

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені Ігоря Сікорського»**

(повне найменування вищого навчального закладу)

**ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИЗАЦІЇ, ПРОМИСЛОВОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА**  
**ЕКОЛОГІЇ**

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

**Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації**

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК 666.1.022.1

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Віталій ЦАПАР  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025р

**Магістерська дисертація**  
**на здобуття ступеня магістра**

**за освітньою програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації»**

**з напрямку підготовки 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та**  
**робототехніка**

на тему: Автоматизація процесу виробництва рідкого скла

Виконав: студент 2 курсу, групи ЛК-41мп

(шифр групи)

Родюк Олег Миколайович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник доц. к.т.н. Ситніков О.В.

( посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що в цьому дипломному  
проекті немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ - 2025 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Факультет автоматизації, промислової інженерії та робототехніки**  
(повна назва)

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

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Напрямок підготовки 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка  
(код і назва)

Освітньо-професійна програма «Технічні та програмні засоби автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Віталій ЦАПАР  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
на магістерську дисертацію студенту**

Родюк Олег Миколайович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Автоматизація процесу виробництва рідкого скла

керівник проекту \_\_\_\_\_  
доц., к.т.н. Ситніков О.В.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «03» листопада 2025р. №4744-с.

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження процес виробництва рідкого скла \_\_\_\_\_

4. Вихідні дані: Схема автоматизації; система керування яка має забезпечувати перерегулювання не більше 10%, час перехідного процесу не більше заданим регламентом меж; параметри які підлягають керуванню: вихідна температура прогріву силіката при виході з автоклаву, витрата пальног, витрата силікату на вході до автоклава

5. Перелік завдань, що потребують розробки: Дослідити процес отримання рідкого скла л; розробка математичної моделі автоклава як технологічного об'єкту

керування; спроектувати та дослідити нечітку систему керування автоклавом; розробка стартап проекту.

6. Орієнтовний перелік графічного(ілюстративного) матеріалу Графічні зображення об'єкту керування; схема процесу виробництва рідкого скла; перехідні характеристики об'єкту; зображення розробленої систем керування; графіки функцій належності, перехідні процеси системи керування.

7. Консультанти розділів дисертації\*

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

8. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проекту | Термін виконання етапів проекту | Примітка |
|-------|-------------------------------------------|---------------------------------|----------|
| 1     | Ознайомлення з теоретичним матеріалом     |                                 |          |
| 2     | Створення математичної моделі об'єкта     |                                 |          |
| 3     | Синтез системи керування                  |                                 |          |
| 4     | Дослідження нечіткої системи              |                                 |          |
| 5     | Проектування схеми автоматизації          |                                 |          |
| 6     | Створення стартап проекту                 |                                 |          |
|       |                                           |                                 |          |
|       |                                           |                                 |          |

Студент \_\_\_\_\_

Олег РОДЮК

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

Олексій СИТНИКОВ

(ініціали, прізвище)

\* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація записку об'ємом 66 сторінок, 22 рисунків, 1 креслення і 20 літературних джерел.

Основною метою дисертації є розробка системи автоматичного контролю хіміко технологічного процесу виробництва рідкого скла, для забезпечення мінімізації використання людського ресурсу, а також підвищення ефективності отримання вихідного продукту та енергетичних ресурсів.

У дисертації розроблено схему автоматизації з технологічною сигналізацією та блокуванням технологічного процесу.

Одним з основних апаратів, що забезпечує яскравий перебіг технологічного процесу виступає автоклав, для якого розроблені та досліджені математична модель у вигляді матеріального та теплового балансу, побудовано перехідну характеристику за каналом керування.

Проведено синтез системи керування для одноконтурної замкнутої з ПІД регулятором та нечіткої системи керування. Представлено повний процес дослідження нечіткої системи керування, та отримання нечітких змінних, наведено стандартні функції належності для витрати силікатного розчину, температури в автоклаві.

Розроблено стартап проекту, що дозволив виявити економічну доцільність прийнятих технічних рішень, а також проведено аналіз ринку та порівняння із існуючими аналогами.

Ключові слова: нафта, нафтові масла, автоклав, об'єкт керування, схема автоматизації, математична модель, тепловий баланс, передатна функція, перехідна характеристика, канал керування, нечітка система, функції належності, база правил.

## ABSTRACT

Master's thesis note with a volume of 66 pages, 22 figures, 1 drawing and 17 literary sources.

The main goal of the dissertation is to develop a system for automatic control of the chemical and technological process of liquid glass production, to ensure the minimization of the use of human resources, as well as increasing the efficiency of obtaining the initial product and energy resources.

The dissertation has developed an automation scheme with technological signaling and blocking of the technological process.

One of the main devices that ensures the high-quality course of the technological process is an autoclave, for which a mathematical model in the form of a material and heat balance has been developed and studied, a transient characteristic has been constructed along the control channel.

A synthesis of a control system for a single-loop closed-loop with a PID regulator and a fuzzy control system has been carried out. The full process of studying a fuzzy control system and obtaining fuzzy variables is presented, we will give standard membership functions for the flow rate of silicate solution, temperature in the autoclave.

A startup project has been developed, which allowed to identify the economic feasibility of the adopted technical solutions, as well as a market analysis and comparison with existing analogues.

Keywords: oil, petroleum oils, autoclave, control object, automation scheme, mathematical model, heat balance, transfer function, transient response, control channel, fuzzy system, membership functions, rule base.

## ЗМІСТ

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                            | 6  |
| 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИРОБНИЦТВА РІДКОГО СКЛА. ....                 | 8  |
| 1.1. Загальна характеристика процесу виробництва рідкого скла.....     | 8  |
| 1.2. Технологічна схема виробництва .....                              | 9  |
| 1.3. Постановка задачі на дослідження.....                             | 12 |
| 2. ОПИС СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА РІДКОГО СКЛА...                | 13 |
| 2.1. Опис схеми автоматизації технологічного виробництва рідкого скла. | 13 |
| 2.2. Основні функціональні блоки .....                                 | 15 |
| 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ’ЄКТУ КЕРУВАННЯ.....                 | 19 |
| 3.1. Дослідження об’єкту керування.....                                | 19 |
| 3.2. Лінеаризація математичної моделі.....                             | 24 |
| 4. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....                                       | 33 |
| 4.1. Синтез системи керування з ПІД-регулятором.....                   | 33 |
| 4.2. Дослідження нечіткої системи керування.....                       | 36 |
| 5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ.....                                       | 48 |
| 5.1. Поняття стартап-проекту.....                                      | 48 |
| 5.2. Загальні підходи до економічного обґрунтування.....               | 50 |
| 5.3. Структура споживання та сегменти ринку.....                       | 58 |
| ВИСНОВКИ .....                                                         | 63 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....                                   | 64 |

## ВСТУП

Розвиток хімічної промисловості є одним із ключових чинників технологічного прогресу, оскільки забезпечує широке коло галузей необхідними матеріалами, реагентами та напівпродуктами. Одним із важливих продуктів неорганічного синтезу є рідке скло — водний розчин силікатів натрію або калію, що широко застосовується у виробництві будівельних матеріалів, литті, деревообробці, нафтовидобуванні, текстильній промисловості, а також як компонент захисних покриттів, клеїв і герметиків [1]. Постійне зростання вимог до якості продукції, енергоефективності виробництва та стабільності технологічних режимів актуалізує необхідність упровадження сучасних систем автоматизації у процес виготовлення рідкого скла.

Технологічний процес виробництва рідкого скла включає низку складних фізико-хімічних перетворень: підготовку сировини, дозування компонентів, завантаження силікатної шихти, розплавлення в печах або автоклавах, гідратацію силікатного розплаву, охолодження та фільтрацію готового продукту [1]. Більшість етапів характеризуються нелінійністю, інерційністю, наявністю збурень, залежністю технологічних параметрів (температури, тиску, концентрації, густини, в'язкості) від зовнішніх умов та режимів роботи обладнання. Через це ручне керування процесом є малоефективним, а забезпечення стабільних характеристик продукту без застосування автоматизованих систем — практично неможливе [1].

У сучасних умовах підприємства хімічної промисловості переходять до використання автоматичних систем контролю та керування на основі програмованих логічних контролерів, комп'ютерних систем моніторингу, датчиків нового покоління, а також алгоритмів оптимізації та прогнозування. Автоматизація процесу виробництва рідкого скла дозволяє зменшити вплив людського фактора, підтримувати оптимальні режими функціонування обладнання, знизити витрати енергії та сировини, підвищити якість і стабільність кінцевого продукту [2]. Крім

того, автоматизовані системи керування забезпечують можливість гнучкого налаштування технологічних параметрів, своєчасного реагування на аварійні стани.

Актуальність теми також зумовлена глобальними тенденціями цифровізації промисловості. Впровадження SCADA-систем, систем збору та аналітики даних, а також використання математичних моделей технологічних процесів сприяють підвищенню ефективності виробництва, прозорості керування та прогнозуванню станів обладнання. Розробка автоматизованої системи для виробництва рідкого скла є реальним кроком до реалізації Індустрія 4.0 [2].

Метою магістерської роботи є розробка та обґрунтування автоматизованої системи керування процесом виробництва рідкого скла для підвищення його якості, стабільності та енергоефективності.

Наукова новизна роботи полягає у застосуванні сучасних методів моделювання та керування для оптимізації технологічного процесу виробництва рідкого скла, а також у розробці структурної схеми автоматизації, яка дозволяє забезпечити стабільність технологічних параметрів у динамічному режимі.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості впровадження розробленої системи на реальному виробництві для зниження витрат енергії, покращення якості кінцевого продукту, підвищення безпеки технологічного обладнання та мінімізації впливу людського фактора [2].

Таким чином, розробка автоматизованої системи керування процесом виробництва рідкого скла є важливим та актуальним завданням, що відповідає сучасним тенденціям автоматизації та цифрової трансформації промисловості, а також сприяє підвищенню конкурентоспроможності та ефективності підприємств хімічної галузі [2].

## 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИРОБНИЦТВА РІДКОГО СКЛА

### 1.1. Загальна характеристика процесу виробництва рідкого скла

Рідке скло (силікатний клей) — це водний розчин силікатів натрію або калію, який отримують у результаті розкладання силікатного розплаву водою або високотемпературного гідролізу силікатної шихти. Основними характеристиками є: силікатний модуль ( $M$ ), густина  $\rho$ , в'язкість  $\mu$ , масова частка  $\text{SiO}_2$  та  $\text{Na}_2\text{O}$ , pH розчину. Ці параметри визначають якість продукту та мають бути стабільно підтримані системою керування [1].

Рідке скло широко використовується у виробництві будівельних матеріалів, литті по газифікованим моделям, деревообробці, хімічних захисних покриттях, нафтовидобуванні та текстильній промисловості.

Існує два основних промислових способи отримання рідкого скла [3]:

- Автоклавний спосіб. Передбачає розкладання силікатної шихти (кварцовий пісок + сода) гарячою водою під тиском 0,8–1,6 МПа при 170–200 °С. Переваги: відносно невисокі енерговитрати, висока якість продукту, можливість безперервного виробництва.
- Плавильний спосіб (печі). Сировина плавиться при 1350–1500 °С, утворюючи скловидний силікат натрію, який далі гідратується. Переваги: висока продуктивність, можливість регулювання складу шихти.

Основні параметри, що визначають якість рідкого скла: температура в автоклаві, тиск в автоклаві, масові витрати води та шихти, тривалість гідролізу, густина готового продукту, силікатний модуль [4].

Порушення параметрів призводить до: недостатнього розкладання силікату; зміни в'язкості; нерівномірності модулю; утворення нерозчинних залишків.

Тому автоматизація відіграє ключову роль у забезпеченні стабільності технологічного режиму [1, 3].

## 1.2. Технологічна схема виробництва

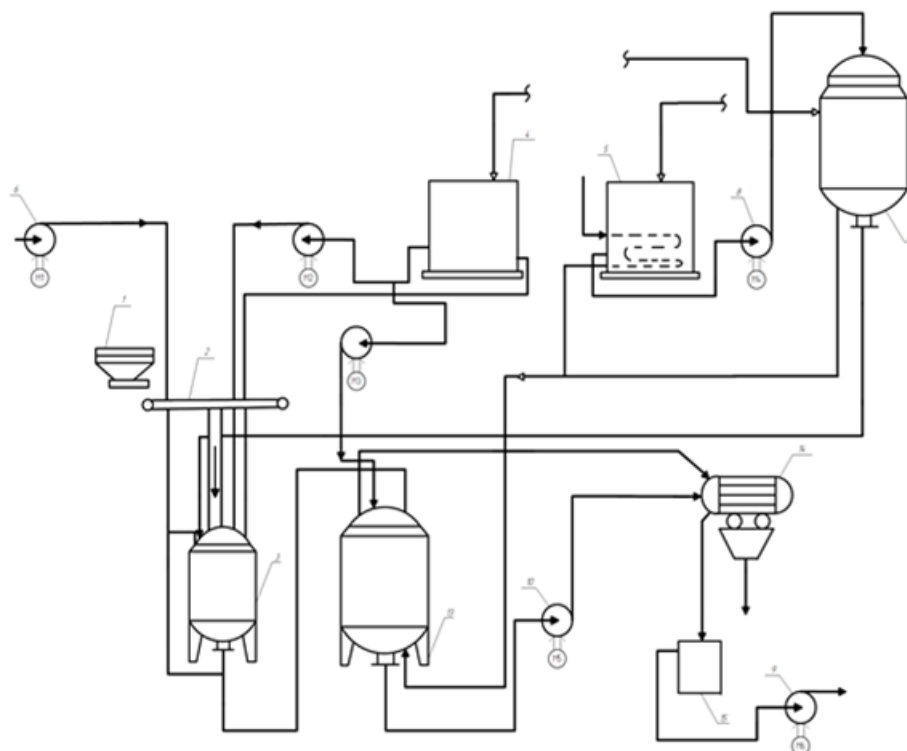


Рисунок 1.1 Технологічна схема установки виробництва рідкого скла

На схемі представлено: 1 – шнекова дробилка; 2 – стрічкові транспортери; 3 – автоклав ; 4, 5 – ємності; 6, 7, 8, 9, 10, 11 – насоси; 12 – мірник; 13 – відстійник; 14 – фільтр; 15 – збірник готового продукту;

Типова технологія включає такі етапи:

Підготовка шихти: дозування кварцового піску, дозування соди ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), перемішування; Завантаження в автоклав; Гідроліз силікату під тиском: нагрів води парою, підтримання температури 170–200 °С, тиск 0,8–1,6 Мпа, контроль рівня в апараті; Розчинення силікату і формування рідкого скла; Охолодження продукту; Фільтрація та відстоювання; Подача в ємності зберігання [5].

Ключові контрольовані величини

| Параметр              | Датчик                                           | Вплив на якість             |
|-----------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------|
| Температура автоклава | термопара / Pt100                                | визначає швидкість реакцій  |
| Тиск                  | тензометричний датчик                            | впливає на рівень гідролізу |
| Рівень                | ультразвуковий/гідростатичний аварійний контроль |                             |
| Витрата пари          | витратомір Vortex                                | точність нагріву            |
| Модуль і густина      | онлайн-денсиметр                                 | кінцева якість              |
| Витрата води          | електромагнітний витратомір                      | концентрація                |

Підготовка кварцового піску. Кварцовий пісок подається на установку через бункер-накопичувач. Далі він проходить такі операції: сита та грохоти — для видалення пилу й крупних фракцій; сушарку — доведення вологості до 0,5–1 %; магнітні сепаратори — усунення металоманітних домішок [6]. Сухий пісок транспортується пневмотранспортом або шнековими конвеєрами до дозувальної станції.

Підготовка лужного компоненту Для запарювання силікату може застосовуватися: розчин гідроксиду натрію (NaOH) або розчин натрію карбонату ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Розчини готуються в спеціальних розчинних баках, оснащених: мішалками, паровими рубашками, системами контролю температури та концентрації. Після приготування луг подається у витратні ємності [2, 7].

Дозування та формування шихти. Пісок і лужний розчин дозуються автоматично за масою. Типові пропорції визначаються цільовим силікатним модулем ( $M = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ), який зазвичай становить 2,0–3,5. Матеріали надходять у змішувач або безпосередньо в автоклав (залежно від конструкції), де утворюється однорідна пульпа. Змішування забезпечує: рівномірний контакт компонентів, прискорення хімічної реакції [5].

Автоклавне запарювання. Це основний етап виробництва, де відбувається перехід кремнезему в розчинний силікат. Автоклав являє собою горизонтальний циліндричний апарат високого тиску, обладнаний: паровою рубашкою або внутрішніми теплообмінниками; запірною кришкою з механізмом замикання; системою подачі пари високого тиску; мішалкою (у сучасних моделях); датчиками тиску, рівня та температури. В автоклав подається шихта. Після герметизації починається подача пари [4].

У автоклаві підтримуються параметри:  $t = 160\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $p = 0,8\text{--}1,6\text{ МПа}$ , тривалість реакції = 2–6 годин [3].

У середині автоклава відбувається реакція утворення силікату натрію. Під дією тиску пари кварцові частинки активно розчиняються у лузі, утворюючи натрієве рідке скло. Після завершення реакції автоклав розгерметизують і силікатна маса (так звана «силікатна каша») вивантажується в приймальний бачок.

Силікатна маса містить тверді нерозчинені частинки. Для отримання однорідного розчину її розварюють у спеціальних апаратах: додається гаряча вода, встановлюється мішалка, підтримується температура  $90\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . У результаті утворюється рідке скло з початковим модулем [5].

Отримана рідина фільтрується через: барабанні вакуум-фільтри, рамні фільтр-преси, сітчасті або тканинні фільтри. Фільтрат — це прозорий або злегка мутний розчин силікату натрію [6].

Силікатний модуль коригують залежно від вимог замовника або стандартів: для зниження модулю додають луг ( $\text{NaOH}$ ), для підвищення — додатково розчиняють кремнезем або випаровують воду.

Концентрацію доводять у випарних апаратах: плівкових, багатокорпусних, з природною або примусовою циркуляцією.

Готове рідке скло направляється в охолоджувальні теплообмінники до  $t = 40\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$  [3].

Після цього продукт накопичується у герметичних ємностях, оснащених: системами перемішування, теплоізоляцією, контрольно-вимірювальними приладами. Далі рідке скло подається на фасування або безпосередньо в трубопровід споживача [5].

#### Система автоматизації та контролю

Установка оснащена: датчиками рівня, тиску, температури, витратомірами луку та води, сигналізаторами відкриття/закриття автоклава, автоматичними регуляторами температури та тиску, системами безпеки (запобіжні клапани, блокування, аварійне скидання пари) [6].

Автоматизація забезпечує: підтримання оптимальних умов реакції, безпечну герметизацію автоклава, контроль концентрації розчину та модуля, аварійний захист.

### 1.3. Постановка задачі на дослідження

Метою дисертації є розробка системи автоматичного контролю процесу виробництва рідкого скла. Це включає, створення схеми автоматизації дослідження математичної моделі автоклаву, як об'єкту керування, синтез нечіткої системи керування.

Для вирішення поставлених задач дослідження включають:

1. Провести аналіз технологічного процесу та виявити ключові параметри, що впливають на якість рідкого скла.
2. Запропонувати математичну модель автоклава.
3. Виконати аналіз можливих методів та обрати оптимальну структуру системи керування.
4. Синтезувати нечітку систему керування
5. Обґрунтувати вибір технічних засобів автоматизації.
6. Розробити проект автоматизованої системи контролю та управління.

## **2. ОПИС СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА РІДКОГО СКЛА**

### **2.1. Опис схеми автоматизації технологічного процесу установки виробництва рідкого скла**

Функціональна схема показує логіку взаємодії датчиків, регуляторів, виконавчих механізмів та режимів безпеки [6].

Система автоматизації включає:

- датчики температури (T)
- датчики тиску (P)
- датчики рівня (L)
- витратоміри води та пари (G)
- електронні клапани керування витратою пари
- частотні приводи насосів
- PLC (програмований логічний контролер)
- панель оператора HMI
- SCADA-система верхнього рівня

Основні контури автоматичного регулювання [6]

1. Контур температури — PID-регулятор пари
2. Контур тиску — PID по паровій арматурі
3. Контур рівня — управління водоподачею
4. Контур витрати води
5. Контур контролю густини/модуля — корекція рецептури

Опис PLC

Для виробництва такого типу найчастіше використовуються [7]:

- Siemens S7-1200 / S7-1500
- Schneider Electric Modicon
- OMRON NX/NJ

- Allen-Bradley CompactLogix

PLC виконує функції [5]:

- збір сигналів з датчиків (AI, DI);
- керування виконавчими механізмами (AO, DO);
- реалізація PID-регуляторів;
- аварійна блокування;
- обмін даними зі SCADA по Modbus TCP/Profibus/Profinet.

Функції SCADA (WinCC, InduSoft, Ignition, Zenon, Trace Mode) [4]:

- архів даних
- графіки тенденцій температури, тиску, витрат
- сигнали аварій та попереджень
- дистанційна зміна технологічних параметрів
- формування звітів по циклах виробництва

Вибір датчиків

#### 1) Температура

- тип: Pt100, термопара ТХА
- вимоги: до 250 °С, сталь 12Х18Н10Т
- обґрунтування: висока точність, інертність, стійкість до хімії.

#### 2) Тиск

- мембранні тензометричні датчики
- діапазон: 0–2 МПа
- обґрунтування: висока точність, захист IP65–67.

#### 3) Рівень

- ультразвуковий або гідростатичний
- обґрунтування: безконтактність, нечутливість до високої температури.

#### 4) Витрата води

- електромагнітні витратоміри
- переваги: відсутність рухомих частин, висока точність.

## 5) Витрата пари

- вихровий (Vortex) витратомір
- обґрунтування: робота з газами високої температури.

## 6) Густина та модуль

- онлайн-денсиметри (наприклад, Endress+Hauser)
- обґрунтування: безперервний контроль якості без проб відбору.

## 2.2. Основні функціональні блоки

Розділено на 10 блоків [8]:

F1 — Старт/Стоп циклу виробництва: умови запуску (перевірка стану клапанів, тиску, рівня).

F2 — Контроль рівня в автоклаві: при  $L < L_{\min}$  -> вмикання насоса; при  $L > L_{\max}$  -> зупинка дозування.

F3 — Контроль температури: PID\_T порівнює  $T_{\text{set}}$  і  $T_{\text{actual}}$  -> регулює клапан подачі пари.

F4 — Контроль тиску: PID\_P регулює випускний клапан.

F5 — Контроль якості (модуль, густина): якщо  $\rho$  поза діапазоном -> корекція рецептури (змінити  $G_{\text{water}}$  або дозу шихти) та повідомлення оператору.

F6 — Аварійні блокування: перевищення  $P_{\max}$  або  $T_{\max}$  -> аварійне відключення нагріву + відкриття байпасу.

F7 — Логіка пакування/зберігання: наповнення ємності при  $\rho$  в нормі.

F8 — Архівація та звітність: накопичення параметрів циклу.

F9 — Обробка збурень: автовідкат PID-параметрів при великих зовнішніх збуреннях.

F10 — Режим ручного керування: локальне управління насосом через HMI.

StartCycle -> F1 checks -> if OK -> enable F2,F3,F4

F2(Level) -> control pump

F3(T) -> control steam\_valve

F4(P) -> control vent\_valve

F5(Quality) -> if out\_of\_range -> adjust recipe or alarm

Emergency -> if  $T > T_{max}$  or  $P > P_{max}$  -> shutdown heating, open safety\_valve, alarm.

Послідовність операцій: Оператор ініціює StartCycle з HMI; PLC перевіряє передумови: рівні баків, стан клапанів, сигналів безпеки; PLC вмикає насоси подачі води, починає дозування шихти; Коли рівень досягає  $L_{work}$  -> починається нагрів парою; PID\_T підтримує  $T_{set}$ ; PID\_P підтримує  $P_{set}$ ; Через встановлений час або при досягненні  $C_{target}$  циклу — переходить до етапу охолодження; Продукт фільтрується, відбирається проба для онлайн денсиметра; якщо  $\rho_{ho}$  в межах — наповнення ємності [8].

Завершення циклу — архівація даних, повідомлення оператора.

Обробка аварій. Порогові значення  $T_{max}$ ,  $P_{max}$ ,  $L_{min}$  задаються у PLC як константи. При аварії система виконує: зупинка нагріву, відкриття аварійного клапана, блокування дозування, сигналізація на HMI та відсилення SMS/Email (за наявності шлюзу) [8].

Код PLC

Приведені для ілюстрації логіки. Конкретна реалізація залежить від моделі PLC та середовища (Siemens TIA Portal, Schneider EcoStruxure, Allen-Bradley RSLogix). Structured Text (ST) — приклад PID-логіки та запуску циклу [8]

(\* Параметри \*)

VAR

$T_{act}$  : REAL; (\* поточна температура \*)

$T_{set}$  : REAL := 443.15; (\* 170 C \*)

steam\_flow\_cmd : REAL; (\* вихід PID \*)

PID\_T : FB\_PID; (\* приклад блоку PID \*)

CycleState : INT := 0; (\* 0-stop,1-started,2-run,3-finish \*)

$L_{act}$  : REAL;

$L_{min}$  : REAL := 0.2;

```

Emergency : BOOL := FALSE;
END_VAR
(* Стартовий блок *)
IF Start_Button AND NOT Emergency THEN
  IF CycleState = 0 THEN
    IF L_act > L_min THEN
      CycleState := 1; (* перехід до реж. запуску *)
    END_IF;
  END_IF;
END_IF;

(* PID temperature control: вбудований функціональний блок *)
PID_T.SetPoint := T_set;
PID_T.ProcessValue := T_act;
PID_T.Kp := 2.0;
PID_T.Ki := 0.5;
PID_T.Kd := 0.1;
PID_T(); (* виклик FB *)
steam_flow_cmd := PID_T.ControlOutput;

(* Аварійна логіка *)
IF T_act > T_max OR P_act > P_max THEN
  Emergency := TRUE;
  (* команда на аварійне закриття/відкриття *)
  steam_close_cmd := TRUE;
  vent_open_cmd := TRUE;
END_IF;

Ladder Diagram (LD) — приклад простої логіки старт/стоп
|---[ Start ]----[ ]------( Set Run )
| +----[ NOT Emergency ]

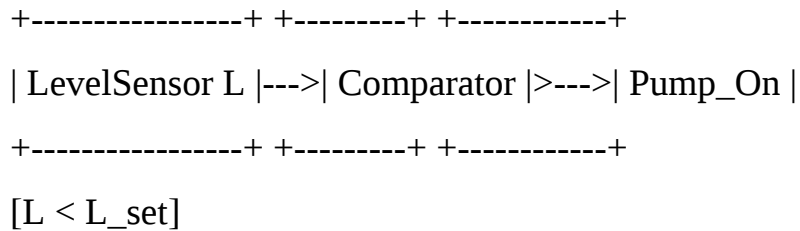
```

|---[ Stop ]----- ( Reset Run )

Пояснення: при натисканні Start і відсутності Emergency встановлюється біт Run.

При натисканні Stop біт Run скидається.

Function Block Diagram (FBD) — приклад контролю рівня



FBD-реалізація: блок Comparator (Less Than) порівнює  $L_{act}$  з  $L_{set}$ , його вихід керує блоком Set для реле насоса.

Тестування, налагодження та валідація [8]

Виконати перевірку блоків у середовищі симуляції (HIL або Simulink) перед підключенням до реального обладнання.

Налаштування PID — метод Ziegler–Nichols або автотюнінг у PLC/SCADA.

Прогнати кілька сценаріїв збурень: +10% витрати пари, пониження якості шихти.

### 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ

#### 3.1. Дослідження об'єкту керування

Об'єктом вибрано автоклав, що являє собою герметичний апарат періодичної або безперервної дії, призначений для проведення процесів підвищеної температури й тиску (стерилізація, гідротермальна обробка, хімічні реакції, полімеризація, вулканізація тощо). Математична модель автоклава описує взаємозв'язок між температурою, тиском, теплонаправідністю, динамікою пари та фізико-хімічними процесами всередині робочого об'єму [3].

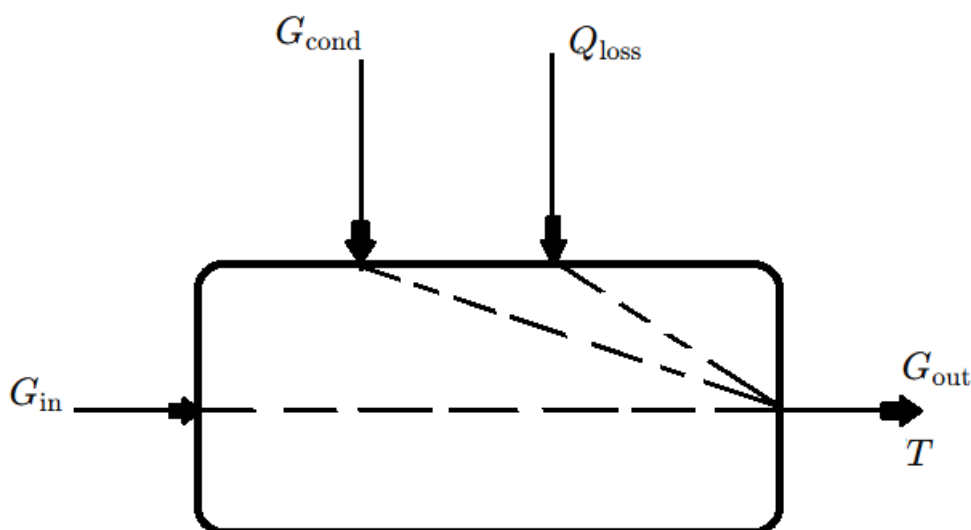


Рисунок 3.1. Структурно-параметрична схема автоклава

Основні припущення для побудови моделі [4] :

1. Робоче середовище в автоклаві однорідне (температура і тиск рівномірні в усьому об'ємі).
2. Пара та конденсат перебувають у квазістаціонарній рівновазі.
3. Теплові втрати через корпус оцінюються як пропорційні різниці температур.
4. Вхід пари в апарат описується параметрами: масовою витратою, ентальпією та тиском.
5. Процеси нагріву й охолодження описуються законами теплопередачі.

Матеріальний баланс. У найпростішому випадку зміна маси робочого середовища (пари) описується рівнянням [9]:

$$\frac{dm}{dt} = G_{\text{in}} - G_{\text{out}} - G_{\text{cond}},$$

Де

- $G_{\text{in}}$  — витрата пари, що подається,
- $G_{\text{out}}$  — витрата пари, що відводиться або виходить через клапан,
- $G_{\text{cond}}$  — швидкість конденсації пари на холодних поверхнях та продукті.

Для періодичного автоклава (стерилізаційного типу) часто припускають:

$$G_{\text{out}}=0,$$

а  $G_{\text{cond}}$  визначають із рівняння теплового балансу.

Тепловий баланс автоклава

Загальне рівняння теплового балансу [9]:

$$C_{\text{eff}} \frac{dT}{dt} = G_{\text{in}} h_{\text{in}} - G_{\text{cond}} h_{\text{vap}} - Q_{\text{loss}},$$

де

- $C_{\text{eff}}$  — ефективна теплоємність системи (сумарна теплоємність продукту, води, стінок апарата, пари),
- $h_{\text{in}}$  — ентальпія пари на вході,
- $h_{\text{vap}}$  — теплота пароутворення,
- $Q_{\text{loss}}$  — втрати тепла через корпус:

$$Q_{\text{loss}} = kA(T - T_{\text{env}}),$$

де  $kA$  — загальний коефіцієнт теплопередачі корпус–навколишнє середовище.

Узагальнена динамічна модель температури

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_{\text{eff}}} (G_{\text{in}} h_{\text{in}} - G_{\text{cond}} h_{\text{vap}} - kA(T - T_{\text{env}}))$$

Тиск у автоклаві визначається як тиск насиченої пари при даній температурі [9]:

$$P = P_{\text{sat}}(T),$$

де  $P_{\text{sat}}$  визначають за рівнянням Антуана:

$$\ln P = A - B/(T + C)$$

Для більш складних процесів, де існує подача пари та зміна маси:

$$P = mRT/V$$

де

- $V$  — робочий об'єм автоклава,
- $R$  — газова стала для водяної пари.

Модель конденсації

Кількість пари, що конденсується:

$$G_{\text{cond}} = Q_{\text{tr}}/h_{\text{vap}},$$

де

$Q_{\text{tr}}$  — теплота, що передається від пари до продукту/посудини:

$$Q_{\text{tr}} = UA_{\text{int}}(T_{\text{steam}} - T_{\text{product}}),$$

$U$  — коефіцієнт теплопередачі між паром та поверхнею стерилізованого матеріалу.

Динаміка нагріву продукту [9]:

$$Mc_p \frac{dT_{\text{product}}}{dt} = UA_{\text{int}}(T - T_{\text{product}}),$$

де

- $M$  — маса продукту,
- $c_p$  — його теплоємність.

Комплексна нелінійна динамічна модель автоклава

Підставляючи всі баланси, отримуємо систему диференціальних рівнянь [10]:

Температура пари

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_{\text{eff}}} (G_{\text{in}} h_{\text{in}} - U A_{\text{int}} (T - T_{\text{product}}) - k A (T - T_{\text{env}}))$$

Температура продукту

$$\frac{dT_{\text{product}}}{dt} = \frac{U A_{\text{int}}}{M c_p} (T - T_{\text{product}})$$

Маса пари

$$\frac{dm}{dt} = G_{\text{in}} - \frac{U A_{\text{int}} (T - T_{\text{product}})}{h_{\text{vap}}}$$

Тиск

$$P = \frac{m R T}{V}$$

Тиск насиченої пари

$$P = P_{\text{sat}}(T)$$

Використання моделі для керування. На базі цієї моделі будується [10]:

- Система керування температури, тиску та масової витрати пари із ПІД-регулятори;
- Реалізувати оптимальне керування мінімізація часу стерилізації, мінімізація витрати пари, обмеження тиску в апараті;
- Розробка моделі із використанням у MATLAB/Simulink для блоки теплових балансів, нелінійний блок переходу  $T \rightarrow P$ , логічні блоки роботи клапанів, система керування + НМІ.

Математична модель автоклава — це комплексна нелінійна система, що включає рівняння масового балансу пари, тепловий баланс пари та продукту, модель конденсації, рівняння тиску, кінетику хімічних реакцій [11].

Модель дозволяє аналізувати: час виходу на режим, витрати пари, поведінку температури й тиску, роботу регуляторів, оптимальні режими процесу

### 3.2. Лінеаризація математичної моделі

Представлено лінеаризацію нелінійної моделі автоклава, стан-просторову та передавальну моделі для синтезу ПІД-регуляторів, рекомендації для налаштування ПІД, структурну/функціональну схему автоклава та покрокову інструкцію + MATLAB-код для реалізації моделі й лінеаризації в Simulink/MATLAB [11].

Візьмемо з попередньої моделі стани та входи:

- Стани:  $x = [T; T_p; m]^T$  — температура пари, температура продукту, маса пари.
- Вхід:  $u = G_{in}$  — масова витрата пари (контролюється клапаном/подією тепла може бути й інший вхід: потужність нагріву  $Q_{in}$ ).
- Параметри:  $C_{eff}, U A_{int}, kA, T_{env}, h_{in}, h_{var}, M, c_p, V, R$ .

Нелінійна система (той же блок як у попередньому описі) [11]:

$$\begin{aligned}\dot{T} &= \frac{1}{C_{eff}} \left( u h_{in} - U A_{int} (T - T_p) - k A (T - T_{env}) \right), \\ \dot{T}_p &= \frac{U A_{int}}{M c_p} (T - T_p), \\ \dot{m} &= u - \frac{U A_{int} (T - T_p)}{h_{vap}}.\end{aligned}$$

Тиск можна зв'язати як  $P = P_{\text{sat}}(T)$  або  $P = mRT/V$ ; для керування температурою корисно мати модель від  $u$  до  $T$  (або до  $P$  через  $T$ ).

Лінеаризація в точці робочої точки [11]

Нехай робоча точка:  $x_0 = [T_0; T_{p0}; m_0]^T$ ,  $u_0$  — сталі значення. Візьмемо збурення  $\Delta x = x - x_0$ ,  $\Delta u = u - u_0$ . Лінеаризуємо за правилом Якобі:

Система у вигляді  $\dot{x} = f(x, u)$ , де

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{C_{eff}}(u h_{in} - U A_{int}(T - T_p) - k A (T - T_{env})) \\ \frac{U A_{int}}{M c_p}(T - T_p) \\ u - \frac{U A_{int}(T - T_p)}{h_{vap}} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \frac{1}{C_{eff}}(u_0 h_{in} - U A_{int}(T_0 - T_{p0}) - k A (T_0 - T_{env})) \\ \frac{U A_{int}}{M c_p}(T_0 - T_{p0}) \\ u_0 - \frac{U A_{int}(T_0 - T_{p0})}{h_{vap}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_{eff}} h_{in} & -\frac{U A_{int}}{C_{eff}} & -\frac{k A}{C_{eff}} \\ \frac{U A_{int}}{M c_p} & \frac{U A_{int}}{M c_p} & 0 \\ 1 & -\frac{U A_{int}}{h_{vap}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta T_p \\ \Delta m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta u \end{bmatrix}.$$

Матриці стан-простору (перші частинні похідні в точці):

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_{eff}}(U A_{int} + k A) & \frac{1}{C_{eff}} U A_{int} & 0 \\ \frac{U A_{int}}{M c_p} & -\frac{U A_{int}}{M c_p} & 0 \\ -\frac{U A_{int}}{h_{vap}} & \frac{U A_{int}}{h_{vap}} & 0 \end{bmatrix}.$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{h_{in}}{C_{eff}} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Ці вирази не залежать безпосередньо від значень станів при даному структурному вигляді — це наслідок лінійності по деяких членах; якщо  $h_{in}$  чи інші параметри залежать від  $T$  або  $P$ , тоді в матриці з'являються додаткові члени [10, 11].

Якщо вихід  $y$  — це температура пари  $T$ , тоді  $C=[1 \ 0 \ 0]$ ,  $D=[0]$ .

Якщо контролюємо тиск через  $T$  — можна задати  $y=P_{sat}(T)$ ; лінеаризоване відношення:  $\Delta y = (dP_{sat}/dT)|_{T_0} \Delta T$ . Тобто  $C$  матриця та коефіцієнт масштабування [11].

Передавальна функція

З системи стан-простір:  $G(s)=C (sI-A)^{-1} B + D$ .

Для  $y=T$  ( $C=[1 \ 0 \ 0]$ ,  $D=0$ ) отримуємо:

$$G_T(s)=N(s)D(s)G_T(s)=\frac{N(s)}{D(s)}G_T(s)=D(s)N(s),$$

де знаменник — характеристичний многочлен  $\det(sI-A)$  (в трьох вимірах). Для практичних цілей можна спростити модель до другого порядку, якщо маса пари в часі змінюється повільно відносно температур [11].

Спрощена (двохвимірна) модель ( $m$ =константа або повільний змінний):

Стани:  $[T; T_p]$  — матриці  $A_{2 \times 2}$  та  $B_{2 \times 1}$  дають раціональну передавальну функцію другого порядку:

$$G_T(s) = \frac{b_0 s + b_1}{s^2 + a_1 s + a_0}$$

Множина коефіцієнтів виражається через елементи  $A$  та  $B$ ; прямо можуть бути виведені аналітично, або знайдені чисельно при заданих чисельних параметрах [11].

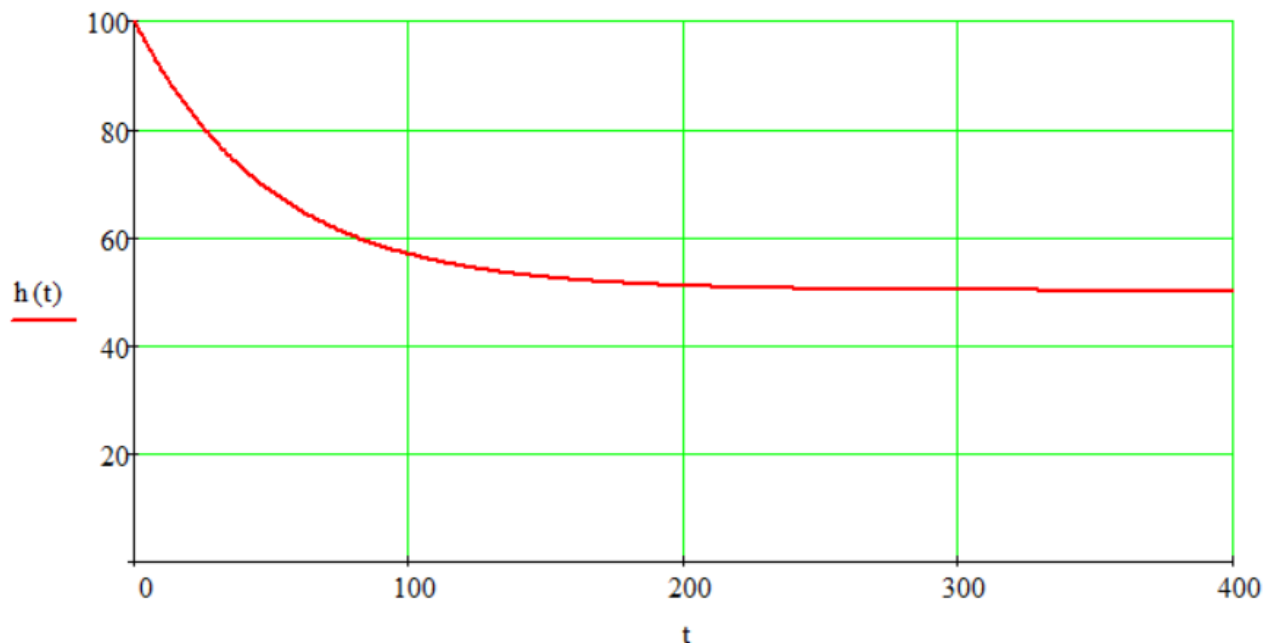


Рисунок 3.2 Перехідна характеристика об'єкту керування за каналом завдання-вихід

Поставлену задачу можна вирішити із використанням м-функції MatLab

```
% build_liquid_glass_model.m
```

```
% This script creates a Simulink model 'liquid_glass_model' that implements
```

```
% a simplified dynamic model of the autoclave process for liquid glass production,
```

```
% including: thermal balance subsystem, chemical kinetics subsystem, density block,
```

```
% PID controllers for temperature and pressure, and scopes for visualization.
```

```
% Usage:
```

% 1. Place this file in a folder on your MATLAB path.

% 2. Run in MATLAB: build\_liquid\_glass\_model

% 3. Open model: open\_system('liquid\_glass\_model')

% 4. Start simulation and tune PID blocks with Simulink PID Tuner if desired.

% NOTE: This script must be executed in MATLAB with Simulink installed.

% The script uses high-level block placement and connections; you may need to

% adjust block positions or parameters interactively.

```
model = 'liquid_glass_model';
```

```
if bdIsLoaded(model)
```

```
    close_system(model, 0);
```

```
end
```

```
new_system(model);
```

```
open_system(model);
```

% Add main subsystems: Thermal, Kinetics, Density

```
add_block('built-in/SubSystem',[model '/Thermal']);
```

```
add_block('built-in/SubSystem',[model '/Kinetics']);
```

```
add_block('built-in/SubSystem',[model '/Density']);
```

% Add PID controllers

```

add_block('simulink/Continuous/PID Controller',[model '/PID_Temp']);

add_block('simulink/Continuous/PID Controller',[model '/PID_Press']);

% Add Steam flow source (Step) and Heat loss constant block

add_block('simulink/Sources/Step',[model '/Step_Steam']);

set_param([model '/Step_Steam'],'Time','100','Before','100','After','150'); % example
steam flow step

add_block('simulink/Sources/Constant',[model '/T_env']);

set_param([model '/T_env'],'Value','293.15');

% Add Scopes for outputs

add_block('simulink/Sinks/Scope',[model '/Scope_Temp']);

add_block('simulink/Sinks/Scope',[model '/Scope_Concentration']);

add_block('simulink/Sinks/Scope',[model '/Scope_Rho']);

% Build Thermal subsystem content

open_system([model '/Thermal']);

% Add Sum, Gain, Integrator inside Thermal

add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/Thermal/Sum1']);

set_param([model '/Thermal/Sum1'],'Inputs','+-');

add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/Thermal/Gain_CmM']);

```

```

set_param([model '/Thermal/Gain_CmM'],'Gain','1/(C_mix*M)'); % symbolic param

add_block('simulink/Continuous/Integrator',[model '/Thermal/Integrator_T']);

add_block('simulink/Sources/Constant',[model '/Thermal/r']);

set_param([model '/Thermal/r'],'Value','2256e3'); % latent heat example

add_block('simulink/Math Operations/Product',[model '/Thermal/Product']);

add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/Thermal/Gain_loss']);

set_param([model '/Thermal/Gain_loss'],'Gain','-k_loss');

add_block('simulink/Sources/Constant',[model '/Thermal/C_mix']);

set_param([model '/Thermal/C_mix'],'Value','3.5e3');

add_block('simulink/Sources/Constant',[model '/Thermal/M']);

set_param([model '/Thermal/M'],'Value','2000');

% Connect blocks inside Thermal

add_line([model '/Thermal'],'r/1','Product/1');

add_line([model '/Thermal'],'Product/1','Sum1/1');

add_line([model '/Thermal'],'Gain_loss/1','Sum1/2');

add_line([model '/Thermal'],'Sum1/1','Gain_CmM/1');

add_line([model '/Thermal'],'Gain_CmM/1','Integrator_T/1');

% Close Thermal subsystem

```

```

close_system([model '/Thermal']);

% Build Kinetics subsystem content

open_system([model '/Kinetics']);

add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/Kinetics/k0']);

set_param([model '/Kinetics/k0'],'Gain','k0');

add_block('simulink/Continuous/Integrator',[model '/Kinetics/Integrator_C']);

add_block('simulink/Math Operations/Product',[model '/Kinetics/Product_kC']);

add_block('simulink/Sources/Constant',[model '/Kinetics/input_dose']);

set_param([model '/Kinetics/input_dose'],'Value','0.0');

% Connect blocks inside Kinetics

add_line([model '/Kinetics'],'k0/1','Product_kC/1');

add_line([model '/Kinetics'],'Product_kC/1','Integrator_C/1');

add_line([model '/Kinetics'],'input_dose/1','Integrator_C/2');

close_system([model '/Kinetics']);

% Build Density subsystem (static map)

open_system([model '/Density']);

add_block('simulink/Sources/Constant',[model '/Density/rho0']);

set_param([model '/Density/rho0'],'Value','1300');

```

```

add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/Density/a1']);

set_param([model '/Density/a1'],'Gain','a1');

add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/Density/a2']);

set_param([model '/Density/a2'],'Gain','a2');

add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/Density/SumRho']);

set_param([model '/Density/SumRho'],'Inputs','+++');

% Simple wiring placeholders (to be connected at top level)

close_system([model '/Density']);

% Connect top-level signals: Steam -> Thermal -> Temp to PID_Temp -> steam valve
command (loop)

add_line(model,'Step_Steam/1','Thermal/1');

add_line(model,'Thermal/1','PID_Temp/1');

add_line(model,'PID_Temp/1','Thermal/1','autorouting','on'); % feedback (simplified
placeholder)

% Connect Thermal and Kinetics to scopes (placeholders)

add_line(model,'Thermal/1','Scope_Temp/1');

add_line(model,'Kinetics/1','Scope_Concentration/1');

add_line(model,'Density/1','Scope_Rho/1');

% Set model parameters for simulation

```

```
set_param(model,'StopTime','1000');
```

```
% Save the model
```

```
save_system(model);
```

```
fprintf('Model "%s" created and saved. Open it in MATLAB/Simulink to finish block  
parameterization and tuning.\n', model);
```

## 4. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

### 4.1. Синтез системи керування з ПІД-регулятором

Високорівнева ASCII-структурна схема системи керування з PID-регулятором [12]

[Сировина] --> [Дозування] --> [Завантаження в автоклав] --> [Автоклав]

|--> [Фільтрація] --> [Ємність зберігання]

|--> [Відбір проб -> Онлайн денсиметр]

Автоклав <- керування: PLC -> PID(T), PID(P), PI(Level)

SCADA <-> PLC

HMI <-> оператор

Деталізована структура (блоки) [12]:

- Сировина (пісок, сода) -> дозатори (коли/масові) -> змішувач -> стрічковий конвеєр -> автоклав
- Автоклав: датчики T, P, L; паровий нагрівач (керований клапан); відвідний клапан тиску; насос підживлення
- Після автоклава: теплообмінник -> фільтр -> ємність стабілізації -> пакування/зберігання
- PLC: модулі AI (4-20 mA), DI/DO, AO
- SCADA/HMI: візуалізація, архівація, звітність

Автотюнінг PID-регуляторів у MATLAB / Simulink для системи автоматизації виробництва рідкого скла [13]

Документ описує повну процедуру налаштування PID-регуляторів у моделі liquid\_glass\_model, побудованій скриптом build\_liquid\_glass\_model.m. У моделі використані два контури керування: температурою автоклава, тиском / подачею пари [13]

Інструкція призначена для студентів і інженерів, що виконують моделювання динамічних об'єктів у хімічній промисловості [13].

Підготовка моделі до автотюнінгу

Перед запуском PID Tuner необхідно перевірити коректність з'єднань [14]

У моделі системи керування присутні блоки: Thermal → видає  $T(t)$ , PID\_Temp → приймає  $T(t)$  як зворотний зв'язок, Steam Valve / Step\_Steam → Сигнал керування PID (подачі пари)

Параметри PID-блоку: Controller type → PID (Standard), Time domain → Continuous, Initial condition → 0

Параметри моделі: Solver: ode45 / ode23tb / ode15s (для жорстких систем краще ode23tb або ode15s), Stop Time: 200...2000 s, Relative tolerance →  $1e-3$ , Absolute tolerance →  $1e-4$

Автоматична ідентифікація моделі (за потреби) [13, 14]

Якщо система сильно нелінійна (а автоклав із парою саме такий), використовується System Identification from Simulation:

- PID Tuner → Plant → Identify New Plant
- Вказати вхід — сигнал керування клапаном пари
- Вказати вихід —  $T(t)$
- Згенерувати або використати наявні дані симуляції
- Обрати структуру моделі: 1st-order + delay, 2nd-order + delay, State-space

Автотюнінг PID у вікні PID Tuner налаштовуються два головні повзунки: Response Time (швидкість системи). Зменшує час регулювання: наліво → повільніше, стабільніше; направо → швидше, агресивніше; Transient Behavior

(перерегулювання): наліво  $\rightarrow$  мінімальне перерегулювання; направо  $\rightarrow$  дозволене перерегулювання [14]

Для автоклава: мінімум перерегулювання, бо температура не повинна переходити межі

Перевірка роботи системи з PID-регулятором [14]:

- Запустити симуляцію
- Перевірити графіки: час регулювання, відсутність перерегулювання, плавність реакції, відсутність високочастотних коливань
- Виконати тестові зміни: задати  $T_{\text{setpoint}} + 5^{\circ}\text{C}$ , імітувати зміну подачі пари, змінити модель втрат тепла

Критерії якості регулювання для: температури: час регулювання  $t_s \leq 500\text{--}800\text{с}$ , перерегулювання  $\leq 5\%$ , статична похибка  $\rightarrow 0$ ; тиску: час регулювання:  $20\text{--}60\text{с}$ , перерегулювання  $\leq 10\%$

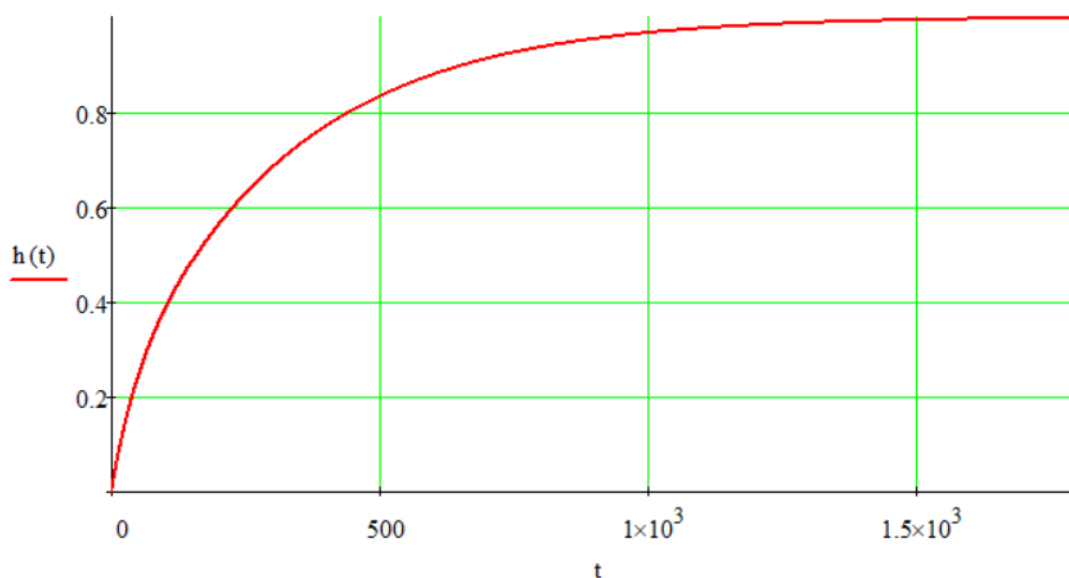


Рисунок 4.1. Перехідний процес одноконтурної замкненої системи керування автоклавом з ПІД регулятором, за каналом керування

#### 4.2. Дослідження нечіткої системи керування

Представимо нечіткі змінні та наведемо стандартні функції належності витрати силікатного розчину та температури в автоклаві [15].

На рисунках 4.2 – 4.4 представлено розраховані засобами математичного пакету MathCad, відповідно графіки функцій належності для термів: «Мала», «Середня», «Висока» лінгвістичної змінної відповідають значенням витрати силікатного розчину для підтримання заданого технологічним регламентом температурного режиму об'єкті керування [16].

Функція належності при умові «мала витрата»:

$$\mu_{F_{\text{мала}}}(F_{\text{ср1}}) = \begin{cases} 1, x < 176,7 \\ \frac{(180 - x)}{3}, 176,7 \leq x \leq 180 \\ 0, x > 180 \end{cases}$$

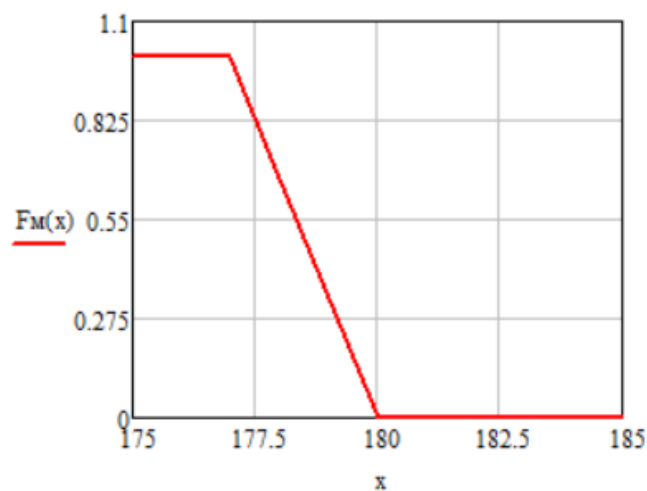


Рисунок 4.2. Функція належності мала витрата витрати силікатного розчину

Функція належності при умові «середня витрата» [16]:

$$\mu_{F_{\text{середня}}}(F_{\text{ср1}}) = \begin{cases} 0, x > 175 \\ \frac{(x - 176,7)}{3,3}, 176,7 \leq x < 180 \\ \frac{(183,3 - x)}{3,3}, 180 \leq x \leq 183,3 \end{cases}$$

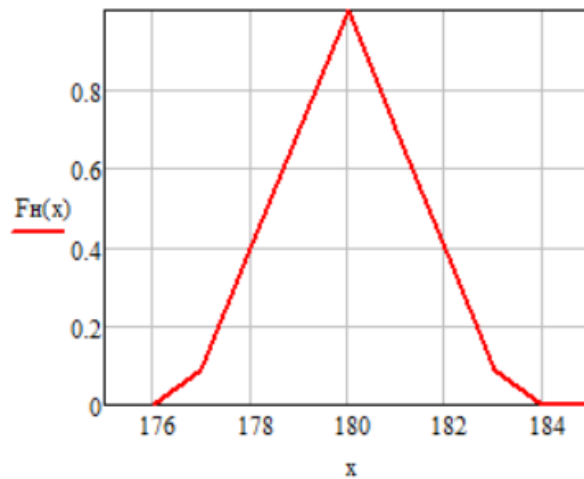


Рисунок 4.3. Функція належності середня витрати силікатного розчину  
Функція належності при умові «висока витрата» [16]:

$$\mu_{F_{\text{Висока}}}(F_{\text{ср1}}) = \begin{cases} 1, x \leq 183,3 \\ \frac{(x - 180)}{3}, 180 < x < 183,3 \\ 0, x \geq 183,3 \end{cases}$$

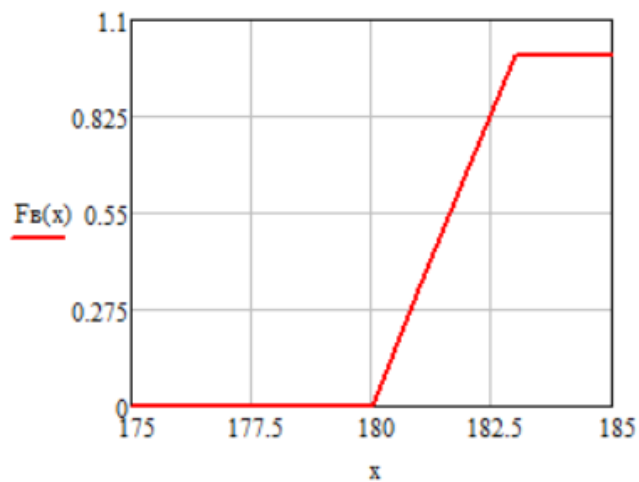


Рисунок 4.4 Функція належності висока витрати силікатного розчину

На рисунку 4.5 зібрано графіки усіх три варіації функцій належності для керувальної змінної.

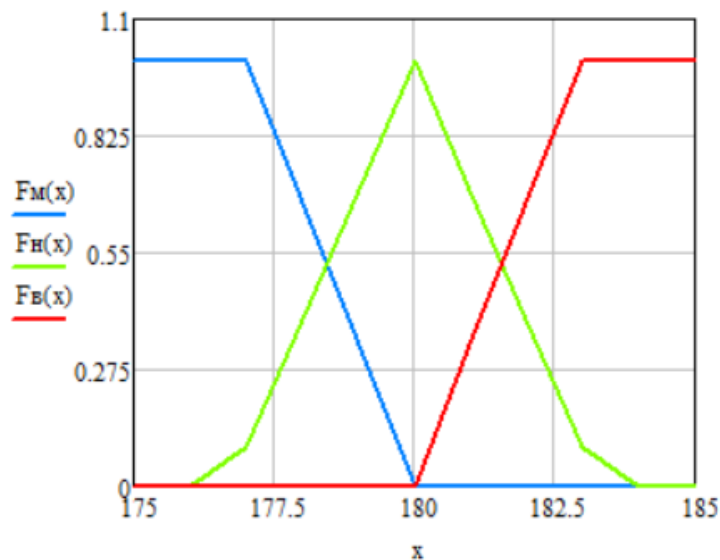


Рисунок 4.5 Належності керувальної змінної мала, середня та висока витрати силікатного розчину

На рисунках 4.6 – 4.8 представлено розроблені графічні залежності функцій, відповідають належності термів показів низька температура, середня температура та висока температура лінгвістичної змінної. Покази відповідно в автоклавів автоклаві [16, 17].

Функція належності при умові «низька температура»:

$$\mu_{T\_низька}(T_{pc}) = \begin{cases} 1, x < 127 \\ \frac{(130 - x)}{3}, 127 \leq x \leq 130 \\ 0, x > 130 \end{cases}$$

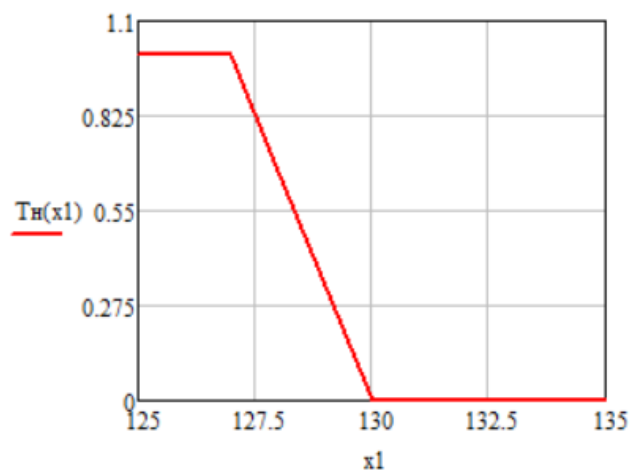


Рисунок 4.6. Функція належності низька температура в автоклаві

Функція належності при умові «середня температура»:

$$\mu_{T\_середня}(T_{pc}) = \begin{cases} 0, x > 125 \\ \frac{(x - 127)}{3}, 127 \leq x < 130 \\ \frac{(133 - x)}{3}, 130 \leq x \leq 133 \end{cases}$$

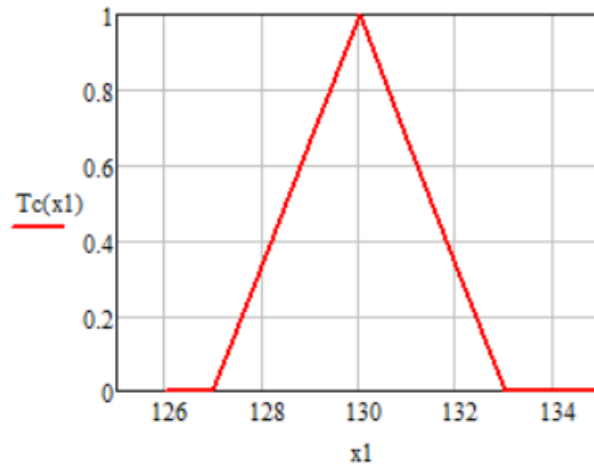


Рисунок 4.7 Функція належності середня температура в автоклаві  
Функція належності при умові «висока температура» [16, 17]:

$$\mu_{T\_Висока}(T_{pc}) = \begin{cases} 0, x \leq 130 \\ \frac{(x - 130)}{3}, 130 < x < 133 \\ 1, x \geq 133 \end{cases}$$

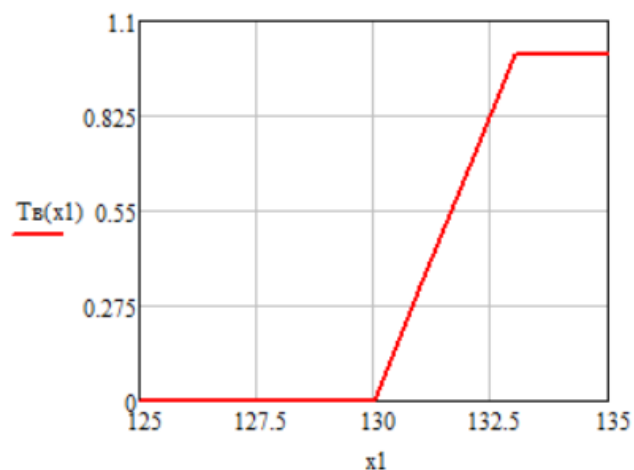


Рисунок 4.8 Функція належності висока температура в автоклаві

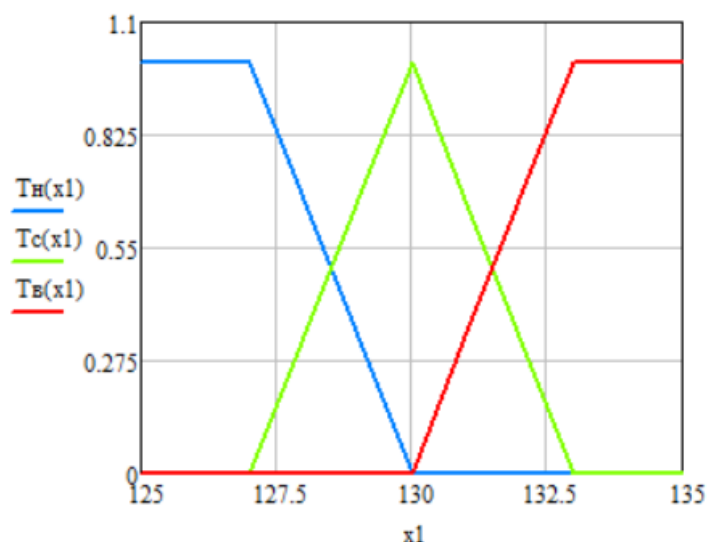


Рисунок 4.9 Належності температури в автоклаві мала, середня та висока

Дослідження правил продукції для нечіткої системи керування автоклавом [18]

Процес фазифікації відповідає за створення нечітких правил керування:

ЯКЩО Температура в автоклаві «низька», ТО Витрата розчину «велика».

ЯКЩО Температура в автоклаві «висока», ТО Витрата розчину «мала».

ЯКЩО Температура в автоклаві «середня», ТО Витрата розчину

«нормальна».

В процесі фазифікації температура в автоклаві 130 °C. Розраховуємо порядок заходу значення температури в конкретний і - й терм,  $\mu(390)_i$ :

$$X := 130 \quad x := 175..185$$

$$n\_м := T_n(X) = 0$$

$$n\_н := T_c(X) = 1$$

$$n\_в := T_b(X) = 0$$

Враховуючи процес заходу в ліві частини правил, будуть застосовані при модифікації нечітких множин відповідно правих частин правил. Дослідимо методику добутку. В представленій методиці значення істини лівої частини правила застосовують як коефіцієнт, що виступає в ролі множника функції належності для змінної в правій частині правил [18].

Якщо перемножити конкретну  $i$ -ту функцію  $F_{ср}$  на конкретний коефіцієнт входу в терм  $\mu(130)_i$ . Подальші етапи іде з урахуванням дії правил, що існують. Відбудеться процес суперпозиції нечітких множин, які отриманні з використанням методу максимуму. Наведено обрахунок дійсного показника витрати силікатного розчину, що співставлене із наведеним показанням температури [18].

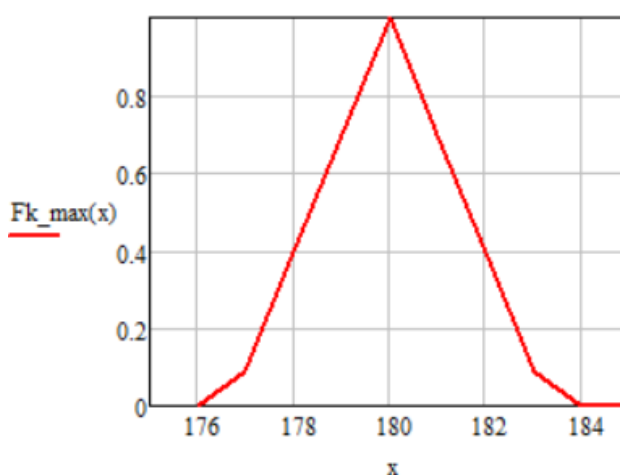
#### Кореговані функції належності методом добутку

$$Fk\_m(x) := F_m(x) \cdot n\_в \quad Fk\_в(x) := F_v(x) \cdot n\_м$$

$$Fk\_н(x) := F_n(x) \cdot n\_н$$

#### Метод максимуму

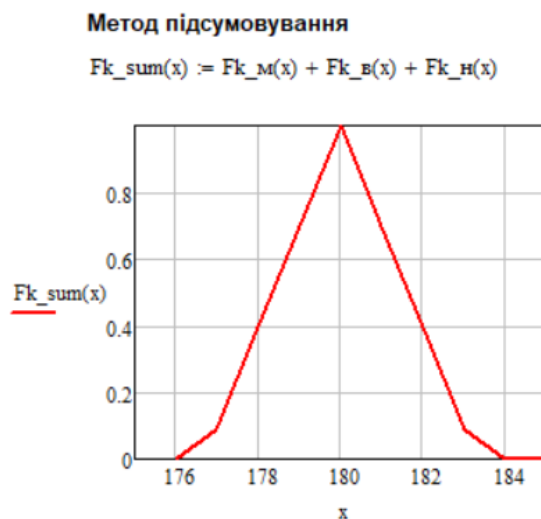
$$Fk\_max(x) := \max(Fk\_m(x), Fk\_в(x), Fk\_н(x))$$



#### Дійсне значення витрати

$$Fd\_max := \frac{\int_{175}^{185} x \cdot Fk\_max(x) dx}{\int_{175}^{185} Fk\_max(x) dx} = 180$$

Рисунок 4.10 Функції належності із застосуванням методу добутку та максимуму



**Дійсне значення витрати**

$$Fd\_sum := \frac{\int_{175}^{185} x \cdot Fk\_sum(x) \, dx}{\int_{175}^{185} Fk\_sum(x) \, dx} = 180$$

Рисунок 4.11 Функція належності із застосуванням методу добутку та підсумування

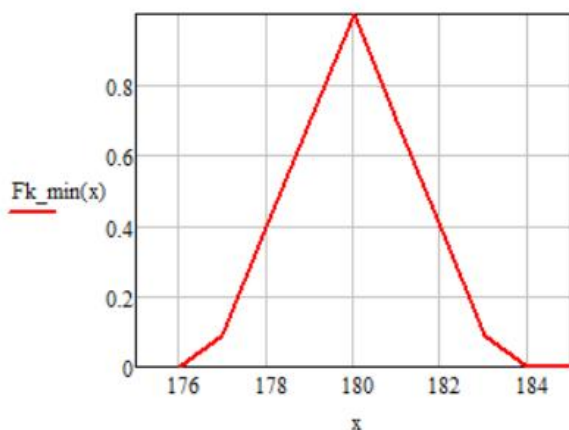
Дослідимо методику по'єднання для суперпозиції нечітких множин та методику мінімуму при модифікації нечітких множин для правил правих частин. Представлено обрахунок істиного значення витрати силікатного розчину, що відповідає вказаному технологічним регламентом значенню температури в автоклаві [18].

### Кореговані функції належності (метод мінімуму)

$$\underline{Fk\_M(x)} := \begin{cases} F_M(x) & \text{if } F_M(x) \leq n\_B \\ n\_B & \text{otherwise} \end{cases} \quad \underline{Fk\_B(x)} := \begin{cases} F_B(x) & \text{if } F_B(x) \leq n\_M \\ n\_M & \text{otherwise} \end{cases} \quad \underline{Fk\_H(x)} := \begin{cases} F_H(x) & \text{if } F_H(x) \leq n\_H \\ n\_H & \text{otherwise} \end{cases}$$

### Метод максимуму

$$Fk\_min(x) := \max(\underline{Fk\_M(x)}, \underline{Fk\_H(x)}, \underline{Fk\_B(x)})$$



### Дійсне значення витрати

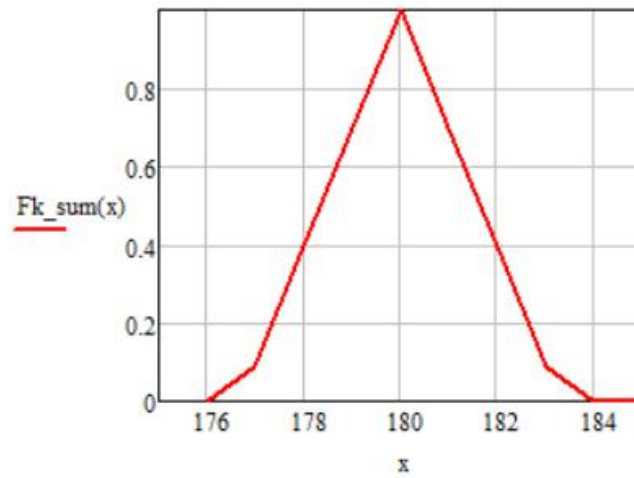
$$Fd\_min := \frac{\int_{175}^{185} x \cdot Fk\_min(x) dx}{\int_{175}^{185} Fk\_min(x) dx} = 180$$

Рисунок 4.12 Функція належності із застосуванням методу максимуму та мінімуму

Проведемо дослідження методики підсумування при суперпозиції нечітких множин та методики мінімізації при модифікованому вигляді правих частин правил. Проведемо обрахунки дійсного значення витрати розчину, що повинно бути співставлено із заданим значенням температури в автоклаві [18].

### Метод підсумування

$$\underline{Fk\_sum(x)} := Fk\_m(x) + Fk\_n(x) + Fk\_v(x)$$



### Дійсне значення витрати

$$\underline{Fd\_min} := \frac{\int_{175}^{185} x \cdot Fk\_min(x) \, dx}{\int_{175}^{185} Fk\_min(x) \, dx} = 180$$

Рисунок 4.13 Функція належності із застосуванням методу підсумування та мінімуму

Подальший крок дослідження – дефазифікації (перехід до числового значення керувальної змінної).

Реалізація нечітких моделі та системи із використанням засобів MatLab [19]

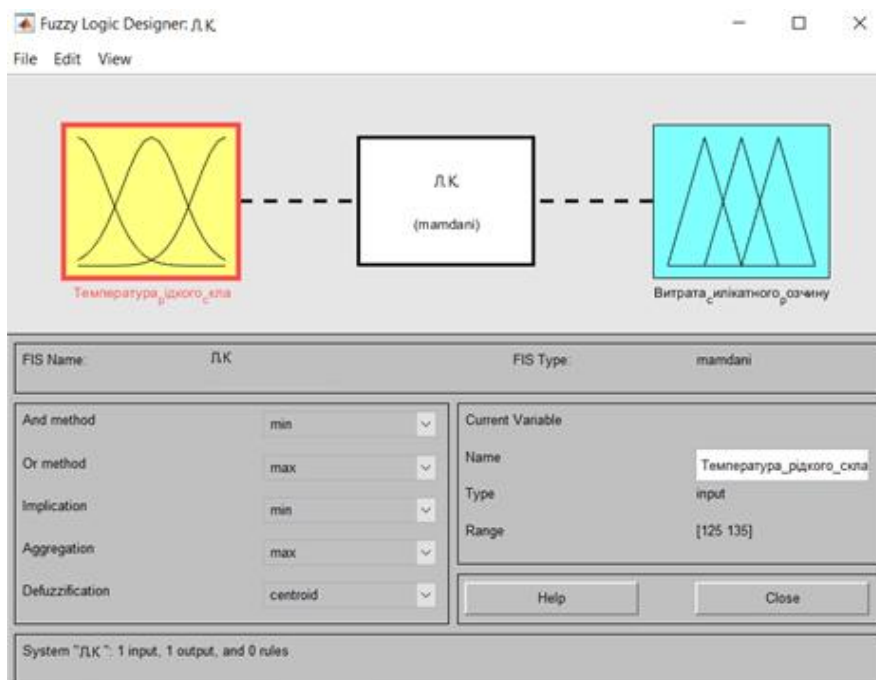


Рисунок 4.14 Схема нечіткої системи керування

Визначаємо терми та відповідні їм функції належності для вхідних та вихідних змінних в системи нечіткого висновку [19]

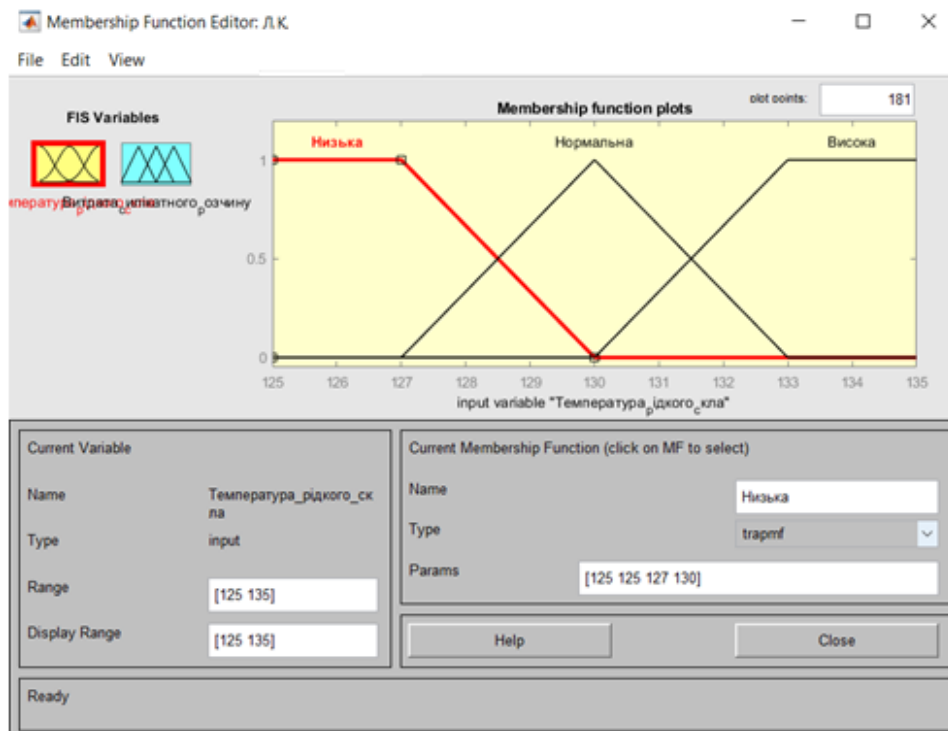


Рисунок 4.15 Функції належності для змінної керування

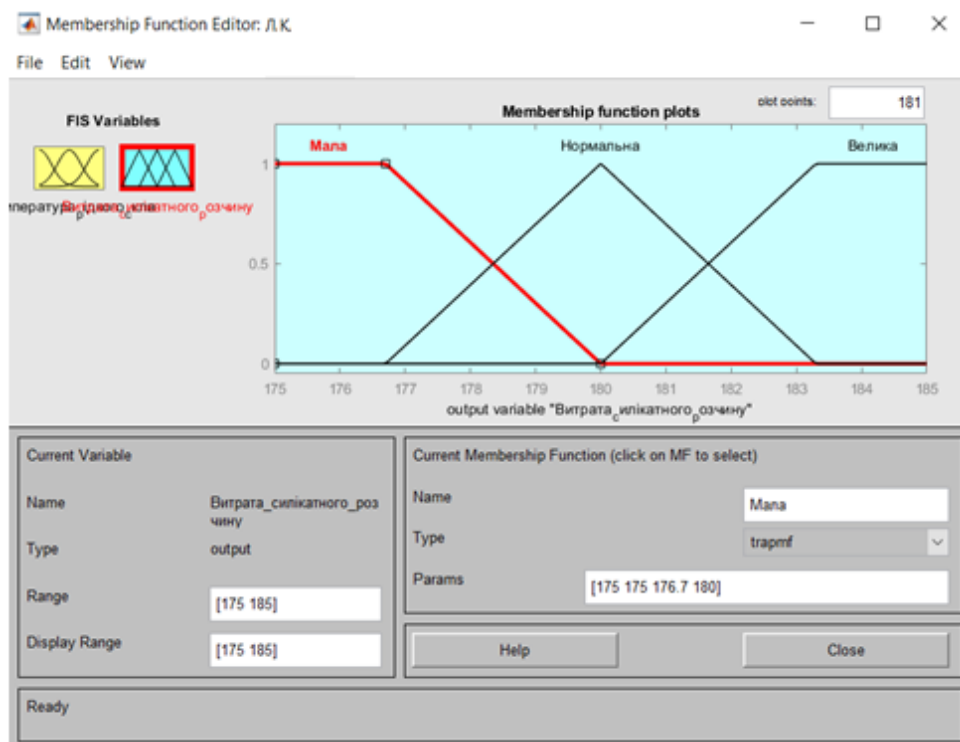


Рисунок 4.16 Функції належності для змінної, що є керованою  
База правил сформовано із використанням редактору правил [19].

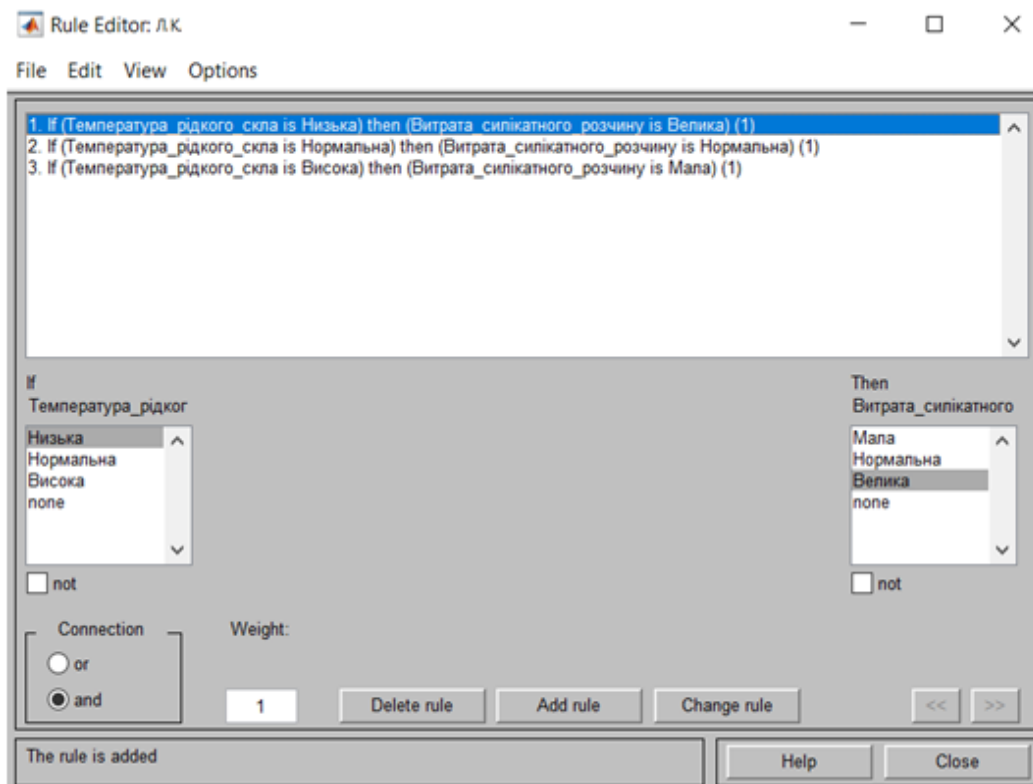


Рисунок 4.17 Редактора правил продукції

Редактора правил після їх визначення для експертної системи, що розробляється [19]

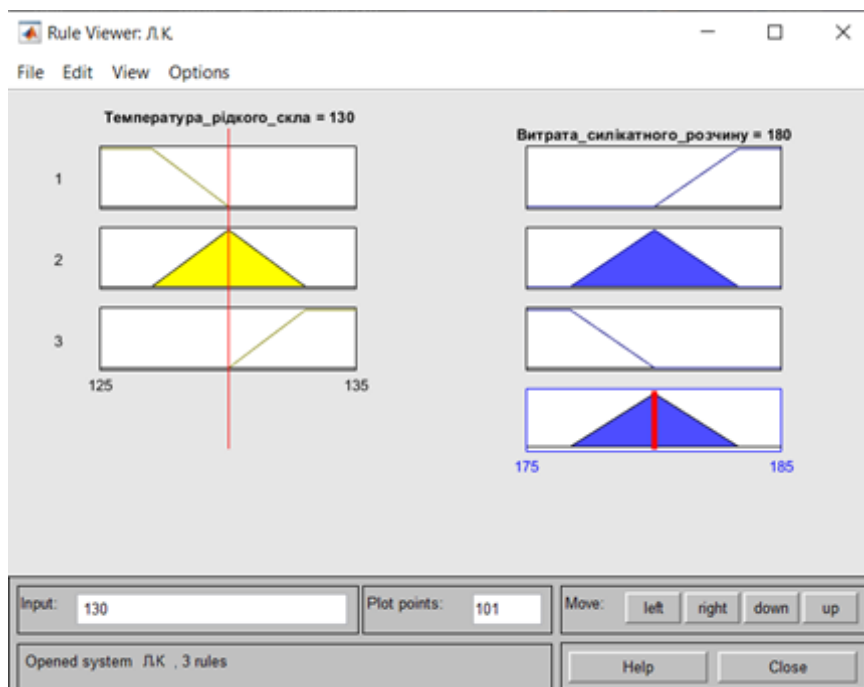


Рисунок 4.18 Правила нечіткого висновку для значень вхідних змінних

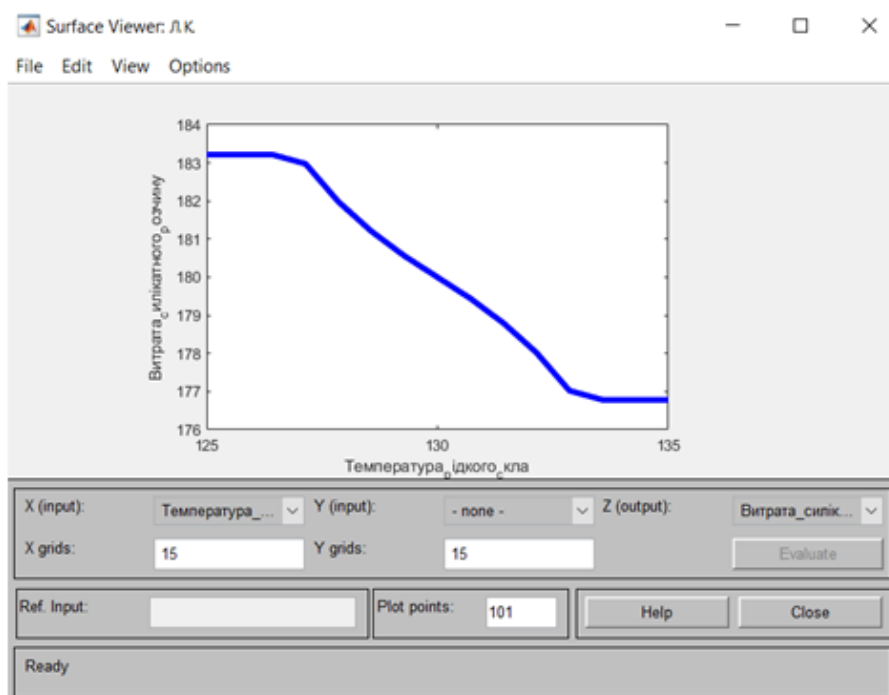


Рисунок 4.19 Поверхня нечіткого висновку

## 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

### 5.1. Поняття стартап-проєкту

Стартапом вважають молоді компанії, створені для розроблення інноваційного продукту або надання нової послуги. Основою стартап-проєктів є використання сучасних підходів та технологій для створення рішень, які усувають недоліки вже наявних конкурентних продуктів [20].

Ідея стартап-проєкту полягає у створенні автоматизації виробництва рідкого скла, що дозволяє об'єднати технічні інновації, економічну доцільність та підхід до управління ризиками. Проєкт передбачає створення автоматизованої установки автоклавного типу з підсистемою керування, яка забезпечить стабільність продукції, зменшення енергетичних витрат та підвищення продуктивності. Запропоноване рішення може бути впроваджене як на існуючих підприємствах, так і як окремий міні-цех для малого та середнього бізнесу [20].

Опис ринку та передумови створення стартапу

Значення рідкого скла на ринку.

Рідке скло (силікат натрію або калію) використовується у багатьох сферах [20]:

- виробництво вогнетривких матеріалів;
- цементні та будівельні суміші;
- деревообробка — антисептики, просочення;
- виготовлення силікатних фарб;
- металургія — формувальні суміші;
- очищення стічних вод;
- підсилення ґрунтів;
- насінний агропротектор.

Попит стабільно зростає, що підтверджується збільшенням застосувань у будівельній галузі та екологічних технологіях [20].

Проблеми традиційних виробництв

Поточні виклики галузі:

- нестабільність якості через ручне регулювання температури й тиску;
- високі енергетичні втрати;
- тривалий цикл виробництва;
- високий рівень аварійності на автоклавних установках;
- відсутність гнучкості при переході між марками рідкого скла;
- низький рівень цифрової інтеграції.

Можливості автоматизації [7, 8, 20]

Автоматизація дозволяє:

- зменшити витрати палива та електроенергії на 12–18%;
- забезпечити стабільну марку продукції;
- скоротити час циклу на 20–30%;
- знизити ризик аварійних ситуацій;
- оптимізувати роботу персоналу;
- впровадити предиктивну аналітику для технічного обслуговування.

Організаційна структура стартапу [20]

Команда:

- технічний директор — 1;
- інженер-автоматик — 2;
- технолог хімік — 1;
- економіст-аналітик — 1;
- оператори — 2.

Етапи реалізації (6–8 місяців):

1. Техніко-економічне обґрунтування.
2. Розробка технологічної і математичної моделі.
3. Проєктування АСУ ТП.
4. Закупівля обладнання.
5. Монтаж та пусконаладження.

6. Валідація якісних параметрів.

7. Комерційний запуск.

Запропонований підхід до стартап-проєкту демонструє високу інноваційну та економічну ефективність. Автоматизація виробництва рідкого скла дозволяє забезпечити [20]:

- стабільну якість продукції,
- значну економію енергії,
- зниження операційних ризиків,
- швидку окупність проєкту,
- підвищення продуктивності та конкурентоспроможності.

Проєкт може бути реалізований як окремий бізнес або модернізація існуючого підприємства. Додатковою перевагою є гнучкість системи, можливість масштабування та інтеграції у будь-які виробничі умови [20].

Економічна ефективність стартапу

## **5.2. Загальні підходи до економічного обґрунтування**

Економічна ефективність стартапу в галузі хімічного виробництва визначається комплексним аналізом капітальних вкладень, операційних витрат, доходу та рентабельності. Для підприємств, що впроваджують автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП), особливе значення має правильна оцінка ефектів від зниження енергоспоживання, стабілізації якості, мінімізації браку, зменшення аварійності та оптимізації чисельності персоналу [20].

В умовах сучасного ринку будівельних матеріалів попит на рідке скло стабільно зростає. Таким чином, інвестиції у високотехнологічну виробничу лінію забезпечують не лише скорочення витрат, а й гарантують стійке положення компанії на ринку протягом найближчих 5–10 років [20].

Аналіз капітальних витрат (CAPEX)

Розрахунок капітальних вкладень проводився з урахуванням середньоринкових цін на обладнання 2024–2025 років. До складу капітальних інвестицій увійшли наступні групи [20]:

#### Технологічне обладнання

1. Автоклав об'ємом 2 м<sup>3</sup> з робочим тиском 12 атм – 30–35 тис. дол.
2. Система подачі сировини:
  - дозатори піску та луку,
  - шнекові живильники,
  - комплект запірної арматури — 7–8 тис. дол.
3. Система фільтрації та коригування складу — 4–6 тис. дол.
4. Ємнісний парк (резервуари для готового продукту) — 4–7 тис. дол.
5. Насоси, трубопроводи — 5–9 тис. дол.

#### Система автоматизації

- Промисловий контролер Siemens S7-1200/1500 — 1,8–3,5 тис. дол.
- Панель оператора HMI – 800–1500 дол.
- Датчики (тиску, температури, рівня, густини, витрати) – 4–6 тис. дол.
- Приводи, частотні регулятори, виконавчі механізми — 3–5 тис. дол.
- SCADA-система та сервер збору даних — 1–3 тис. дол.

Сумарно на систему автоматизації: 12–18 тис. дол.

#### Монтаж, проектування, пусконаладження [5, 20]

- електромонтаж — 2,5–3,5 тис. дол.;
- прокладання трубопроводів — 3–4 тис. дол.;
- налагодження АСУ ТП — 2 тис. дол.;
- розробка технічного проєкту — 1,5–2 тис. дол.

#### Операційні витрати (ОРЕХ)

Операційні витрати – це витрати на роботу підприємства протягом року.

#### Витрати на сировину

- Пісок кварцовий: 70–100 \$/т

- Каустична сода: 360–450 \$/т
- Вода технічна: 0,5–1,2 \$/м³

На 1 тону рідкого скла у середньому потрібно:

- 0,35 т піску,
- 0,25 т луґу,
- 0,4 м³ води.

Собівартість сировинного набору:  $\approx 60\text{--}80$  \$/т.

Енергетичні витрати

Нагрів автоклава — основна стаття витрат.

Для 1 т рідкого скла:

- 220–280 кВт·год електроенергії або
- еквівалент пари/газу.

Енергоспоживання автоматизованої лінії [3, 20]:

- 11 000–15 000 \$/рік.

Заробітна плата персоналу

У штаті — 5–6 людей:

- оператори – 2,
- інженер АСУ ТП – 1,
- технолог – 1,
- завідувач виробництвом – 1.

Річна зарплата: 35–45 тис. дол.

Обслуговування і ремонт

- технічне обслуговування насосів, датчиків, запірної арматури;
- калібрування вимірювальних приладів;
- заміна теплоізоляції.

У середньому: 4–6 тис. дол./рік.

Розширений аналіз економічної віддачі від автоматизації [20]

Економія за рахунок зниження енергоспоживання

МРС-керування дозволяє:

- зменшити перерегулювання,
- скоротити пікові навантаження,
- оптимізувати час нагріву.

Економія: 10–18 %.

При річних витратах 12 000 дол.

Економія становить:

→ 1200–2160 дол./рік

Зменшення браку продукції

Причини браку до автоматизації:

- нерівномірний нагрів,
- помилки у дозуванні,
- людський фактор.

Зниження браку з 6–8 % до 1–2 % дає:

→ економію 10 000–13 000 \$/рік

Оптимізація штату

Автоматизація дозволяє скоротити змінну робочу групу на 1–2 людей [20].

Економія на зарплаті:

→ 6000–12 000 \$/рік

Виробнича потужність

Розрахунок аналогічний попередньому:

$2160 \text{ т/рік} \times 200 \text{ \$/т} = 432\,000 \text{ \$/рік}$  доходу.

Повна рентабельність

Операційний прибуток (після покриття OPEX):

332 500–345 000 \$/рік

Строк окупності

З урахуванням ефектів від автоматизації:

$69\,500/340\,000 \approx 0.20 \text{ — } 0.25 \text{ року}$   
 $69\,500 / 340\,000 \approx 0.20 \text{ — } 0.25 \text{ року}$

Тобто 2–3 місяці — дуже висока інвестиційна ефективність [20].

Ризики стартапу та методи їх мінімізації

### 9.1 Загальна класифікація ризиків

Ризики стартапу поділяються на:

1. технічні, технологічні;
2. економічні;
3. ринкові;
4. операційні;
5. екологічні та безпекові;
6. правові та регуляторні;
7. ризики управління персоналом;
8. ризики постачання сировини;
9. ризики кібербезпеки (через цифровізацію виробництва).

Технічні ризики та мінімізація

Відмова обладнання

Причини:

- корозія металів,
- порушення роботи запірної арматури,
- старіння датчиків.

Заходи:

- дублювання ключових датчиків (t, p, рівень),
- впровадження Predictive Maintenance,
- регулярна ультразвукова діагностика стінок автоклава,
- резервні насоси.

Перегрів реакційної зони

Наслідки: ризик підвищення тиску, аварія.

Захист:

- трирівневий регулятор температури (PID+MPC+аварійний обмежувач),
- автоматичний скид тиску,
- система аварійного вимкнення (ESD).

Помилки у вимірюванні

Датчики рН, густини, рівня можуть давати похибку при забрудненні.

Мінімізація:

- автоматичне промивання,
- регулярна калібровка,
- вбудована діагностика HART/IO-Link.

Економічні ризики

Коливання цін на сировину

Пісок та луг можуть змінюватись у вартості через логістику та енергоринок [20].

Методи контролю:

- довгострокові контракти,
- диверсифікація постачальників,
- збільшення складських запасів.

Інфляційні та валютні ризики

Оскільки обладнання імпортується, виникає залежність від курсу гривні.

Рішення:

- хеджування валютних ризиків,
- придбання обладнання поетапно,
- використання місцевих аналогів.

Ринкові ризики

Зміна попиту

Попит на рідке скло корелює зі станом будівельної галузі.

Стратегія:

- орієнтація на водоочистку та сільське господарство,

- виробництво силікатних клеїв.

Екологічні ризики

Розлив лугу

Луг є небезпечним хімічним реагентом.

Заходи:

- ванни-збірники,
- датчики протікання,
- антихімічне покриття підлоги.

Викиди та стоки

Реакція виділяє тепло та пар з невеликою кількістю домішок.

Контроль:

- нейтралізація відходів,
- очищення фільтрами,
- контроль рН у стічній воді.

Кіберризики

Оскільки виробництво має SCADA, існує ризик атак.

Захист:

- VPN-доступ,
- обмеження прав,
- журналювання операцій,
- захист промислових мереж.

Прогноз розвитку стартапу

Методологія прогнозування

Прогноз розробляється на основі:

- аналізу ринку,
- технологічних трендів,
- потенціалу модернізації виробництва,
- можливості масштабування.

Перспективи оцінюються на 3, 5 і 10 років.

Прогноз на 3 роки

1. Збільшення виробничої потужності до 4000–5000 т/рік.
2. Розширення лінійки продукції:
  - силікат калію,
  - високомодульні розчини,
  - модифікатори бетону.
3. Отримання міжнародних сертифікацій (ISO 9001, ISO 14001).
4. Підключення модулю AI-аналітики до SCADA.
5. Впровадження роботизованої системи розливу і фасування.

Прогноз на 5 років [2, 20]

1. Створення міні-заводів контейнерного типу для продажу клієнтам.
2. Вихід на ринок ЄС, Близького Сходу та Азії.
3. Зниження собівартості виробництва на 20–25 % завдяки оптимізації технологічного циклу.
4. Повна цифровізація виробництва — створення ERP+MES платформи.
5. Розробка унікальних силікатних композицій під специфічні галузі.

Прогноз на 10 років

1. Побудова інноваційного технопарку з R&D центром.
2. Впровадження автономних виробничих модулів з AI-керуванням.
3. Вихід компанії на IPO або залучення стратегічного інвестора.
4. Розширення товарної лінійки на силікатні гелі, сорбенти та каталізатори.
5. Впровадження технологій зеленої енергетики (сонячні колектори, рекуперація тепла).

Глобальний ринок: розміри, темпи зростання, ключові драйвери [20]

- Глобальний ринок Sodium Silicate (рідке/тверде «скло») оцінюється у приблизно USD 8 млрд у 2023 році, з прогнозом росту до  $\approx$  USD 12.7 млрд до 2033 року. [alliedmarketresearch.com+1](https://www.alliedmarketresearch.com/sodium-silicate)

- Частина ринку, що стосується рідких розчинів (liquid sodium silicate, LSS), показує помірне, але стабільне зростання: за деякими оцінками, ринок LSS виріс у 2023 році та має продовжити зростати до 2030 року з темпом ~3–4% на рік. [24chemicalresearch.com+1](#)
- Інші джерела дають трохи більші прогнози: ринок “Liquid Sodium Silicate” оцінюється на ~USD 12.45 млрд у 2025 році із прогнозом ~USD 21.5 млрд до 2032 року (CAGR ~6.45 %). [Future Market Report](#)

Висновок: ринок рідкого скла / силікатів натрію знаходиться у фазі стабільного зростання; попит збільшується за рахунок кількох секторів — будівництва, матеріалів для вогнетривкої промисловості, очищення води, ливарного виробництва, виготовлення клеїв, герметиків, фарб тощо [3, 20].

Основні драйвери росту:

- Розвиток будівництва та інфраструктури (цемент, бетон, фундаментні роботи, гідроізоляція, штукатурки). [GlobeNewswire+2atk-ua.com+2](#)
- Використання у вогнетривких, тепло- і вологоізоляційних матеріалах, фарбах, покриттях. [atk-ua.com+2IUA+2](#)
- Використання як зв’язуючого / сполучного агента — у ливарному виробництві, виробництві целюлозно-паперових виробів, у хімічній промисловості. [pdf.marketpublishers.com+2atk-ua.com+2](#)
- Зростання попиту на “зелені” або екологічно більш прийнятні матеріали — силікати часто розглядають як альтернативу більш “тяжким” хімічним сполучним. [Future Market Report+2atk-ua.com+2](#)

### 5.3. Структура споживання та сегменти ринку

Ринок силікатів / рідкого скла можна розбити на декілька ключових сегментів за кінцевим застосуванням [20]:

| Сегмент / галузь                                                                                                                                                                                                                                 | Основні застосування / переваги                                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Будівництво / цемент / бетон / гідроізоляція / штукатурки / покриття                                                                                                                                                                             | Додавання до бетонів/штукатурок для підвищення міцності, волого- та вогнетривкості. <a href="#">Українська «Преса» Онлайн+1</a> |
| Ливарне виробництво, металургія, вогнетривкі матеріали                                                                                                                                                                                           | Як сполучна речовина при формуванні форм, стійкість до високої температури. <a href="#">IUA+1</a>                               |
| Клеї, герметики, покриття, фарби                                                                                                                                                                                                                 | Здатність діяти як в'язке, адгезійне, ущільнювальне, водостійке, вогнетривке речовина. <a href="#">atk-ua.com+2dim.vn.ua+2</a>  |
| Очищення води, обробка стоків, екологічні технології                                                                                                                                                                                             | Використання як флокулянта, засіб для обробки та очищення води. <a href="#">pdf.marketpublishers.com+1</a>                      |
| Паперова / целюлозно-паперова промисловість, текстиль, інші хімічні галузі                                                                                                                                                                       | Використання як зв'язуюче, добавка або допоміжна речовина. <a href="#">pdf.marketpublishers.com+1</a>                           |
| Тенденція: сегмент будівництва та будматеріалів, а також клеїв/герметиків — найшвидше зростаючі. Попит зростає у країнах з інтенсивним будівництвом та індустріалізацією, особливо в Азії. <a href="#">Future Market Report+2GlobeNewswire+2</a> |                                                                                                                                 |
| Регіональний розподіл та зони зростання [20]                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                 |

- Найшвидше зростання на ринку рідкого силікату прогнозується в регіоні Азія-Пасифік, що зумовлено активним розвитку інфраструктури, урбанізацією та масштабним будівництвом. [Future Market Report+1](#)
- Серед країн-лідерів — China, яка має значну частку у світовому виробництві та споживанні силікатів. [Future Market Report+1](#)
- Разом із цим, ринки Європи та Північної Америки мають стабільний попит, зокрема в сегментах екологічних матеріалів, вогнетривів, обробки води, ливарного виробництва. [pdf.marketpublishers.com+2atk-ua.com+2](#)

Висновок: для стартапу, розташованого в Європі чи Східній Європі, є можливість орієнтації як на внутрішній ринок, так і на експорт у ЄС, особливо якщо пропонувати продукцію з доданою вартістю (автоматизоване виробництво, стабільність якості, екологічність) [20].

Конкурентне середовище — існуючі виробники та бар'єри входу [20]

- На світовому ринку серед великих виробників/постачальників силікатів називають такі компанії, як BASF, Evonik, PQ Corporation, Tokuyama Corporation, OxyChem, а також низку інших регіональних та локальних гравців. [pdf.marketpublishers.com](https://pdf.marketpublishers.com)+2[pdf.marketpublishers.com](https://pdf.marketpublishers.com)+2
- Основні бар'єри для входу на ринок:
  1. Необхідність значних капітальних інвестицій — обладнання, автоклави, системи контролю, забезпечення безпеки, сертифікації.
  2. Висока конкуренція з боку великих виробників, які вже мають налагоджені логістичні мережі, клієнтів і стандартизовану якість.
  3. Регуляторні та екологічні вимоги — безпека, утилізація відходів, контроль хімічних речовин, сертифікація.
  4. Залежність від сировини та енергоресурсів — стабільність постачання кварцу, соди, енергії; логістичні витрати та коливання цін.

Для стартапу, який пропонує інноваційне, автоматизоване виробництво із контролем якості — це може бути конкурентною перевагою. Однак важливо мати чітке конкурентне позиціонування і план виходу на ринок.

Стан ринку в Україні / Східній Європі — виклики та можливості

- В Україні вже існують виробники рідкого скла, наприклад Сувенір, які постачають рідке скло на ринок. [suvenir.zp.ua](https://suvenir.zp.ua)+1
- Водночас, через економічну нестабільність, наслідки війни, перебої з постачанням сировини та зниження попиту на деякі галузі (виробництво скла, вікон, світлопрозорих конструкцій) — загальний ринок виробничого скла і суміжних матеріалів зазнав сильного удару. [ХНУ ім. С. Кузнеця](#)+1

- Це створює нішу: потреба у локальному, надійному, гнучкому виробництві рідкого скла — особливо з автоматизацією, щоб мінімізувати ризики дефіциту, логістики, імпортозалежності.

Можливості для вашого стартапу в Україні / Східній Європі [20]:

- Заміщення імпорتنих поставок за рахунок локального виробництва, з більш привабливою логістикою, гнучкістю, контролем якості.
- Орієнтація на сегменти зростання: водоочищення, гідроізоляція, ремонт/реконструкція, виготовлення будівельних та вогнетривких матеріалів, які можуть бути актуальними під час відбудови після війни.
- Можливість пропонувати продукт з підвищеною доданою вартістю — автоматизоване виробництво, стабільна марка, сертифікація, екологічність.

Ризики та виклики на ринку — що потрібно врахувати [20]

- Цінова конкуренція: великі гравці з економією масштабу можуть пропонувати низьку ціну — складно конкурувати на ціновому полі без значної оптимізації витрат.
- Коливання цін на сировину та енергоносії — що особливо актуально для регіонів із нестабільною економікою / інфляцією.
- Залежність від галузей-споживачів: ринок рідкого скла значною мірою залежить від стану будівництва, металургії, промисловості; спад у цих галузях означає зниження попиту.
- Регуляторні, екологічні та логістичні ризики — вимагають хорошої організації, контролю якості, безпеки виробництва, транспортування.
- Необхідність маркетингу та побудови довіри — новий гравець має довести, що його продукт не поступається імпортним аналогам, особливо якщо буде виходити на експорт.

Висновки: чи є ринок для вашого стартапу — і де найкраще почати [20]

- Ринок рідкого скла — глобально і регіонально — показує стабільне зростання, з кількома сильними драйверами (будівництво, екологічні

рішення, потреба в матеріалах з вогнетривкими/гідроізоляційними властивостями, ливарна промисловість).

- Для стартапу з автоматизованим виробництвом є незайнята ніша — особливо якщо орієнтуватися на ринки, де існує дефіцит або нестабільність поставок (як-от Україна/Східна Європа), або на нішеві сегменти (вогнетривкі матеріали, спеціалізовані будівельні суміші, очищення/екологія, малі партії, кастомні рецептури).
- Ключовими конкурентними перевагами можуть бути: стабільна якість, гнучкість, автоматизація, енерго- та ресурсоефективність, локальне виробництво, менші логістичні витрати, можливість кастомізації під клієнта.
- Водночас потрібно дуже уважно працювати з ризиками — сировина, енергоресурси, сертифікація, конкуренція, регуляторика, побудова каналів збуту та маркетингу.

## ВИСНОВКИ

У процесі виконання дисертації було проведено комплексне дослідження технології виробництва рідкого скла та розроблено систему автоматизації установки, яка забезпечує стабільну якість кінцевого продукту, підвищення ефективності виробництва і безпеку технологічного процесу. Було проведено аналіз сучасні методів виробництва рідкого скла, визначено основні технологічні параметри процесу, такі як температура, тиск, витрата сировини, кількість пального. Встановлено, в результаті проведеного аналізу, які є найважливішими параметрами, що впливають на якість виробництва, це температура в автоклаві, тиск та витрата вхідного розчину. Досліджено послідовність основних етапів виробництва. Проведено опис технологічної схеми установки виробництва рідкого скла, обґрунтовано вибір технологічного обладнання та допоміжних систем.

Розроблено структурну схему автоматичного керування установкою. Обґрунтовано вибір засобів вимірювання, регулювання та сигналізації. Запропоновано математична модель автоклава, нечітка система керування температурою в апараті, представлено переваги по відношенню до системи із ПД-регулятором.

Розроблена система автоматизації процесу виробництва рідкого скла є технічно обґрунтованою, економічно доцільною і забезпечує підвищення ефективності та надійності роботи технологічного комплексу

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреев, А. І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв. – Київ: Техніка, 2019. – 368 с.
2. Герасимов, Л. І. Процеси та апарати хімічних виробництв. – Харків: НТУ «ХП», 2021. – 524 с.
3. Дьяків, І. Б. Автоматизація технологічних процесів: підручник. – Київ: Ліра-К, 2017. – 406 с.
4. Похил, В. О., Лебідь Ю. С. Автоматизація технологічних процесів у промисловості: навчальний посібник. – Дніпро: Пороги, 2016. – 289 с.
5. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.інтегр. технології / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КП», 2008. – 236 с. : іл. – Біблігр.: с. 230-231. – 200.
6. Лукінюк М. В. Технологічні вимірювання та прилади [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КП», 2007. – 436 с. : іл. – Біблігр.: с. 427-428. – 200 пр. – ISBN 978-966-622-247-6.
7. Perry, R. H. Perry's Chemical Engineers' Handbook. – 9th ed. – McGraw-Hill, 2018. – 2500 p.
8. Пчелін, В. В. Датчики та вимірювальні перетворювачі: навчальний посібник. – Київ: НТУУ «КП», 2019. – 348 с.
9. Бойчук, М. В. Теорія автоматичного керування. – Львів: Новий Світ, 2020. – 452 с.
10. Власенко, О. Л., Кузик В. П. Основи теорії керування: навчальний посібник. – Київ: КНУТД, 2018. – 310 с.
11. Сидоренко, М. Г. Математичне моделювання систем управління. – Київ: Кондор, 2022. – 312 с.

12. Bequette, B. W. Process Control: Modeling, Design and Simulation. – Prentice Hall, 2003. – 742 p.
13. Клименко, О. М. Системи автоматичного регулювання: теорія та застосування. – Одеса: Астропринт, 2019. – 384 с.
14. Ярушевський, М. І. Системи керування технологічними процесами. – Дніпро: НГУ, 2018. – 336 с.
15. Ковальчук, В. С. Моделювання динамічних систем у MATLAB/Simulink. – Київ: КМУ, 2020. – 295 с.
16. Åström, K. J., Murray, R. M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. – Princeton University Press, 2008. – 397 p.
17. Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A. Process Dynamics and Control. – Wiley, 2016. – 512 p.
18. Emerson Process Management. DeltaV Control System Product Data Sheet. – 2021.
19. MathWorks. MATLAB & Simulink Documentation: Control System Toolbox, System Identification Toolbox, Simulink Control Design. – 2023.
20. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : «КПІ ім Ігоря Сікорського», 2016. – 28 с