

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Інженерно-хімічний факультет

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації автоматизації
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ В.С. Цапар
(підпис) (ініціали, прізвище)
“ ” _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації»
зі спеціальності **174 – Автоматизація , комп'ютерно-інтегровані технології та**
робототехніка
(код і назва)

на тему: Автоматизація процесу виробництва скла

Виконала: студентка 6 курсу, групи ЛК-42мп

(шифр групи)

Денисюк Анастасія Валеріївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник Жученко Олексій Анатолійович - доктор технічних наук, професор

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

Консультант _____

(назва розділу)

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

Рецензент _____

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

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інженерно-хімічний факультет
(повна назва)

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

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

Освітньо-професійна програма «Технічні та програмні засоби автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Віталій ЦАПАР

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Автоматизація процесу виробництва скла ,
науковий керівник дисертації Жученко Олексій Анатолійович - доктор
технічних наук, професор,

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

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації

3. Об'єкт дослідження Скловарна піч

4. Вихідні дані Синтез та дослідження системи керування скловарної печі

5. Перелік завдань, які потрібно розробити потрібно проаналізувати технологічну схему виробництва склотари, провести ідентифікацію об'єкта за даними практики, виконати синтез і дослідження систем керування скловарної печі, розробити та змодельовати ПД-регулятор і нечітку систему керування температурою, а також підготувати стартап-проект.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу схема

автоматизації регенеративної скловарної печі з підковоподібним напрямком полум'я

7. Орієнтовний перелік публікацій висвітлення результатів дослідження скловарної печі як об'єкта керування в процесі виготовлення склотари та розроблення її параметричної моделі.

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Збір експериментальних даних щодо параметрів роботи скловарної печі		
2	Створення схеми автоматизації скловарної печі з підковоподібним розташуванням полум'я		
3	Визначення характеристик об'єкта дослідження на основі експериментальних даних		
4	Моделювання системи керування ПІД-регулятором в Simulink		
5	Створення та аналіз нечіткої системи керування скловарною піччю		
6	Оформлення стартап-проекту		
7	Оформлення магістерської дисертації		

Студент

Анастасія ДЕНИСЮК

Науковий керівник дисертації

Олексій ЖУЧЕНКО

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація виконана на тему «Автоматизація процесу виробництва скла» і містить сторінок пояснювальної записки, ілюстрацій, таблиць, додатки та бібліографічних джерел.

Метою дослідження є вивчення методів керування виробництвом склотари за допомогою моделювання системи керування з ПД-регулятором у Simulink, розробка та аналіз нечіткої системи керування скловарної печі, а також їх порівняння.

Об'єктом дослідження є скловарна піч з підковоподібним напрямком полум'я, а предметом – система керування процесами виробництва склотари.

Було отримано експериментальні дані параметрів скловарної печі та проведено їх ідентифікацію. Досліджено технологічну схему виробництва, поетапний процес виготовлення склотари, впроваджено системи контролю витрати продуктів горіння та тиску в газовому просторі печі, а також враховано методи вимірювання показників у системі керування.

Розроблено математичну модель системи керування з ПД-регулятором у Simulink та досліджено нечітку систему керування скловарною піччю. Крім того, опубліковано результати дослідження скловарної печі як об'єкта автоматизації.

Ключові слова: СКЛО, СКЛОТАРА, СКЛОВАРНА ПІЧ, СКЛОВИРОБНИЦТВО, ІДЕНТИФІКАЦІЯ СИСТЕМИ, НЕЧІТКА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, СКЛОУТВОРЕННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ПРОЦЕСИ СИЛКАТОУТВОРЕННЯ, MICROSOFT EXCEL.

ABSTRACT

The master's thesis is on the topic “Automation of the glass production process” and contains pages of explanatory notes, illustrations, tables, appendices, and bibliographic sources.

The purpose of the study is to investigate methods of controlling glass container production using a control system model with a PID controller in Simulink, to develop and analyze a fuzzy control system for a glass furnace, and to compare them.

The object of the study is a glass furnace with a horseshoe-shaped flame direction, and the subject is the glass container production process control system.

Experimental data on the parameters of the glass furnace were obtained and identified. The technological scheme of production and the step-by-step process of glass container manufacturing were studied, systems for controlling the consumption of combustion products and pressure in the gas space of the furnace were implemented, and methods for measuring indicators in the control system were taken into account.

A mathematical model of the control system with a PID controller was developed in Simulink, and a fuzzy control system for the glass furnace was investigated. In addition, the results of the study of the glass furnace as an object of automation were published.

Keywords: GLASS, GLASS CONTAINERS, MELTING END FURNACE, GLASSWARE, GLASS MANUFACTURING, SYSTEM IDENTIFICATION, FUEL CONTROL SYSTEM, GLASSING, AUTOMATION, PROCESSES OF SILICATE PRODUCTION, MICROSOFT EXCEL.

Зміст

ВСТУП.....	8
1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ТА СПЕЦИФІКА ВИГОТОВЛЕННЯ СКЛЯНОЇ ТАРИ.....	10
1.1. Підготовка та обробка вихідної сировини.....	11
1.2. Формування та дозування шихтової суміші.....	12
1.3. Процес плавлення скломаси.....	13
1.3.1. Види скловарних печей.....	14
1.3.2. Механізм утворення скла і перебіг фізико-хімічних процесів.....	16
1.4. Технологія формування та термообробка склотарної продукції з контролем якості.....	21
1.5. Постановка задач магістерської дисертації.....	25
2. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	26
2.1. Технологічні параметри контролю та керування у процесі виробництва.....	26
2.2. Характеристика та пояснення принципової схеми автоматизації.....	29
3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ.....	34
3.1. Визначення характеристик об'єкта методом «сірого ящика».....	34
4. РОЗРОБЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ РОБОТИ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ.....	42
4.1. Проектування та моделювання ПД-регулятора в середовищі Simulink.....	42

4.2. Створення та дослідження нечіткої системи керування температурним режимом в скловарній печі.....	45
Висновок до розділу 4.....	52
5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ.....	55
5.1. Концепція та короткий опис стартапу.....	55
5.2. Огляд тенденцій ринку глинозему	58
5.3. Маркетинговий аналіз середовища	60
5.3.1. Зовнішні ринкові впливи	62
5.3.2. Оцінка мікромаркетингових факторів	66
5.3.3. Формування основної управлінської проблеми.....	68
5.4. Оцінювання конкурентів	70
5.5. Розробка ринкових стратегій	73
Висновки до розділу 5.....	74
Список використаних джерел.....	75

ВСТУП

Упродовж останніх років ринок скляної тари демонструє стабільну тенденцію до зростання. Аналіз споживчого попиту свідчить, що скляна упаковка не лише не втрачає актуальності, а й упевнено зміцнює свої позиції серед інших видів тари. Це зумовлено комплексом її експлуатаційних та технологічних переваг.

Скляна пляшка забезпечує оптимальні умови зберігання продукції, оскільки матеріал не вступає в хімічну взаємодію з наповнювачем та не змінює його органолептичні властивості. Скло є інертним, екологічним та придатним до повторного використання. Саме тому напої з підвищеними вимогами до герметичності та стабільності — зокрема шампанські та інші ігристі вина — традиційно розливаються виключно в скляну тару.

Важливим фактором є і можливість різноманітного дизайну. Скляна тара дозволяє виробнику підкреслити індивідуальність бренду за допомогою унікальної форми, рельєфних елементів, фірмового логотипу чи назви компанії. Такий підхід знижує ризик фальсифікацій та підвищує впізнаваність продукції. Окрім цього, естетичні пропорції та прозорість скла роблять виріб більш привабливим серед покупців, впливаючи на вибір споживача на полицях магазинів.

До готової склотари висувається низка вимог, які забезпечують її якість та безпечність. Пляшка повинна мати рівну, гладку поверхню без дефектів, сторонніх включень чи непровару. Важливими є механічна міцність та здатність витримувати необхідний внутрішній тиск, особливо у випадку тари для газованих ігристих напоїв. Також скло повинно характеризуватися достатньою термостійкістю та відповідати вимогам хімічної інертності, що регламентуються гідролітичним класом матеріалу.

Сучасне виробництво склотари здійснюється переважно двома технологічними методами — секційним та роторним. Секційні машини забезпечують високу продуктивність і дозволяють виготовляти великі обсяги тари. Роторні установки, хоча й поступаються за продуктивністю, характеризуються нижчою собівартістю виготовлення. Тому вибір технології залежить від економічних можливостей підприємства та необхідного обсягу випуску продукції.

Зростання попиту на склотару вимагає вдосконалення технологічних процесів та впровадження автоматизованих систем управління виробництвом, що дозволяє підвищити якість продукції та зменшити витрати. Саме дослідження цих аспектів і є актуальним у контексті даної роботи.

1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ТА СПЕЦИФІКА ВИГОТОВЛЕННЯ СКЛЯНОЇ ТАРИ

Виробництво скляної пляшки проходить наступні етапи[1]:

- 1.Підготовка сировинних матеріалів.
- 2.Приготування шихти
- 3.Варка скла.
- 4.Формування вироби.
- 5.Відпал виробу.
- 6.Контроль якості.
- 7.Упаковка готових виробів.

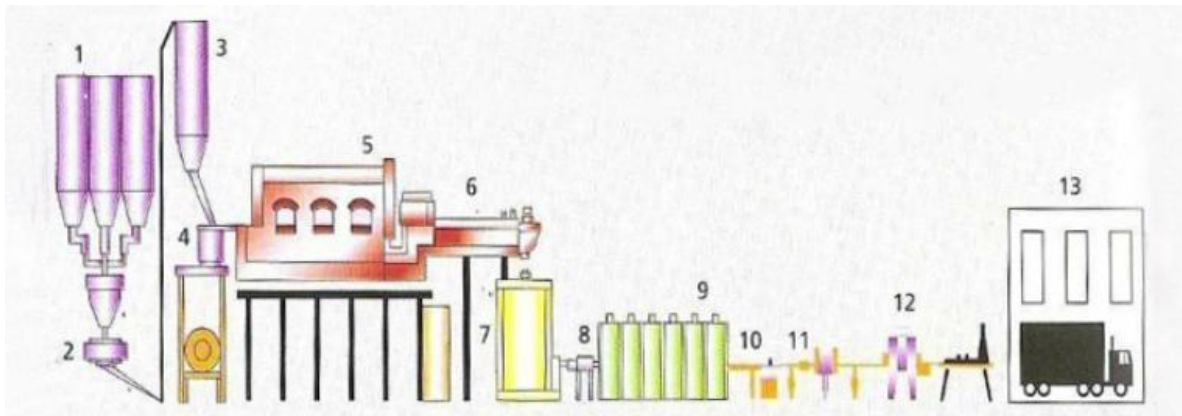


Рис. 1.1 Технологічна схема виготовлення склотари

1.1. Підготовка та обробка вихідної сировини

На початковій стадії виробництва здійснюється підготовка сировини, яка в подальшому використовується для отримання скломаси. Всі матеріали, що застосовуються у скловарінні, умовно поділяють на дві групи: основні та допоміжні.

До основних належать компоненти, які формують базовий склад майбутнього скла: кварцовий пісок, сода, сульфат натрію, глинозем, крейда, доломіт та інші матеріали, що забезпечують структуру і фізико-хімічні властивості скломаси.

Допоміжні матеріали вводять для коригування характеристик готового виробу, покращення якості скла, прискорення процесів варіння або надання виробам певного забарвлення. До таких добавок належать, зокрема, сполуки селену, кобальту та інші домішки спеціального призначення.



Рис. 1.2 Сировина

Сировина зі складу подається до підготовчого цеху[2], де її звільняють від небажаних включень, подрібнюють, сушать, розмелюють та ретельно просівають. Після цього підготовлені компоненти змішують із попередньо очищеним та подрібненим склобоям. Готова сировинна суміш надходить до видаткового бункера для подальшого використання у процесі формування шихти.

1.2. Формування та дозування шихтової суміші

На наступному етапі здійснюється підготовка шихти — сухої суміші всіх сировинних компонентів, що застосовуються для отримання скломаси. Для забезпечення однорідності майбутньої суміші кожний інгредієнт відважують у заданих пропорціях, після чого всі складові ретельно перемішують і подають у змішувальне обладнання.

Таблиця 1.1 хімічний склад деяких видів скла

Вид скла	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Склотара (прозора)	72,6	13,7	0,5	11,0	0,1	1,6	< 0,05
Склотара (зелена)	72,0	15,1	—	8,4	2,1	1,1	0,4
Склотара (коричнева)	72,7	13,8	1,0	10,0	—	1,9	0,2
Скляний посуд	75,6	13,5	4,1	3,7	2,6	0,4	0,02
Прозоре листо­ве скло	71	14	0,8	9	5	1–1,5	0,08
Матове листо­ве скло	70	14	0,8	9	5	1–1,5	0,3–1,5

Щоб запобігти розшаруванню шихти під час транспортування й подальшого використання, її злегка зволожують. Після завершення всіх підготовчих операцій готову шихту транспортують до виробничого цеху, де вона надходить у процес варіння скломаси.

1.3. Процес плавлення скломаси

Третій етап. Варіння скла – це багатоступеневий процес перетворення шихти у рідку скломасу. Шихта нагрівається знизу за допомогою розплавленого скла, а зверху – тепловим випромінюванням полум'я. Скловаріння вважається найбільш складною операцією при виробництві склотари. Процес варіння проводиться у ванних печах безперервної дії. Ванні печі являють собою складні теплотехнічні установки у вигляді басейнів, виготовлених з вогнетривких матеріалів. Під час нагрівання шихти відбувається повне розплавлення усіх компонентів (температура 1100–1150 °C). При подальшому підвищенні температури тугоплавкі складові повністю розчиняються, формуючи однорідну скломасу. Для підвищення прозорості скломаси температуру доводять до 1500–1600 °C.



Рис. 1.3 Варіння скла

Щоб надати склу необхідне забарвлення або зробити його непрозорим, до скла додають різні барвники: для синього відтінку використовують сполуки кобальту, для зеленого – сполуки хрому, для фіолетового – марганець, а для синьо-зеленого та коричневого кольору – оксиди заліза. Крім того, додають глушники, наприклад сполуки фосфору або фтору, для коригування оптичних властивостей.

1.3.1. Види скловарних печей

Скловарні печі класифікують за типом роботи та конструкцією. Найпоширеніші:

Ванні печі безперервної дії – працюють постійно, забезпечують безперервне плавлення шихти та отримання однорідної скломаси

Печі періодичної дії – шихта завантажується та плавиться у порціях; після завершення плавлення розплав виливають.

Тунельні печі – довгі печі, де шихта рухається по тунелю і поступово розплавляється.

Електричні печі – використовують електричний струм для нагріву, забезпечують точний контроль температури та зменшують викиди шкідливих газів.

Кожен тип печі обирають залежно від виду скла, обсягів виробництва та вимог до якості скломаси.

Таблиця 1.2 Види склопечей

Вид печі	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Застосування
Ванні печі безперервної дії	Постійне плавлення шихти, розплав надходить безперервно	Однорідна скломаса, велика продуктивність	Висока енергоємність, складність конструкції	Виробництво склотари та промислового скла

Продовження Таблиці 1.2

Печі періодичної дії	Шихта завантажується партіями, після плавлення розплав зливають	Простота конструкції, менші витрати на малих обсягах	Менша продуктивність, нерівномірна якість скла	Виробництво спеціального або кольорового скла
Тунельні печі	Шихта рухається по тунелю та поступово плавиться	Можливість плавного регулювання температури	Складність обслуговування, великі габарити	Виробництво великої партії скла постійного складу
Електричні печі	Нагрівання за рахунок електричного струму	Точний контроль температури, менше шкідливих викидів	Висока вартість обладнання	Високоякісне скло, лабораторне виробництво, малі партії

1.3.2. Механізм утворення скла і перебіг фізико-хімічних процесів

Таблиця 1.3 Хімічні, фізичні та фізико-хімічні процеси при варінні скла

Стадія процесу	Температурний інтервал, °C	Хімічні процеси	Фізичні процеси	Фізико-хімічні процеси
Силікато-утворення	800-1000	• Термічна дисоціація карбонатів: $\text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$ $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$ • Утворення силікатів: $\text{Na}_2\text{O} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3$ $\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3$ • Окислення сульфатів	• Нагрівання шихти • Виділення газів (CO_2, SO_2, H_2O) • Збільшення об'єму шихт	• Твердофазна дифузія іонів • Формування контактів між частинками • Спікання компонентів

Продовження Таблиці 1.3

Склоутворення	1000-1200	• Розчинення SiO_2 в розплаві • Гідроліз силікатів: $\text{Si-O-Si} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Si-OH}$ • Обмінні реакції між силікатами	• Плавлення евтектичних сумішей • Зниження в'язкості до 10^3-10^4 Па·с • Теплопередача в масі	• Розчинення кварцу • Дифузійна гомогенізація • Конвективний масоперенос • Коалесценція рідких фаз
Освітлення	1400-1500	• Розкладання освітлювачів: $2\text{As}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{As}_2\text{O}_5 + \text{O}_2 \uparrow$ $\text{Na}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{SO}_3 \uparrow$ • Окислювально-відновні реакції	• Зниження в'язкості до 10-100 Па·с • Спливання газових бульбашок • Теплове випромінювання	• Дифузія газів до бульбашок • Коалесценція бульбашок • Конвективні потоки • Масообмін газ-розплав

Продовження Таблиці 1.3

Гомогенізація	1400-1500	• Вирівнювання складу • Завершення обмінних реакцій	• Конвекція розплаву • Усереднення температури • Зниження градієнтів густини	• Дифузійне вирівнювання концентрацій • Розчинення неоднорідностей • Термодифузія
Студка (охладження)	1500-1200	• Встановлення рівноваги окислення • Припинення хімічних реакцій	• Підвищення в'язкості до 10^4 Па·с • Зниження температури • Теплопередача	• Початок структурних перебудов • Зміна конфігурації сітки • Встановлення рівноважної структури

Продовження Таблиці 1.3

Формування та відпал	1200-500	• Фіксація ступеня окислення • Припинення іонного обміну	• Зростання в'язкості до 10^{12-13} Па·с • "Заморожування" структури при T_g • Виникнення внутрішніх напружень	• Релаксація структури • Зміна фіктивної температури T_f • Кінетичне гальмування переходів • Зняття термічних напружень
----------------------	----------	---	--	---

Склоподібний стан речовини характеризується відсутністю дальнього порядку в розташуванні структурних одиниць при збереженні ближнього порядку. Скло є твердим тілом у термодинамічно нерівноважному метастабільному стані з надлишковою вільною енергією Гіббса порівняно з кристалічним станом. Перехід від рідкого стану до склоподібного відбувається в інтервалі температур склування (T_g), де спостерігається різке зростання в'язкості до 10^{12} - 10^{13} Па·с.

Структура силікатного скла базується на тривимірній ковалентній сітці кремнійкисневих тетраедрів $[\text{SiO}_4]^{4-}$, з'єднаних вершинами через атоми кисню. Координаційне число кремнію становить 4, енергія зв'язку Si-O складає 443 кДж/моль. Введення оксидів лужних металів призводить до розриву місткових Si-O-Si зв'язків з утворенням немісткових атомів кисню: $\equiv\text{Si-O-Si}\equiv + \text{R}_2\text{O} \rightarrow 2(\equiv\text{Si-O}^-\text{R}^+)$. Оксиди лужноземельних металів виконують функцію стабілізаторів структури.

Процес склоутворення включає чотири послідовні стадії. На стадії силікатоутворення (800-1000°C) відбуваються гетерогенні твердофазні реакції з термічною дисоціацією карбонатів: $\text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2\uparrow$ ($\Delta H_{298} = +322$ кДж/моль), $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2\uparrow$ ($\Delta H_{298} = +178$ кДж/моль) та взаємодією утворених оксидів з кремнеземом з формуванням проміжних силікатів (Na_2SiO_3 , CaSiO_3).

На стадії склоутворення (1000-1200°C) при досягненні температур плавлення евтектик формується рідка фаза. Швидкість розчинення кварцу описується рівнянням: $v = k \cdot S \cdot (C_s - C) / \eta$, де η - в'язкість розплаву. Стадія освітлення (1400-1500°C) забезпечує дегазацію скломаси згідно з законом Стокса: $v = 2gr^2(\rho_m - \rho_g) / (9\eta)$. Застосування освітлювачів (As_2O_3 , Sb_2O_3) інтенсифікує процес виділення газів.

При охолодженні нижче T_g відбувається кінетичне "заморожування" структури. Швидкість охолодження впливає на фіктивну температуру T_f згідно з $\ln(q) = \text{const} - E_a / (RT_f)$, де E_a - енергія активації в'язкого плину.

Склоутворення визначається структурними критеріями Захаріасена-Варрена: низьке координаційне число катіонів (3-4), з'єднання поліедрів вершинами, утворення тривимірної сітки. Кінетичні умови вимагають, щоб швидкість охолодження перевищувала швидкість кристалізації ($q > q_{cr} = \Delta T_{cr} / \tau$). Термодинамічно процес відбувається при виконанні умови $\Delta G_{glass} < \Delta G_{crystal} + W$, де W - енергетичний бар'єр кристалізації.

1.4. Технологія формування та термообробка склотарної продукції з контролем якості

Після охолодження скломаса надходить через канал фідеру до склоформуючої машини[3] продемонстровано на рис.1.4.

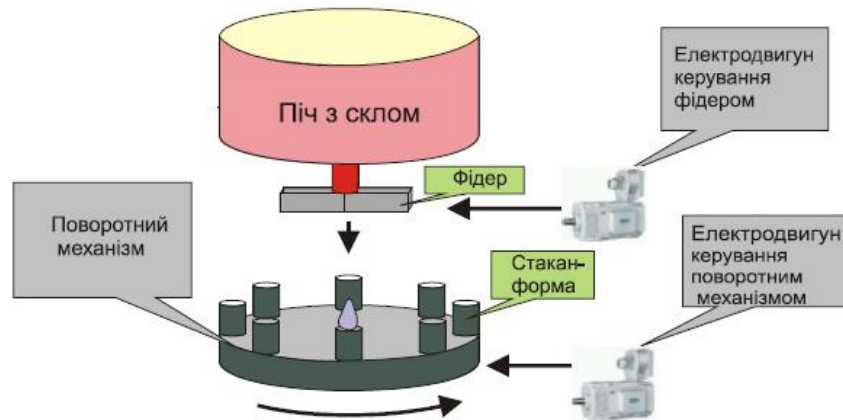


Рис. 1.4

Канал фідеру є важливим елементом перед формуванням пляшки у склоформуючій машині. Він поділений на кілька секцій, в яких протікає скломаса, а її температура постійно контролюється. У деяких секціях також здійснюється активне регулювання температури для підтримання оптимального режиму, розрахованого для конкретного виду пляшки. Для прозорого скла допустима відносна похибка температури до 1%, для кольорового – 2–3%.

Конструкція фідеру дозволяє одночасне формування від 1 до 3 капель, залежно від типу склоформуючої машини. Його оснащення включає правильний підбір діаметра очка, розміру і типу плунжера, ексцентриків та ножиць. Діаметр очка зазвичай на 3–6 мм більший за діаметр чорнової форми. Ексцентрики плунжера та ножиці підбираються відповідно до обраної швидкості і бажаної форми каплі.

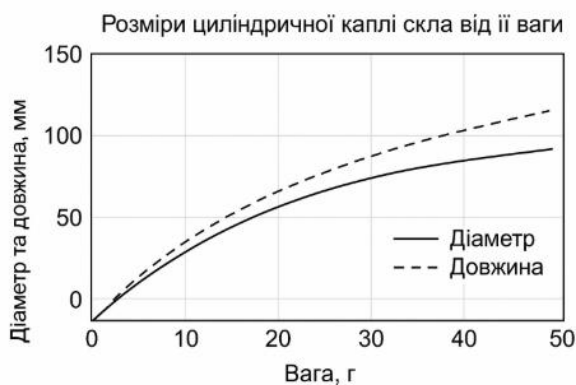


Рис. 1.5. Діаметр і довжина циліндричної каплі скла залежно від її маси

Після цього починається етап безпосереднього формування пляшок на склоформуючих машинах. Для виробництва скляної тари застосовують різні типи машин, які повинні бути високопродуктивними, економічними і забезпечувати точне дотримання заданої форми виробу.

Основні типи склоформуючих машин:

Карусельні (роторні) – формування виробів відбувається при безперервному або циклічному обертанні столів навколо центральної осі. Можуть мати один або два столи: на одному формують заготовку, на іншому – готовий виріб. Використання однієї форми дає продуктивність близько 50 шт./хв, двох – 100–160 шт./хв.

Секційні – складаються з декількох незалежних секцій (2, 4, 6 і більше). Цей тип дозволяє виробляти більше пляшок і використовувати різні форми у різних секціях. При застосуванні двомісних форм продуктивність збільшується на 20–40%.

Конвеєрні – застосовуються переважно для виготовлення полегшених пляшок. Виробництво найбільш ефективне: понад 230 шт./хв для пляшок ємністю 0,5 л і близько 400 шт./хв для 0,2 л. Сучасні секційні машини використовують 8, 10 або 12 секцій.

Після приготування скломасу її охолоджують до температури, при якій вона набуває потрібної в'язкості, і починають процес видування скляних виробів.



Рис.1.6 Вигляд формувального апарату

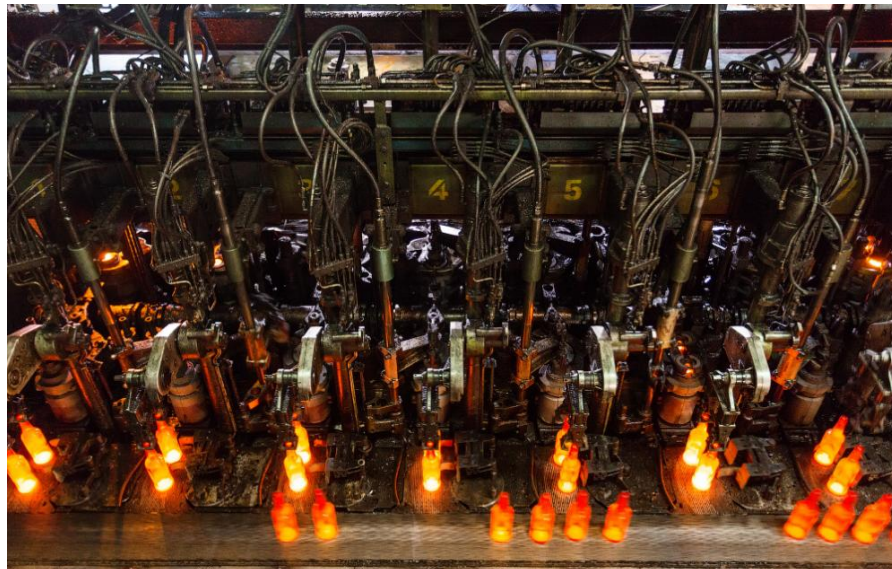


Рис.1.6 Вигляд формувального апарату

На першому етапі формується чорнова заготовка[4], яка приблизно повторює форму майбутнього виробу (пляшки або баночки). Потім, після формування горла, заготовка роздувається у потрібний об'єм і передається в чистову форму автоматичного формувального обладнання, де отримує остаточну форму готового виробу.

Після формування вироби направляють у печі прямого нагрівання для додаткової термічної обробки. На скло наносять тонку захисну плівку до або після відпалу, що значно підвищує його міцність і термічну стійкість.

Контроль якості склотарної продукції здійснюється на всіх етапах виробництва для забезпечення відповідності готових виробів нормативним вимогам. Основними показниками якості є міцність, герметичність, прозорість, відсутність включень та дефектів, а також точність геометричних розмірів. Для цього застосовуються такі методи:

Візуальний контроль — перевірка на наявність тріщин, повітряних бульбашок та сторонніх включень;

Механічні випробування — визначення міцності на стиск, удар та термостійкості;

Вимірювання геометричних параметрів — контроль діаметра, товщини стінок та об'єму;

Автоматизовані системи контролю — використання сенсорів і камер для виявлення дефектів у потоці продукції;

Випробування на герметичність — перевірка здатності тари зберігати рідину без протікання.

Готові вироби проходять контроль якості відповідно до нормативних вимог і технічних умов. Під час перевірки оцінюють якість скла, наявність виробничих дефектів та точність формування горла для забезпечення герметичності упаковки. На фінальному етапі придатну тару сортують, упаковують у ящики або коробки і відправляють на склад готової продукції для подальшої доставки замовнику.

1.5. Постановка задач магістерської дисертації

Метою цього дипломного проекту є створення схеми автоматизації та розробка системи автоматичного керування скловарною піччю, яка є ключовим елементом у технологічному процесі виробництва склотарної продукції.

Варто зазначити, що застосування простих або стандартних систем керування для цього об'єкта може бути неефективним через специфіку технологічного процесу. Тому необхідна розробка системи, що враховує особливості роботи скловарної печі та дозволяє здійснювати точний контроль над температурним режимом.

На температуру всередині печі впливають різноманітні зовнішні фактори, серед яких найбільше значення мають концентрація кисню в повітрі, вологість шихти, витрата сировини та стан розплавленого скла.

Для забезпечення стабільної роботи системи управління необхідно створити ефективний механізм підтримки температурного режиму печі. Це може бути досягнуто шляхом використання регулятора на основі нечіткої логіки або класичного ПІД-регулятора. Виходячи з цього, у рамках дипломного проекту були визначені наступні завдання:

1. Розробити схему автоматизації процесу скловаріння;
2. Виконати ідентифікацію динамічної моделі скловарної печі на основі експериментальних даних;
3. Створити систему керування температурою скловарної печі з використанням ПІД-регулятора;
4. Розробити систему керування температурою з використанням нечіткого регулятора;
5. Проаналізувати різні методи налаштування регуляторів та порівняти їх ефективність у роботі.

2. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1. Технологічні параметри контролю та керування у процесі виробництва

Скловарна піч — це теплотехнічний агрегат безперервної або періодичної дії, призначений для плавлення шихти та отримання однорідної скломаси з заданими фізико-хімічними властивостями. У печі відбуваються основні технологічні процеси: нагрівання, плавлення, рафінування та усереднення скла перед його подачею на формування виробів. Конструкція печі забезпечує підтримання стабільного температурного режиму та рівномірний перебіг термохімічних реакцій у всьому об'ємі розплаву[5].

Для стабільної, безпечної та ефективної роботи процесу виробництва склотари в скловарній печі, а також для отримання продукції необхідної якості, необхідно впровадити автоматичний контроль і регулювання ряду технологічних параметрів. До основних з них належать:

- подача та витрата газу, що спрямовується до пальникових пристроїв печі;
- витрата повітря, яке подається для забезпечення повного згоряння палива;
- кількість шихти та склобою, що транспортується у піч;
- рівень розплавленої маси на виході з печі;
- температурний режим у зоні регенераторів;
- температура стінок печі;
- температура скломаси на виході з протоки.

У ванній скловарної печі відбувається значна кількість хімічних, фізичних та фізико-хімічних процесів, які протікають при різних температурних режимах. Особливості перебігу цих процесів та розподіл

температур по об'єму печі відображено в температурній моделі скловарної печі на рис 2.1

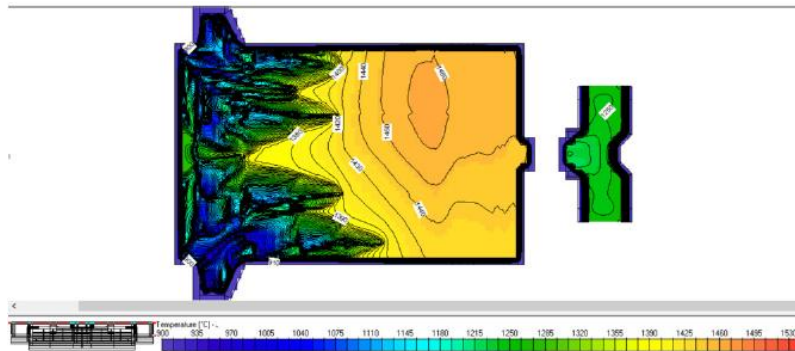


Рис. 2.1 Температурна модель печі на поверхні скломаси

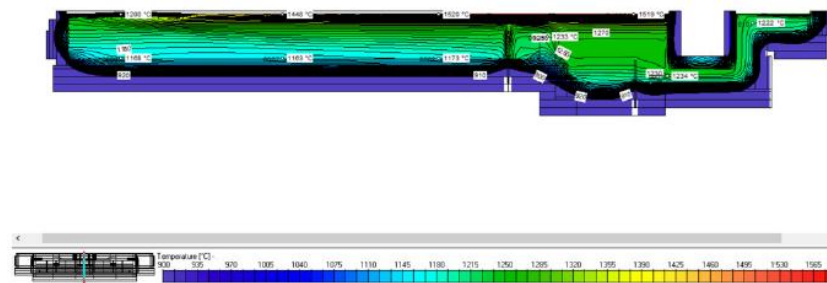


Рис. 2.1 Температурна модель печі у поперечному розрізі

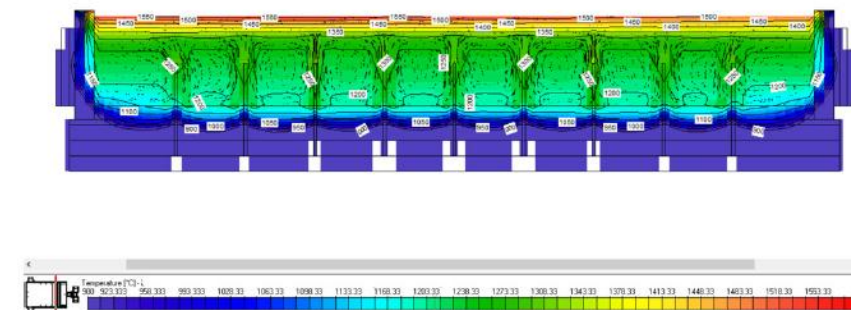


Рис. 2.1 Температурна модель печі в зоні максимуму і бустингу

У зв'язку з тим, що у ванній скловарної печі відбуваються процеси з вираженою температурною та динамічною неоднорідністю, необхідно здійснювати автоматизований контроль параметрів у різних її зонах. Зокрема, система має забезпечувати вимірювання та регулювання таких величин:

- температура поверхні розплаву в районі пальникових пристроїв;
- температура донної частини печі поблизу горілок;

- температура верхнього шару скломаси в зоні максимальних теплових навантажень;
- температура дна в області максимального прогріву;
- температурний режим поверхні розплаву в зоні протоки;
- температурний режим донної частини в зоні протоки;
- тиск газового простору всередині печі.

Таблиця 2.1 – Параметри контролю та керування скловарної печі

№ п/п	Технологічний об'єкт, місце заміру параметра	Найменування параметра	Норми технологічного режиму	Вимоги до автоматизації
1	Газ, трубопровід	Витрата	—	Контроль, керування
2	Повітря, трубопровід	Витрата	—	Контроль, керування
3	Склomаса, протока (вихід)	Температура	1250 °C	Керування
4	Склomаса, протока	Температура	—	Контроль
5–6	Стійка регенератора	Температура	—	Контроль
7–8	Повітря, регенератор	Температура	—	Контроль
8–17	Склomаса, ванна печі	Температура	1000–1400 °C	Контроль
18–19	Суміш шихти та склобою, силоси	Витрата	—	Керування
20	Склomаса, фідер	Рівень	—	Контроль
21	Газовий простір печі	Тиск	—	Контроль, керування

2.2. Характеристика та пояснення принципової схеми автоматизації

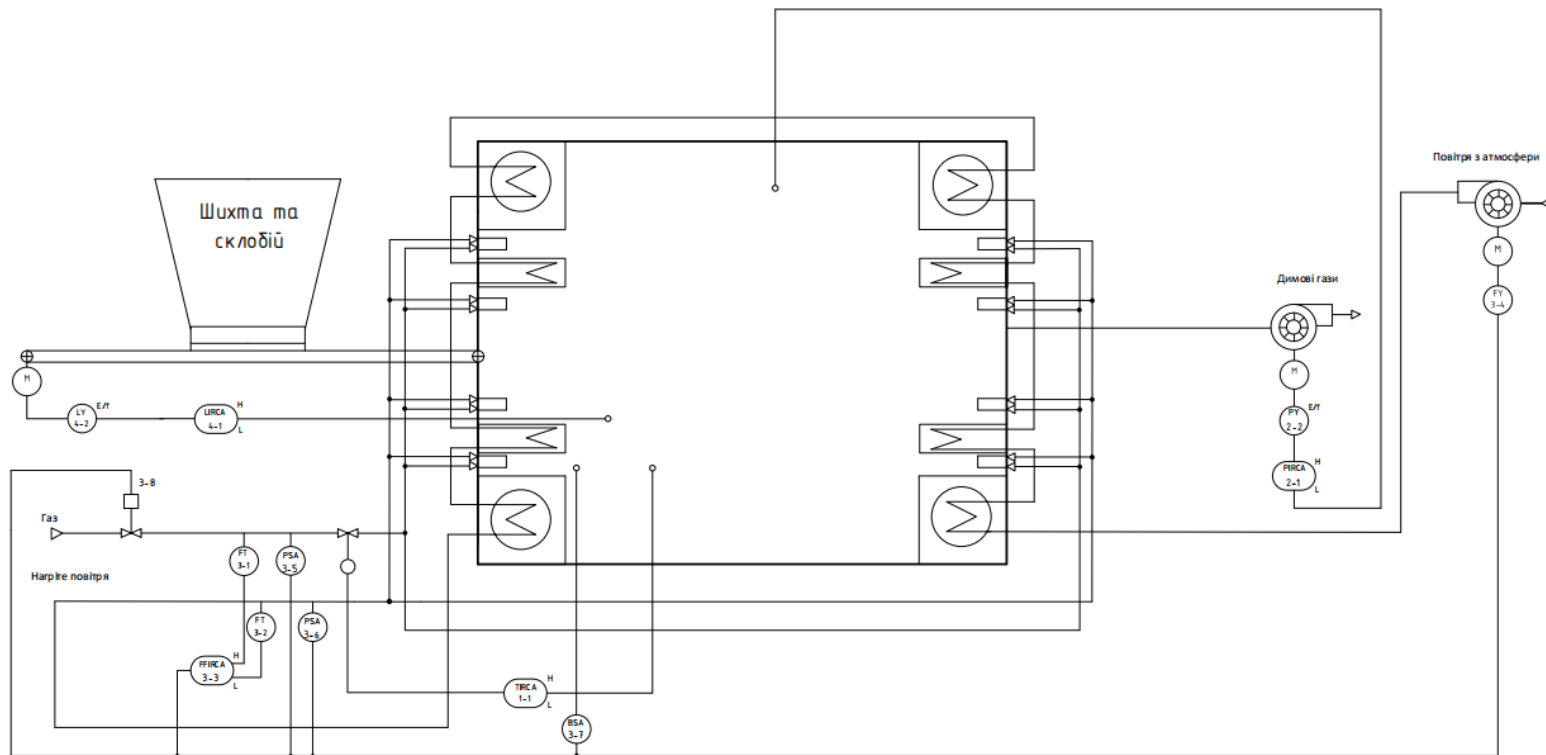


Рис.2.2. Спрощена функціональна схема автоматизації скловарної печі ванного типу

Опис функціональної схеми

1. Регулювання температури у печі.

Для вимірювання температури скломаси в печі використовується термопара (поз. 1-1) діапазон вимірювання 0 – 2300 °С. В комплекті з термопарою стоїть термоперетворювач (поз. 1-2) з вихідним уніфікованим струмовим аналоговим сигналом 4 -20 мА, який передається на аналоговий вхід ПЛК Modicon M340.

Для регулювання подачі газу в піч, ПЛК відповідно до алгоритму функціонування формує регулюючу дію. Ця дія подається на аналоговий вихід актуатора (поз. 1-4) з перетворювачем (поз. 1-3), який регулює подачу газу в піч.

2. Регулювання розрідження в печі;

Як первинний перетворювач тиску у верхній частині випарувальної камери використовуємо вимірювальний перетворювач тиску розрідження (поз. 2-1) з діапазоном вимірювання $-0.002 \dots 0.002$ бар. Вихідний сигнал (4 – 20 мА) з цього давача подається на аналоговий вхід ПЛК Modicon M340.

При відхиленні вхідного параметра від заданого значення ПЛК згідно алгоритму функціонування формує регулюючу дію з аналогового виходу ПЛК регулюючий сигнал 4 -20 мА надходить на частотний перетворювач (поз. 2-2) для вентилятора (поз. 2-3).

3. Регулювання співвідношення паливо-повітря;

Вимірювання витрати газу і повітря здійснюється з використанням ультразвукового витратоміра (поз. 3-1) з діапазоном вимірювання $0 \div 1600$ м³/год та аналоговим вихідним сигналом 4-20 мА, які надходять на аналогових вхід ПЛК Modicon M340.

Вимірювання витрати повітря здійснюється з використанням вихрового витратоміра (поз. 3-2) з діапазоном вимірювання $0.01 \text{ м}^3/\text{год} - 10000$ м³/год та аналоговим вихідним сигналом 4-20 мА, які надходять на аналогових вхід ПЛК Modicon M340.

При відхиленні вхідного параметра від заданого значення ПЛК згідно алгоритму функціонування формує регулюючу дію з аналогового виходу ПЛК регулюючий сигнал 4 -20 мА надходить на частотний перетворювач (позиція 3-4) для вентилятора (поз. 3-6).

Система блокування реалізована так: у разі виявлення критичної невідповідності параметрів у системі до заданих або виникненні аварійних ситуацій, для запобігання небезпечних наслідків ПЛК подасть сигнал на електромагнітний клапан (поз. 3-8), аби зупинити подачу газу, вимкне частотно-керований пристрій транспортера завантаження печі, та увімкне обдув системи вентиляторами (2-2) та (3-4). Тиск газу та повітря у

трубопроводах контролюється двома реле тиску (3-6, 3-7), а при пальниках застосовано реле контролю полум'я (3-5).

4. Регулювання рівня скломаси в печі;

Даний контур реалізований за допомогою: лазерного рівнеміра (поз. 4-1), з діапазоном вимірювання налаштовуваним відповідно до потреб систем (0.440 м – 0.448 м), та з аналоговим вихідним сигналом у 4-20 мА; частотного перетворювача (поз. 4-2) для електродвигуна (поз. 4-3). У разі відхилення рівня скломаси від заданого, ПЛК сформує керуючу дію на частотно керований пристрій (4-2).

Таблиця 2.2. Специфікація технічних засобів автоматизації

№ п/п	№ поз.	Назва параметра	Місце встановлення	Назва засобу та коротка технічна характеристика	Тип	К-сть
1			На щиті	Модуль блоку живлення Вхідна номінальна напруга 220В Вихідна напруга 24В	BMX CPS2000	1
2			На щиті	Модуль аналогових вхідних та вихідних сигналів Аналогових входів – 8 Аналогових виходів – 4	BMX АММ 0600	1
3			На щиті	Модуль дискретних вхідних сигналів Дискретних входів – 8	BMX DDI 1602 Типу р-п-р	1
4			На щиті	Модуль дискретних вихідних сигналів Дискретних виходів – 8	BMX DDO 1602	1
5	1-1	Температура в печі	По місцю	Термопара	Тип В НТ 4060	1

Продовження Таблиці 2.2

6	1-2		По місцю	Діапазон 0...2300 °С, Клас захисту IP 65. Нормуючий перетворювач Вихідний сигнал 4-20мА	SITRANS TK-H (7NG3210- 2JN01)	1
7	1-3		По місцю	Регулюючий клапан Номінальна пропускна здатність 1000 м3/год	Kromschro der VFC	1
8	1-3a		По місцю	Електричний привід для клапана	IC-40	1
9	1-3b	Тиск розріджен ня в печі	По місцю	Перетворювач тиску Sitrans P DS III (7MF4433) Вимірювальний діапазон - 0.002 ... 0.002бар	—	1
10	2-2 3-4		На щиті	Частотний перетворювач Сигнал 4–20мА; Потужність 22кВт.	ATV930D2 2N4	1
11	2-3 3-3		По місцю	Вентилятор Продуктивність 7000 м3/год, Потужність 7.5кВт.	ВЦ14-46	2
12			По місцю	Електродвигун Потужність – 7.5 кВт Напруга – 380 В Швидкість – 3000 об/хв.	AIP112M2	1
13	3-1	Витрата газу на вході в піч	По місцю	Ультразвуковий витратомір Вихідний сигнал 4...20мА Діапазон 0...2300 м3/год	Siemens Sitrans FS230 Gas	1
14	3-2	Витрата повітря на вході в піч	По місцю	Вихідний витратомір Вихідний сигнал 4...20мА Діапазон 0...10000 м3/год	Siemens SITRANS FX330	1

Продовження Таблиці 2.2

15	4-1	Рівень скломаси	По місцю	Лазерний рівнемір АВВ LLT100. Діапазон вимірювання 0.5÷30 м Точність ±5 мм. Вихідні сигнали 4–20 мА.	LLT100	1
16	4-2	Витрата склобою на вході в піч	На щиті	Частотний перетворювач Сигнал 4–20мА; Потужність 5.5кВт.	ATV930D5 5N4	1
17			По місцю	Електродвигун Потужність – 22 кВт Напруга – 380 В Швидкість – 3000 об/хв.	AIP180S2	1
18			На щиті	Допоміжне реле Напруга живлення 24 В	VS116k	1

3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОО РЕЖИМУ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

3.1. Визначення характеристик об'єкта методом «сірого ящика»

Оскільки побудувати повноцінну аналітичну математичну модель скловарної печі доволі складно через багатфакторність та нелінійність процесів, було прийнято рішення визначити перехідні характеристики основних керованих каналів на основі експериментальних даних. Необхідні показники були отримані завдяки інформації з Рокитянського склазаводу.

Процес ідентифікації динамічних об'єктів передбачає встановлення їх структури та параметрів на підставі експериментальних вимірювань: значень вхідних впливів та відповідних вихідних реакцій.

У ситуаціях, коли об'єкт керування поводить себе як «чорний ящик» і не має доступної внутрішньої моделі, його необхідно піддати контрольованим зовнішнім збуренням, зафіксувати реакцію системи та за отриманими даними побудувати математичний опис. Таким чином «чорний ящик»[6] поступово перетворюється у «білий», тобто стає інформаційно прозорим для подальшого аналізу та синтезу системи керування. Схематичне зображення процесу ідентифікації наведено на рисунку 3.1.



Рис. 3.1. Ідентифікація чорного ящика

Одним із ключових етапів під час проведення ідентифікації є правильний вибір зон, у яких будуть формуватися зовнішні збурення, а також визначення точок збору інформації про реакцію об'єкта. Саме в цих місцях

необхідно встановлювати вимірювальні датчики та елементи системи керування, щоб отримати максимально достовірні дані про поведінку печі.

Окрім визначення структури моделі, у практиці часто виникає й більш проста задача — ідентифікація параметрів. Вона полягає у тому, що математична структура моделі вже відома наперед, але її числові параметри залишаються невизначеними. У такому випадку об'єкт вважається «сірим ящиком», і процес його дослідження спрямований на визначення конкретних параметрів, які перетворюють модель на «білий ящик», тобто повністю зрозумілу та описану систему. Схематичне подання етапів ідентифікації параметрів наведено на рисунку 3.2.

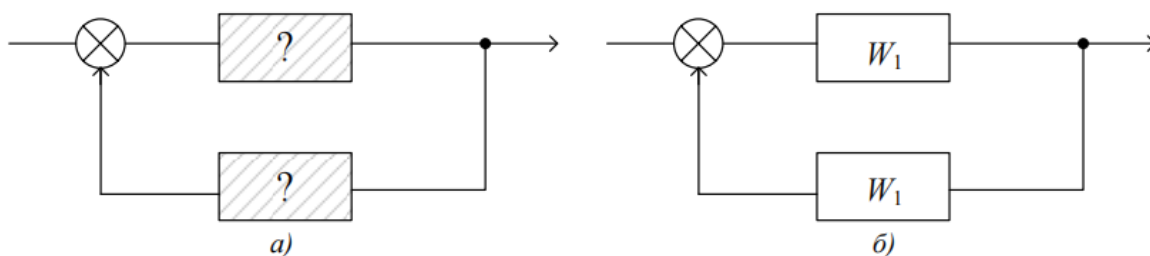


Рис. 3.2. Ідентифікація параметрів ДО (а) і ПІСЛЯ (б)

Зняті експериментальні дані представлені в табл. 3.1

Таблиця 3.1

№	Температура скла	Витрата газу, м³/год.	Витрата повітря, м³/год.	Вміст кисню, %	Вологість с/бою
1	1322	1225	359	1206	178
2	1325	1228	241	1230	382
3	1325	1227	240	1210	382

Продовження Таблиці 3.1

4	1331	1238	283	1211	396
5	1332	1231	234	1223	367
6	1334	1243	307	1221	398
7	1340	1253	388	1215	187
8	1340	1243	383	1228	401
9	1340	1243	327	1313	387
10	1340	1243	359	1220	408
11	1340	1257	397	1231	206
12	1165	1264	407	1228	203
13	1166	1252	264	1242	418
14	1344	1267	405	1242	402
15	1344	1259	275	1246	413
16	1345	1269	408	1246	421
17	1345	1269	275	1245	421
18	1346	1270	419	1251	214
19	1345	1269	405	1254	247
20	1332	1225	359	1206	178
21	1322	1225	241	1230	386
22	1325	1227	240	1210	382
23	1328	1236	372	1211	184

Продовження Таблиці 3.1

24	1341	1255	276	1250	434
25	1340	1256	283	1248	433
26	1338	1265	424	1239	223
27	1331	1268	283	1247	436
28	1337	1268	283	1247	441
29	1336	1269	433	1239	225

Для виконання процесу ідентифікації динамічних характеристик технологічних об'єктів у даному проєкті застосовується пакет System Identification Toolbox, який є складовою середовища MATLAB. Цей інструментарій призначений для побудови математичних моделей лінійних динамічних систем на основі експериментальних вхідних та вихідних даних.

Пакет містить розвинений графічний інтерфейс, що значно спрощує підготовку даних, візуалізацію процесу та створення моделей без необхідності прямого використання командного рядка. Командні функції при цьому виконують допоміжну роль, забезпечуючи підтримку та збереження моделей, створених у графічному середовищі GUI.

Методи, реалізовані в System Identification Toolbox, дозволяють розв'язувати широкий спектр задач — від формування систем керування та обробки сигналів до аналізу часових рядів і дослідження їх динамічних властивостей.

Основні можливості пакета включають:

- інтуїтивно зрозумілий та гнучкий користувацький інтерфейс;
- інструменти попередньої обробки даних (фільтрація, корекція тренду, усунення зсувів);
- вибір робочого діапазону даних для подальшого аналізу;

- методи авторегресійного моделювання;
- дослідження відгуку системи у часовій та частотній областях;
- побудову та відображення нулів і полюсів передатної функції;
- аналіз похибок і нев'язок при оцінюванні моделі.

На рисунку 3.3 подано експериментальні дані, завантажені в середовище Identification Toolbox для каналу «витрата газу — температура скломаси». На рисунку 3.4 представлено результати оцінювання кількох моделей. Можна зробити висновок, що передаточна функція другого порядку з нулем забезпечує найкращу точність апроксимації даного каналу.

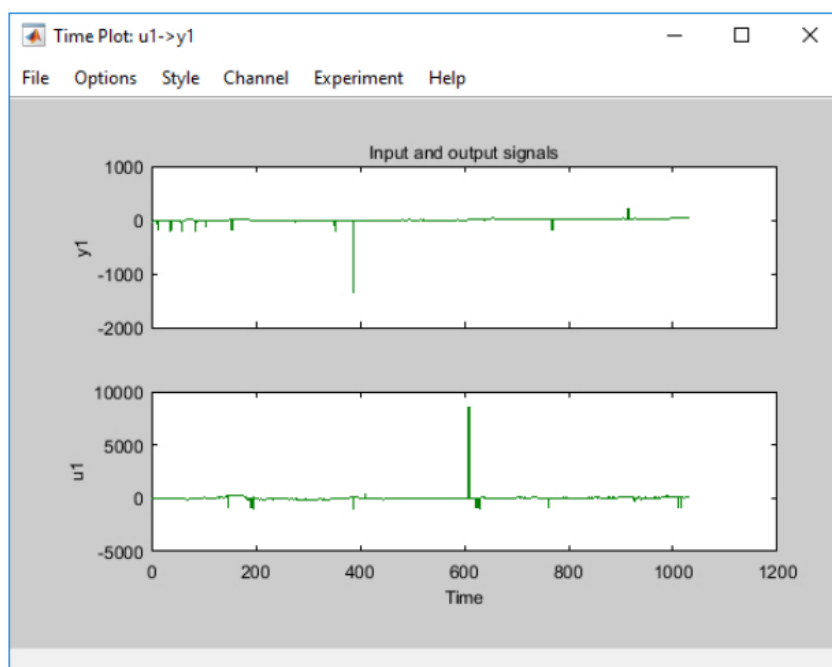


Рис 3.3. Identification Tool Box по каналу витрата газу – температура скломаси

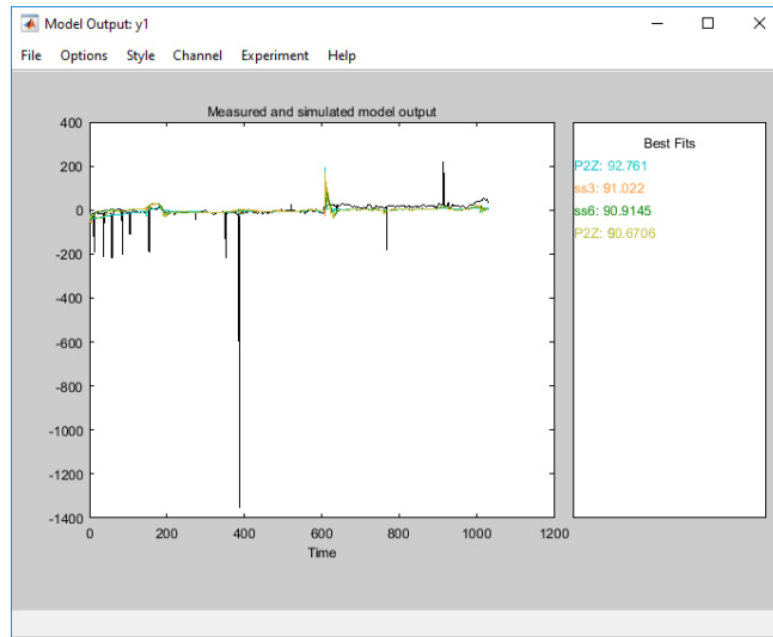


Рис 3.4. Наведені оцінки різних моделей, що були отримані під час ідентифікації каналу

Передатна функція по каналу витрата газу – температура скламаси, перехідна характеристика показана на рис. 3.5.

$$Wr = \frac{0.0290630776s + 1.5302}{292.8521552s^2 + 400.253s + 1}$$

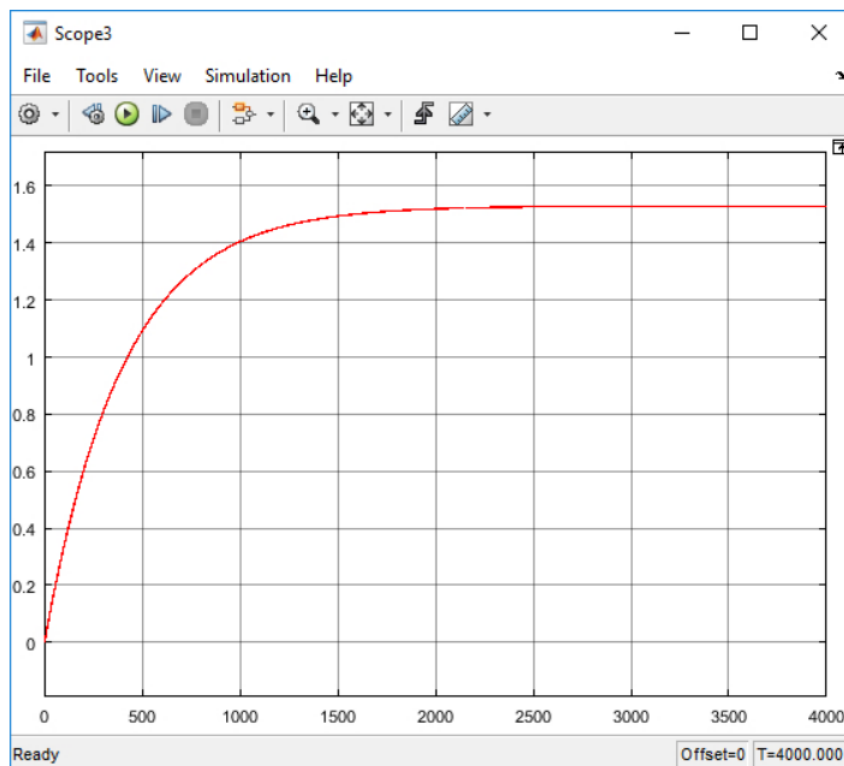


Рис 3.5 Передатна функція по каналу витрата газу – температура

СКЛОМАСИ

Аналогічним способом були визначені передатні функції й для інших технологічних каналів. Отримані моделі та відповідні їм перехідні характеристики наведені в наступних підрозділах.

Для каналу «витрата повітря — температура скломаси» була побудована передатна функція, а графік його перехідної характеристики представлений на рисунку 3.6.

$$W_{\Pi} = \frac{3.5s - 0.136}{1910.42s^2 + 78.6s + 1}$$

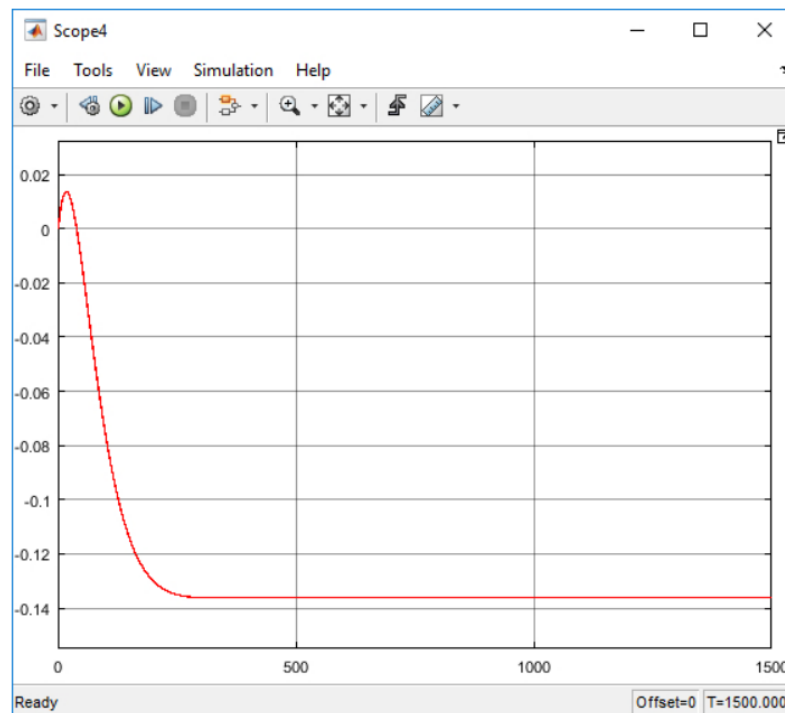


Рис. 3.6 Передатна функція по каналу витрата повітря – температура скломаси

Передатна функція по каналу витрата повітря – температура скломаси, перехідна характеристика показана на рис. 3.7

$$W_{\kappa} = \frac{-20.93500647s + 0.83643}{1469.4223s^2 + 482.486 + 1}$$

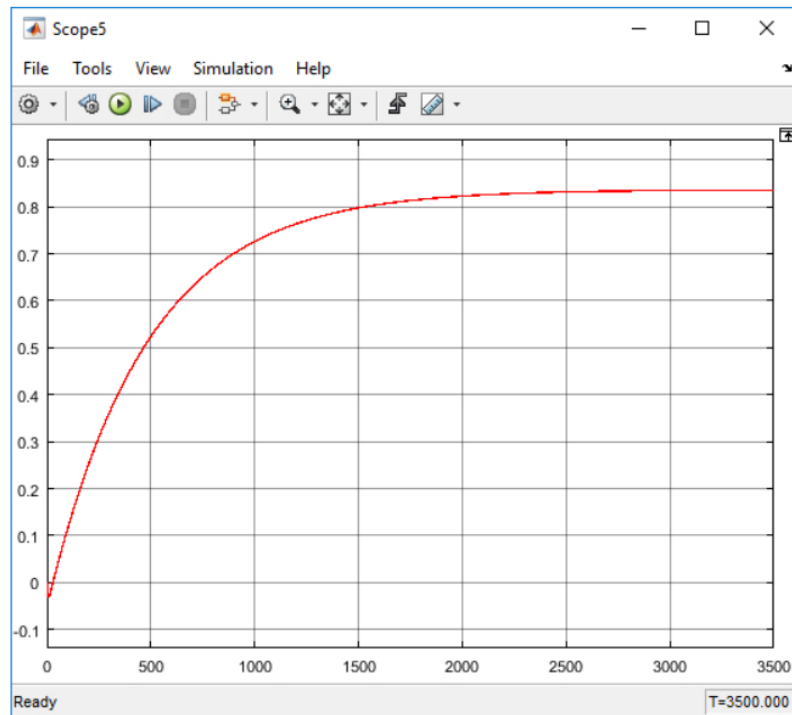


Рис. 3.7 Передатна функція по каналу концентрація кисню – температура скломаси

Передатна функція по каналу вологість склобою – температура скломаси, перехідна характеристика показана на рис. 3.8.

$$W_{\text{вол}} = \frac{434.58241s - 1.0174}{21448.0512s^2 + 1543.622s + 1}$$

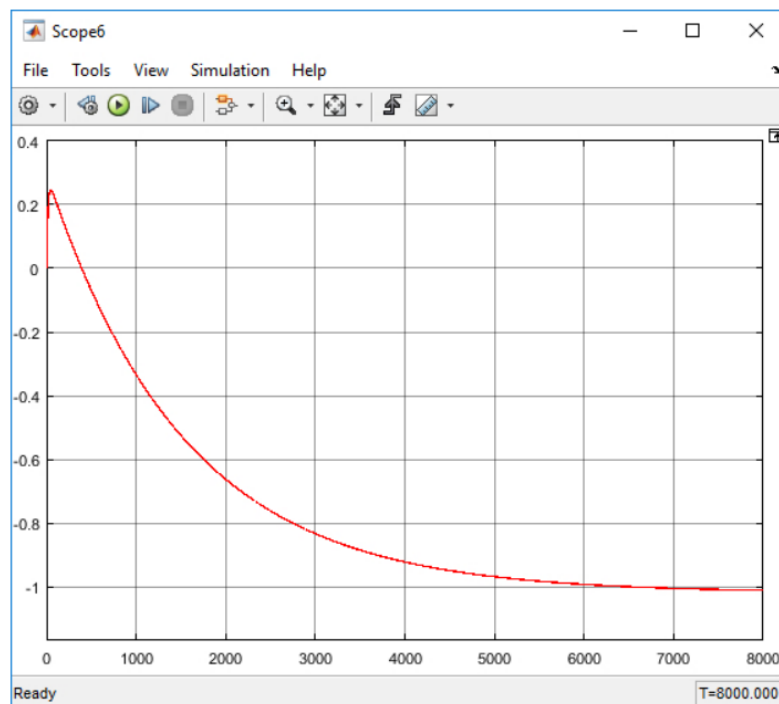


Рис. 3.8. Передатна функція по каналу вологість склобою – температура скломаси

4. РОЗРОБЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ РОБОТИ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

4.1. Проектування та моделювання ПІД-регулятора в середовищі Simulink

На рисунку 4.1 представлено схему системи керування з ПІД-регулятором. Для моделювання використано раніше визначену передатну функцію керування.

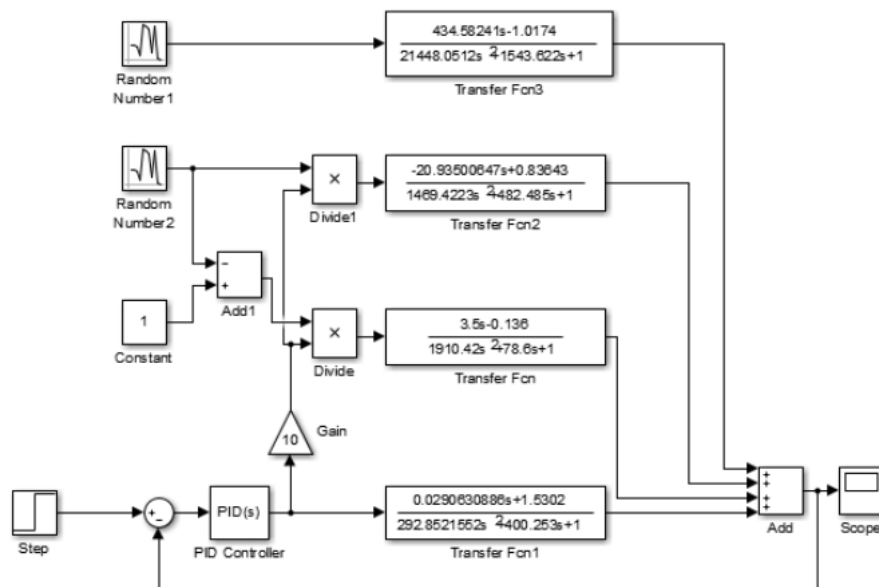


Рис. 4.1 Схема системи керування з ПІ-регулятором у середовищі Simulink

Коефіцієнти ПІД-регулятора налаштовуються за допомогою вбудованих можливостей Matlab, зокрема через PID Tuning Toolbox. Цей інструмент автоматично визначає оптимальні параметри обраного регулятора, будує його перехідну характеристику та відображає показники якості роботи[7]. Отримані результати представлені нижче.

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	0.58595	0.58595
I	0.0011583	0.0011583
D	-219.6177	-219.6177
N	0.0013034	0.0013034

Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	644 seconds	644 seconds
Settling time	4.02e+03 seconds	4.02e+03 seconds
Overshoot	13 %	13 %
Peak	1.13	1.13
Gain margin	7.4 dB @ 0.00341 rad/s	7.4 dB @ 0.00341 rad/s
Phase margin	52.5 deg @ 0.0013 rad/s	52.5 deg @ 0.0013 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Рис. 4.2. Результат роботи *PID Tuning Toolbox*: виведені коефіцієнти ПІД-регулятора та критерії якості

Графік перехідного процесу побудованої системи з ПІД-регулятором наведений на рис. 4.3.

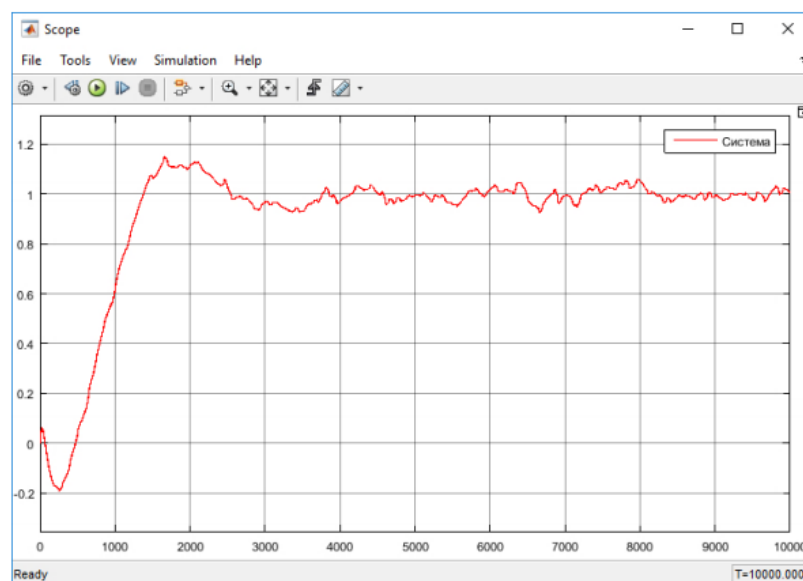


Рис. 4.3. Графік перехідної характеристики в системі з ПІ-регулятором

Проаналізувавши отримані дані з графіків перехідних процесів можна визначити потрібні критерії якості для АСР з ПІД-регулятором:

Таблиця 4.1. Критерії якості керування

Критерій	Значення ПІ-регулятора
Перерегулювання	17 %
$e_{\max}$	0,17 °C
$T_{\max}$	1600 хв
Час встановлення T_s	1600 хв

4.2. Створення та дослідження нечіткої системи керування температурним режимом в скловарній печі

Для реалізації нечіткого моделювання у середовищі Simulink використовується спеціальний додатковий пакет Fuzzy Logic Toolbox[8].

Щоб застосувати методи нечіткої логіки, звичайні чіткі змінні необхідно перетворити на нечіткі. Цей процес ілюструється на рисунках 3.25–3.26. Діапазон значень змінної розбивається на підмножини, для кожної з яких формується функція належності змінної до відповідної множини.

У вікні Membership Function Editor створюються функції належності для кожної терми. Для моделювання було визначено по 5 терм для входних нечітких змінних та 5 терм для вихідної змінної.

На рисунках 4.3–4.7 функції належності мають трикутну форму, хоча в загальному випадку вони можуть мати будь-який вигляд залежно від специфіки задачі. Кількість множин (термів) також визначається індивідуально під кожен задачу.

Функції належності для всіх лінгвістичних змінних представлені на наведених нижче рисунках.

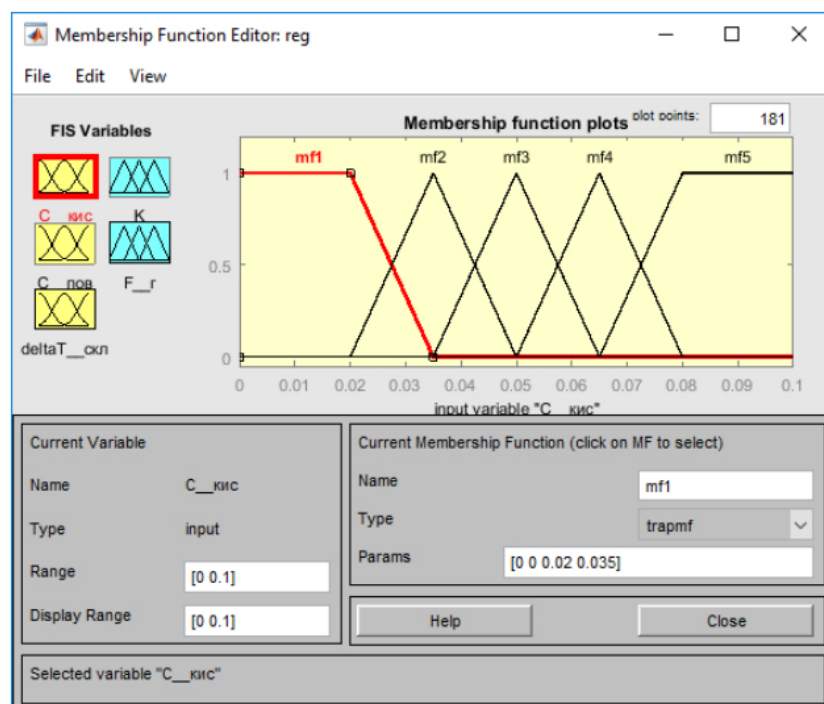


Рис. 4.3. Графіки функцій належності змінної – концентрація кисню

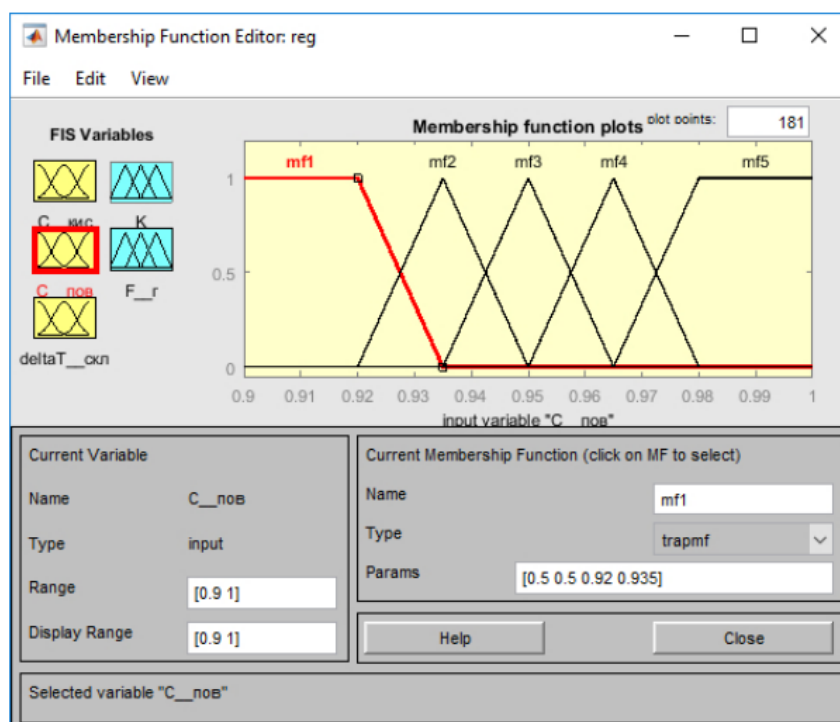


Рис 4.4. Графіки функцій належності змінної – концентрація повітря

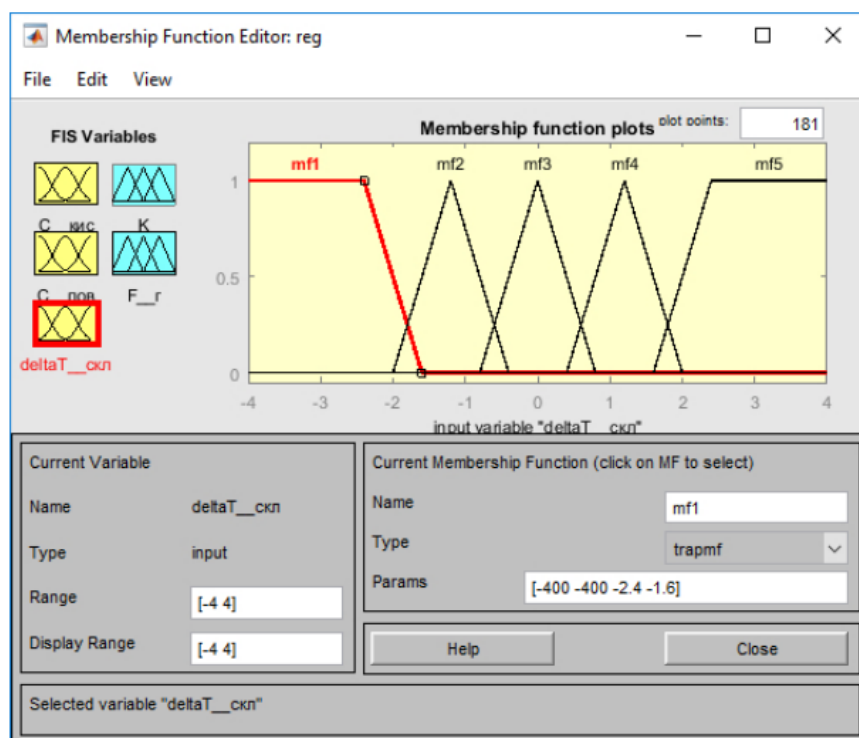


Рис 4.5 Графіки функцій належності змінної – різниця температур

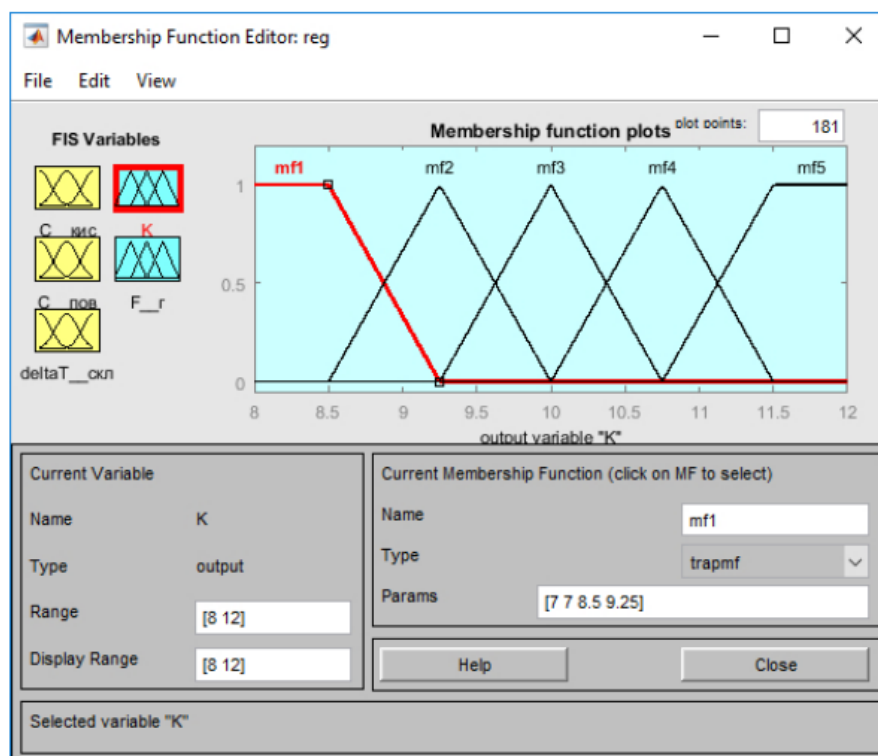


Рис 4.6 Графіки функцій належності змінної – коефіцієнт концентрації кисню в повітрі

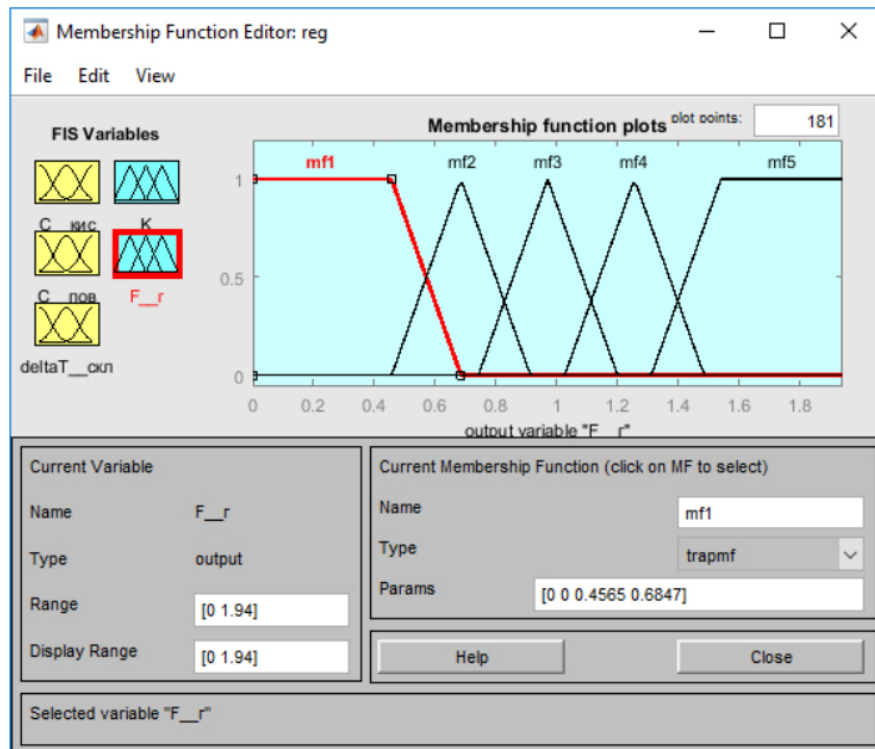


Рис 4.7 Графіки функцій належності змінної – витрата газу

Розглядаємо такі лінгвістичні змінні:

Концентрація кисню $C_{\text{кис}}$ – «Дуже мала» mf1, «Мала» mf2,

«Нормальна» mf3, «Велика» mf4, «Дуже велика» mf5.

Концентрація повітря $C_{\text{пов}}$ – «Дуже мала», «Мала», «Нормальна», «Велика», «Дуже велика».

Різниця температур $\Delta T_{\text{скл}}$ – «Дуже негативна», «Негативна», «Нульова», «Позитивна», «Дуже позитивна».

Коефіцієнт концентрації K – «Дуже малий», «Малий», «Нормальний», «Великий», «Дуже великий».

Витрата газу F_r – «Дуже мала», «Мала», «Нормальна», «Велика», «Дуже велика».

Для здійснення регулювання нечітких змінних необхідно виконати операції, які базуються на висловлюваннях оператора, сформульованих у вигляді нечітких правил. Створення бази правил для нечіткого регулятора здійснюється у вікні Edit Rules.

Правила наведені нижче:

1. Якщо $C_{\text{кис}} = mf3$ і $C_{\text{пов}} = mf3$, то $K = mf3$.
2. Якщо $C_{\text{кис}} = mf2$ і $C_{\text{пов}} = mf4$, то $K = mf4$.
3. Якщо $C_{\text{кис}} = mf1$ і $C_{\text{пов}} = mf5$, то $K = mf5$.
4. Якщо $C_{\text{кис}} = mf4$ і $C_{\text{пов}} = mf2$, то $K = mf2$.
5. Якщо $C_{\text{кис}} = mf5$ і $C_{\text{пов}} = mf1$, то $K = mf1$.
6. Якщо $\Delta T_{\text{скл}} = mf1$, то $F_{\Gamma} = mf5$.
7. Якщо $\Delta T_{\text{скл}} = mf2$, то $F_{\Gamma} = mf4$.
8. Якщо $\Delta T_{\text{скл}} = mf3$, то $F_{\Gamma} = mf3$.
9. Якщо $\Delta T_{\text{скл}} = mf4$, то $F_{\Gamma} = mf2$.
10. Якщо $\Delta T_{\text{скл}} = mf5$, то $F_{\Gamma} = mf1$.

Розроблені правила заносяться через редактор правил (рис. 4.8).

Також виводимо вікно перегляду результатів використання правил продукції (рис. 4.9).

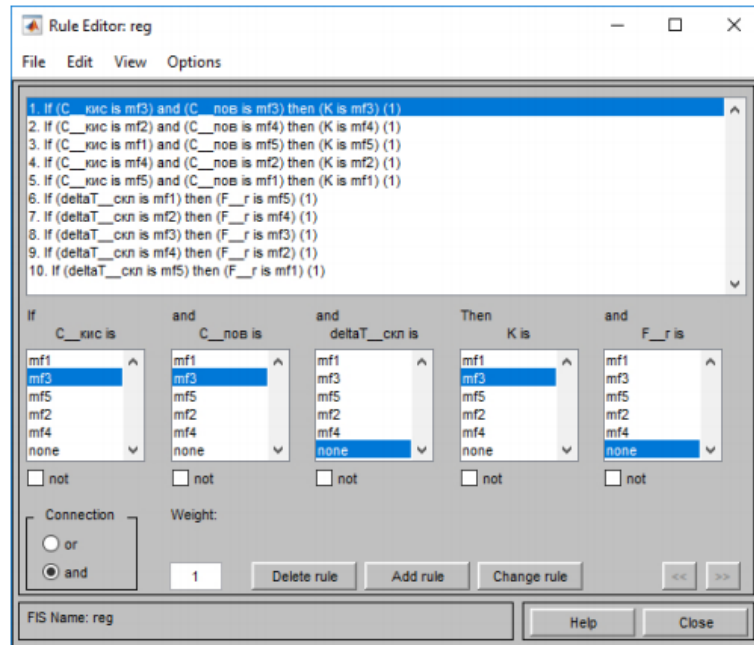


Рис. 4.8 Вікно редактора правил продукції після їх визначення

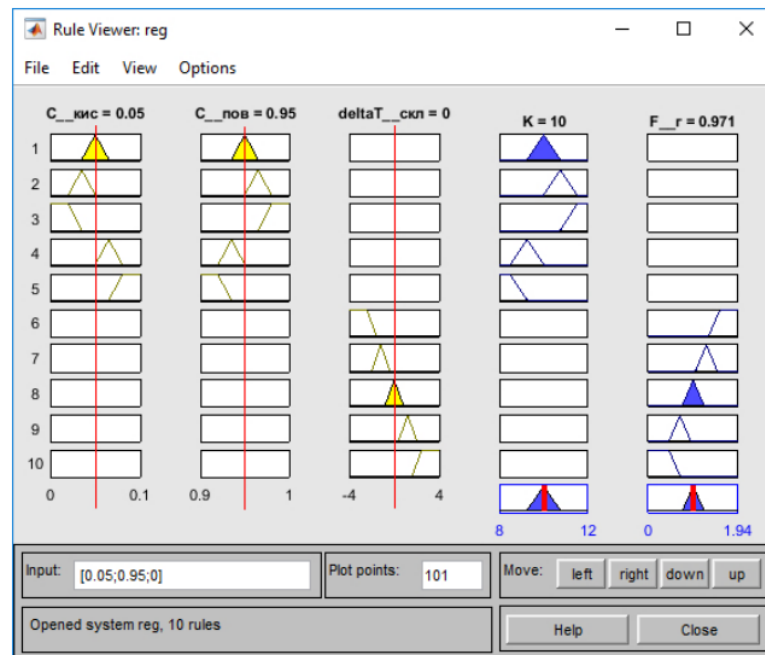


Рис. 4.8 Результат використання правил продукції після

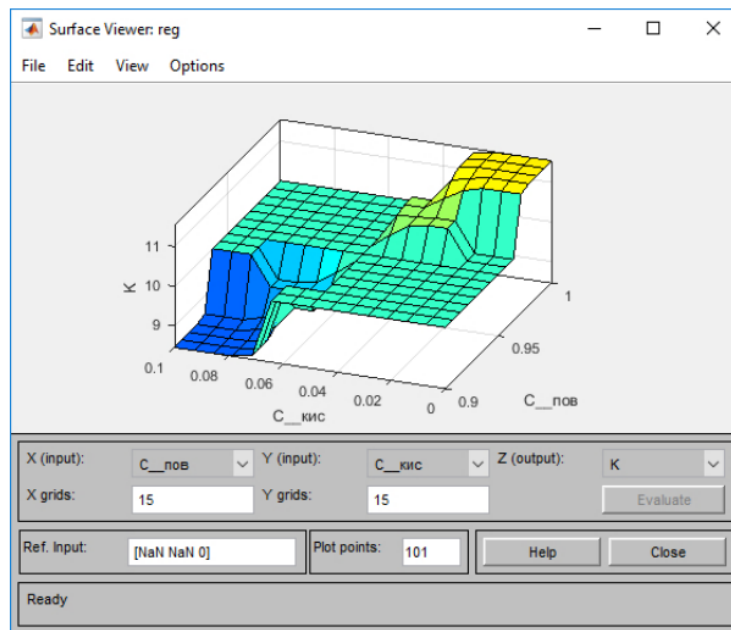
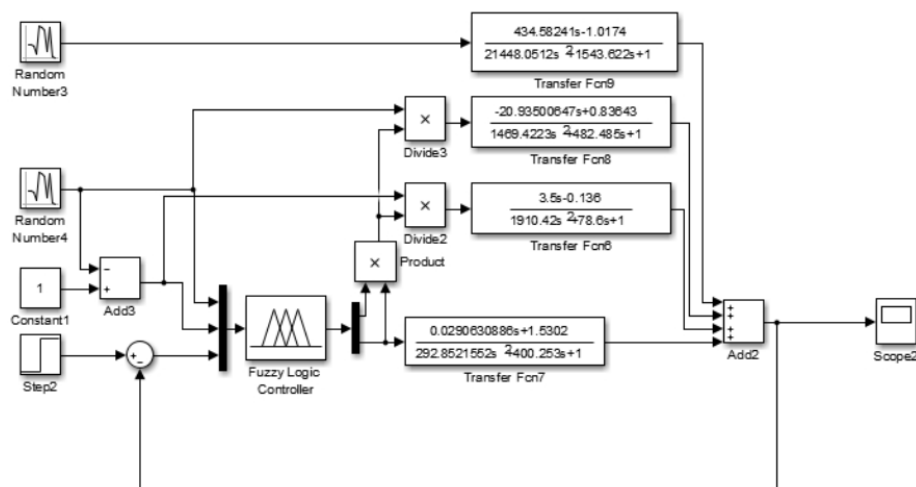
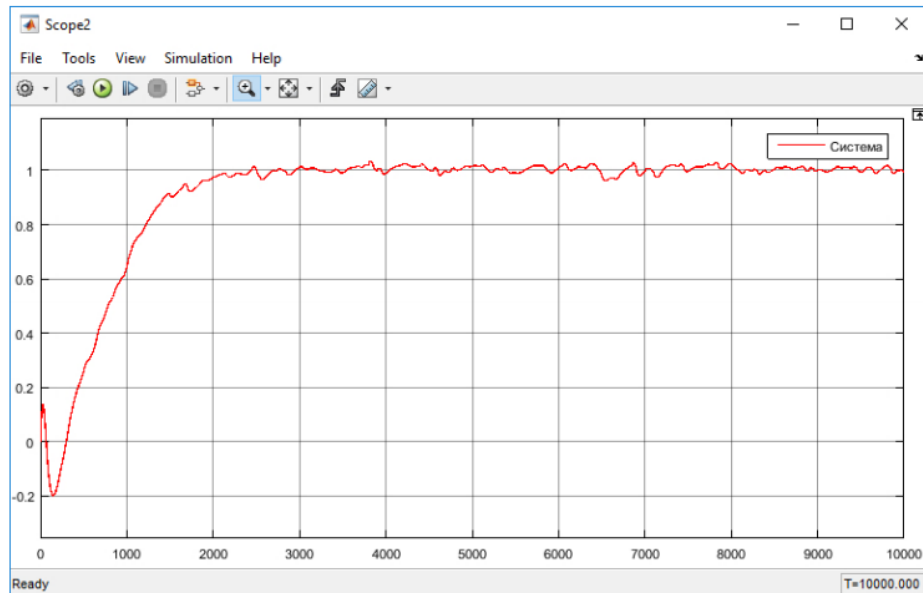


Рис 4.9. Залежність коефіцієнта концентрації від концентрації повітря та КИСНЮ

Для оцінки якості перехідних процесів було виконано комп'ютерне моделювання нечіткого ПІД-регулятора. У середовищі Simulink для створення нечіткої автоматичної системи регулювання (АСР) до системи підключається відповідна нечітка модель, при цьому у вікні параметрів блоку fuzzy-регулятора вказується ім'я файлу з контролером (fuzzy-controller). Наступним кроком проводяться комп'ютерні випробування створеної моделі.

Побудований контур наведено на рисунку 4.10 а), а графік перехідних процесів – на рисунку 4.10 б).





б)

Рис. 4.10. а) Схема АСР с fuzzy-регулятором в Simulink; б) Графік перехідних процесів.

Згідно графіків перехідних процесів АСР с fuzzy-регулятором можна визначити критерії якості:

Таблица 4.1. Критерії якості керування

Критерій	Значення Fuzzy-регулятора
Перерегулювання	0 %
$e_{\max}$	0 °C
$T_{\max}$	0 хв
Час встановлення T_s	2000 хв

Висновок до розділу 4

Було досліджено два підходи до синтезу системи регулювання:

- Налаштування ПІД-регулятора
- Налаштування нечіткого регулятора

Для наочності порівняння перехідних процесів обох систем побудовано графіки, які наведені на рисунку 4.11.

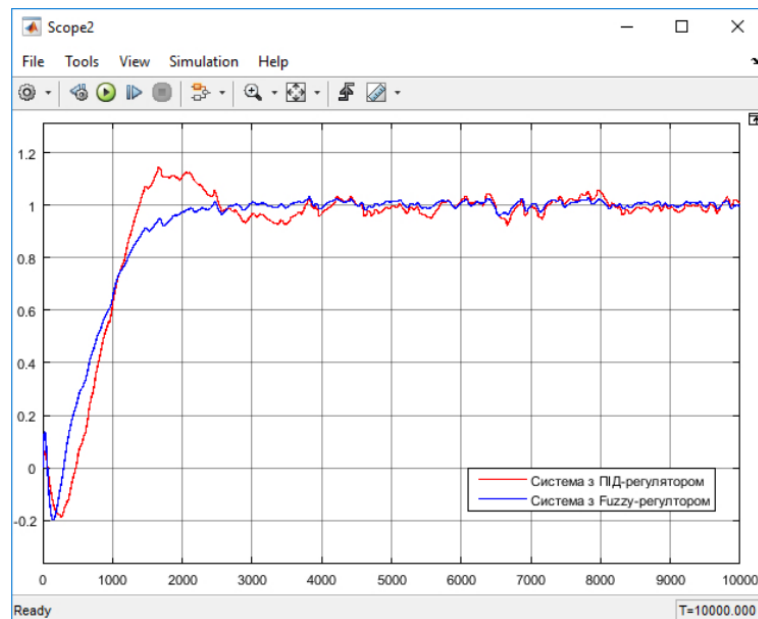


Рис. 4.11. Графіки перехідних характеристик систем з ПІД регулятором та Fuzzy регулятором

На основі аналізу даних, отриманих з графіків перехідних процесів, визначено ключові критерії якості регулювання для системи з ПІД-регулятором:

Таблиця 4.4. Критерії якості регулювання

Критерій	Значення ПІ-регулятора	Значення Fuzzy-регулятора
Перерегулювання	17 %	0 %
$e_{\max}$	0,17 °C	0 °C
$T_{\max}$	1600 хв	0 хв
Час встановлення T_s	1600 хв	2000 хв

Аналіз перехідних характеристик та даних, наведених у таблиці критеріїв якості керування, показав, що найбільш ефективним методом регулювання температурного режиму скловарної печі є використання нечіткої

системи керування з fuzzy-регулятором. Використання ПІД-регулятора виявилось менш придатним через наявність значного перерегулювання на рівні 17%, що в процесі скловаріння є недопустимим. Для забезпечення високої якості склотари потрібен більш точний контроль температури, оскільки навіть незначні коливання можуть негативно вплинути на кінцевий продукт.

Нечіткий регулятор дозволяє ефективно компенсувати коливання вмісту кисню в повітрі, автоматично коригуючи співвідношення подачі кисню та газу, що забезпечує стабільність процесу.

Отже, найоптимальнішим рішенням виявився fuzzy-регулятор з нульовим перерегулюванням та часом виходу на усталений режим близько 2000 хв, що гарантує точне підтримання необхідного температурного режиму та високу якість готового скла.

5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

5.1. Концепція та короткий опис стартапу

Суть стартапу: спеціалізований сервіс з технічного обслуговування, ремонту та монтажу високотемпературного обладнання для скловиробничих підприємств. Фокус на критично важливих елементах гарячого цеху: склоплавильні печі, фідери, системи подачі скломаси, формувальне обладнання[9].

Логотип зображено на рис. 5.1:



Рис. 5.1. Логотип стартап проекту

Ключові послуги

- Аварійний ремонт печей та обладнання (24/7)
- Планові зупинки - капітальний ремонт
- Модернізація застарілого обладнання
- Установка нових ліній та агрегатів
- Технічний аудит та діагностика

Цільова аудиторія

- Заводи з виробництва тарного скла
- Виробники листового скла
- Підприємства спеціального скловиробництва

- Фабрики скловолокна

Конкурентні переваги

- Вузька спеціалізація та експертність у високотемпературних процесах
- Швидке реагування (критично при аваріях)
- Власна команда кваліфікованих інженерів-технологів
- Знання специфіки вітчизняного обладнання

Модель монетизації

- Контракти на сервісне обслуговування
- Проектні роботи (ремонт, модернізація)
- Продаж запчастин з маржею
- Консалтинг з оптимізації виробництва

Команда: Директор, бухгалтер, головний інженер, команда електронників, команда механіків, слюсарі-ремонтники, програміст.

Щоб точно оцінити, скільки грошей потрібно для команди, потрібно врахувати: зарплати кожного члена команди, податки, витрати на обладнання, інструменти та програмне забезпечення. Я можу скласти приблизний розрахунок, виходячи з типової зарплати в Україні для подібних посад.

Припустимо, місячні зарплати такі:

Директор – 80 000 грн

Бухгалтер – 40 000 грн

Головний інженер – 60 000 грн

Команда електронників (3 людини) – по 40 000 грн кожен → 120 000 грн

Команда механіків (3 людини) – по 35 000 грн кожен → 105 000 грн

Слюсарі-ремонтники (4 людини) – по 30 000 грн кожен → 120 000 грн

Програміст – 50 000 грн

Разом зарплати:

$80\,000 + 40\,000 + 60\,000 + 120\,000 + 105\,000 + 120\,000 + 50\,000 = 575\,000$ грн
на місяць

Якщо додати приблизно 20% на податки та соціальні внески:

$575\,000 \times 1,2 \approx 690\,000$ грн на місяць

Це базова оцінка без витрат на матеріали, інструменти, оренду та інші потреби.

5.2. Огляд тенденцій ринку

Скловиробнича галузь залишається одним із стратегічно важливих секторів промисловості, оскільки продукція зі скла широко використовується у будівництві, харчовій промисловості, медицині, електроніці та інших сферах. Сучасні тенденції розвитку виробництва скла спрямовані на підвищення якості готової продукції, зниження енергоспоживання та впровадження інноваційних технологій плавлення й формування скломаси. У зв'язку з цим особливої уваги потребує забезпечення надійної, безперебійної та безпечної роботи обладнання гарячого цеху, де відбуваються ключові стадії технологічного процесу.

В умовах сьогодення питання ремонту, модернізації та встановлення нового обладнання набуває ще більшої актуальності. Значна частина підприємств працює на морально й фізично застарілому устаткуванні, що призводить до підвищених тепловтрат, зниження ефективності плавлення, збільшення виробничих витрат та ризику аварійних ситуацій. Враховуючи високу енергоємність скловарних печей і їхній вплив на якість скломаси, модернізація гарячого цеху є важливим напрямом підвищення конкурентоспроможності підприємства. Ось діаграма, яка наочно показує зростання попиту на скловиробництво з роками. Вона добре ілюструє актуальність модернізації гарячого цеху та встановлення сучасного обладнання для задоволення зростаючих потреб ринку.



Рис. 5.2

Крім того, у період відбудови економіки та підвищеного попиту на будівельні матеріали, зокрема склотару та будівельне скло, актуальність технічного оновлення виробничих потужностей значно зростає. Встановлення сучасного обладнання дозволяє не лише стабілізувати технологічний процес, але й забезпечити відповідність продукції міжнародним стандартам якості, що є необхідною умовою для виходу на зовнішні ринки.

5.3. Аналіз внутрішнього середовища середовища

Історія розвитку підприємства:

Компанія заснована Анастасією у 2025 році. З моменту створення підприємство орієнтується на надання професійних інженерно-технічних послуг у сфері гарячого цеху скловиробництва та поступово розширює свій спектр робіт відповідно до потреб ринку.

Асортимент послуг:

- встановлення та налагодження обладнання гарячого цеху скловиробництва;
- модернізація технічних вузлів і комплексні ремонтні роботи.

Географічне розташування:

- Основний офіс компанії розташований у Києві, район станції метро “Університет”, що забезпечує зручну логістику та доступність для клієнтів.

Корпоративні стандарти:

- висока якість виконання робіт;
- дотримання обумовлених термінів і умов співпраці;
- відповідальність за кінцевий результат.

Ресурси та обмеження:

- офісне та виробниче приміщення;
- кваліфіковані фахівці;
- спеціалізоване обладнання для монтажу та ремонту.

Ринкова ситуація і тенденції:

Останні роки характеризуються активним зростанням інвестицій у скловиробництво, що стимулює підвищений попит на послуги з ремонту, модернізації та встановлення технологічного обладнання.

Основні учасники ринку:

- інженерні й сервісні компанії;
- внутрішні технічні відділи великих склозаводів.

Економічні та соціальні тенденції:

Галузь стабільно розвивається, а загальний обсяг ринку технологічного обладнання та сервісних рішень для скловиробництва оцінюється приблизно у 100 млрд гривень, що підкреслює перспективність і актуальність цього напрямку.

Таблиця 5.1. Аналіз внутрішнього маркетингового середовища підприємства

Внутрішні фактори	Можливості	Загрози	Симптоми проблеми/можливості
Стратегія розвитку компанії	Розширення послуг та сучасних технологій	Уповільнення розвитку через конкуренцію	Компанія може втратити темп зростання
Кадри	Підвищення кваліфікації працівників	Дефіцит спеціалістів	Якість роботи персоналу може погіршуватися
Фінанси	Інвестиції для масштабування	Нестача капіталу	Компанія може зупинити виконання проєктів

5.3.1. Зовнішні ринкові впливи

Таблиця 5.2. Фактори політико-правового середовища

Фактори	Вплив фактору	Альтернативні дії / можливі рішення
Зміни в законодавстві	Можливості: зниження адміністративного тиску, оптимізація податків. Загрози: нові норми можуть ускладнити діяльність.	Розгляд переміщення частини операцій у країни зі стабільнішим регулюванням.
Профспілки	Можливості: покращення умов праці, зростання мотивації. Загрози: можливий тиск на керівництво.	Укладання довгострокових колективних угод.

Таблиця 5.3. Фактори економічного середовища

Фактори	Вплив фактору	Альтернативні дії / можливі рішення
Рівень інфляції	Можливості: адаптація цінової політики. Загрози: зменшення доходів та купівельної спроможності клієнтів.	Оптимізація витрат, коригування цін.

Продовження Таблиці 5.3

Рівень цін	Можливості: можливість підвищувати ціну. Загрози: необхідність стримувати підвищення.	Вибір оптимального рівня цін відповідно до ситуації.
Динаміка ВВП	Можливості: розширення масштабів роботи. Загрози: зниження інтересу до сегменту.	Розробка стратегії роботи на нових ринках.
Купівельна спроможність	Можливості: зростання попиту. Загрози: втрата клієнтів через падіння доходів.	Пошук альтернативних груп клієнтів.

Таблиця 5.4. Фактори науково-технічного середовища

Фактори	Вплив фактору	Альтернативні дії / можливі рішення
Інформаційні технології	Можливості: покращення сервісу. Загрози: підсилення конкуренції.	Впровадження ІТ-рішень для залучення клієнтів.
Нові товари	Можливості: розширення асортименту. Загрози: посилення конкуренції.	Підвищення унікальності товарних пропозицій.
Нові технології	Можливості: модернізація процесів. Загрози: конкуренція з новими технологічними продуктами.	Адаптація виробництва до інновацій.

Таблиця 5.5. Фактори демографічного середовища

Фактори	Вплив фактору	Альтернативні дії / можливі рішення
Чисельність населення	Можливості: розширення потенційного ринку. Загрози: зміна структури населення.	Адаптація маркетингової політики.
Народжуваність	Можливості: нові сегменти клієнтів. Загрози: демографічний спад.	Розвиток послуг для молодих сімей.
Кваліфікація трудових ресурсів	Можливості: залучення кваліфікованих кадрів. Загрози: нестача спеціалістів.	Інвестування у навчання персоналу.

Таблиця 5.6. Фактори соціально-культурного середовища

Фактори	Вплив фактору	Альтернативні дії / можливі рішення
Спосіб життя	Можливості: зростання попиту на продукцію. Загрози: зміна уподобань.	Модернізація обладнання та адаптація товарів.

Продовження Таблиці 5.6

Мода	Можливості: вплив на вибір споживачів. Загрози: швидка зміна трендів.	Оновлення дизайну та асортименту.
Рівень життя населення	Можливості: збільшення продажів. Загрози: зменшення купівельної спроможності.	Орієнтація на інші категорії клієнтів.

Таблиця 5.7. Фактори природного середовища

Фактори	Вплив фактору	Альтернативні дії / можливі рішення
Стихійні лиха	Можливості: підвищення уваги до безпеки. Загрози: зупинка роботи.	Розроблення плану альтернативних дій.

5.3.2. Оцінка мікроркетингових факторів

Таблиця 5.8. Узагальнена таблиця впливу споживачів

Фактори	Вплив фактора: можливості	Вплив фактора: загрози	Шляхи вирішення або реалізації
Демографічні та соціально-психологічні особливості покупців	Формують додаткові можливості впливу на попит	Обмежений вплив на поведінку окремих груп	Розширення цільової аудиторії та її зацікавленості в послугах
Обсяг купівельного попиту	Потенціал отримання додаткового прибутку	Ризик зниження попиту	Покращення сервісу для утримання клієнтів
Чутливість до ціни та якості	Стимулює підвищення конкурентності	Незадоволення якістю може зменшити продажі	Підвищення якості товарів і послуг

Таблиця 5.9. Узагальнена таблиця впливу конкурентів

Фактори	Можливості	Загрози	Шляхи реагування
Кількість конкурентів	Необхідність модернізації та впровадження ефективних рішень	Втрата частини клієнтів	Підвищення конкурентоспроможності та оптимізація послуг

Сильні та слабкі сторони конкурентів	Можливість запропонувати кращі рішення	Ризик програшу конкуренції	Постійний аналіз конкурентів і вдосконалення послуг
Наявність лідерів ринку	Стимул до впровадження інновацій	Зайняття великої частки ринку лідерами	Пошук своєї аудиторії та вдосконалення підходів

Таблиця 5.10. Узагальнена таблиця впливу постачальників

Фактори	Можливості	Загрози	Вирішення
Якість і ціна продукції	Пошук вигідніших постачальників	Нестабільність якості	Удосконалення технологій для підвищення якості

Таблиця 5.11. Узагальнена таблиця впливу контактних аудиторій

Фактори	Можливості	Загрози	Шляхи вирішення
Основні контактні аудиторії (фінансові органи, ЗМІ, управління)	Підтримка репутації та прозорості роботи	Тиск на бізнес	Побудова стратегії урегулювання конфліктів
Широка публіка	Зростання лояльності	Можливе поширення негативної думки	Активна комунікація та демонстрація якості роботи
Внутрішні аудиторії	Покращення ефективності роботи	Погіршення взаємодії в колективі	Удосконалення внутрішньої організації

5.3.3. Формування основної управлінської проблеми

SWOT-аналіз продемонстровано нижче



Сильні сторони:

- Висока якість продукту
- Надійність
- Швидкість виконанн

Слабкі сторони:

- Необхідність значних стартових інвестицій
- Висока вартість впровадження технологій

Можливості:

- Шанс зайняти значну частку ринку
- Потенціал подальшого продажу стартапу великій компанії

Загрози:

- Ризик неповернення інвестицій
- Недостатній інтерес цільової аудиторії

Сильні та слабкі сторони альтернативних шляхів (переписано)

Найняти маркетингову компанію

- Плюси: Професіонали виконують більшу частину роботи
- Мінуси: Потрібні додаткові фінансові витрати

Партнерство з іншою організацією

- Плюси: Доступ до ресурсів партнера та його клієнтської бази
- Мінуси: Часткова втрата незалежності

Продаж стартапу на ранньому етапі

- Плюси: Можливість отримати кошти швидко, незалежно від успіху продукту
- Мінуси: Втрата потенціалу заробітку в майбутньому

5.4. Оцінювання конкурентів

Таблиця 5.14. Ситуативний аналіз конкурентів на ринку

Особливості конкурентного середовища	Суть характеристики	Вплив на діяльність підприємства та можливі дії
1. Тип конкуренції – чиста	Ринок перебуває у стані вільної конкуренції: відсутні компанії, які повністю домінують у сфері.	Мотивує підвищувати якість роботи та підтримувати конкурентоспроможність.
2. Рівень конкурентної боротьби – національний	На початкових етапах діяльність стартапу зосереджена в межах внутрішнього ринку України.	Потрібно адаптуватися до ринкових умов та динаміки українського середовища.
3. За галузевою ознакою – внутрішньогалузева	Компанія працює в межах однієї сфери послуг.	Сконцентрувати увагу на розвитку ключової галузі.
4. Конкуренція за видами товарів – товарно-родова	Суперництво відбувається між товарами та послугами однієї категорії.	Сприяє розширенню асортименту та підвищенню рівня сервісу.
5. Характер конкурентних переваг – неціновий	Основні переваги полягають у якості, інноваційності та рівні обслуговування.	Потрібно активно відстоювати якість і демонструвати переваги перед конкурентами.
6. За інтенсивністю – немарочна	Продукт не має чітко визначеного маркування та формується відповідно до потреб клієнта.	Послуги надаються індивідуально залежно від запиту замовника.

Таблиця 5.15. Аналіз конкурентів у галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Інженерні компанії	Правовий захист, який забезпечується патентами, потребує відповідних капіталовкладень	Для надання наших послуг ми залежимо від постачальників	Скло-виробництва	Наші послуги можуть надавати й інші агентства
Висновки	Ринок великий і зростає, що дозволяє нам конкурувати за споживача	Можливості виходу на ринок існують, незважаючи на конкурентів	Потрібне нам постачання обладнання	Вузький спектр клієнтів	Обмеження мінімальні, а ринок зростає, тож можна зайняти своє місце

Таблиця 5.16. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Інформаційний простір	Замовники можуть ознайомитися з усіма послугами на сайті
2	Робота у багатьох векторах	Установлення та ремонт обладнання

Таблиця 5.17. Оцінка факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1–20	3	2	1	0	1	2	3
1	Наявність інформаційного сайту	5			+				
2	Робота у багатьох векторах	2				+			
3	Якість	10					+		
4	Ціна	5				+			

5.5. Розробка ринкових стратегій

У процесі аналізу ринку було визначено цільову групу споживачів, орієнтованих на продукцію зі скла високої якості. Представлена продукція належить до високого цінового сегмента та відповідає очікуванням клієнтів, які приділяють увагу якості й естетичним характеристикам. Частка потенційних споживачів у даному сегменті становить приблизно 90%, що свідчить про доцільність такого вибору. Рівень конкуренції у зазначеному сегменті є відносно невисоким, що створює сприятливі умови для виходу на ринок і подальшого розвитку. Основним інструментом взаємодії з цільовою аудиторією є пряме спілкування з клієнтами з метою формування довгострокових партнерських відносин.

У межах реалізації проєкту було обрано стратегічну альтернативу у вигляді укладання довгострокових контрактів із партнерами. Такий підхід забезпечує стабільність діяльності та знижує ризики, пов'язані з коливанням попиту. Базовою стратегією розвитку підприємства визначено стратегію диференціації, що полягає у створенні унікальної ціннісної пропозиції для споживача. Ключовими конкурентними перевагами виступають сучасні стандарти обслуговування клієнтів і високий рівень професійної підготовки персоналу, що дозволяє відрізнитися від потенційних конкурентів.

Аналіз конкурентного середовища показав відсутність прямих конкурентів у даному сегменті, що зумовлено використанням власних, унікальних скляних форм. Це надає підприємству можливість самостійно формувати асортимент продукції та не залежати від ринкових пропозицій інших виробників. Економічна стратегія підприємства спрямована на покриття початкових інвестицій у перший рік діяльності з подальшим переходом до стабільного зростання та отримання прибутку. Обраний стратегічний підхід створює передумови для зміцнення конкурентних позицій на ринку.

З урахуванням вимог цільової аудиторії до якості послуг, стратегія позиціонування підприємства ґрунтується на диференціації. Основний акцент робиться на високий рівень сервісу, індивідуальний підхід до клієнтів та унікальні характеристики продукції. Для ефективного просування послуг доцільно підкреслювати професіоналізм, якість виконання замовлень і додану цінність, яку отримує споживач, обираючи саме дане підприємство.

Висновок до розділу 5

У п'ятому розділі магістерської роботи здійснено комплексне дослідження ринку споживачів і товарів, а також проведено аналіз маркетингового та зовнішнього середовища компанії з урахуванням активних конкурентів. На основі отриманих результатів було сформовано стратегічний план розвитку підприємства та визначено ключові управлінські напрями його подальшої діяльності. Додатково виконано конкурентний аналіз, що дав змогу окреслити сильні й слабкі сторони компанії.

Список використаних джерел

1. Воронов Г. К. Технології виробництва скломатеріалів: конспект лекцій / Г. К. Воронов. С.18-19.
2. Ковальчук В. П., Петренко І. С. Технологія скла та склотари / Навчальний посібник. – Київ: КНУТД, 2015. – 256 с.
3. Племянніков М. М., Яценко А. П., Пилипенко І. В., Корнілович Б. Ю. Технологія та виробництво скла. Підручник. — К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. — 336 с.
4. Організація виробництва. Електронний посібник. — Луцьк: ЛНТУ, 2023/ розділ 8.4
5. «Інноваційні технології у виробництві спеціального та побутового скла», Племянніков М. М., Яценко А. П., Пилипенко І. В., Корнілович Б. Ю., с.140.
6. "Теорія систем та системний аналіз: Методичні вказівки до практичних занять", Охріменко В. М., Воронкова Т. Б., с. 3-8.
7. "Моделювання систем у середовищі MATLAB-SIMULINK", Гераїмчук М. Д., та інші, розділ 5-6, 7.
8. "Інтелектуальні системи автоматичного керування. Дослідження математичних моделей одноканальної системи fuzzy-керування. Рекомендації до виконання розрахункової роботи"
9. Ries, Eric. The Lean Startup: How Today's Entrepreneurs Use Continuous Innovation to Create Radically Successful Businesses. Crown Business, 2011. Розділ 1-3.