20%-м перерегулюванням, оскільки він забезпечує помірний динамічний викид, достатньо коротку тривалість процесу та всього два півперіоди коливань..

Як тип перехідного процесу оберемо процес із 20%-м перерегулюванням, оскільки це відповідає специфіці керованого об'єкта. Обрана ділянка регулювання має низьку інерційність, що дозволяє використовувати процес із 20%-м перерегулюванням, а також не допускає тривалих коливань температури, оскільки це призведе до порушення теплового режиму печі. Динамічний викид є важливим фактором, адже підвищення температури в топці понад норму може призвести до перевитрати палива і зниження якості скла, що спричиняє появу браку у виробництві. Зважаючи на ці фактори, обираємо процес із 20%-м перерегулюванням, який характеризується максимальним динамічним відхиленням y_1 і тривалістю перехідного процесу τ_p .

3.3 Апроксимація перехідної характеристики об'єкту управління

Крива розгону досліджуваного в роботі об'єкту управління для вхідного впливу з боку заслінки на газопроводі величиною 25% (рисунок 3.3) приведена на рисунку 3.4.

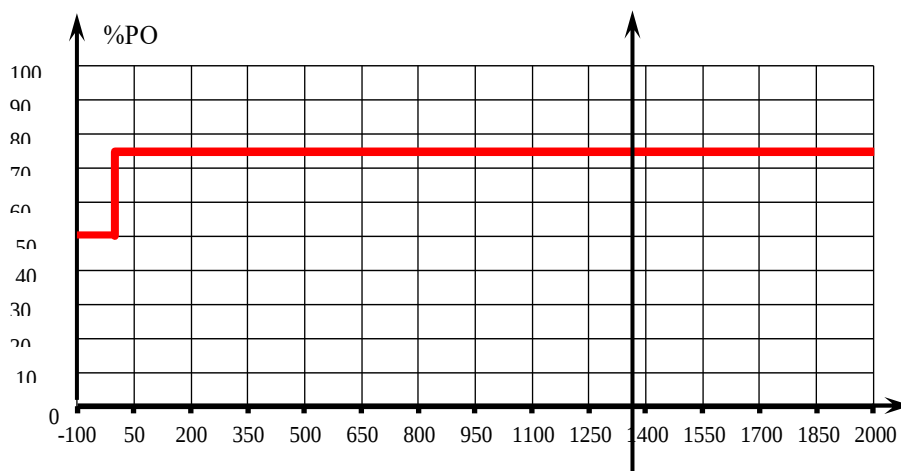


Рисунок 3.3 - Ступінчастий вплив з боку регулюючого органу

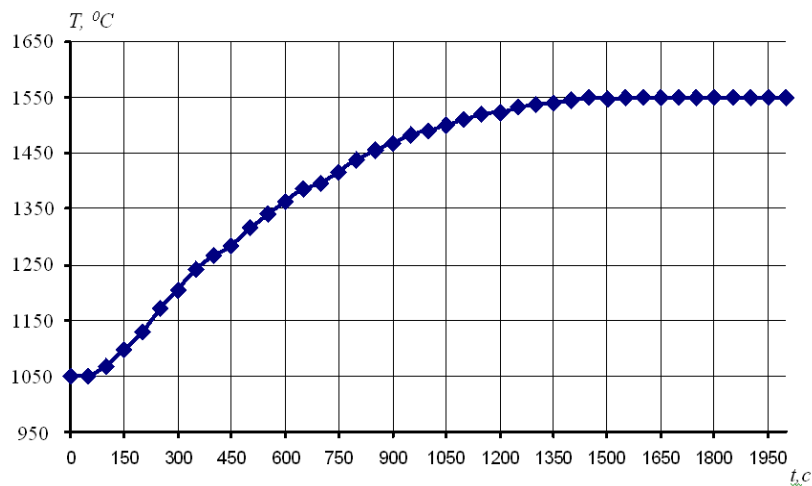


Рисунок 3.4 - Крива розгону - зміна температури в печі при збуренні положенням заслінки на газопроводі.

З існуючих способів визначення параметрів об'єкту управління $T_{об}$ та τ_0 я використовую метод приведеної перехідної характеристики. Приведена перехідна характеристика зображена на рисунку 3.5.

Якщо $h^*(t_1)=0,33$ та $h^*(t_2)=0,7$, то параметри ОУ визначаються наступним чином:

$$\tau_0 = 0.5 \cdot (3 \cdot t_1 - t_2) = 0.5 \cdot (3 \cdot 300 - 685);$$

$$T_{об} = 1.25 \cdot (t_2 - t_1) = 1.25 \cdot (685 - 300);$$

Тобто:

$$\tau_0 = 107,5c$$

$$T_{об} = 481,25c$$

На базі кривої розгону отримую коефіцієнт передачі об'єкту:

$$K_{об} = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{(1550 - 1050)^{\circ C}}{(75 - 50)\%PO} = 20 \frac{^{\circ}C}{\%PO}.$$

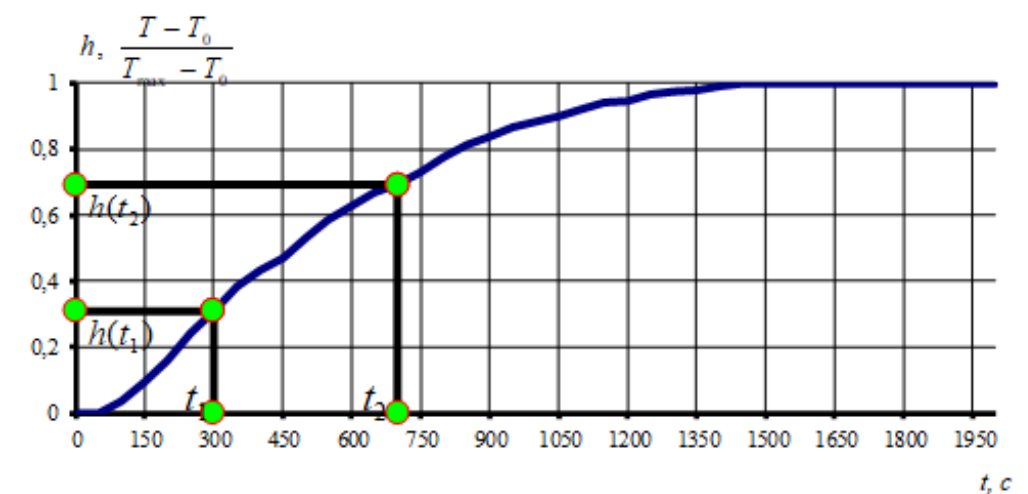


Рисунок 3.5 - Приведена перехідна характеристика

Остаточна передавальна функція об'єкту управління має вид:

$$W_{об}(p) = \frac{20 \cdot e^{-107,5 \cdot p}}{481,25 \cdot p + 1}.$$

Апроксимація перехідної характеристики приведена на рисунку 3.6, а

аналітичний вираз наступний: $h(t) = 20 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-107,5}{481,25}} \right).$

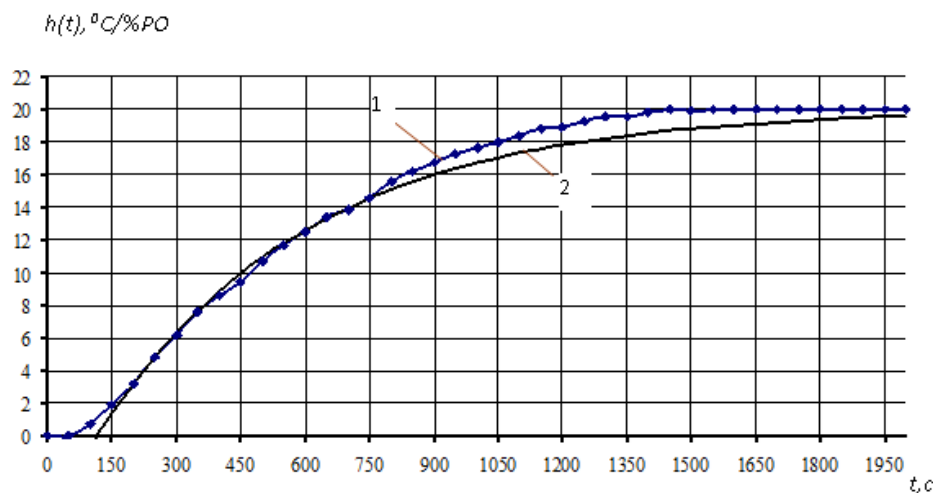


Рисунок 3.6 - Перехідна характеристика об'єкту управління (1 – реальна перехідна характеристика; 2 – апроксимована перехідна характеристика)

Отже, можна стверджувати, що апроксимація вийшла успішною.

3.4 Розрахунок регулятора САР

Відповідно до співвідношення: $r = \frac{\tau_o}{T_{об}} = \frac{107,5}{481,25} = 0.223$ (так як $0.2 \leq r \leq 1.0$),

обираємо ПІ регулятор безперервний [15-17].

Щоб отримати допустимі значення показників якості - динамічного викиду та тривалості процесу, використаю динамічний коефіцієнт регулювання. Його фізичний зміст полягає в тому, що він показує, у скільки разів динамічне відхилення (y_1) менше при використанні регулятора порівняно зі сталою величиною без регулятора. Коефіцієнт обчислюється за формулою:

$$R_d = \frac{y_1}{\Delta u} \cdot \frac{1}{K_{об}};$$

Параметри регулятора визначатиму за формулами:

$$K_p = \frac{0.7}{K_{об} \cdot \tau_o / T_{об}}; T_i = 0.7 \cdot T_{об}.$$

Підставивши значення, отримаю:

$$K_p = \frac{0,7}{20 \cdot \frac{107,5}{481,25}} = 0.156 \frac{\%PO}{^{\circ}C}; T_i = 0,7 \cdot 481,25 = 336,87c.$$

Враховуючи, що: $\frac{\tau_o}{T_{об}} = 0.22$, за таблицею отримаю динамічний коефіцієнт регулювання для перехідного процесу з 20% -перерегулюванням:

$$R_d = 0,15.$$

Обчислюю динамічний викид за допомогою динамічного коефіцієнта регулювання:

$$y_1 = R_d \cdot (k_{об} \cdot \Delta u);$$

де Δu - збурення збоку регулюючого органу (внутрішнє збурення).

$$y_1 = 0,15 \cdot (20 \cdot 1) = 3^{\circ}C;$$

Далі знаходжу тривалість регулювання:

$$\frac{\tau_p}{\tau_o} = 14.$$

Звідси:

$$\tau_p = 14 \cdot 107,5 = 1505 \text{ c}.$$

Отже, параметри настроювання регулятора у замкненій САР визначено.

3.5 Моделювання та оптимізація САР

Використовуючи отримані параметри налаштування регулятора, промоделью перехідний процес у замкненій системі автоматичного регулювання (САР) за допомогою програми Matlab. Графік отриманого перехідного процесу за каналом "завдання-вихід" наведено на рисунку 3.7.

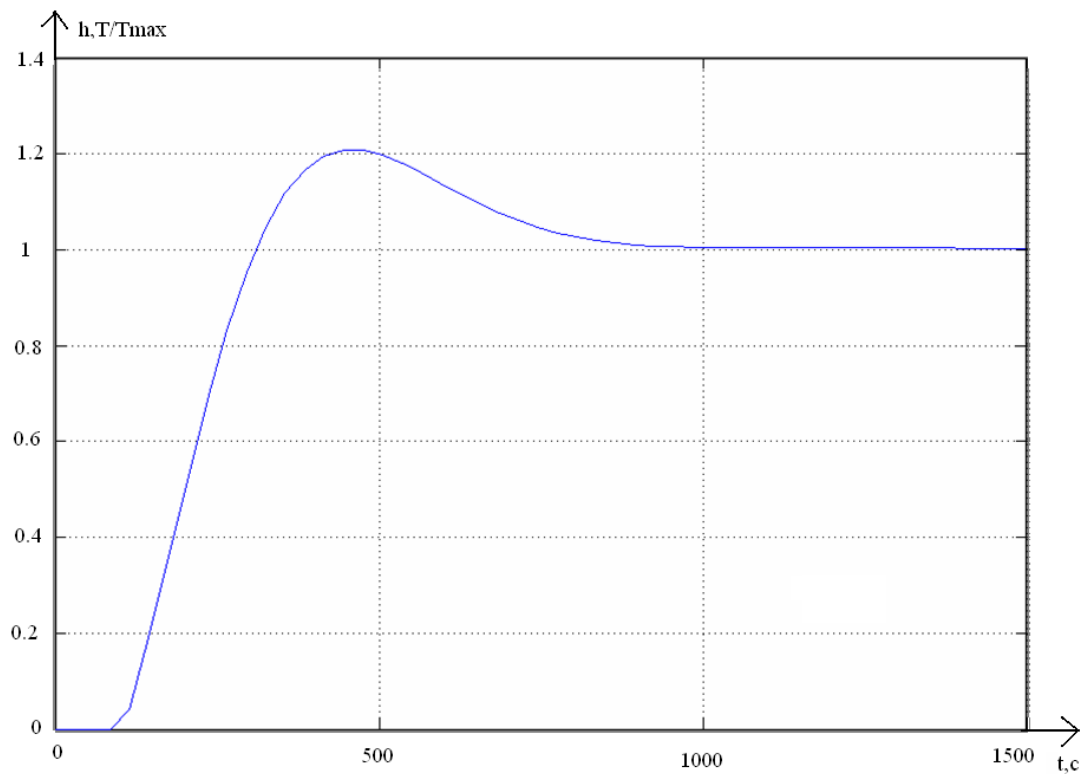


Рисунок 3.7 - Перехідний процес за каналом $y^* \rightarrow y$

На основі отриманих процесів визначаю прямі критерії якості (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Прямі критерії якості

Назва каналу	σ	τ_p, c	$\delta_{уст}$
$y^* \rightarrow y$	21%	770	0

Оскільки перерегулювання і тривалість регулювання не відповідають

заданим значенням, необхідно знайти оптимальні параметри регулятора. Для цього застосовуються три методи оптимізації, з яких ми оберемо найпоширеніший і надійний метод - пошук оптимальних параметрів ПІ-регулятора з використанням пакету NCD-Blockset (рисунок 3.8).

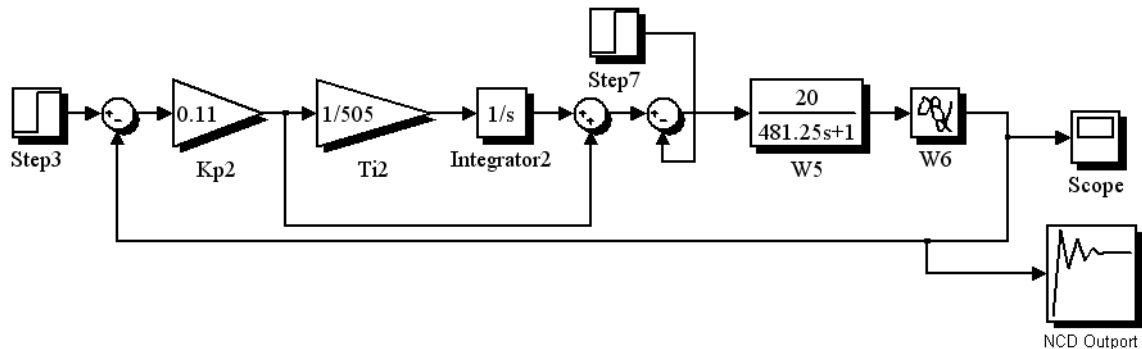


Рисунок 3.8 - Структурна схема АСР з блоком оптимізації

Цей інструмент дозволяє налаштовувати параметри нелінійної Simulink-моделі, де можна задавати будь-яку кількість змінних, включно з векторами та матрицями. Хід оптимізації відображається на екрані у вигляді графіка контрольованого процесу та поточних значень функції, яку мінімізують. Після завершення оптимізації результат зберігається в робочому просторі.

Параметри регулятора задамо змінним величинами: K_p , T_i , а у командному вікні MatLab задамо їх початкові значення: $K_p=0,156$; $T_i=336,87c$.

Отже, ми створили Simulink-модель об'єкта керування і можемо перейти до задання обмежень, що накладаються на систему. Встановимо коридор, у межах якого повинен знаходитися сигнал блока NCD Outport відповідно до вимог задачі.

Далі вибираємо пункт меню Optimization\ Parameters. Відкривається вікно, в якому необхідно вказати назви оптимізованих параметрів: K_p , T_i в полі Tunable Variables. Тут же змінимо значення поля Discretization interval на 0.1 і відмітимо поле Stop optimization as soon as the constraints are achieved (рисунок 3.9).

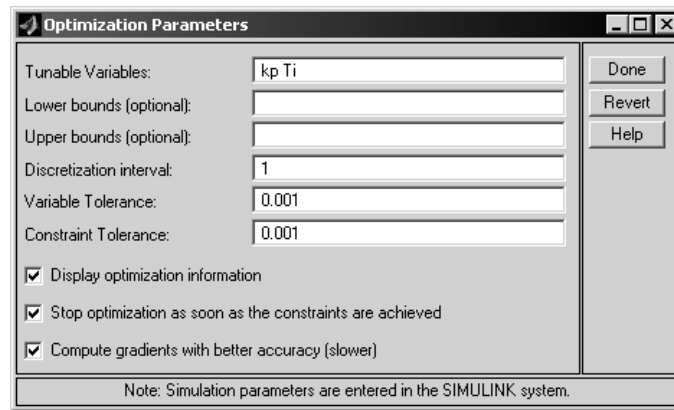


Рисунок 3.9 - Налаштування параметрів блоку NCD Outport

Далі можна проводити процес оптимізації. Натискаємо кнопку Start у вікні блоку NCD Outport і спостерігаємо за розвитком процесу: для кожного етапу оптимізації у вікні відображаються графіки сигналу, які відповідають початковим (білого кольору) і поточним (зеленого кольору) значенням параметрів, що настраюються. При цьому у командному вікні MatLab відображається інформація про хід оптимізації (рисунок 3.10).

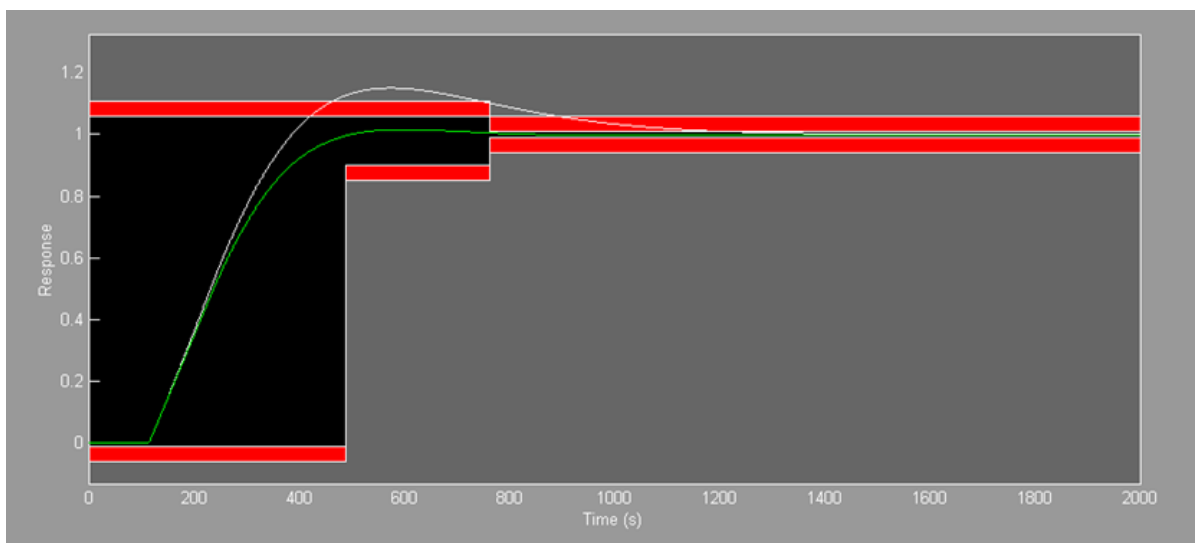


Рисунок 5.10 - Вікно оптимізації перехідного процесу

Після завершення процесу оптимізації оптимальні значення параметрів автоматично зберігаються в робочому просторі MatLab. У цьому випадку це значення параметрів (K_p) та (T_i), які використовувались для налаштування регулятора: `>>Ti=505; >>kp=0.11`.

Підставивши числові коефіцієнти у математичну модель, отримаємо

перехідний процес (рисунок 3.11).

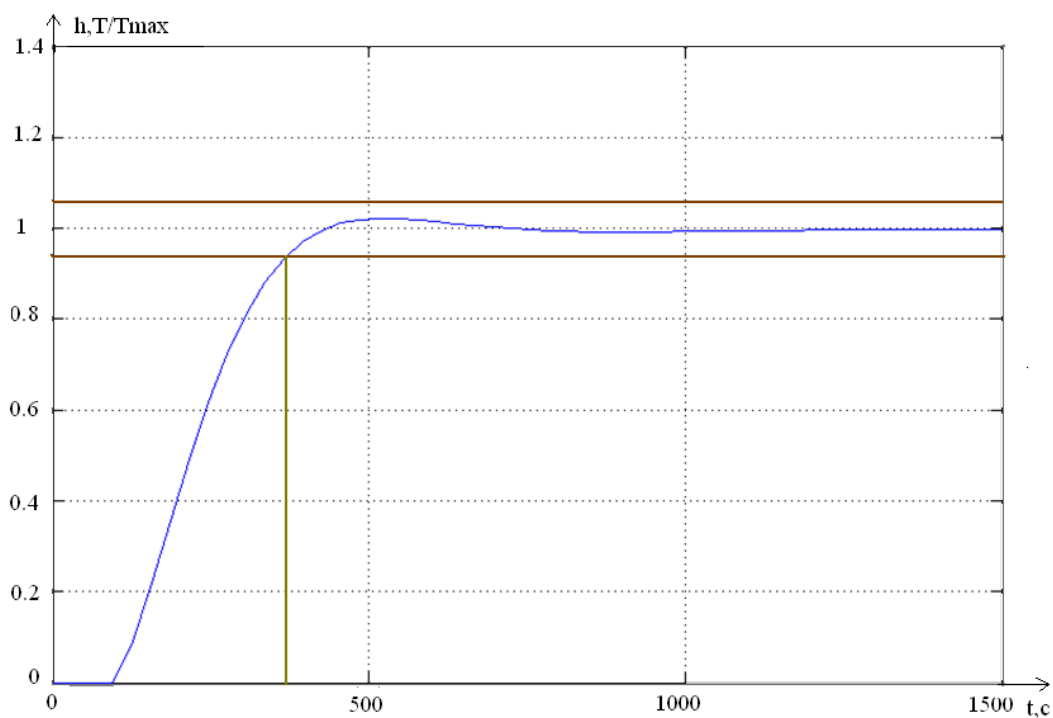


Рисунок 3.11 - Перехідний процес

Отриманий перехідний процес характеризується наступними показниками якості: час регулювання $T_r=385$ с, перерегулювання $\sigma = 3\%$, коливальність $n=0$; усталена похибка регулювання $\delta_{уст} \approx 0,00$.

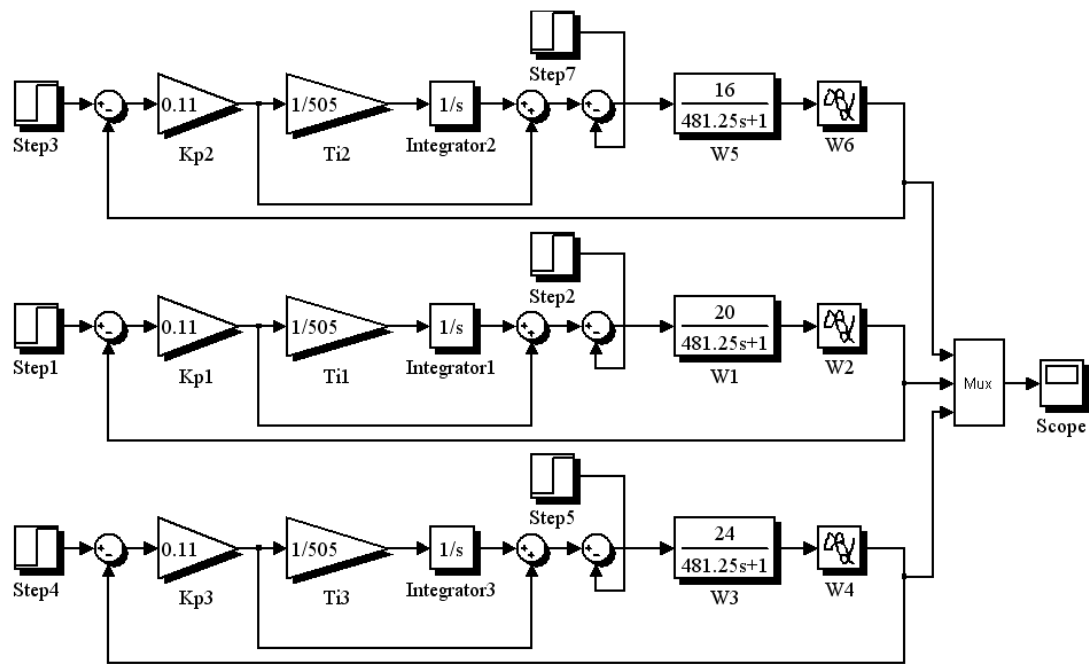
В результаті саме ці результати будемо вважати оптимальними параметрами налагодження регулятора.

3.6 Аналіз чутливості САР температури

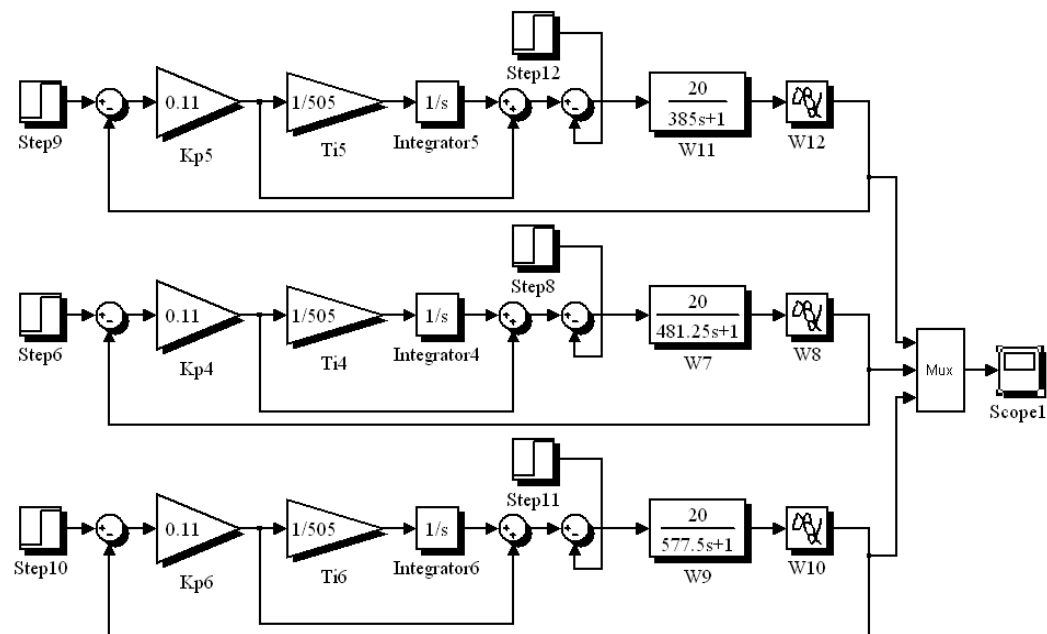
У процесі експлуатації системи автоматичного регулювання температури скловарної печі можливий знос технологічного обладнання, що призводить до змін параметрів об'єкта регулювання. Для виявлення допустимих меж зміни цих параметрів і їх впливу на якісні показники роботи САР температури виникає потреба в аналізі чутливості досліджуваної системи регулювання.

На рисунку 3.12 представлена модель, яка використовується для зняття та аналізу перехідних характеристик при зміні коефіцієнта передачі та сталої часу

плавильної печі на +20% і -20% від номінального значення..



а)



б)

Рисунок 3.12 - Модель для дослідження чутливості САР температури : а)- при зміні коефіцієнта передачі об'єкта; б)- при зміні сталої часу об'єкта

Результати моделювання відповідно представлені на рисунках 3.13, 3.14.

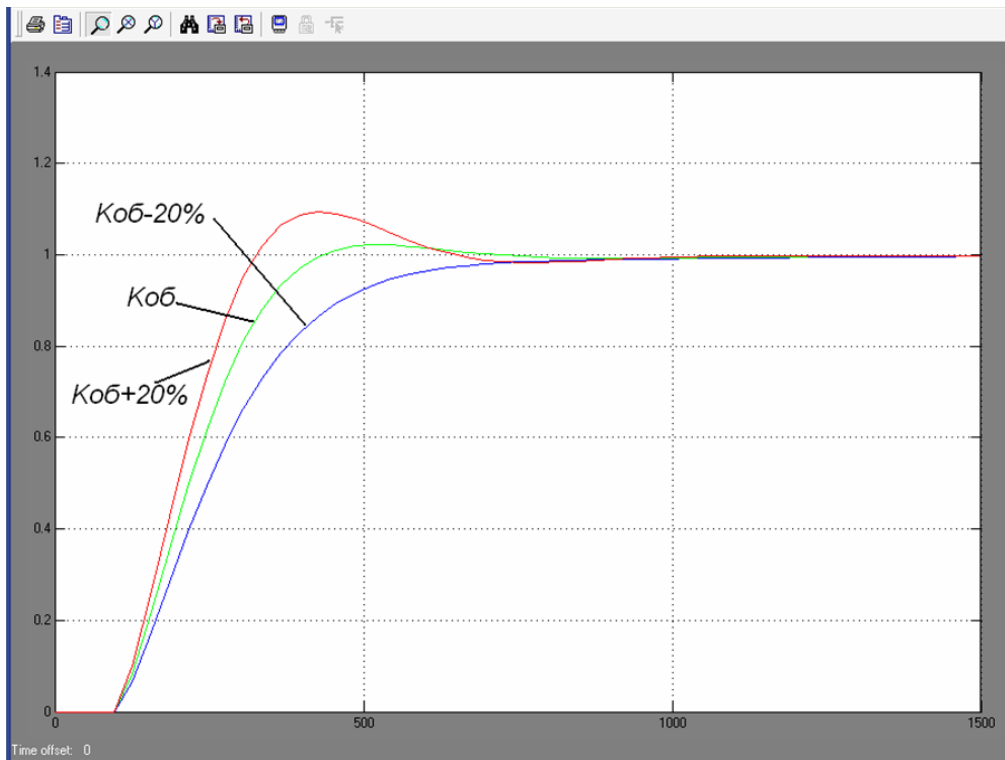


Рисунок 3.13 - Моделювання системи управління при зміні коефіцієнта передачі об'єкта

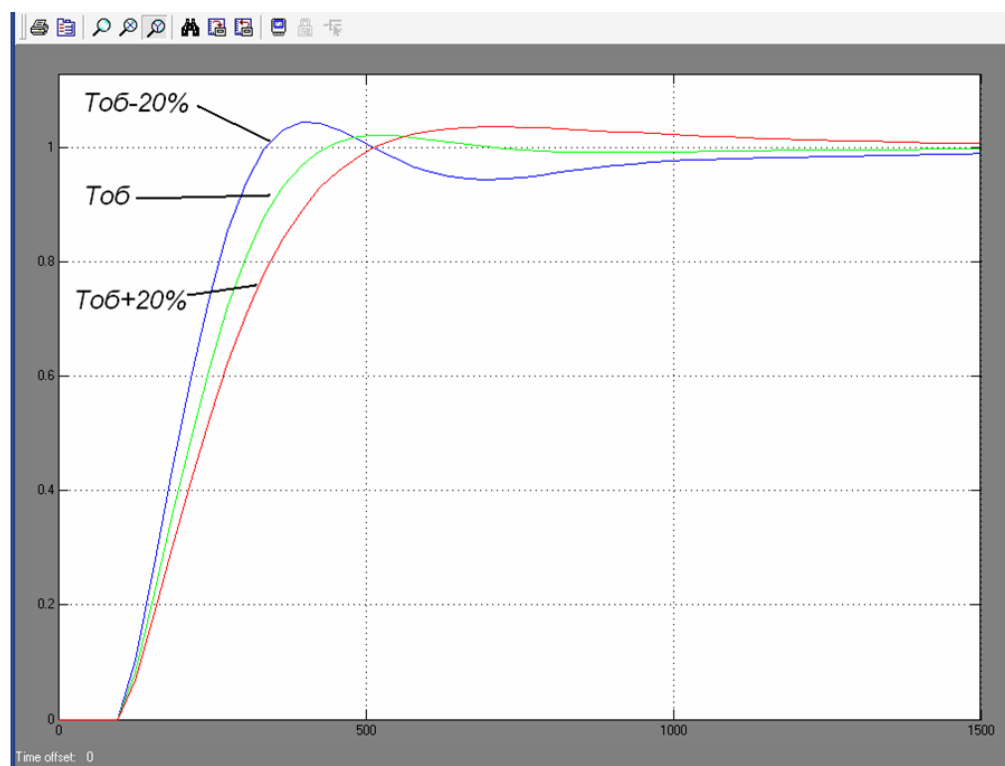


Рисунок 3.14 - Моделювання системи управління при зміні сталої часу об'єкта

За отриманими результатами можна судити, що система є чутливою до зміни коефіцієнта передачі об'єкта регулювання і не чутливою до зміни сталої часу.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання даної роботи, яка стосується дослідження технологічних аспектів варіння скла, було виявлено необхідність впровадження сучасних мікропроцесорних засобів. Згідно з поставленою метою, були визначені параметри для контролю, сигналізації, блокування та автоматичного регулювання, а також розроблена функціональна схема автоматизації технологічного процесу.

В рамках проекту було проведено аналіз технологічного процесу скловаріння з метою виявлення ключових параметрів, що підлягають регулюванню. Також було оцінено поточний рівень автоматизації на підприємствах даної галузі, що дозволило виявити наявні недоліки та можливості для вдосконалення.

Досліджені компоненти системи автоматичного керування температурою в скловарній печі, що включають первинні перетворювачі, виконавчі механізми та системи контролю. Вивчено структуру систем контролю, регулювання та управління, що є важливими елементами для забезпечення стабільності та якості процесу варіння скла.

Для узгодження сигналів існуючих первинних вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів були розроблені структурні схеми каналів введення-виведення аналогових і дискретних сигналів у промисловий мікропроцесорний контролер "Lagoon". На основі проведених досліджень здійснено вибір технічних засобів для реалізації автоматизації, що забезпечить ефективність роботи системи.

Створена розподілена автоматизована система управління технологічним процесом варіння скла в скловарній печі, що складається з первинних перетворювачів, програмованого логічного контролера та виконавчих пристроїв забезпечить підвищення ефективності та якості продукції, а також оптимізацію процесів управління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ящишин Й. М. Технологія скла: підручник у трьох частинах. – Ч. 2 : Технологія скляної маси / Й. М. Ящишин. – Львів : Видавництво «Бескид Біт», 2004. – 250 с.
2. Ящишин Й. М. Технологія скла: підручник у трьох частинах. – Ч. 3 : Технологія скляних виробів / Й. М. Ящишин. – Львів: Видавництво «Растр-7», 2011. – 416 с.
3. Інноваційні технології у виробництві спеціального та побутового скла / М. М. Племянніков, А. П. Яценко, І. В. Пилипенко, Б. Ю. Корнілович; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,94 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 298 с.
4. Воронов Г. К. Технології виробництва скломатеріалів : конспект лекцій для студентів за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія / Г. К. Воронов. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 128 с.
5. Choudhary M. K. Recent advances in mathematical modeling of flow and heat transfer phenomena in glass furnaces / M. K. Choudhary // J. Am. Ceram. Soc. – 2002. – 85 [5]. – P. 1030-1036.
6. Beerkens R. G. Modeling of the melting process in industrial glass furnaces / R. G. Beerkens // Mathematical Simulation in Glass Technology / eds. D. Krause and H. Loch. – Berlin : Springer, 2002. – P. 17-72.
7. Choudhary M. K. Heat transfer in glass-forming melts / M. K. Choudhary, R. M. Potter // Properties of Glass Forming Melts / eds. L. D. Pye, A. Montenero and I. Joseph. – Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2005. – P. 249-293.
8. Kuhn W. S. Mathematical modeling of batch melting in glass tanks / W. S. Kuhn // Mathematical Simulation in Glass Technology / eds. D. Krause and H. Loch. – Berlin : Springer, 2002. – P. 73-125.
9. Патент України на корисну модель UA 90052 U, C03B 5/24. Спосіб керування тепловим режимом скловарної печі / А.І. Жученко, В.С. Цапар. - №u201314506; заявл. 11.12.2013; опубл. 12.05.2014.

10. Племянніков М. М. Хімія і технологія скла. Високотемпературні процеси / М. М. Племянніков, А. П. Яценко, Б. Ю. Корнілович. – Київ: Освіта України, 2015. – 184с.
11. Some Health Disorders among Workers in a Glass Factory [Електронний ресурс] // Occupational Medicine & Health Affairs. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.esciencecentral.org/journals/some-health-disorders-amongworkers-in-a-glass-factory-omha-2329-6879.1000106.pdf>.
12. Склоробство [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://aspectplus.com.ua/content/view/156/3/lang,ua/>
13. Арсенічев А.Л. Розробка ієрархічної системи керування скловарною піччю / Арсенічев А.Л. // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів Volume 7, Issue 1 /2015. – С.83-86.
14. Бобух А.О. Автоматзація інженерних систем: Навч. посібник. - Харків: ХНАМГ, 2005. - 212с.
15. Віктор Трегуб Автоматизація об'єктів періодичної дії. Підручник / В.Трегуб – Київ: Ліра-К, 2017. – 136 с.
16. Методи сучасної теорії управління. Підручник / Ладанюк А.П., Луцька Н.М., Кишенько В.Д. [та ін.] / К.: Ліра-К, 2019. – 368 с. ISBN 78-617-7605-36-1.
17. Методи та засоби автоматичного керування технологічними процесами: Навчальний посібник / І. В. Дубінін, М. І. Дорошенко, М. В. Руднєва та ін. – К.: ВПЦ “Київський університет”, 2011. – 536 с.
18. Климентовський Ю. А., Гладкий А.М. Технічні засоби автоматики. - К: Видавництво «КВЦ», 2003. -238с.
19. Контролер LAGOON-7000 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://forum.skunksworks.net/Forum10/HTML/000167.html>
20. Термопара [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://zetcontrol.com.ua/2017/10/11/termopara-tip-s-tpp/>
21. Вимірювальний перетворювач тиску APLISENS PC-28 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://aplisens.com.ua/ru/product/pc-28>
22. Заслінки поворотні DANFOSS APORIA [Електронний ресурс]. Режим

доступу: <http://veren.com.ua/uk/products/accessories/armature/armatura-zaslinky/149g032658-danfoss>

23. Трансмітер SITRANS T universal transmitter 7NG-3040 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/576/23671576/att_95778/v1/7NG3040_1_BA_en.pdf

24. Перетворювач частоти "Delta Electronics" моделі VFD150B43A [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://220volt.com.ua/preobrazovatel-chastoti-delta-electronics-vfd150b43a/>

25. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування / М.Г Попович., О.В. Ковальчук.- Підручник. - 2-ге вид. , перероб. і доп. — К. : Либідь, 2007. — 656 с.

26. Теорія автоматичного керування. Навчальний посібник / Сорока К.О. — Харків, ХНАМГ, 2006 – 187 с.