

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 очищення олив

Виконав: студент 2 курсу, групи ЛК-41мп
(шифр групи)

Чумак Валерій Олександрович
(прізвище, ім'я, по-батькові) _____ (підпис)

Керівник ас. Москаленко М.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**

Чумак Валерій Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Автоматизація процесу очищення олив

керівник проекту _____
ас. Москаленко М.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 очищення олив _____

4. Вихідні дані: Схема автоматизації; система керування яка має забезпечувати перерегулювання не більше 15%, час перехідного процесу не більше заданим регламентом меж; параметри які підлягають керуванню: температура при виході з з трубчастой печі, витата пального, витрата речовини на вході печі

5. Перелік завдань, що потребують розробки: Дослідити процес очищення олив; розробка математичної моделі трубчастой печі, як технологічного об'єкту керування; спроектувати та дослідити систему керування піччю; розробка стартап проекту.

6. Орієнтовний перелік графічного(ілюстративного) матеріалу Графічні зображення об'єкту керування; схема процесу очищення олив; перехідні харак-

теристики об'єкту; зображення розробленої систем керування; графіки функцій, 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	Аналіз нечіткої системи керування		
5	Проектування схеми автоматизації		
6	Створення стартап проекту		

Студент _____

Валерій ЧУМАК
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

Максим МОСКАЛЕНКО

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація записку об'ємом 75 сторінок, 48 рисунків, 1 креслення і 23 літературних джерел.

Основною метою дисертації є розробка системи автоматичного контролю хіміко технологічного процесу очищення масел, для забезпечення мінімізації втручання людини у виробничий процес, 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 технологічної схеми є трубчаста піч, для якої розроблені та досліджені математична модель, що предствляє собою тепловий баланс, побудовано статичні та динамічні характеристики різних режимів роботи.

Проведено синтез системи керування з аналоговим ПІД регулятором та нечіткої системи керування, що ґрунтується на базі правил. Представлено повний процес дослідження та порівняльний аналіз роботи розроблених систем керування піччю.

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

Ключові слова: трубчаста піч, об'єкт керування, схема автоматизації, математична модель, тепловий баланс, передатна функція, перехідна характеристика, канал керування, нечіткий регулятор.

ABSTRACT

Master's thesis note with a volume of 75 pages, 48 figures, 1 drawing and 23 literary sources.

The main goal of the dissertation is to develop a system for automatic control of the chemical and technological process of oil purification, to ensure the minimization of human intervention in the production process, 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 of the technological scheme is a tubular furnace, for which a mathematical model representing a heat balance has been developed and studied, static and dynamic characteristics of various operating modes have been constructed.

A synthesis of a control system with an analog PID regulator and a fuzzy control system based on rules has been carried out. A full research process and comparative analysis of the operation of the developed furnace control systems have been presented.

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: tube furnace, control object, automation scheme, mathematical model, heat balance, transfer function, transient response, control channel, fuzzy controller.

ВСТУП.....	8
1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ УСТАНОВКИ КОНТАКТНОГО ДООЧИЩЕННЯ ОЛИВ	ПОМИЛКА! ЗАКЛАДКУ НЕ ВИЗНАЧЕНО.
1.1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ.....	
.....	ПОМИЛКА! ЗАКЛАДКУ НЕ ВИЗНАЧЕНО.
1.2 АНАЛІЗ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА.....	16
1.3 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ НА АВТОМАТИЗАЦІЮ.....	17
2 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ УСТАНОВКИ КОНТАКТНОГО ДООЧИЩЕННЯ ОЛИВ ВІДБІЛЮВАЛЬНИМИ ГЛИНАМИ.....	18
2.1 ОПИС СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ УСТАНОВКИ КОНТАКТНОГО ДООЧИЩЕННЯ ОЛИВ ВІДБІЛЮВАЛЬНИМИ ГЛИНАМИ.....	18
2.2 SCADA-система технологічного процесу установки контактного доочищення оливи відбілювальними глинами.....	23
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ	27
3.1 СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНА СХЕМА ТРУБЧАСТОЇ ПЕЧІ.....	27
3.2 МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИЧНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ТРУБЧАСТОЇ ПЕЧІ.....	29
3.3 МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ТРУБЧАСТОЇ ПЕЧІ.....	34
4 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	40
4.1 РОЗРАХУНОК АНАЛОГОВОГО РЕГУЛЯТОРА.....	40
4.2 СИНТЕЗ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ.....	42
4.3 ФОРМУВАННЯ НЕЧІТКИХ ПРАВИЛ КЕРУВАННЯ.....	50
5. СТАРТАП ПРОЕКТ.....	57
5.1 МЕТА СТАРТАПУ.....	57
5.2 БІЗНЕС-МОДЕЛЬ.....	59
5.3 ЛОГІЧНА АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ.....	63

ВИСНОВОК.....	72
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	74

ВСТУП

Сучасна промислова обробка мастильних матеріалів, зокрема олив, є важливим етапом забезпечення їх високої якості та експлуатаційних властивостей. Процес очищення олив спрямований на видалення механічних домішок, води, продуктів окислення та інших сторонніх компонентів, що погіршують їх характеристики та скорочують термін служби обладнання. Ефективність очищення залежить не лише від вибраних технологічних методів, а й від точності підтримання режимів процесу, що забезпечується сучасними системами автоматизації [1].

Процес очищення олив зазвичай включає кілька основних секцій: контактування, фільтрування, іноді доповнюваних секціями дегазації та адсорбції [1].

Секція контактування призначена для ефективного змішування вихідного продукту з реагентами або інгібіторами окислення, а також для термічної обробки, що сприяє розділенню домішок і покращує подальшу фільтрацію. Основними апаратами цієї секції є [2]:

- Холодний змішувач – використовується для попереднього змішування оливи з очищувальними агентами при низьких температурах, що дозволяє зменшити утворення осаду та запобігти термічному руйнуванню компонентів мастила.
- Трубочаста піч – забезпечує нагрів оливи до оптимальної температури для активації хімічних процесів очищення та підвищення в'язкості для полегшення видалення домішок.
- Відпарена колона – призначена для видалення летких домішок та води шляхом часткового випаровування, що покращує ефективність подальшої фільтрації та стабілізує склад продукту.

Секція контактування забезпечує не лише підготовку оливи до наступних етапів очищення, а й оптимальні умови для хімічного і термічного впливу на забруднення [1].

Фільтрування є ключовим етапом очищення, який забезпечує видалення механічних та колоїдних домішок із оливи. Ефективність цієї секції визначає чистоту кінцевого продукту і його відповідність стандартам якості. Основними апаратами секції фільтрування є [2]:

- Гарячий змішувач – дозволяє підтримувати однорідність оливи та реагентів під час фільтрувального процесу, запобігаючи осіданню твердих частинок і забезпечуючи рівномірне проходження через фільтрувальні елементи.
- Дискові фільтри – використовуються для тонкого механічного очищення оливи від твердих включень. Завдяки високій поверхні фільтрувального елемента забезпечується ефективне відділення осаду при мінімальних витратах енергії.
- Рамні фільтри – застосовуються для грубого очищення та видалення великих частинок. Вони відзначаються простотою конструкції та надійністю в умовах промислової експлуатації.

Фільтрувальна секція часто інтегрується з системами підігріву та циркуляції оливи, що підвищує ефективність видалення забруднень і запобігає засміченню апаратів.

Актуальність автоматизації процесу

У сучасних промислових умовах ручне регулювання температури, тиску та витрати оливи є недостатньо точним і не забезпечує стабільної якості продукту. Автоматизація процесу очищення олив дозволяє [1]:

- Підтримувати оптимальні параметри нагрівання та змішування у секціях контактування;
- Забезпечувати постійну швидкість проходження оливи через фільтри та рівномірність фільтрування;
- Контролювати рівень забруднення та автоматично коригувати режими роботи апаратів;

- Зменшувати втрати продукту та енергії, підвищувати безпеку персоналу.

Впровадження систем PID-регуляторів, SCADA та сучасних стратегій керування, включаючи MPC (Model Predictive Control), дозволяє інтегрувати всі секції технологічного процесу в єдину систему управління, оптимізувати витрати реагентів та енергії, а також забезпечити високий рівень стабільності та надійності виробництва [1].

Мета та завдання дослідження

Метою магістерської дисертації є розробка та дослідження автоматизованої системи керування процесом очищення олив із врахуванням особливостей контактування та фільтрування. Для досягнення мети передбачено [2]:

1. Аналіз технологічних процесів та апаратів секцій контактування і фільтрування.
2. Розробка математичної моделі процесу очищення олив, включно з тепловими та гідродинамічними параметрами.
3. Синтез системи автоматичного керування на основі ПД-регуляторів та/або MPC для забезпечення стабільної роботи процесу.
4. Моделювання процесу в MATLAB/Simulink та аналіз перехідних процесів.
5. Розробка рекомендацій щодо оптимізації параметрів технологічного процесу та підвищення ефективності очищення.

1. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ УСТАНОВКИ КОНТАКТНОГО ДООЧИЩЕННЯ ОЛИВ

1.1. Загальна характеристика технологічного процесу

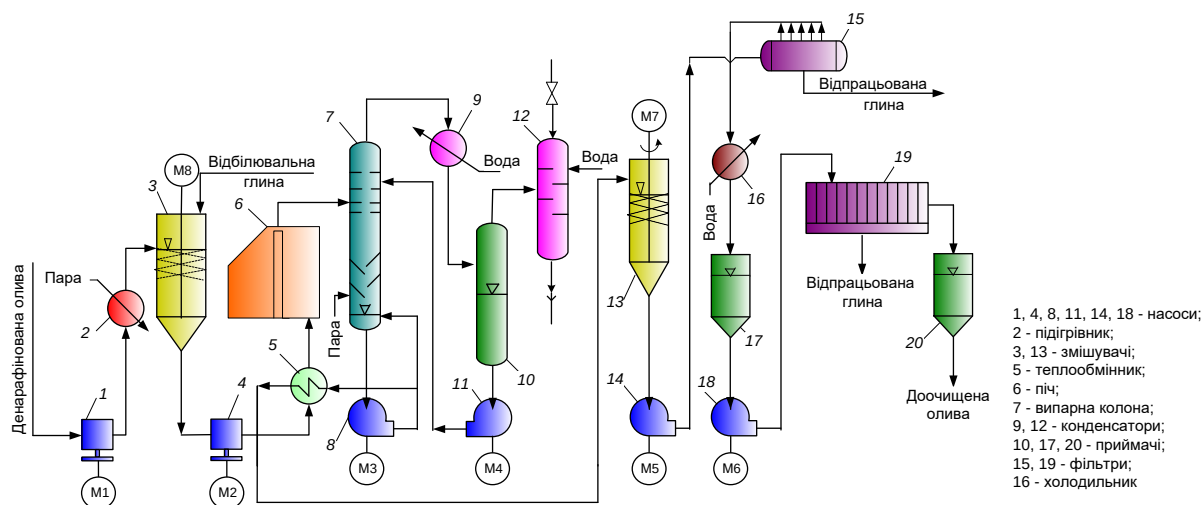


Рисунок 1 - Процес контактного доочищення олив відбілювальними глинами

Технологічний режим установки:

Температура, °C:

суспензії в холодному змішувачі.....	70-80
суспензії на виході зі змішувача печі.....	130-220
у дискових фільтрах.....	130-170
у рамних фільтрах.....	70-110

Тиск, МПа:

у дискових фільтрах.....	0,40
у рамних фільтрах.....	0,35

Витрати глини (неактивованої), % (масова частка).....5-10

Контактне доочищення олив відбілювальними глинами є одним із основних методів підвищення кольорових та фізико-хімічних характеристик продукту, видалення залишкових пігментів, продуктів окислення та дрібних механічних домішок. Процес заснований на абсорбції домішок на поверхні високопористих відбілювальних глин з одночасним підігрівом оливи до оптимальної температури, що підвищує її в'язкість і зменшує вміст летких домішок [3].

Для умовного промислового масштабу передбачається установка, що включає наступні основні секції [1, 3]:

1. Попереднє підігрівання оливи;
2. Контактне змішування з відбілювальною глиною;
3. Відділення глини та механічних домішок через фільтри;
4. Додаткове доочищення та контроль параметрів продукту.

Установки такого типу потребують інтегрованих систем автоматичного керування, що забезпечують стабільність технологічних режимів та зменшують людський фактор.

Секція попереднього підігрівання оливи

Основне призначення

Підігрівання оливи перед змішуванням з відбілювальною глиною дозволяє:

- знизити в'язкість продукту для полегшення рівномірного контакту з абсорбентом;
- прискорити хімічні реакції та сорбційні процеси;
- забезпечити видалення летких домішок у попередніх операціях.

Основні апарати

- Трубчаста піч (нагрівач): забезпечує рівномірне нагрівання оливи до 90–120°C. Встановлюється з контуром автоматичного контролю температури.
- Циркуляційний насос: забезпечує стабільну швидкість руху оливи по трубопроводу, що критично для рівномірного нагрівання.
- Датчики температури та витрати: інтегровані в SCADA для підтримки заданих режимів.

Автоматизація

Система управління забезпечує [2]:

- автоматичний контроль температури за допомогою PID-регуляторів;
- регулювання швидкості потоку оливи для оптимального теплового контакту;
- сигналізацію при перевищенні критичних значень температури або тиску.

Секція контактного змішування з відбілювальною глиною

Принцип дії

Олива після підігрівання подається у контактний змішувач, де вводиться відбілювальна глина у певному співвідношенні. Глина адсорбує залишкові пігменти, продукти окислення та дрібні механічні домішки [1].

Основні апарати

- Холодний змішувач: використовується для попереднього змішування оливи з глиною при температурі близько 50–60°C, щоб запобігти термічному руйнуванню сорбенту;
- Гарячий змішувач: забезпечує інтенсивне перемішування при робочій температурі (90–120°C), рівномірне розподілення глини по всьому об'єму оливи;
- Датчики рівня та в'язкості: контролюють однорідність суспензії та підтримують оптимальний режим контактного процесу.

Автоматизація [4, 5]

- Управління подачею глини здійснюється через шнекові дозатори з електроприводом, інтегровані у SCADA;
- PID-регулятори контролюють температуру та час контакту;
- Система сигналізації попереджає про можливі засмічення або надлишок глини.

Секція відділення глини та механічних домішок

Призначення

Фільтрування забезпечує [6]:

- видалення відпрацьованої глини та механічних домішок;
- підготовку оливи до фінального продукту з високими показниками кольору та чистоти;
- захист наступного обладнання від забруднення.

Основні апарати

- Дискові фільтри: забезпечують тонке очищення від дрібних частинок;
- Рамні фільтри: видаляють великі механічні включення;
- Гарячий змішувач: підтримує однорідність оливи перед фільтруванням, запобігаючи осіданню глини;
- Циркуляційні насоси та датчики тиску на фільтрах: забезпечують стабільну подачу і контроль забруднення фільтрувальних елементів.

Автоматизація

- Контроль тиску та перепаду на фільтрах;
- Автоматичне переключення потоків між фільтрами для чистки та регенерації;
- Інтеграція з SCADA для дистанційного моніторингу та збору даних.

Секція фінальної підготовки оливи [3, 4]

Після фільтрування олива надходить у буферний накопичувач, де відбувається контроль кольору, в'язкості та температури.

Автоматизація

- PID-регулятори підтримують оптимальну температуру для розливу чи упаковки;
- Датчики контролю фізико-хімічних параметрів передають інформацію в SCADA для корекції режимів у попередніх секціях;
- Система історії процесу зберігає дані для аналізу ефективності установки.

Особливості автоматизації та керування [4]

Автоматизація дозволяє:

1. Зменшити вплив людського фактора та забезпечити стабільну якість продукту;
2. Контролювати всі критичні параметри: температуру, тиск, рівень, в'язкість, час контакту;
3. Оптимізувати витрати реагентів і енергії;
4. Використовувати сучасні стратегії керування: PID, SCADA, MPC;
5. Відстежувати стан апаратів і попереджати аварійні ситуації.

Інтеграція всіх секцій у єдину систему дозволяє забезпечити максимальну ефективність процесу та мінімальні втрати продукту [2].

Установка контактного доочищення олив відбілювальними глинами включає:

- секцію підігрівання (трубчаста піч, циркуляція, контроль температури);
- секцію контактного змішування (холодний і гарячий змішувач, датчики в'язкості та рівня, автоматичне дозування глини);
- секцію фільтрування (дискові та рамні фільтри, контроль тиску);
- фінальну підготовку продукту (регулювання температури та в'язкості, SCADA).

1.2 Аналіз автоматизації виробництва

Автоматизація процесу дозволяє підтримувати стабільні технологічні режими, підвищує ефективність очищення, зменшує витрати реагентів і енергоресурсів та забезпечує безпеку експлуатації установки [2, 5].

Таблиця 1. Параметри контролю виробництва

№ п/п	Найменування стадії процесу (технологічний об'єкт), місце заміру параметра	Найменування параметра, що контролюється чи регулюється	Норми технологічного режиму та допустимі відхилення	Вимоги до схеми автоматизації (контроль, регулювання, сигналізація)
	2	3	4	5
1.	Трубопровід каталізатора	витрата	-----	контроль
2.	Трубопровід бензину	витрата	-----	контроль
3.	Збирач суспензії 2	рівень	-----	контроль
4.	Трубопровід суміші етилену та бензину	температура	120 °C	контроль
5.	Трубопровід пари	витрата	-----	контроль
6.	Трубопровід етилену	температура	-----	контроль
7.	Полімеризатор 3, 4, 5	температура	140-145 °C	контроль
8.	Трубопровід парогазової суміші після конденсатора (холодильника) 9	температура	60 °C	контроль
9.	Трубопровід вода	витрата	-----	контроль
10.	Сепаратори – дегазатори 10, 12	витрата	-----	контроль
11.	Трубопровід ПЕСТ	витрата	-----	контроль

	2	3	4	5
12.	Трубопровід на виході з випарної колони 7	температура	-----	контроль
13.	Трубопровід на виході з конденсатора 9	температура	-----	контроль
14.	Приймач 10	рівень	-----	контроль
15.	Випарна колона 7	рівень	-----	контроль
16.	Трубопровід на виході з випарної колони 7	температура	-----	контроль
17.	Трубопровід на виході з конденсатора 12	температура	-----	контроль
18.	Трубопровід на вході в змішувач 13	витрата	-----	контроль
19.	Трубопровід відбілювальної землі 29	витрата	-----	контроль
20.	Змішувач 13	рівень	-----	контроль
21.	Тиск у дискових фільтрах 15	тиск	0,4МПа	контроль
22.	Дисковий фільтр 15	температура	130-170 °С	контроль
23.	Трубопровід на вході в приймач 17	температура	-----	контроль
24.	Приймач 17	рівень	-----	контроль
25.	Тиск у рамних фільтрах 19	тиск	0,35МПа	контроль
26.	Рамний фільтр 19	температура	70-110 °С	контроль
27.	Приймач 20	рівень	-----	контроль
28.	Трубопровід до-очищеної оливи 31	витрата	-----	контроль

1.3 Постановка задачі на автоматизацію

Основні задачі дослідження включають:

- математичну модель об'єкту керування;
- синтез систем керування різних типів;
- створення схеми автоматизації технологічного процесу;
- розробка стартап проекту.

2. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ УСТАНОВКИ КОНТАКТНОГО ДООЧИЩЕННЯ ОЛИВ ВІД- БІЛЮВАЛЬНИМИ ГЛИНАМИ

2.1. Опис схеми автоматизації технологічного процесу установки контактного доочищення олив відбілювальними глинами

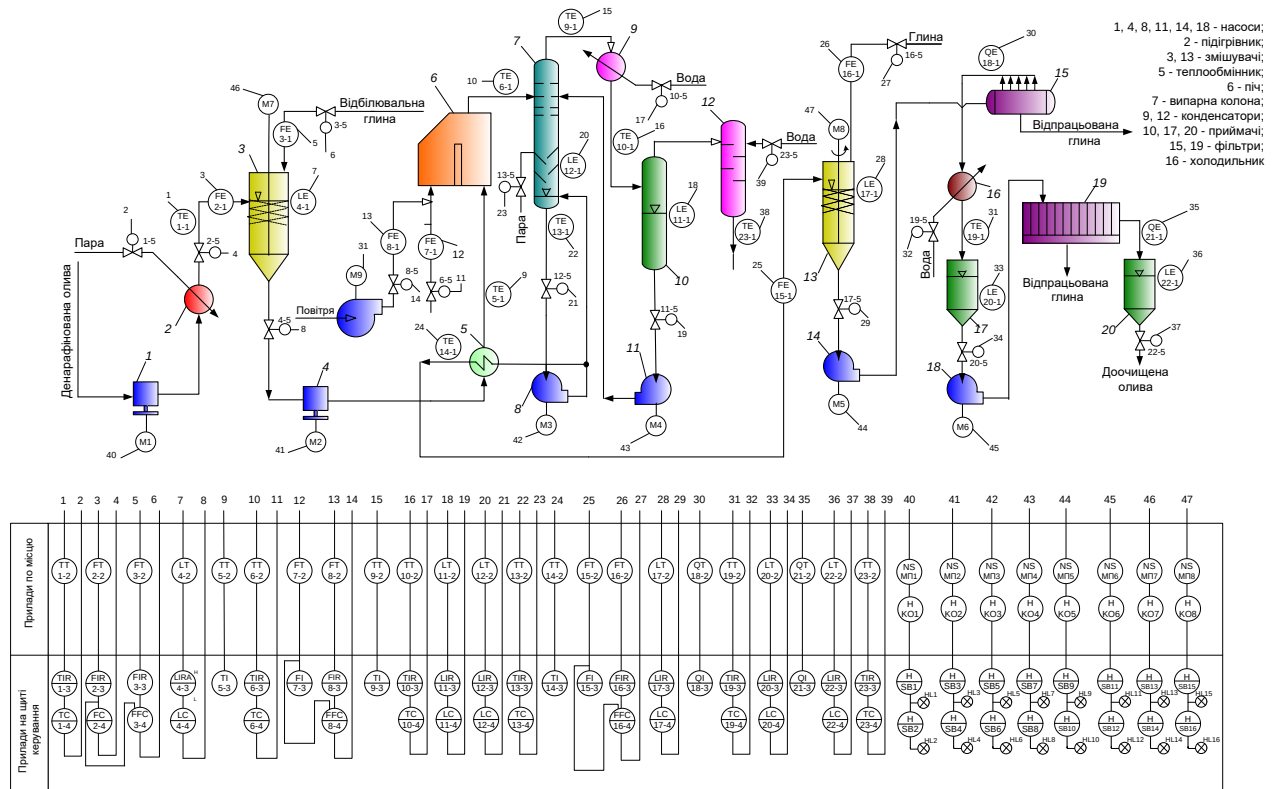


Рисунок 2.1. - Схема автоматизації технологічного процесу

В схемі автоматизації продуктивність задається за допомогою контура регулювання витрати [6].

Автоматизація технологічного процесу контактного доочищення олив є ключовим елементом забезпечення стабільної якості кінцевого продукту, ефективності використання реагентів та енергетичних ресурсів, а також безпеки персоналу. В основу автоматизаційної схеми покладено інтеграцію всіх основних секцій установки — підігрівання, контактного змішування та фільтрування — в єдину систему керування з можливістю дистанційного контролю та моніторингу.

Основні принципи автоматизації [7]

Система автоматизації передбачає:

1. Контроль температурних параметрів на кожному етапі: у трубчастій печі, холодному та гарячому змішувачах, фільтрувальній секції. Температура регулюється через PID-регулятори з сигналами від термопар, інтегрованих у систему SCADA.
2. Регулювання подачі оливи та глини: швидкість подачі оливи контролюється за допомогою насосів з електронним приводом, а дозування відбілювальної глини — шнековими дозаторами з автоматичним керуванням.
3. Контроль рівня та тиску у апаратах: рівень у змішувачах та накопичувачах контролюється за допомогою електричних або ультразвукових датчиків, а тиск на вході та виході фільтрів — манометрами з передачею сигналу у SCADA.
4. Моніторинг в'язкості та однорідності суспензії: датчики в'язкості та датчики потоку забезпечують стабільність суспензії оливи з глиною, що критично для ефективності абсорбції.

Основні елементи схеми [8]

Схема автоматизації включає наступні блоки:

- Система нагрівання оливи: трубчаста піч із PID-регулюванням температури та контролем витрати оливи. В SCADA відображаються параметри нагріву та сигналізуються відхилення від заданих режимів.
- Секція контактного змішування: холодний змішувач для попереднього перемішування, гарячий змішувач для основного контактування з глиною, датчики рівня, температури та в'язкості, шнекові дозатори глини. У SCADA здійснюється контроль кількості та швидкості введення глини, а також автоматична корекція часу контакту в залежності від температури та в'язкості.

- Секція фільтрування: дискові та рамні фільтри з контролем тиску, температури та перепаду тиску на фільтрувальних елементах. Автоматична система забезпечує чергування фільтрів, очищення або регенерацію фільтрувальних елементів.
- Буферний накопичувач і контроль кінцевого продукту: датчики рівня, температури, в'язкості та кольору оливи. Інформація передається у SCADA, де здійснюється автоматична корекція режимів у попередніх секціях.

Функціональні можливості автоматизації [9]

Автоматизована система забезпечує [10]:

1. Підтримання стабільних технологічних параметрів (температура, витрата, рівень, тиск, в'язкість) у реальному часі;
2. Сигналізацію аварійних станів: перевищення температури, тиску, засмічення фільтрів;
3. Автоматичне керування апаратами: регулювання швидкості насосів, дозування глини, перемикання фільтрів;
4. Збір та архівацію даних процесу для подальшого аналізу ефективності роботи установки;
5. Можливість впровадження прогнозного керування (MPC) для оптимізації енергоспоживання та витрат глини з урахуванням динаміки процесу.

Взаємодія апаратів та сенсорів у схемі [11]

- Трубчаста піч → холодний змішувач: сигнал про температуру на виході передається в SCADA, яка коригує нагрів та витрату;
- Холодний змішувач → гарячий змішувач: контроль рівня та в'язкості забезпечує правильне співвідношення оливи та глини;

- Гарячий змішувач → фільтри: тиск і температура на вході фільтрів регулюються автоматично, перепад тиску контролює стан фільтрувальних елементів;
- Фільтри → буферний накопичувач: кінцевий продукт надходить у накопичувач, де датчики параметрів контролюють якість і передають дані в SCADA для корекції режимів у попередніх секціях.

Переваги автоматизованої схеми [8, 11]

- Стабільність якості оливи при мінімальному участі оператора;
- Економія реагентів та енергоресурсів завдяки точному дозуванню та оптимізації режимів;
- Підвищення безпеки персоналу завдяки дистанційному керуванню і сигналізації аварійних станів;
- Можливість модернізації для впровадження нових алгоритмів керування, наприклад прогнозного MPC або адаптивного регулювання.

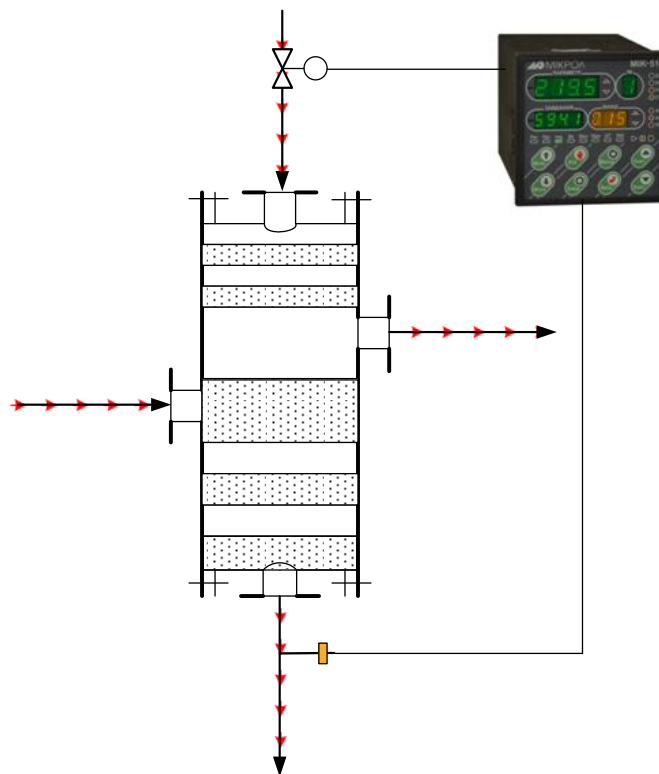


Рисунок 2.2 Демонстрація роботи контура регулювання в теплообміннику

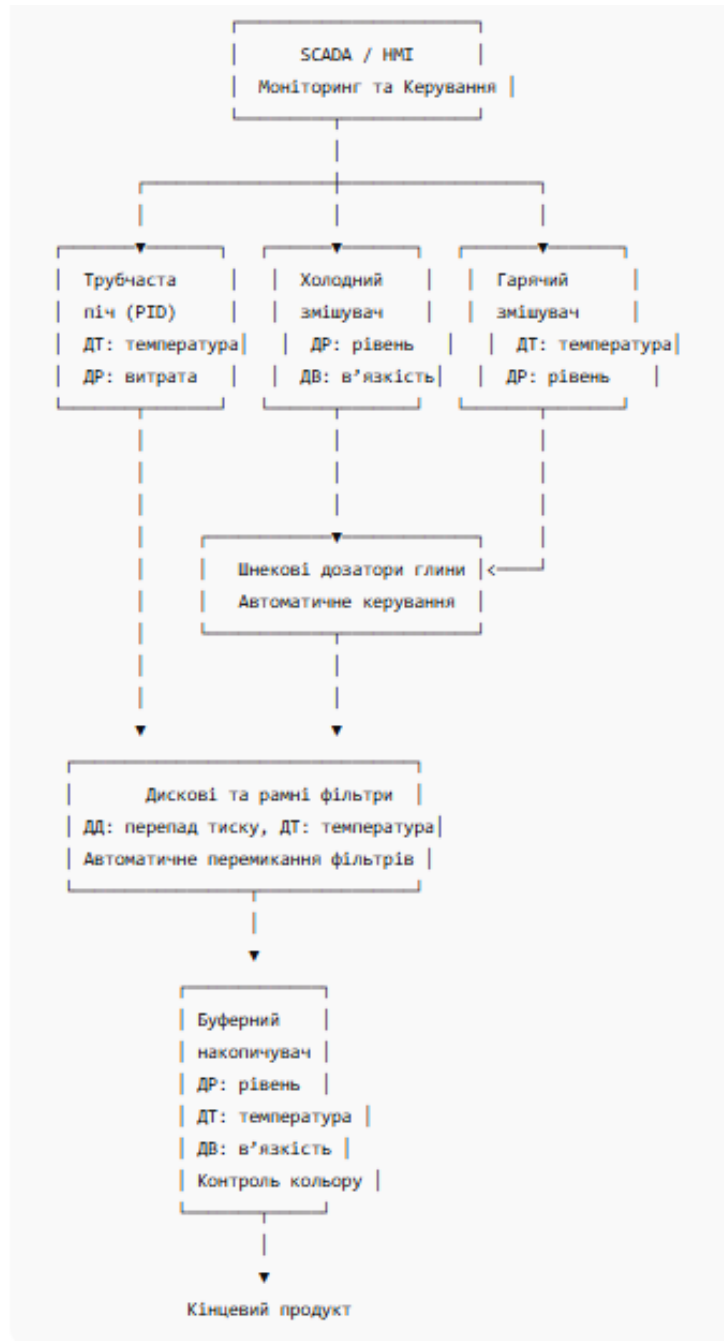


Рисунок 2.3 Блок-схема автоматизації установки контактного доочищення олив відбілювальними глинами

SCADA / HMI – централізоване управління всіма апаратами та сенсорами; збір даних, сигналізація, дистанційне керування [13].

Трубчаста піч – нагрівання оливи; PID-регулятор контролює температуру, датчики витрати забезпечують постійну швидкість потоку [14].

Холодний змішувач – попереднє перемішування оливи з глиною; датчики рівня і в'язкості контролюють однорідність суспензії.

Шнекові дозатори глини – автоматична подача відбілювальної глини у потрібному співвідношенні.

Гарячий змішувач – основне контактне змішування; PID-регулятори підтримують температуру і час контакту.

Дискові та рамні фільтри – видалення осаду та частинок глини; контроль перепаду тиску і температури; автоматичне чергування фільтрів.

Буферний накопичувач – контроль рівня, температури, в'язкості та кольору продукту; дані передаються у SCADA для корекції режимів.

2.2 SCADA-система технологічного процесу установки контактного доочищення оливи відбілювальними глинами

Загальна характеристика

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) — це система моніторингу та керування технологічними процесами в режимі реального часу, яка інтегрує всі основні апарати установки: трубчасту піч, холодний та гарячий змішувачі, шнекові дозатори глини, фільтрувальну секцію та буферний накопичувач [14].

Основні завдання SCADA у цій установці [11]:

1. Моніторинг параметрів процесу: температура, тиск, рівень, витрата, в'язкість, колір оливи.
2. Автоматичне керування апаратами: насосами, дозаторами глини, змішувачами, фільтрами.
3. Сигналізація аварійних станів: перевищення температури, тиску, перепаду тиску на фільтрах, засмічення фільтрувальних елементів.
4. Збір та архівація даних для аналізу ефективності процесу, оптимізації витрат реагентів та енергоресурсів.

5. Інтеграція прогнозного або адаптивного керування (MPC, PID), що дозволяє підтримувати стабільні режими технологічного процесу.

Архітектура SCADA [12]

SCADA-система складається з наступних рівнів:

1. Рівень сенсорів і виконавчих механізмів (field level):

- Датчики температури (ДТ) – трубчаста піч, гарячий та холодний змішувач, фільтри, буферний накопичувач.
- Датчики рівня (ДР) – змішувачі, накопичувач.
- Датчики в'язкості (ДВ) – холодний і гарячий змішувачі, буферний накопичувач.
- Датчики перепаду тиску (ДД) – дискові та рамні фільтри.
- Датчики кольору (ДК) – буферний накопичувач.
- Виконавчі механізми: насоси, шнекові дозатори глини, перемішувачі змішувачів, перемикання фільтрів.

2. Рівень контролерів (control level):

- PLC (Programmable Logic Controller) – отримує сигнали від сенсорів, обробляє їх і видає команди на виконавчі механізми.
- Включає PID-регулятори для підтримки температури, витрати та часу контакту оливи з глиною.
- Може інтегрувати MPC-модулі для прогнозного регулювання процесу і оптимізації витрат енергії та глини.

3. Рівень моніторингу та керування (supervisory level):

- SCADA-сервер обробляє всі дані від PLC, формує графічні панелі оператора (HMI).

- Можливість дистанційного керування насосами, змішувачами та дозаторами глини.
- Відображення аварійних сигналів і історії процесу.

Функціональні можливості SCADA для установки [16]

1. Моніторинг в реальному часі:

- Температура на вході та виході трубчастої печі;
- В'язкість і рівень у змішувачах;
- Перепад тиску на фільтрах;
- Колір і в'язкість кінцевого продукту.

2. Автоматичне регулювання:

- PID-контроль температури і витрати оливи;
- Автоматичне дозування глини за рецептурою;
- Перемикання фільтрів і регенерація елементів без участі оператора.

3. Сигналізація та безпека:

- Попередження про перевищення критичних значень;
- Блокування апаратів при аваріях;
- Архівування даних для аналізу та звітності.

4. Аналітика та оптимізація:

- Збір статистики по споживанню глини та енергії;
- Оптимізація часу контакту і температурних режимів;
- Прогнозування ефективності фільтрувальної секції та ресурсу апаратів.

Приклад інтеграції SCADA з апаратами

[SCADA/HMI]

|

| контроль, сигналізація



[PLC контролер] <— ДТ, ДР, ДВ, ДД, ДК —> [Апарати процесу]

|

|

| команди на виконавчі механізми

| потік оливи та сигнали датчиків



[Насоси, змішувачі, дозатори, фільтри] —> [Буферний накопичувач / готовий продукт]

3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ

3.1 Структурно-параметрична схема трубчастої печі

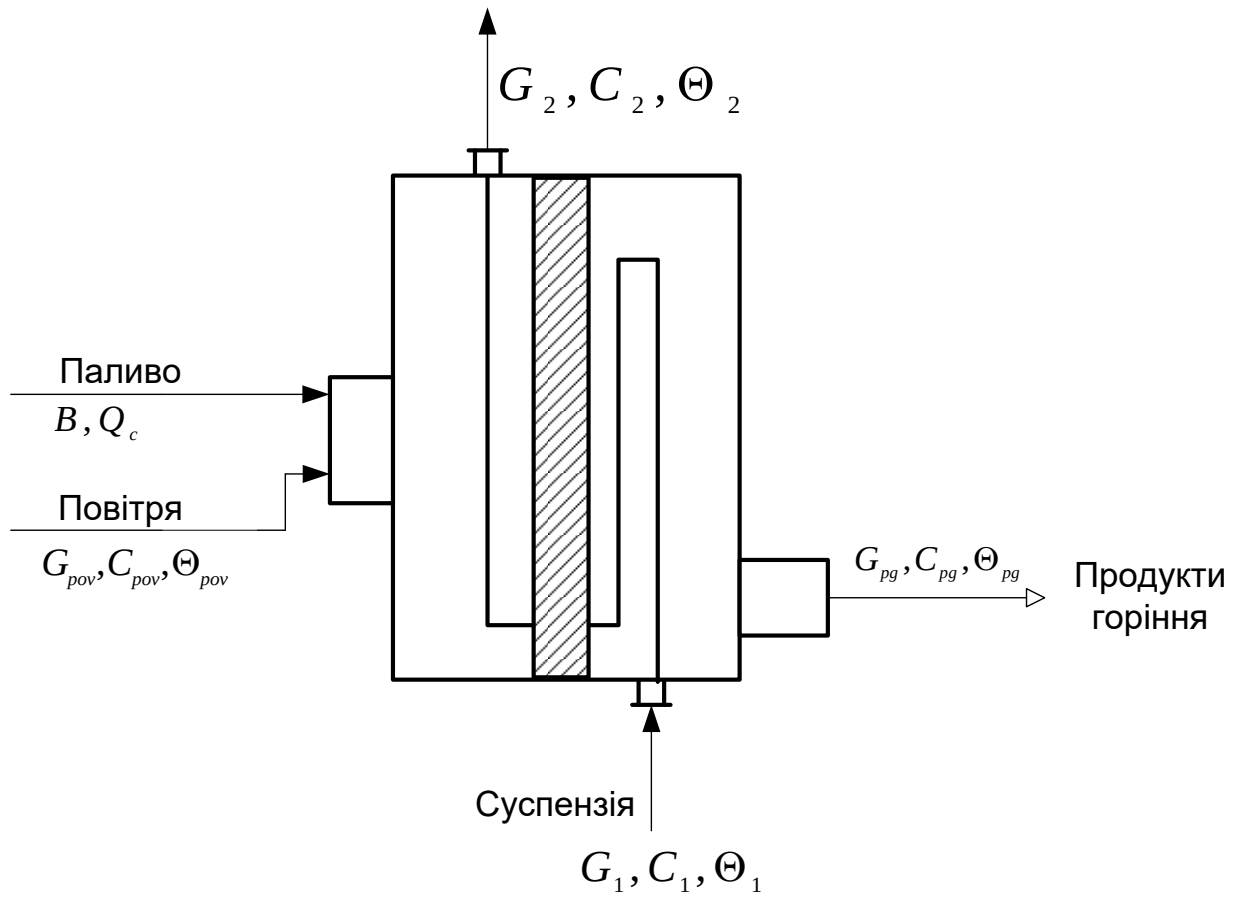


Рисунок 3.1 Розрахункова схема трубчастої печі

Таблиця 5 – таблиця умовних позначень

Позначення	Назва параметру	Величина	Розмірність
Q_{nc}	Нижча теплота згоряння палива	7300	Вт
B	Витрата палива	100	кг/год
G_{rov}	Витрата повітря	10	кг/год
C_{rov}	Теплоємність повітря	0,24	Вт/кг·град
Θ_{rov}	Температура повітря	20+273	К
G_1	Витрата суспензії, що нагрівається	10000	кг/год

C_1	Теплоємність суспензії, що нагрівається	0,305	Вт/кг·град
Θ_1	Температура суспензії, що нагрівається	90+273	К
λ_{stink}	Коефіцієнт теплопровідності стінки	0,78	Вт/м·К
S	Площа січного перерізу стінки	30	м ²
Θ_{nagr}	Середня температура в першій камері біля гріючої стінки	1007+273	К
Θ_{st}	Початкова температура гріючої стінки	30+273	К
C_{pg}	Теплоємність продуктів горіння	0,28	Вт/кг·град
G_{pg}	Витрата продуктів горіння	6156	кг/год
Θ_{pg}	Температура продуктів горіння	400+273	К
C_2	Теплоємність продукту на виході	0,03	Вт/кг·град
G_2	Витрата продукту на виході	10000	кг/год
Θ_2	Температура продукту на виході (теоретична)	140+273	К

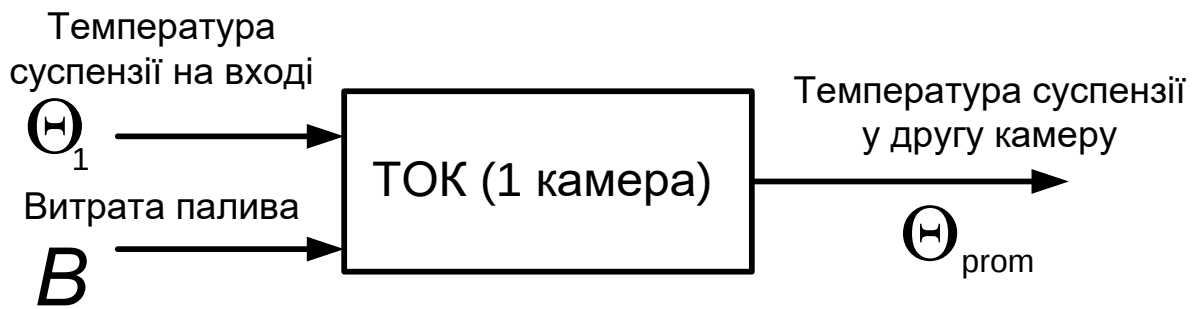


Рисунок 3.2 Входи-Виходи, 1 камера

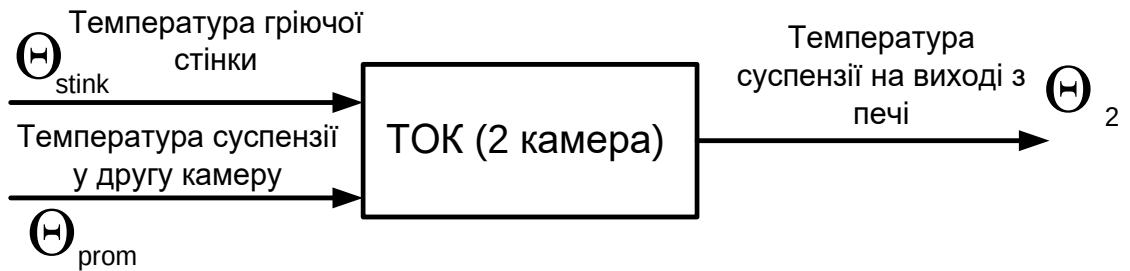


Рисунок 3.3 Входи-Виходи, 2 камера

Вихід обрано температуру суспензії на виході з апарату, так як до випарної колони дана суспензія має надходити з чітко визначеними параметрами [8]

3.2 Моделювання статичного режиму роботи трубчастої печі

Складемо рівняння теплового балансу для кожної з камер [9]:

Перша камера:

Тепло, що виділяється під час згоряння палива:

$$Q_{pal} = Q_p + Q_{pov}$$

Тепло, що приходить з повітрям:

$$Q_{pov} = \Theta_{pov} \cdot G_{pov} \cdot C_{pov}$$

Тепло, що отримується при спалюванні палива:

$$Q_p = Q_{nc} \cdot B$$

Тепло, що приходить з суспензією:

$$Q_1 = C_1 \cdot G_1 \cdot \Theta_1$$

Тепло, що витрачається на нагрів трубчатки:

$$Q_{nagr} = G_1 \cdot C_1 \cdot (\Theta_{prom} - \Theta_1)$$

Тепло, що передається гріючій стінці:

$$Q_{stink} = \lambda_{stink} \cdot S \cdot (\Theta_{nagr} - \Theta_{st})$$

Тепло, що виноситься з апарату продуктами горіння:

$$Q_{pg} = G_{pg} \cdot C_{pg} \cdot \Theta_{pg}$$

Тепло, що втрачається через корпус апарату:

$$Q_{korp}=0.3 \cdot Q_{pal}$$

Тепло, яке виноситься з суспензією у другу камеру:

$$Q_{v2k}=G_1 \cdot C_1 \cdot \Theta_{prom}$$

Загальний тепловий баланс першої камери:

$$Q_{pal} + Q_1 - Q_{nagr} - Q_{stink} - Q_{pg} - Q_{korp} - Q_{v2k} = 0$$

Друга камера:

Тепло, що приходить з суспензією нагрітою в першій камері [6]:

$$Q_{v2k}=G_1 \cdot C_1 \cdot \Theta_{prom}$$

Тепло від гріючої стінки:

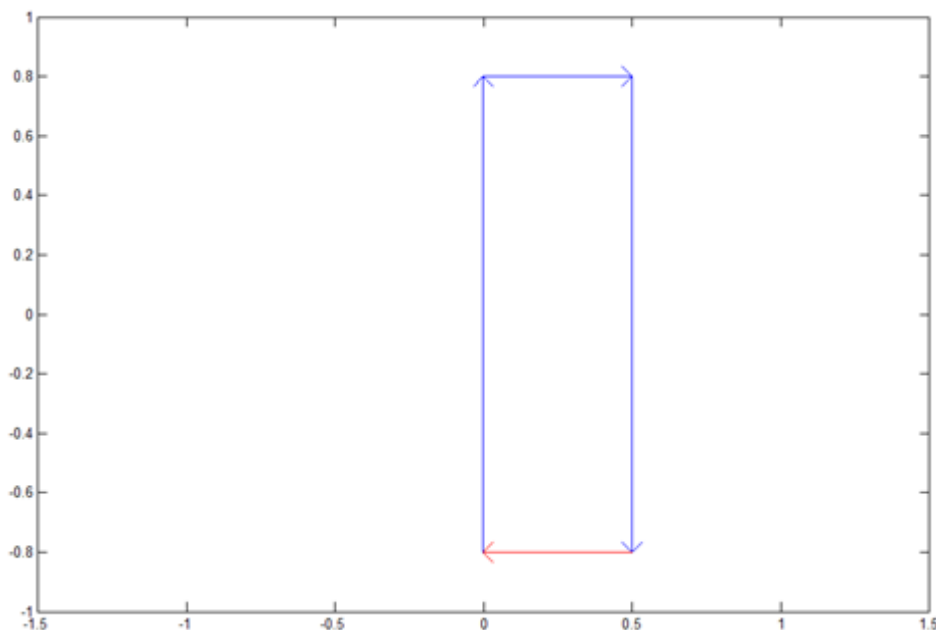


Рисунок 3.4 – PDE Toolbox в режимі зображення границь

Для даного випадку, згідно з умовами теплопровідності, задамо наступні параметри: бічні стінки та верхня частини матимуть граничні умови другого порядку Неймана [7]:

$$g = n \cdot k \cdot \text{grad}(T) + q \cdot T, \quad g = 7 \cdot 293$$

$$\text{де } q = \alpha(T - T_0), \quad q = 7 \cdot (T - T_0)$$

низ печі матиме граничні умови першого порядку:

$$r = h \cdot T, \quad g = 0, \quad q = 0$$

$T=1006$; коефіцієнт теплопровідності $\alpha=7$

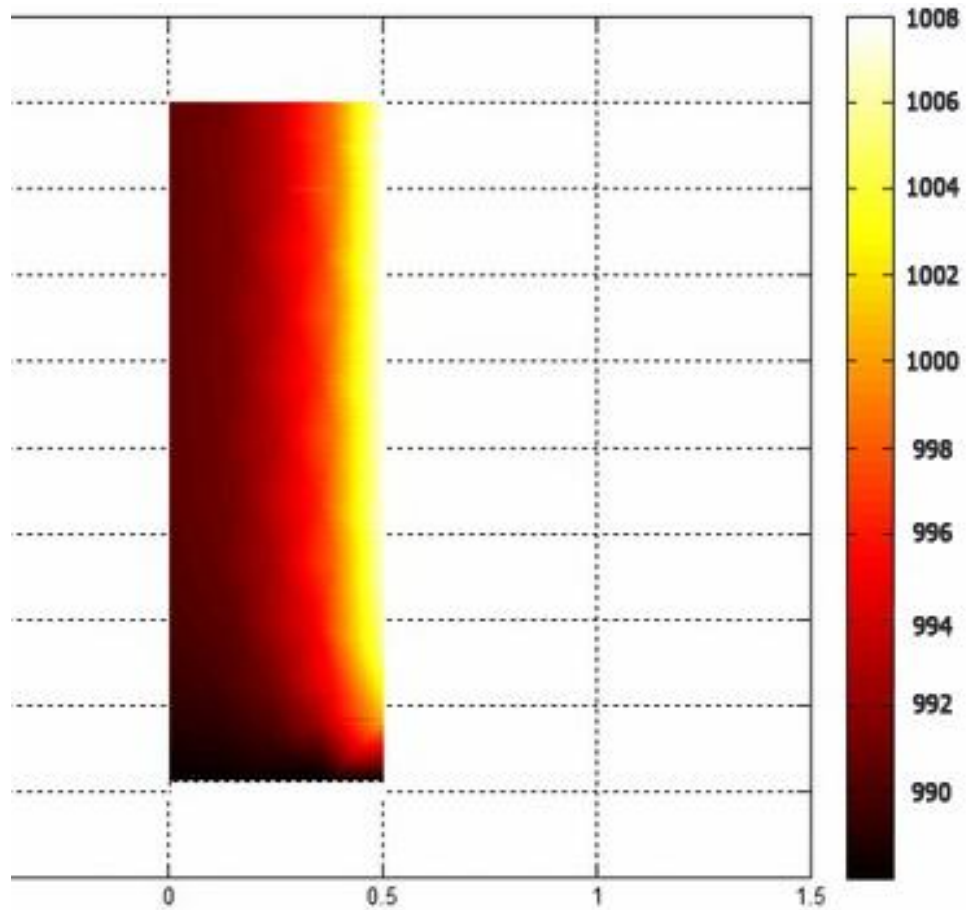


Рисунок 3.5 – Демонстрація розподілення температури по товщині стінки трубчастої печі

$$Q_{stink} = \lambda_{stink} \cdot S \cdot (\Theta_{nagr} - \Theta_{st})$$

Втрати тепла на корпус апарату:

$$Q_{korp} = 0.3 \cdot (Q_{v2k} + Q_{stink})$$

Тепло, що виноситься суспензією на виході з апарату:

$$Q_2 = C_2 \cdot G_2 \cdot \Theta_2$$

Тепло, що витрачається на нагрів трубчатки:

$$Q_{nagr} = G_1 \cdot C_1 \cdot (\Theta_2 - \Theta_{prom})$$

Загальний тепловий баланс другої камери:

$$Q_{v2k} + Q_{stink} - Q_{korp} - Q_2 - Q_{nagr} = 0$$

Статичні характеристики першої камери:

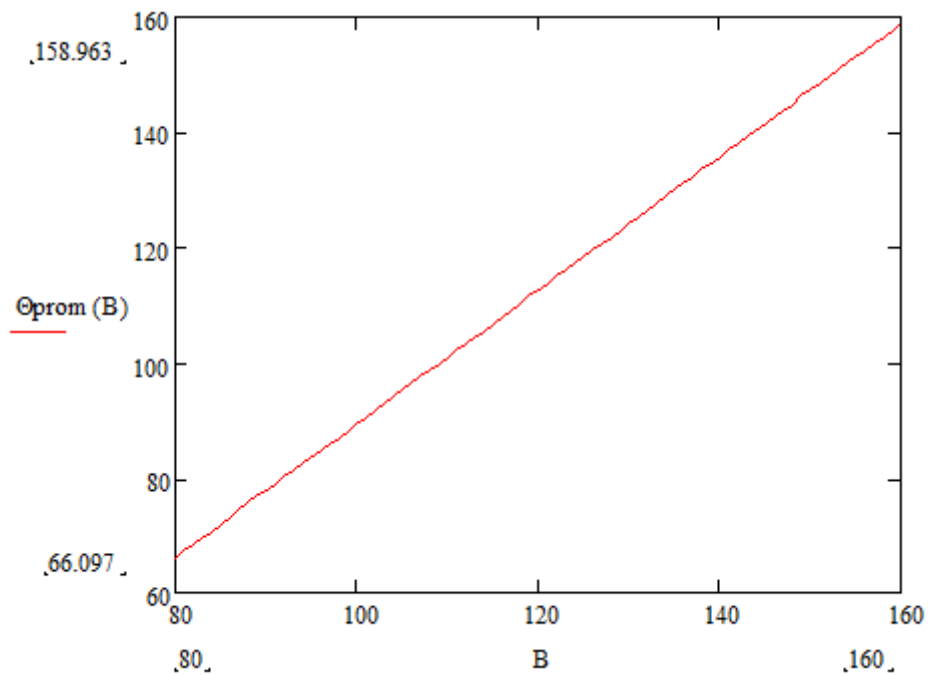


Рисунок 3.6. Статична характеристика залежності зміни температури суспензії, що надходить до другої камери від значення величини витрати

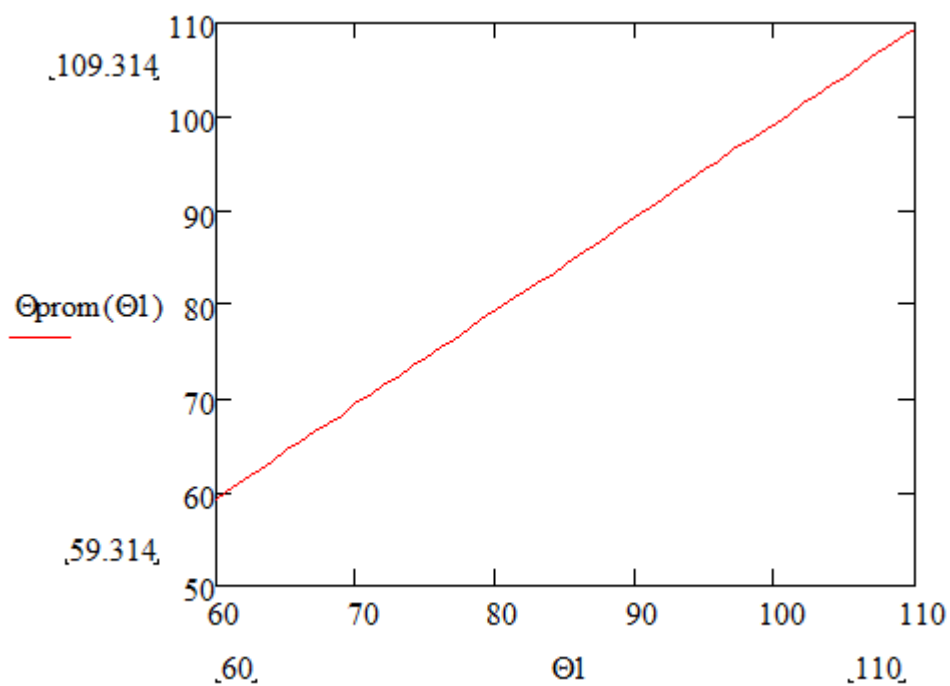


Рисунок 3.7 Статична характеристика залежності зміни температури суспензії, що надходить до другої камери від значення величини температури вхідної суспензії

Статичні характеристики другої камери:

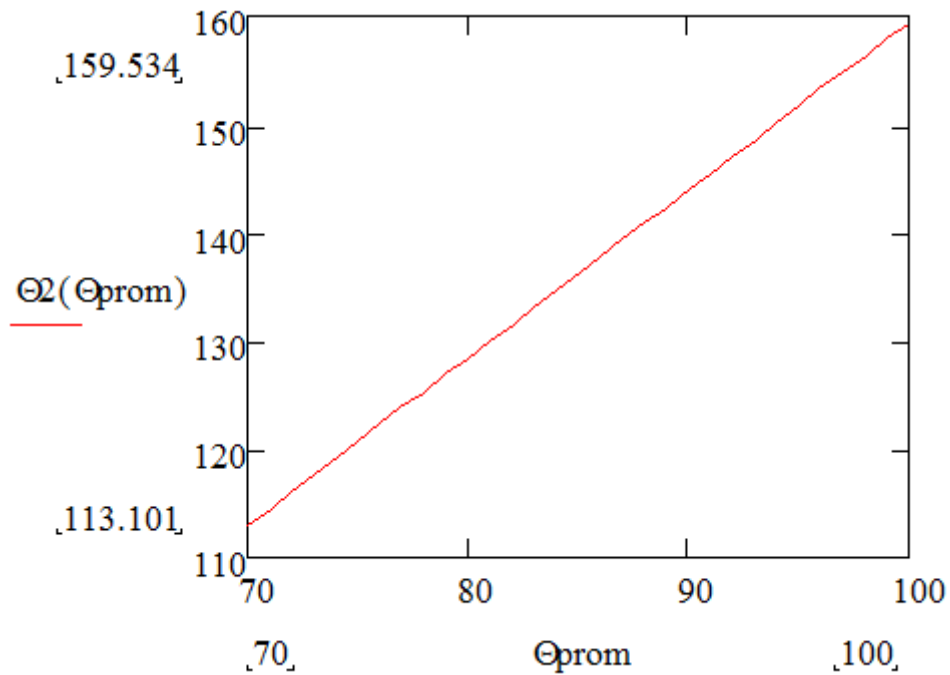


Рисунок 3.8 Статична характеристика залежності зміни температури суспензії на виході з печі від значення величини температури суспензії з першої камери

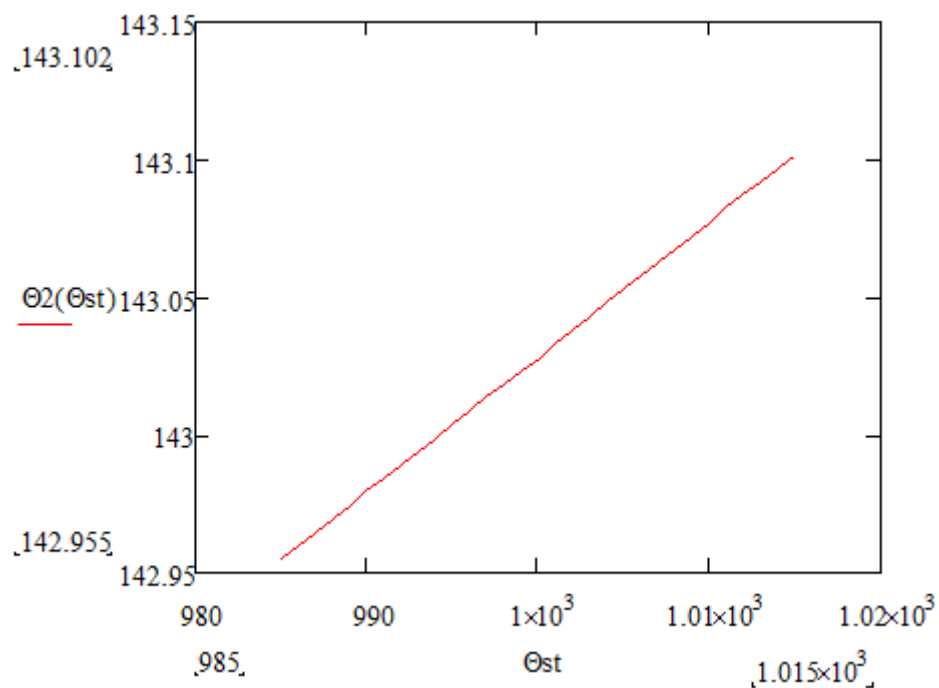


Рисунок 3.9 Статична характеристика залежності зміни температури суспензії на виході з печі від значення температури гріючої стінки

3.3 Моделювання динамічного режиму роботи трубчастої печі

Перейдемо до розгляду моделі у динаміці. Для цього з рівняння теплового балансу для першої камери отримаємо [10]:

$$\Theta_{pov} \cdot G_{pov} \cdot C_{pov} + Q_{nc} \cdot B + C_1 \cdot G_1 \cdot \Theta_1 - G_1 \cdot C_1 \cdot (\Theta_{prom} - \Theta_1) - \lambda_{stink} \cdot S \cdot (\Theta_{nagr} - \Theta_{st}) - G_{pg} \cdot C_{pg} \cdot \Theta_{pg} - 0.3 \cdot (\Theta_{pov} \cdot G_{pov} \cdot C_{pov} + Q_{nc} \cdot B) - G_1 \cdot C_1 \cdot \Theta_{prom} = \rho \cdot V \cdot C_1 \cdot d\Theta_{prom}/dt$$

Лінеаризуємо рівняння:

Змінними параметрами є: $\Theta_1, B, \Theta_{prom}$.

Запишемо рівняння в приростах

$$\Theta_{pov} \cdot G_{pov} \cdot C_{pov} + Q_{nc} \cdot \Delta B + C_1 \cdot G_1 \cdot \Delta \Theta_1 - G_1 \cdot C_1 \cdot (\Delta \Theta_{prom} - \Delta \Theta_1) - \lambda_{stink} \cdot S \cdot (\Theta_{nagr} - \Theta_{st}) - G_{pg} \cdot C_{pg} \cdot \Theta_{pg} - 0.3 \cdot (\Theta_{pov} \cdot G_{pov} \cdot C_{pov} + Q_{nc} \cdot \Delta B) - G_1 \cdot C_1 \cdot \Delta \Theta_{prom} = \rho \cdot V \cdot C_1 \cdot d \Delta \Theta_{prom}/dt$$

Данне рівняння перетворимо за Лапласом:

$$0.97 \cdot Q_{nc} \cdot \Delta B(p) + 2 \cdot C_1 \cdot G_1 \cdot \Delta \Theta_1(p) = 2 \cdot G_1 \cdot C_1 \cdot \Delta \Theta_{prom}(p) + \rho \cdot V \cdot C_1 \cdot d \Delta \Theta_{prom}(p) \cdot p$$

Звідси отримаємо передатні характеристики:

$$W_{zB1}(p) = \frac{15.8}{1.244 \cdot p + 1} \text{ - По каналу витраті палива (B) на одиничний вплив}$$

$$W_{KER1}(p) = \frac{30.5}{1.244 \cdot p + 1} \text{ - По каналу температура суспензії (\Theta_{prom}) на одиничне}$$

завдання

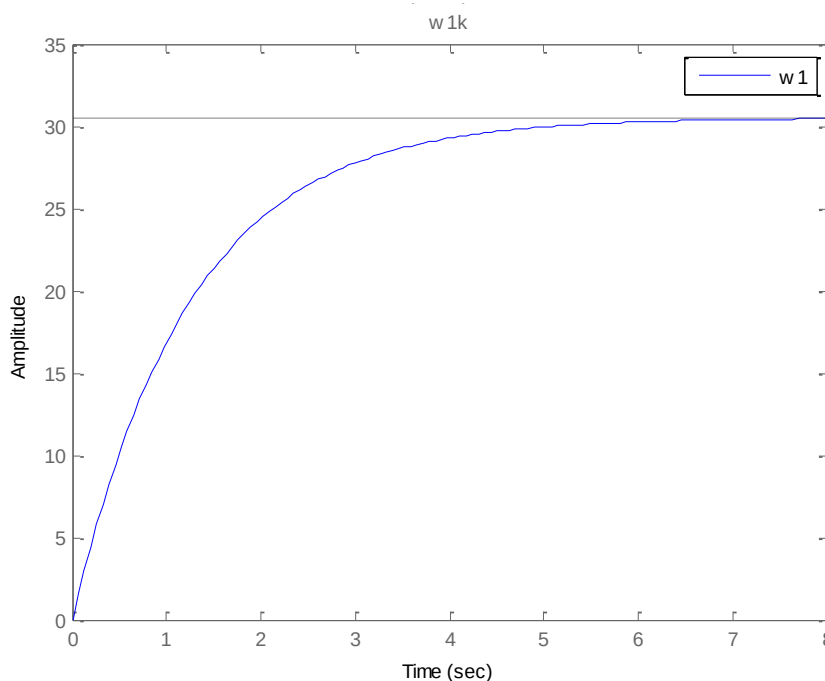


Рисунок 3.10 – Перехідна характеристика першої камери

Проведемо аналогічні розрахунки для другої камери [10]:

$$0.97 \cdot G_1 \cdot C_1 \cdot \Theta_{\text{prom}} - 0.97 \cdot \lambda_{\text{stink}} \cdot S \cdot \Theta_{\text{nagr}} + 0.97 \cdot \lambda_{\text{stink}} \cdot S \cdot \Theta_{\text{st}} - G_2 \cdot C_2 \cdot \Theta_2 - G_2 \cdot C_2 \cdot \Theta_2 + G_1 \cdot C_1 \cdot \Theta_{\text{prom}} = \rho \cdot V \cdot C_2 \cdot d\Theta_2 / dt$$

Ліанеризуємо дане рівняння за змінними параметрами, якими будуть Θ_{prom} , Θ_2 , Θ_{st} , запишемо отриманне рівняння в приростах:

$$0.97 \cdot G_1 \cdot C_1 \cdot \Delta\Theta_{\text{prom}} - 0.97 \cdot \lambda_{\text{stink}} \cdot S \cdot \Delta\Theta_{\text{nagr}} + 0.97 \cdot \lambda_{\text{stink}} \cdot S \cdot \Delta\Theta_{\text{st}} - G_2 \cdot C_2 \cdot \Delta\Theta_2 - G_2 \cdot C_2 \cdot \Delta\Theta_2 + G_1 \cdot C_1 \cdot \Delta\Theta_{\text{prom}} = \rho \cdot V \cdot C_2 \cdot d\Delta\Theta_2 / dt$$

Скоротимо подібні та перетворимо за Лапласом:

$$1.97 \cdot G_1 \cdot C_1 \cdot \Delta\Theta_{\text{prom}} = G_2 \cdot C_2 \cdot \Delta\Theta_2(p) + G_1 \cdot C_1 \cdot \Delta\Theta_2(p) + \rho \cdot V \cdot C_2 \cdot d\Delta\Theta_2(p) \cdot p$$

З даного рівняння отримаємо наступні передатні характеристики:

$$W_{\text{ZB2}}(p) = \frac{17.9}{0.365 \cdot p + 1} \text{ - По каналу температури суспензії у другу камеру } (\Theta_{\text{prom}})$$

$$W_{\text{KER2}}(p) = \frac{29.5}{0.365 \cdot p + 1} \text{ - По каналу температури суспензії на виході з печі } (\Theta_2)$$

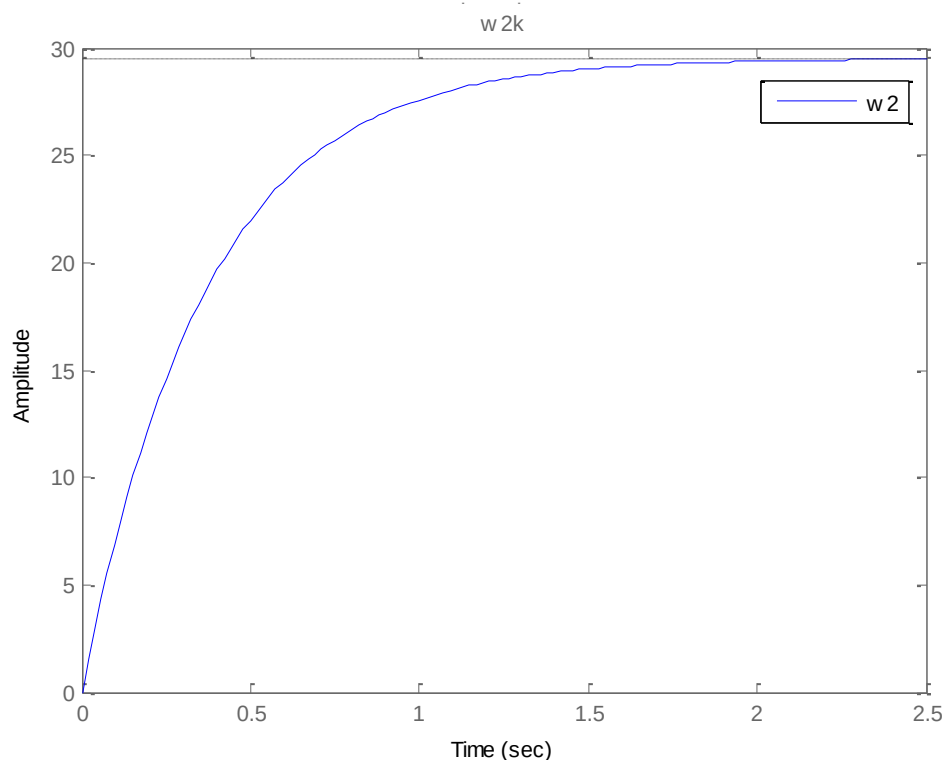


Рисунок 3.11 – Перехідна характеристика другої камери

Для отримання кінцевого результату, необхідно з'єднати послідовно передатні характеристики першої та другої камери, по збуренню та керуванню відповідно [9]:

$$W_{zB}(p) = W_{zB1}(p) \cdot W_{zB2}(p) = \frac{40.9}{0.45406 \cdot p^2 + 1.609 \cdot p + 1}$$

$$W_{KER}(p) = W_{KER1}(p) \cdot W_{KER2}(p) = \frac{35.4}{0.45406 \cdot p^2 + 1.609 \cdot p + 1}$$

Передатна характеристика системи:

$$W_{1s}(p) = \frac{35.4}{0.45406 \cdot p^2 + 1.609 \cdot p + 1}$$

В результаті отримаємо представлену характеристику[11]:

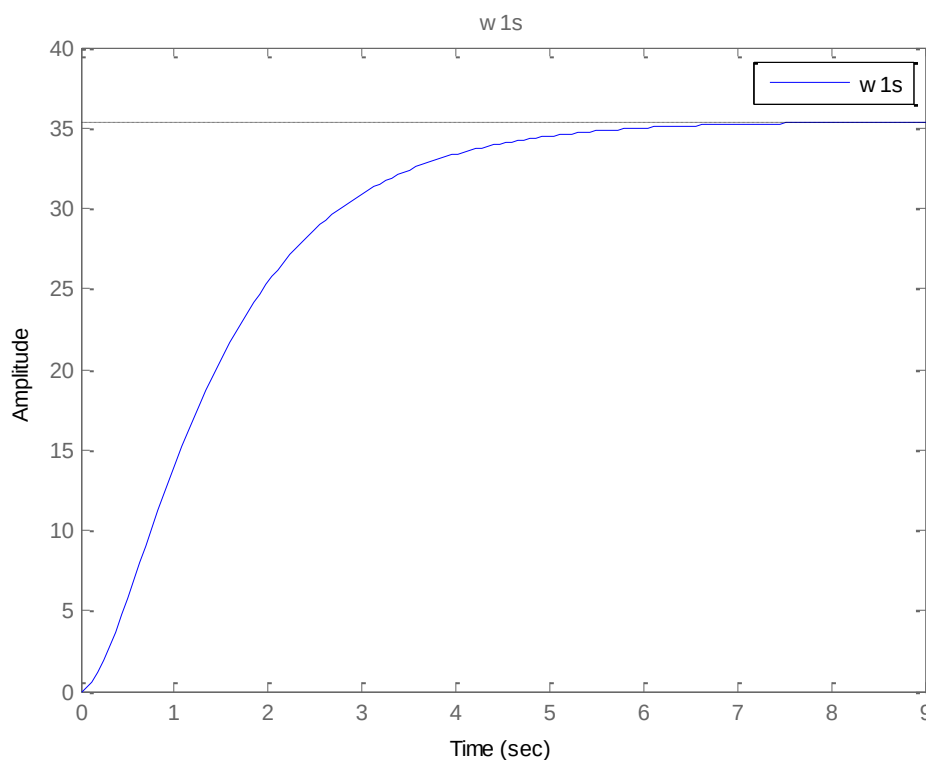


Рисунок 3.12 Перехідна характеристика двокамерної трубчатої печі

Представимо передатні характеристики першої, другої камери, та всієї печі:

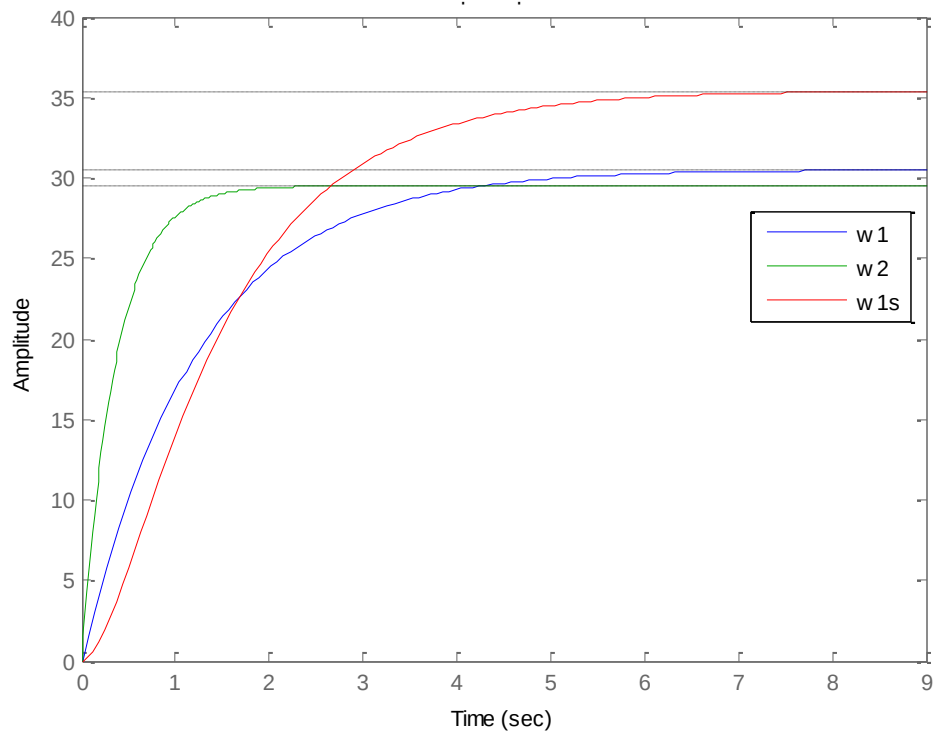


Рисунок 3.13 – Перехідна характеристика двокамерної трубчастої печі, першої та другої камери

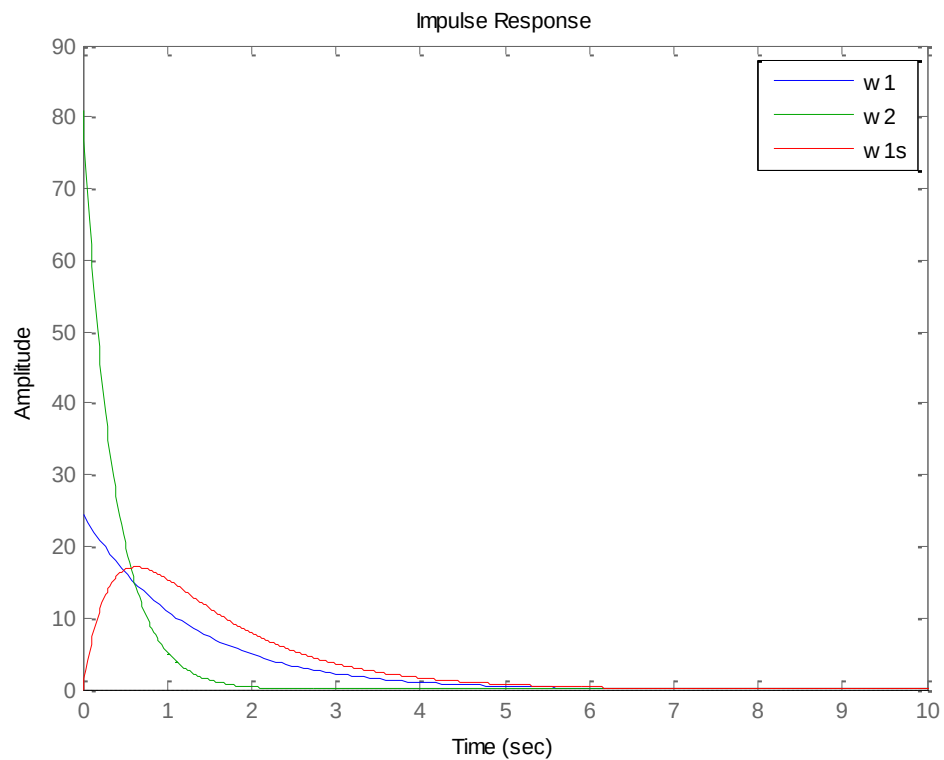


Рисунок 3.14 Реакція на одиничний імпульс двокамерної трубчастої печі, першої та другої камери

Представимо фазові характеристики в полярній системі координат:

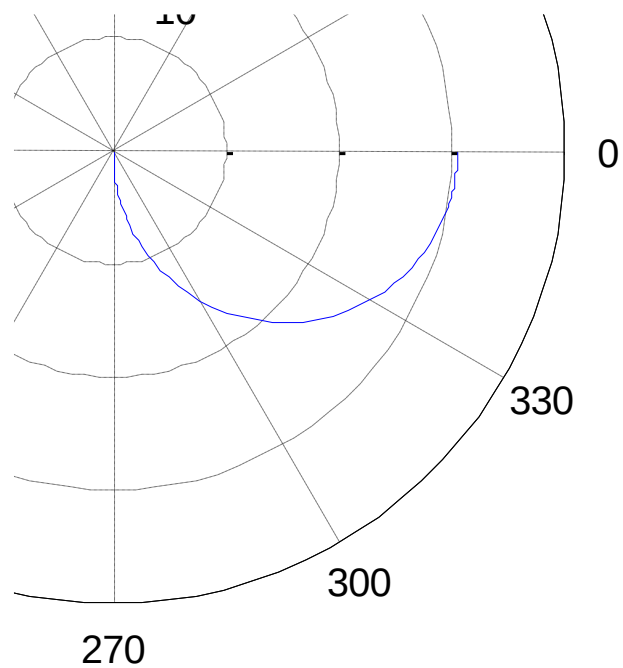


Рисунок 3.15 Амплітудно фазова характеристика першої камери в полярних координатах

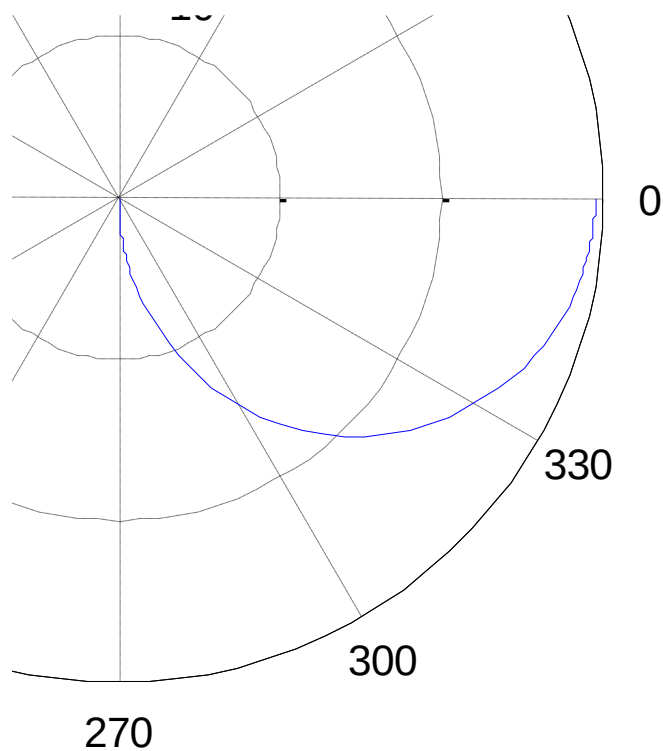


Рисунок 3.16 Амплітудно фазова характеристика другої камери в полярних координатах

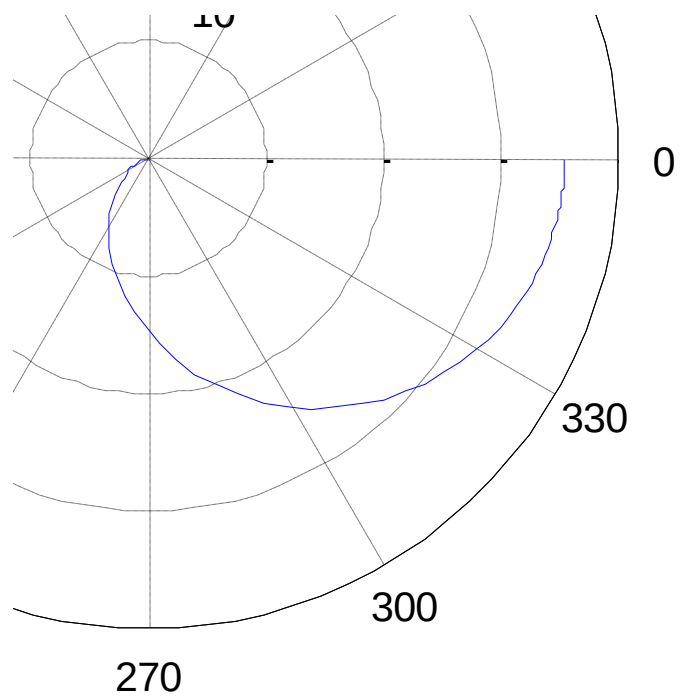


Рисунок 3.17 – Амплітудно фазова характеристика трубчастої печі в полярних координатах

4. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

4.1. Розрахунок аналогового регулятора

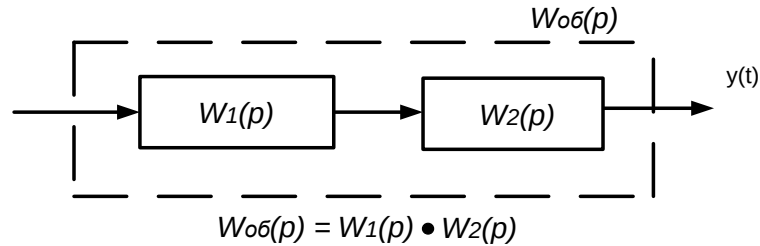


Рисунок 4.2. Структурна схема послідовно з'єднаних передатних функцій першої та другої камер об'єкта

Таким чином, об'єкт можна представити, як такий, який складається з двох послідовно включених передатних функцій, ввімкнених послідовно [12, 13].

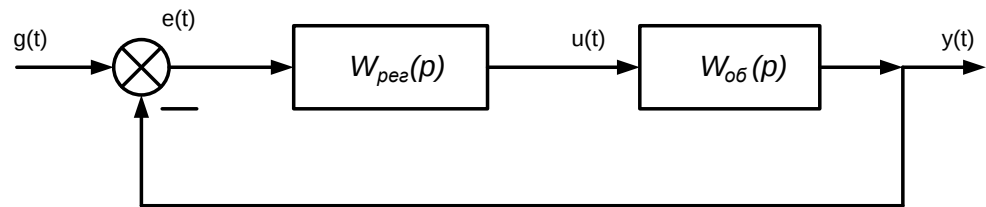


Рисунок 4.3 Структурна схема системи з аналоговим регулятором

Передатна функція аналогового Пі регулятора:

$$W_{рег}(p) = Kp \cdot \left(1 + \frac{1}{Ti \cdot p} \right)$$

Передатна характеристика системи:

$$W_{об}(p) = \frac{35.4}{0.45406 \cdot p^2 + 1.609 \cdot p + 1}$$

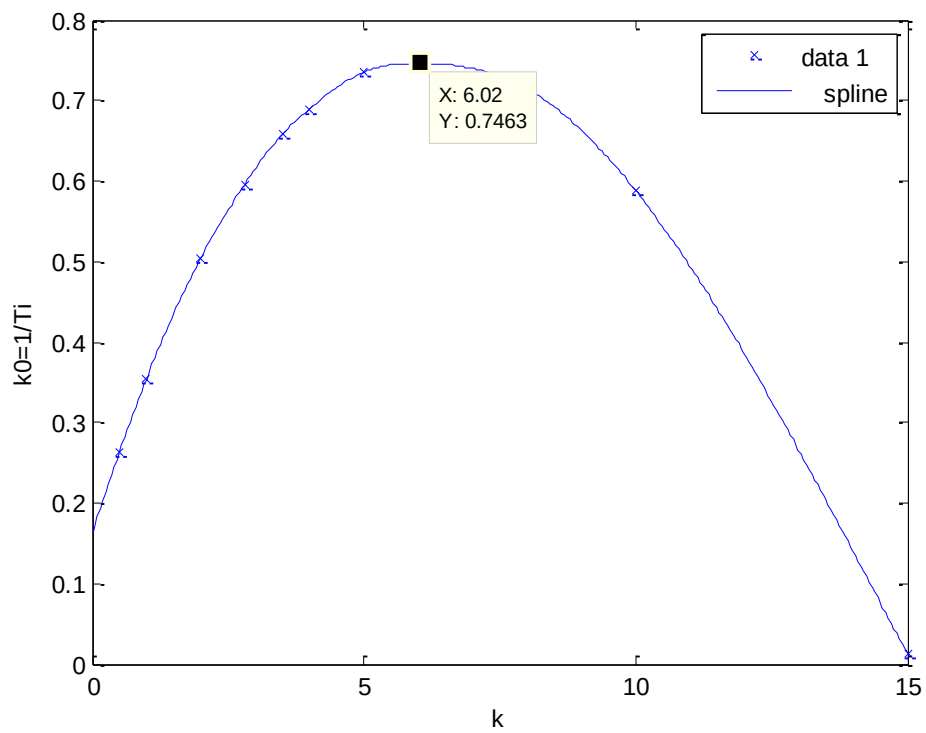


Рисунок 4.4 Графік залежності K_p/T_i для вибору оптимальних параметрів
настройки регулятора

Програмно знайдені параметри:

$K_p=6.02$

$T_i=1.36$

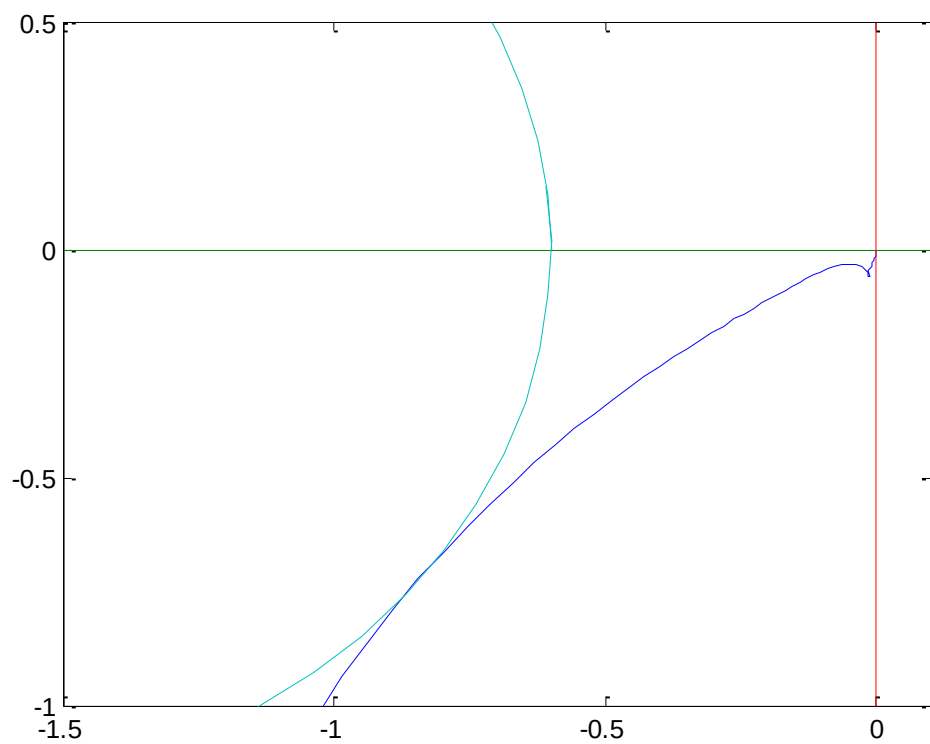


Рисунок 4.5 АФХ розімкненої системи з Пі-регулятором

Передатна функція для замкненої системи матиме вигляд:

$$W_{zs}(p) = \frac{1}{(1 + W_{об} \cdot W_{рег})}$$

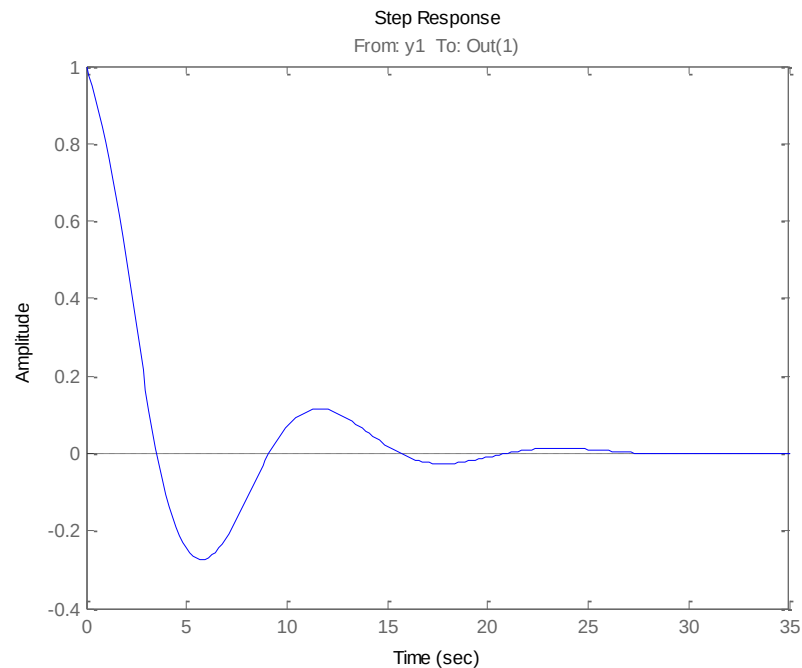


Рисунок 4.6 Передатна функція за каналом (збурення - вихід) при оптимальному налаштуванні регулятора

4.2. Синтез нечіткої системи.

Опис лінгвістичних змінних, що фігурують у НЧСК [15].

Витрата палива B (637.5– 862.5 нм³/год) – «Дуже низька», «Низька», «Середня», «Висока», «Дуже висока»

Витрата повітря G_{v2} (51000 – 69000 кг/год) – «Дуже низька», «Низька», «Середня», «Висока», «Дуже висока»

Для того щоб система могла відпрацювати ці правила, треба задати математичні функції належності.

Подання функції належності математично та графічно

$$x := 637.5, 638 \dots 862.5$$

$$B_veryLow(x) := \begin{cases} 1 & \text{if } x \leq 637.5 \\ \frac{693.5 - x}{693.5 - 637.5} & \text{if } 637.5 \leq x \leq 693.5 \\ 0 & \text{if } x \geq 693.5 \end{cases}$$

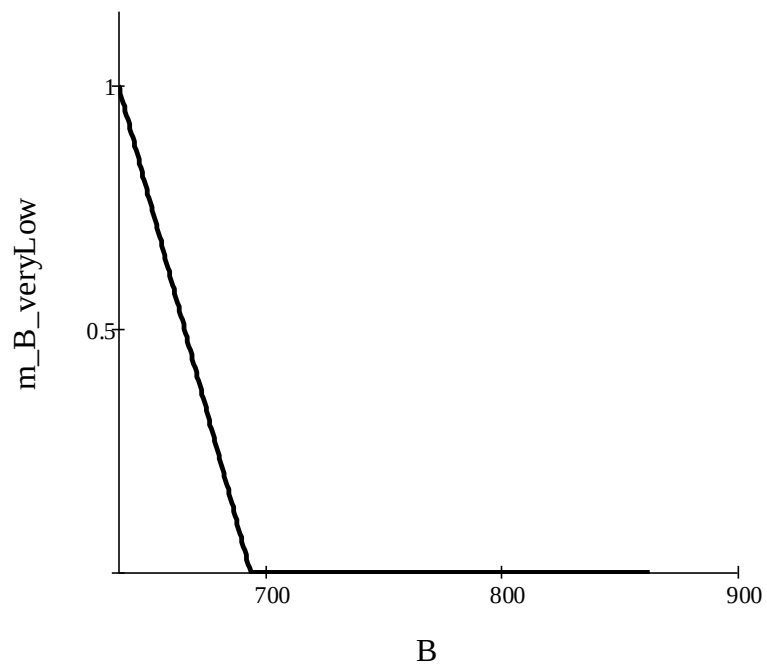


Рисунок 4.7 «Нечітка підмножина «Дуже низька» визначена на множині значень витрати палива»

$$B_low(x) := \begin{cases} 0 & \text{if } x < 637.5 \\ \frac{x - 637.5}{693.5 - 637.5} & \text{if } 637.5 \leq x \leq 693.5 \\ \frac{750 - x}{750 - 693.5} & \text{if } 693.5 \leq x \leq 750 \\ 0 & \text{if } x \geq 750 \end{cases}$$

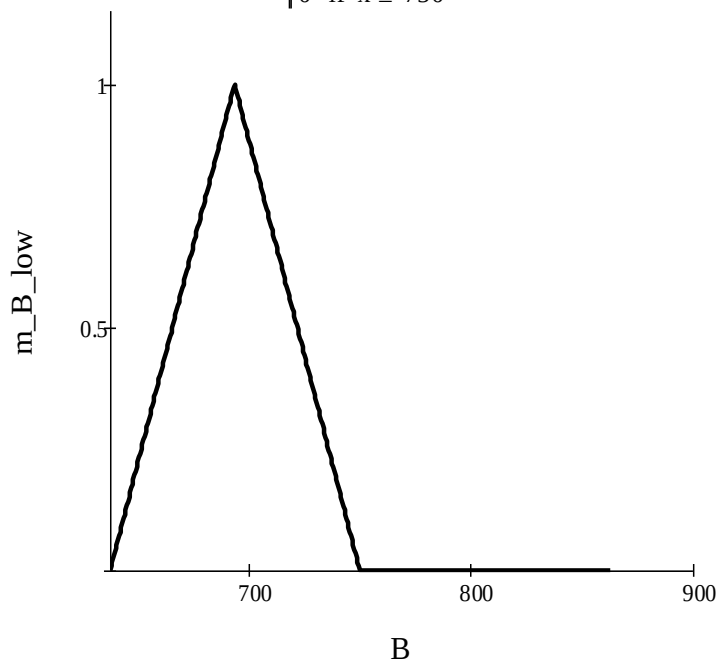


Рисунок 4.8 «Нечітка підмножина «Низька» визначена на множині значень витрати палива»

$$B_mid(x) := \begin{cases} 0 & \text{if } x < 693.75 \\ \frac{x - 693.75}{750 - 693.75} & \text{if } 693.75 \leq x \leq 750 \\ \frac{806.25 - x}{806.25 - 750} & \text{if } 750 \leq x \leq 806.25 \\ 0 & \text{if } x \geq 806.25 \end{cases}$$

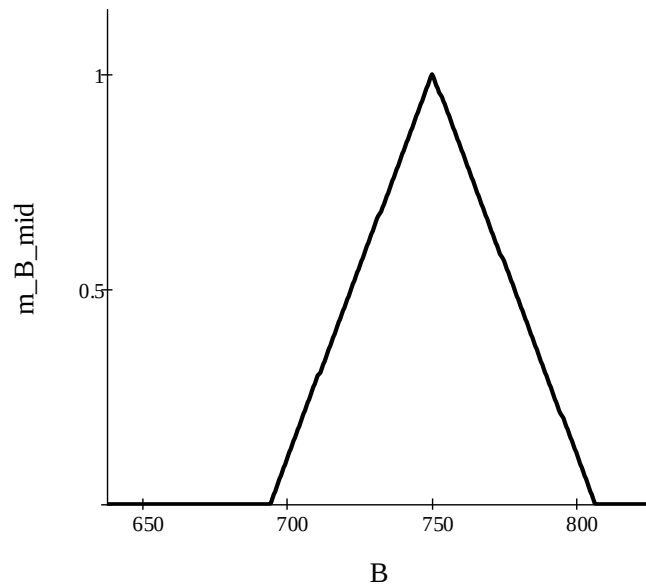


Рисунок 4.9 «Нечітка підмножина «Середня» визначена на множині значень витрати палива»

$$B_high(x) := \begin{cases} 0 & \text{if } x < 750 \\ \frac{x - 750}{806.25 - 750} & \text{if } 750 \leq x \leq 806.25 \\ \frac{862.5 - x}{862.5 - 806.25} & \text{if } 806.25 \leq x \leq 862.5 \\ 0 & \text{if } x \geq 862.5 \end{cases}$$

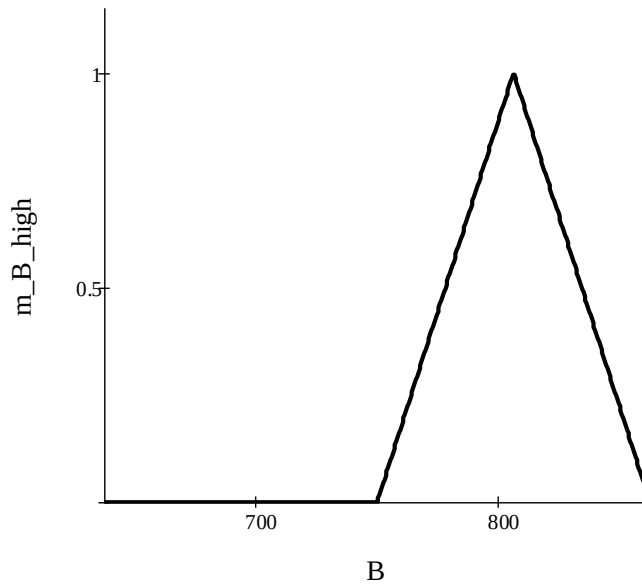


Рисунок 4.10 «Нечітка підмножина «Висока» визначена на множині значень витрати палива»

$$B_veryHigh(x) := \begin{cases} 0 & \text{if } x < 806.25 \\ \frac{x - 806.25}{862.5 - 806.25} & \text{if } 806.25 \leq x \leq 862.5 \\ 1 & \text{if } x > 862.5 \end{cases}$$

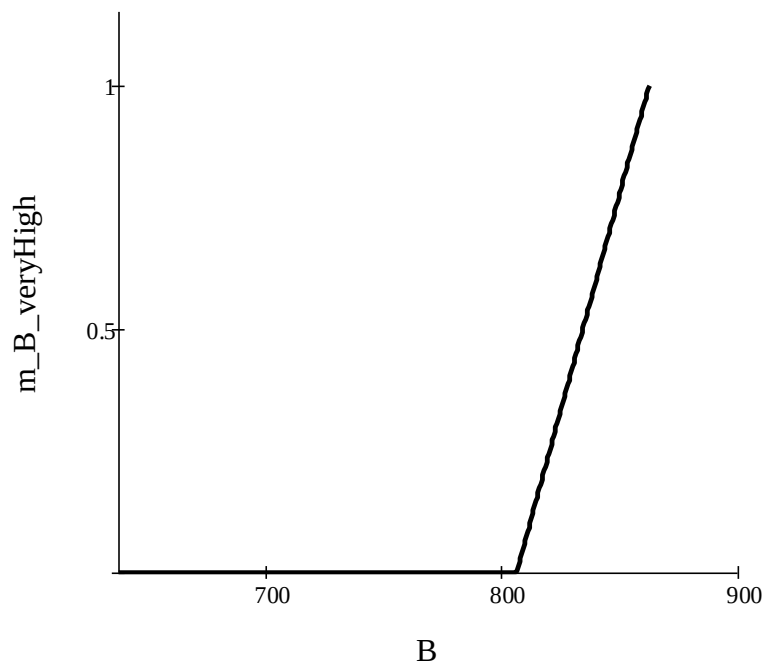


Рисунок 4.11 «Нечітка підмножина «Дуже висока» визначена на множині значень витрати палива»

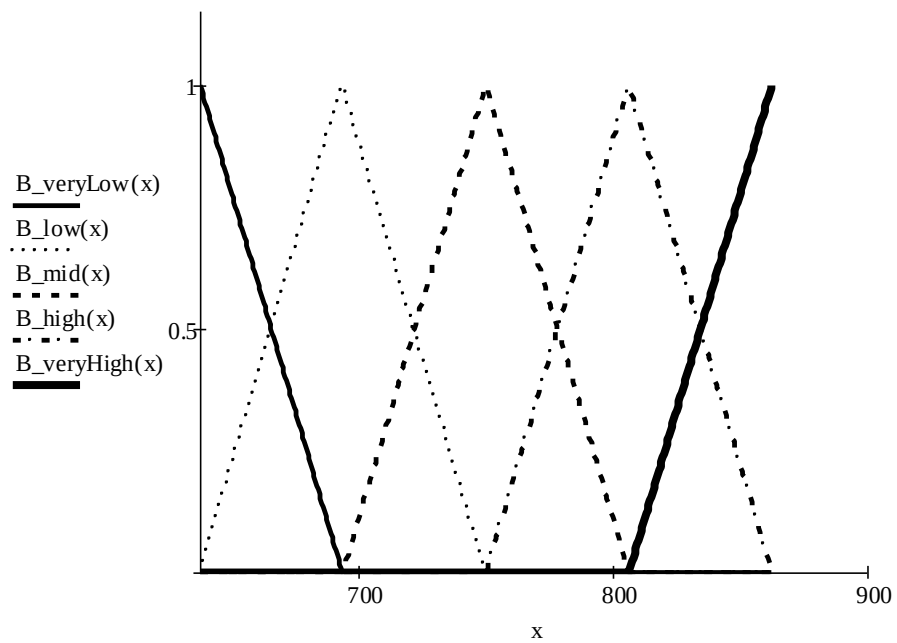


Рисунок 4.12 «Усі нечіткі визначені на множині значень витрати палива»

$x := 51000, 51100 \dots 69000$

$$Gv2_veryLow(x) := \begin{cases} 1 & \text{if } x \leq 51000 \\ \frac{55500 - x}{55500 - 51000} & \text{if } 51000 \leq x \leq 55500 \\ 0 & \text{if } x \geq 55500 \end{cases}$$

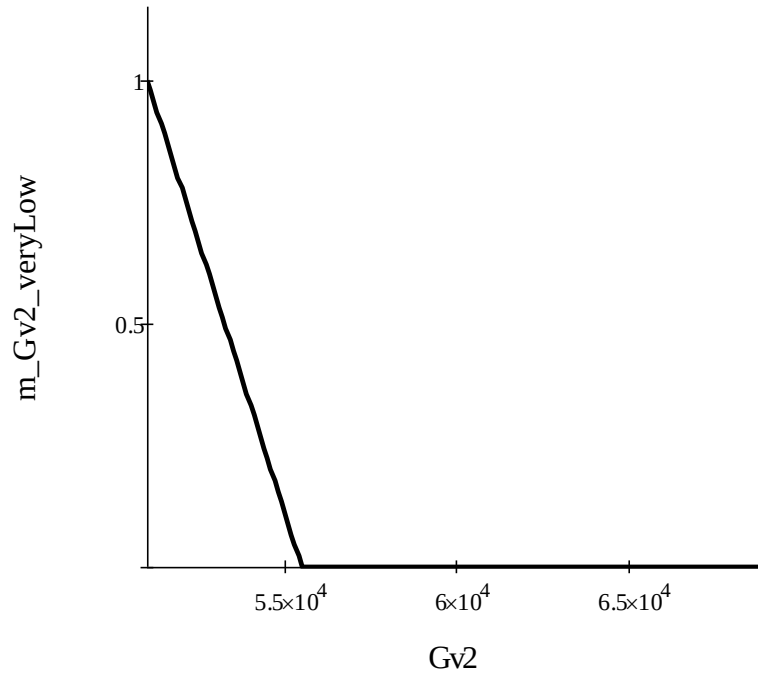


Рисунок 4.13 «Нечітка підмножина «Дуже низька» визначена на множині значень витрати вторинного повітря»

$$Gv2_low(x) := \begin{cases} 0 & \text{if } x < 51000 \\ \frac{x - 51000}{55500 - 51000} & \text{if } 51000 \leq x \leq 55500 \\ \frac{60000 - x}{60000 - 55500} & \text{if } 55500 \leq x \leq 60000 \\ 0 & \text{if } x \geq 60000 \end{cases}$$

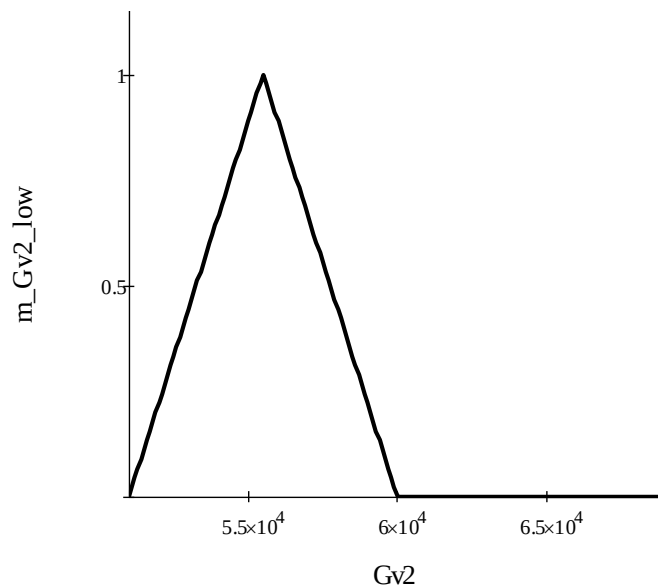


Рисунок 4.14 «Нечітка підмножина «Низька» визначена на множині значень витрати вторинного повітря»

$$Gv2_mid(x) := \begin{cases} 0 & \text{if } x < 55500 \\ \frac{x - 55500}{60000 - 55500} & \text{if } 55500 \leq x \leq 60000 \\ \frac{64500 - x}{64500 - 60000} & \text{if } 60000 \leq x \leq 64500 \\ 0 & \text{if } x \geq 64500 \end{cases}$$

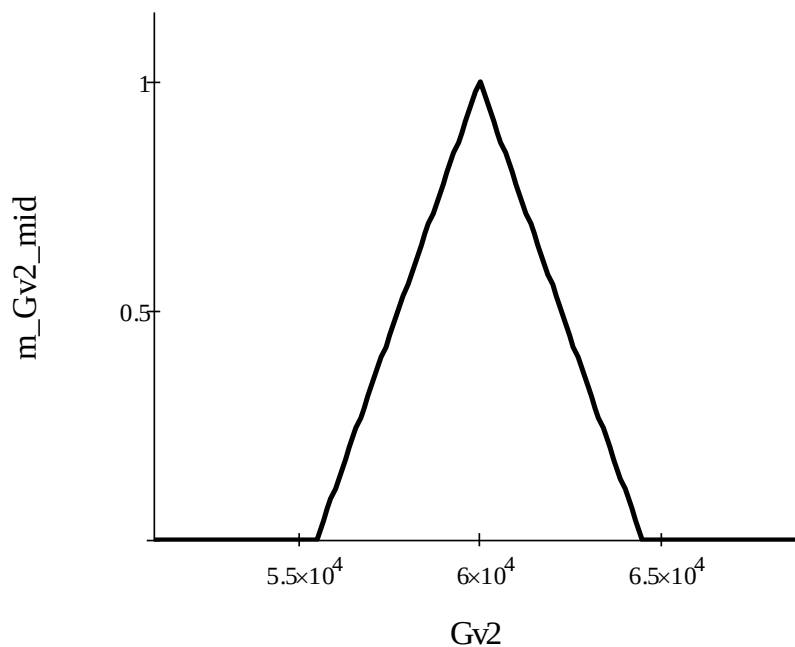


Рисунок 4.15 «Нечітка підмножина «Середня» визначена на множині значень витрати вторинного повітря»

$$Gv2_high(x) := \begin{cases} 0 & \text{if } x < 60000 \\ \frac{x - 60000}{64500 - 60000} & \text{if } 60000 \leq x \leq 64500 \\ \frac{69000 - x}{69000 - 64500} & \text{if } 64500 \leq x \leq 69000 \\ 0 & \text{if } x \geq 69000 \end{cases}$$

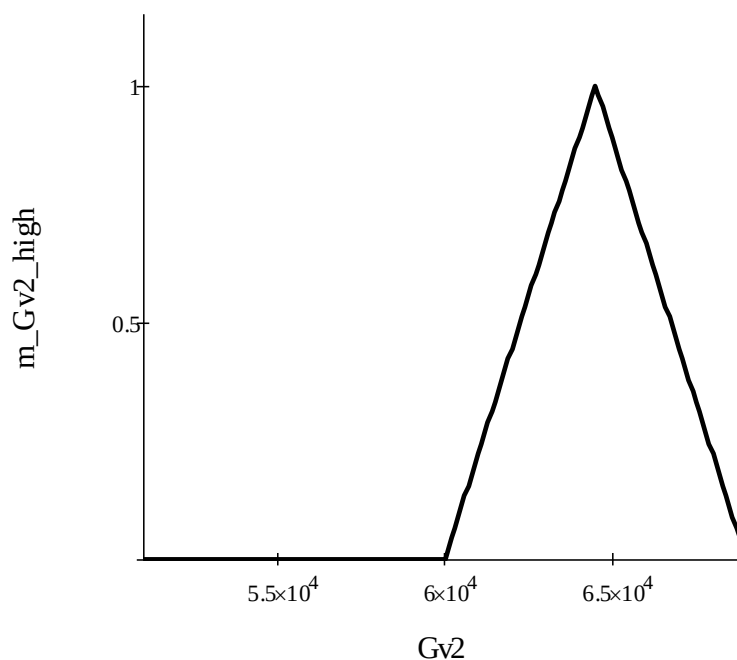


Рисунок 4.16 «Нечітка підмножина «Висока» визначена на множині значень витрати вторинного повітря»

$$\text{Gv2_veryHigh}(x) := \begin{cases} 0 & \text{if } x < 64500 \\ \frac{x - 64500}{69000 - 64500} & \text{if } 64500 \leq x \leq 69000 \\ 1 & \text{if } x > 69000 \end{cases}$$

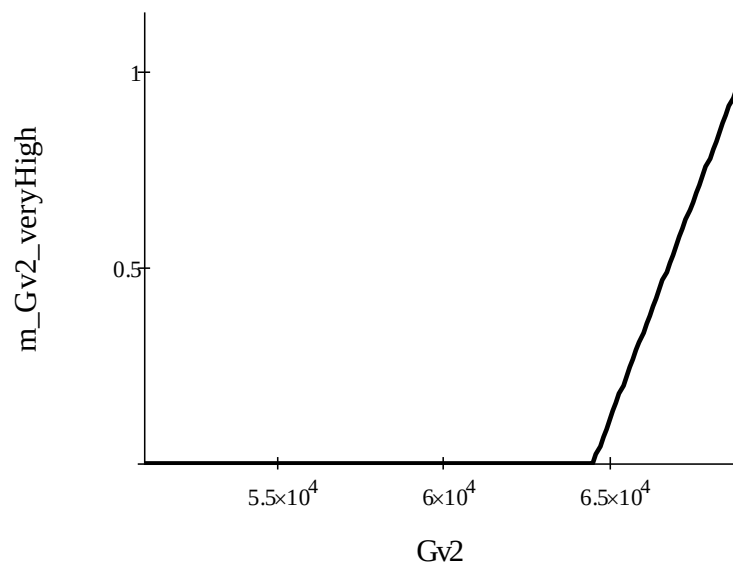


Рисунок 4.17 «Нечітка підмножина «Дуже висока» визначена на множині значень витрати вторинного повітря»

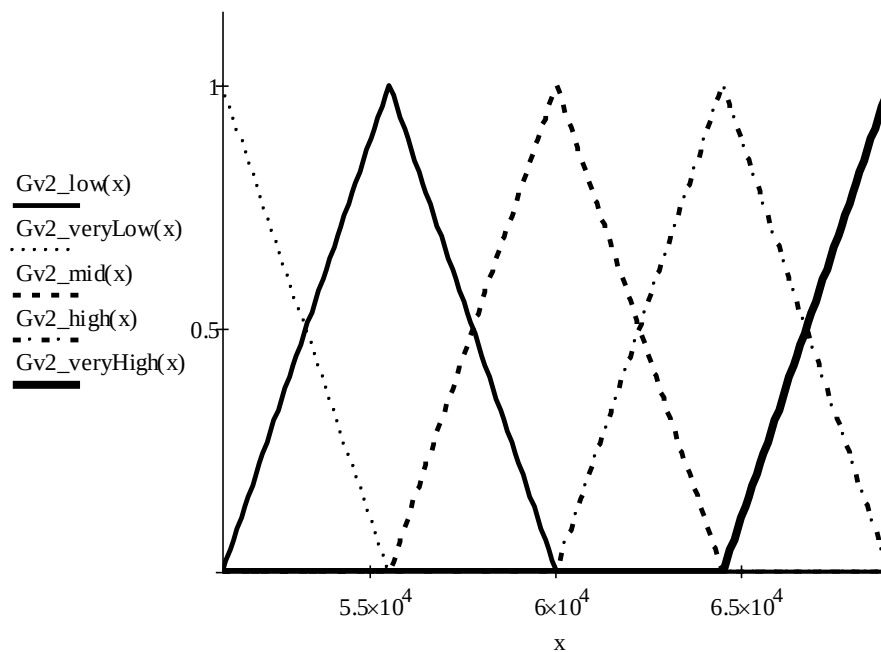


Рисунок 4.18 «Усі нечіткі визначені на множині значень витрати вторинного повітря»

4.3. Формування нечітких правил керування.

Розрахунок керувальної змінної системи управління за різними алгоритмами

Сформулюємо нечіткі правила керування [16, 17]:

ЯКЩО витрата палива «*дуже низька*», ТО витрата повітря повинна бути «*дуже низька*»

ЯКЩО витрата палива «*низька*», ТО витрата повітря повинна бути «*низька*»

ЯКЩО витрата палива «*середня*», ТО витрата повітря повинна бути «*середня*»

ЯКЩО витрата палива «*висока*», ТО витрата повітря повинна бути «*висока*»

ЯКЩО витрата палива «*дуже висока*», ТО витрата повітря повинна бути «*дуже висока*»

Припустимо, що температура реакційної суміші рівна -90 °C.

Коефіцієнти модифікацій:

$\underline{dn_m} := B_veryLow(728)$	$dn_m = 0$
$\underline{n_m} := B_low(728)$	$n_m = 0.389$
$\underline{s_m} := B_mid(728)$	$s_m = 0.609$
$\underline{v_m} := B_high(728)$	$v_m = 0$
$\underline{dv_m} := B_veryHigh(728)$	$dv_m = 0$

Метод добутку:

$$\begin{aligned}Gv2_dn_md(x) &:= Gv2_veryLow(x) \cdot dn_m \\Gv2_n_md(x) &:= Gv2_low(x) \cdot n_m \\Gv2_s_md(x) &:= Gv2_mid(x) \cdot s_m \\Gv2_v_md(x) &:= Gv2_high(x) \cdot v_m \\Gv2_dv_md(x) &:= Gv2_high(x) \cdot v_m \\Gv2_md(x) &:= \max(Gv2_dn_md(x), Gv2_n_md(x), Gv2_s_md(x), Gv2_v_md(x), Gv2_dv_md(x))\end{aligned}$$

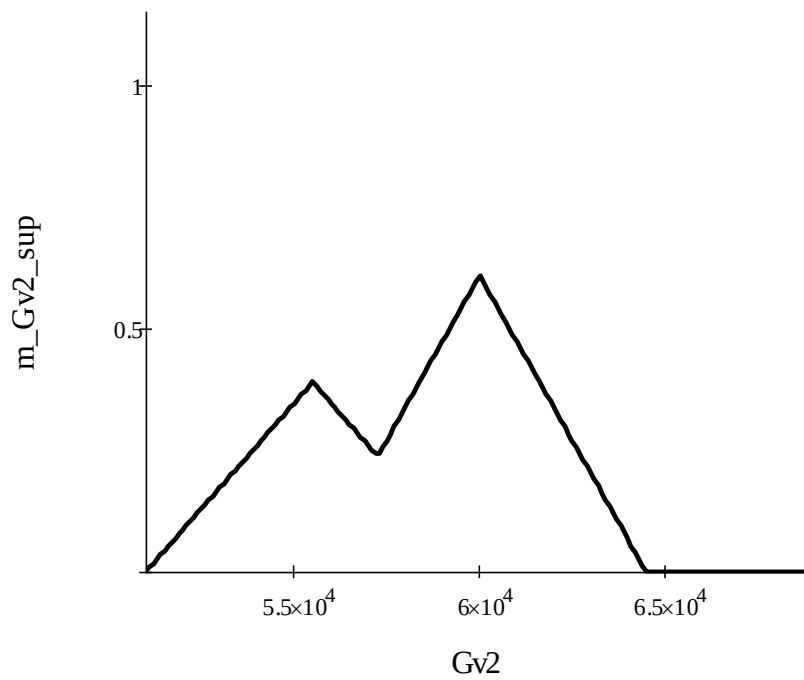


Рисунок 4.19 «Результат суперпозиції нечітких множин методом об'єднання з модифікацією правил методом добутку»

$$Gv2_md2(x) := Gv2_dn_md(x) + Gv2_n_md(x) + Gv2_s_md(x) + Gv2_v_md(x) + Gv2_dv_md(x)$$

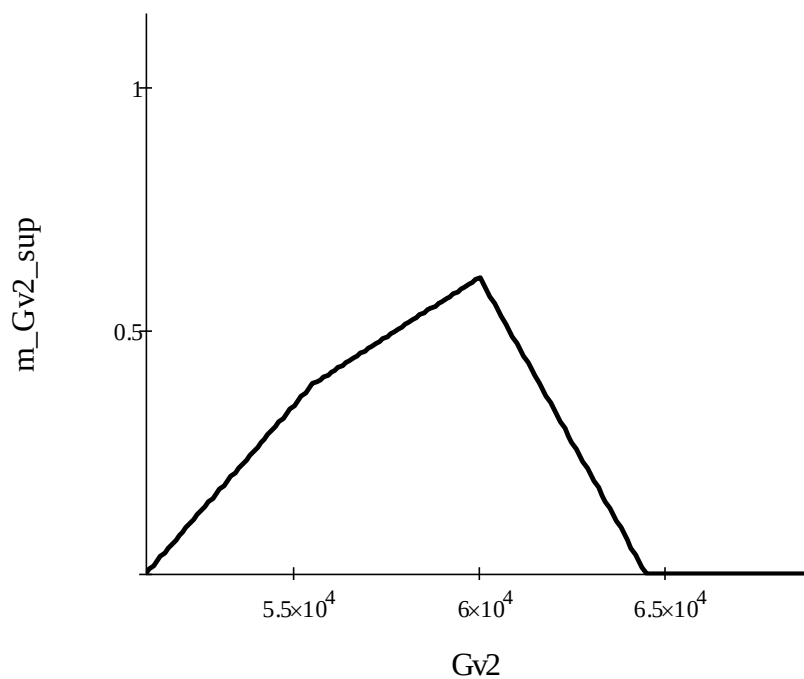


Рисунок 4.20 «Результат суперпозиції нечітких множин методом підсумовування з модифікацією правил методом добутку»

Метод мінімуму:

$$Gv2_dn_mn(x) := \begin{cases} Gv2_veryLow(x) & \text{if } Gv2_veryLow(x) \leq dn_m \\ dn_m & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Gv2_n_mn(x) := \begin{cases} Gv2_low(x) & \text{if } Gv2_low(x) \leq n_m \\ n_m & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Gv2_s_mn(x) := \begin{cases} Gv2_mid(x) & \text{if } Gv2_mid(x) \leq s_m \\ s_m & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Gv2_v_mn(x) := \begin{cases} Gv2_high(x) & \text{if } Gv2_high(x) \leq v_m \\ v_m & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Gv2_dv_mn(x) := \begin{cases} Gv2_veryHigh(x) & \text{if } Gv2_veryHigh(x) \leq dv_m \\ dv_m & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Gv2_mn(x) := \max(Gv2_dn_mn(x), Gv2_n_mn(x), Gv2_s_mn(x), Gv2_v_mn(x), Gv2_dv_mn(x))$$

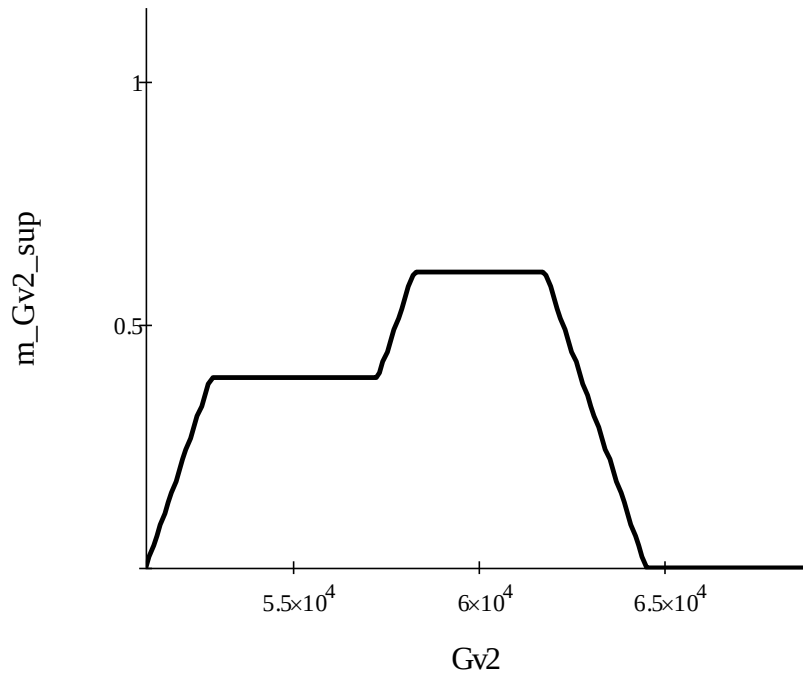


Рисунок 4.21 «Результат суперпозиції нечітких множин методом об'єднання з модифікацією правил методом мінімуму»

$$Gv2_mm2(x) := Gv2_dn_mn(x) + Gv2_n_mn(x) + Gv2_s_mn(x) + Gv2_v_mn(x) + Gv2_dv_mn(x)$$

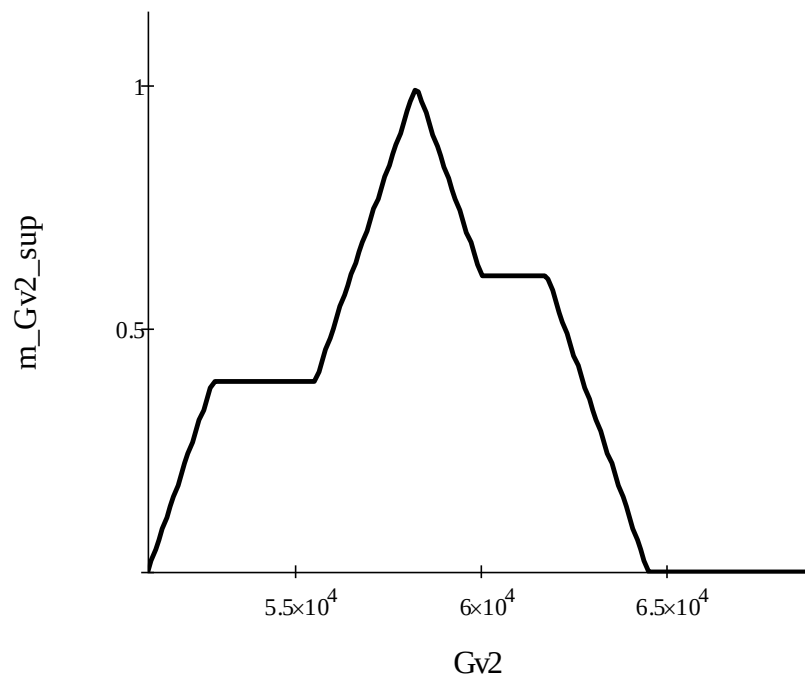


Рисунок 4.22 «Результат суперпозиції нечітких множин методом підсумовування з модифікацією правил методом мінімуму»

Реалізація НЧСК засобами програм *MatLab*

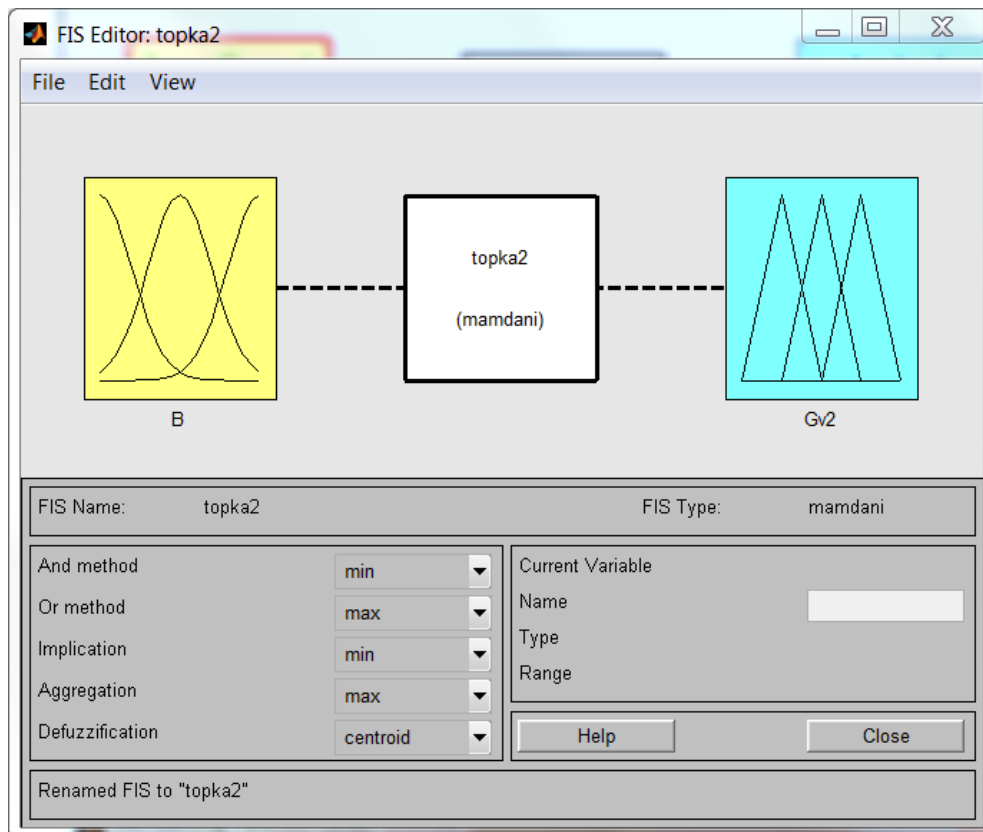


Рисунок 4.23 Вид редактора FiS з вхідною та вихідною змінною

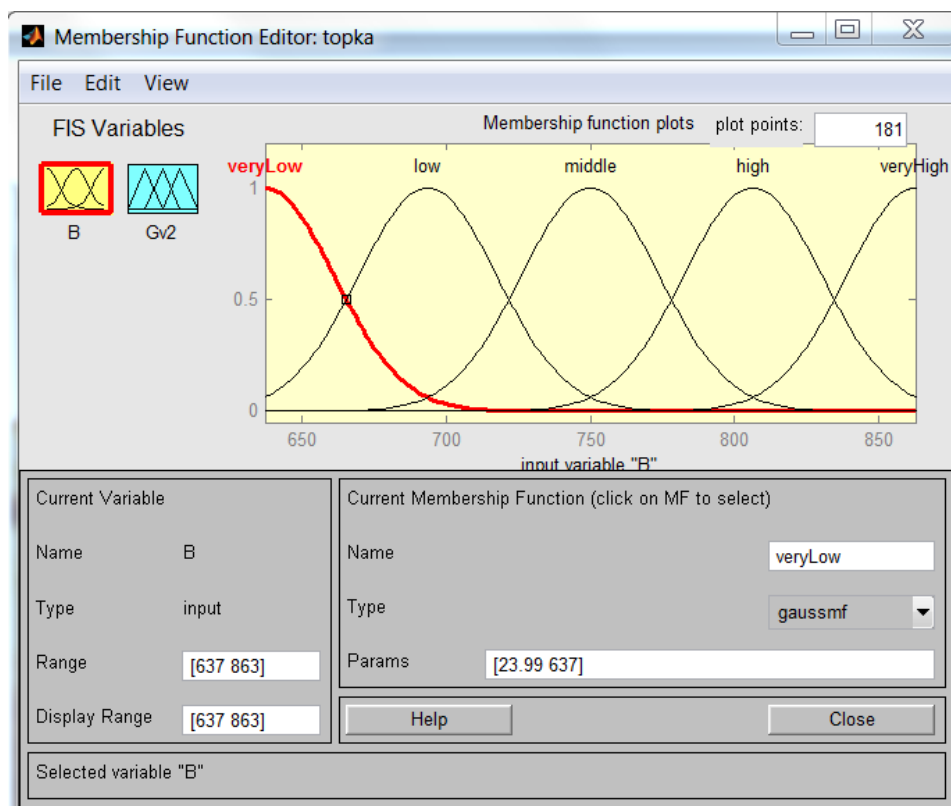


Рисунок 4.24 Вигляд редактора функцій належності при редагуванні вхідної змінної

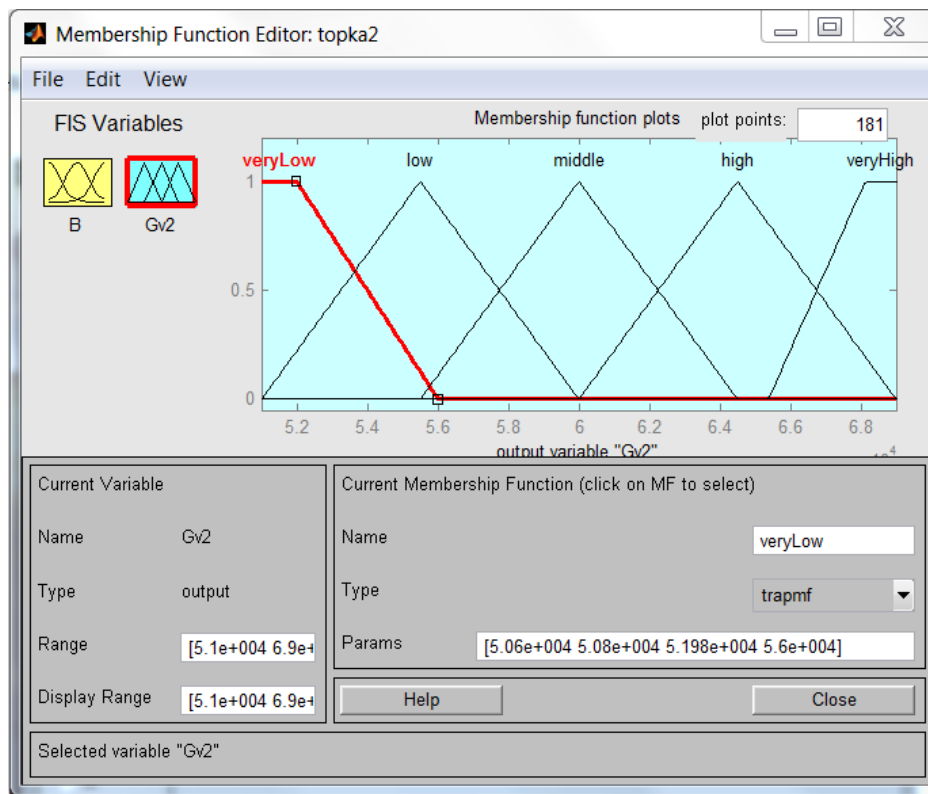


Рисунок 4.25 Вигляд редактора функцій належності при редагуванні вихідної змінної

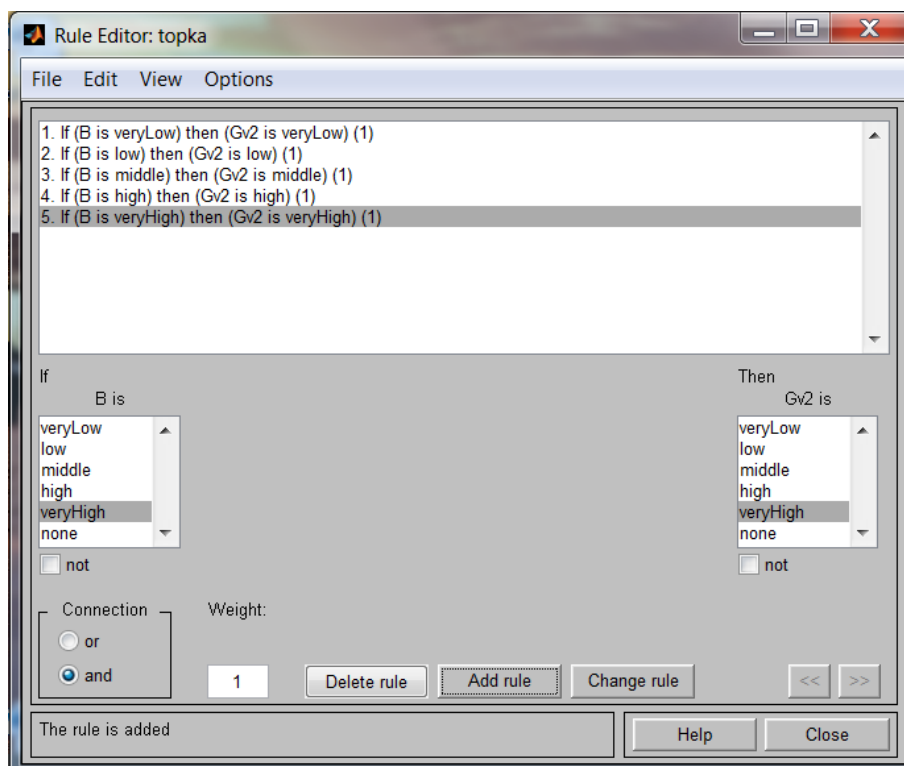


Рисунок 4.26 Вигляд редактора правил нечіткого висновку після їх визначення

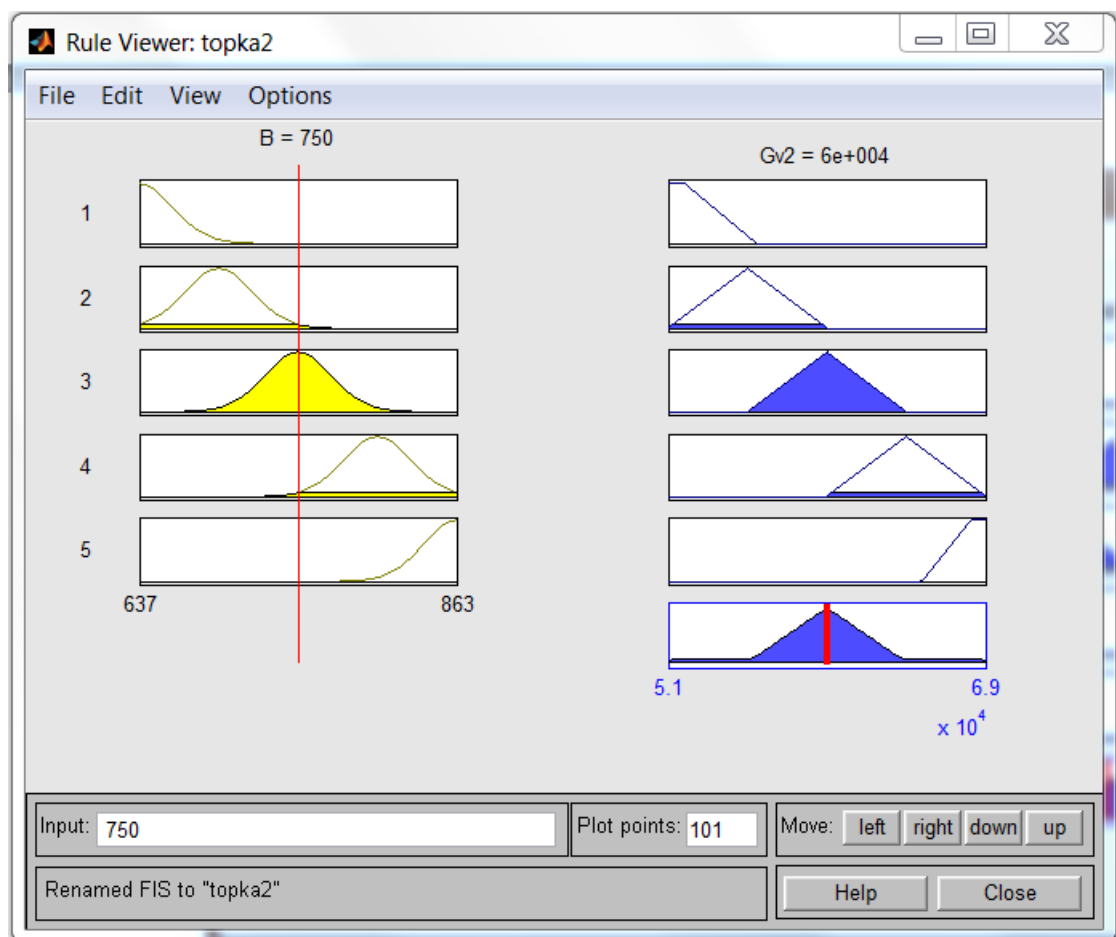


Рисунок 4.27 Вигляд програми проглядання правил нечіткого висновку для значень вхідних змінних

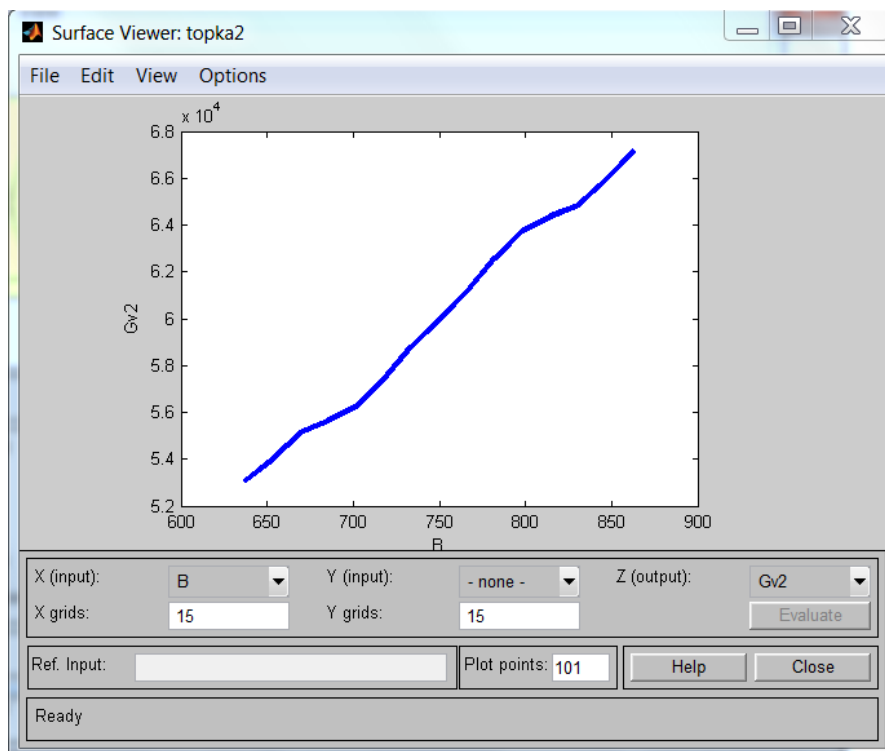


Рисунок 4.28 Вигляд програми проглядання поверхні нечіткого висновку для розробленої нечіткої моделі

5. СТАРТАП ПРОЕКТ

5.1 Мета стартапу

Розробити та впроваджувати SCADA-систему для установки контактного доочищення олив відбілювальними глинами (далі — «SCADA-BLEACH») для малих і середніх олійно-жирових підприємств (refineries / processors). Продукт автоматизує: дозування глини, контроль температури/тиску/рівнів, оптимізацію тривалості контакту, фільтрацію і відстеження показників якості (кольору, індексу кислотності). Рішення дає економію реагенту, підвищення якості продукту, зменшення операційних витрат і кращу прослідковуваність для сертифікацій (GMP / traceability) [21].

Ключове: ринок хворий на фрагментацію і потребує цифровізації; глобальний ринок відбілювальної глини та SCADA росте — хороший макрофон. fortunebusinessinsights.com+1

Опис продукту [21]

- Компоненти системи:
 - HMI/операторська панель (веб/локальний HMI) з трендами, аварійними індикаторами, логами.
 - PLC-інтеграція (Modbus/Profinet/OPC UA) для насосів, клапанів, дозаторів глини, фільтр-преса, теплообмінника.
 - Алгоритми оптимізації дозування глини (правила + PID/логіка) → мінімізувати витрату глини при збереженні якості.
 - Аналітика (SaaS): KPI по витраті глини, енергії, часу контакту, yield; звіти для сертифікації.
 - Модуль віддаленого моніторингу + оповіщення (Telegram / SMS / e-mail).
- Формат продажу:

- on-premise SCADA + одноразова плата за встановлення.
- Підписка SaaS на аналітику/збереження історії/оновлення алгоритмів.
- Технологічна перевага: спеціалізований пакет логіки для процесу контактної доочистки — готові шаблони, що скорочують час впровадження.

Цільовий ринок та розміри [21]

- Глобальний ринок відбілювальної глини: оцінки різняться, але дані показують ріст — приклади: Fortune Business Insights (USD ~335M у 2023 → зростання до 2032) та IMARC / інші звіти з більшими оцінками; висновок — стійкий попит у секторі олій та жирів. fortunebusinessinsights.com+1
- Глобальний SCADA / industrial automation: ринок SCADA оцінюється в між ~USD 12B–22B (різні джерела) з CAGR ~4–11% у найближче десятиліття — сильна галузева динаміка автоматизації. precedenceresearch.com+1
- Сировинний попит (рослинні олії): глобальне виробництво рослинних олій продовжує зростати (USDA / аналітика 2025), що підтримує попит на технології переробки та доочистки. ukragroconsult.com
- Україна: велика експортна галузь рослинних олій (значна частина експорту країни) — це локальний ринок з великою кількістю олійних заводів, зацікавлених в підвищенні якості та оптимізації витрат. [UCAB](https://ucab.com)+1

Висновок: цільовий ринок — локальні і регіональні олійно-жирові заводи (Україна, ЄС сусідні), а також постачальники/виробники відбілювальної глини та оператори контрактної переробки.

Конкуренція [21]

- Прямі конкуренти: великі постачальники SCADA/інтегратори (Siemens, Schneider, Wonderware) — дають загальні рішення, але не «out-of-the-box» для технології відбілювання.

- Нішеві гравці/локальні інтегратори: пропонують кастомні проекти, але часто без аналітичної SaaS-складової та оптимізації дозування.
- Перевага стартапу: нішевий фокус, готові алгоритми оптимізації дозування глини, швидке впровадження, SaaS-аналітика.

5.2. Бізнес-модель

- CAPEX-продаж: одноразова вартість обладнання + інсталяції + ліцензії (пакет).
- OPEX: щорічна підписка SaaS (аналітика, оновлення), техпідтримка, запчастини.
- Додатково: оплати за датчики/модулі, інтеграція з ERP, віддалений моніторинг.
- Цінова пропозиція (орієнтир, приклад): пакет «старт» — €40–70k за установку (включно PLC, HMI, датчики, інсталяція) + €5–12k/рік підписка. (Ціни — ілюстративні; потрібно локальне пропозиційне креслення та калькуляція).

Простий фінансовий сценарій [21]

Усі цифри — прикладний сценарій для оцінки інвестування; їх треба коригувати під реальні локальні ціни/курси/податки.

Припущення:

- Ціна продажу (hardware+install+ліцензія) = €60,000/установку.
- Річна підписка (сервіс+SaaS) = €8,000/установку (починає надходити після встановлення).
- Собівартість (COGS) апаратної частини + інсталяція = €30,000/установку.
- R&D / початкові витрати (Year0) = €100,000.

- Маркетинг/операційні витрати: Year1 €50k, Year2 €80k, Year3 €120k, Year4 €150k.
- План продажів (установки): Year1: 3, Year2: 10, Year3: 25, Year4: 40, Year5: 60.
- Дисконтна ставка для NPV = 12%.

Результати (загальні грошові потоки, ілюстративно) [21]:

Грошові	потоки	(Year0..Year5):
Year0:	−€100,000	(R&D)
Year1:		+€114,000
Year2:		+€354,000
Year3:		+€974,000
Year4:		+€1,704,000
Year5:		+€2,754,000

- При таких припущеннях NPV (при дисконт 12%) $\approx$ €3,622,883 (позитивний), IRR $\approx$ 251% (дуже високий, через невеликий початковий капітал і швидке масштабування у припущенні).
Заувага: IRR тут дуже великий через консервативний початковий вклад у порівнянні з доходами; реальні показники залежать від реальних витрат на впровадження, гарантій, кредитного капіталу тощо.

(Я ось-ось підрахував ці показники для ілюстрації сценарію — якщо потрібно, зроблю версію з трьома сценаріями: консервативним / базовим / оптимістичним з чіткими чутливими аналізами.)

Маркетинг і продажі (Go-to-Market) [21]

- Пілот із 1–2 локальними заводами (крайній приклад — Україна) → кейс-стаді з даними економії глини та підвищеної якості.
- Ціль: технічні менеджери, власники заводів, рітейлери, co-packers.

- Канали: пряма продаж через інженерів з продажу; партнерство з постачальниками глини/фільтрації; участь у виставках agro/food tech; онлайн-маркетинг для B2B.
- Комунікація: ROI кейси (€/т економії), підвищення виходу продукції, відповідність стандартам.

Вигоди для клієнта (конкретно)

- Зниження витрат на відбілювальну глину за рахунок оптимізації дозування (залежно від процесу — потенційно 5–20% економії).
- Підвищення стабільності якості очищеної оливи → кращі контракти/ціни.
- Зниження часу простою через автоматичні алерти та предиктивну діагностику.
- Збереження історії процесу для сертифікацій та претензій із якістю.

Ризики та заходи пом'якшення [21]

- Технічний ризик: невірна інтеграція з існуючим обладнанням — пом'якшити модульною архітектурою та детальними pre-site surveys.
- Ринок/конкуренція: великі інтегратори можуть запропонувати подібні системи — диференціюватися глибинним domain-knowledge і SaaS-аналітикою.
- Капітал/ліквідність: початкові витрати на R&D — шукати гранти, ангел-інвестиції, pre-рау контракти з пілотними клієнтами.
- Регуляторика/сертифікація: забезпечити відповідність санітарним вимогам; співпрацю з лабораторіями.

Команда та потреби в ресурсах [21]

- Мінімальна стартова команда: CTO/Automation engineer, Backend/Cloud developer, Embedded/PLC інженер, Business dev / Sales (1-2), QA/тестувальник.
- Бюджет на 6–12 місяців запуску: R&D + пілотні впровадження $\approx$ €100–200k (залежно від рівня зарплат/фіксованих витрат).

Дорожня карта (12–24 місяці)

- Місяці 0–3: архітектура продукту, MVP контролера + HMI, підготовка тестової установки.
- Місяці 4–6: інтеграція алгоритмів оптимізації дозування, локальний пілот (1 завод).
- Місяці 7–12: кейс-стаді, маркетинг, перша комерційна пропозиція, підписка SaaS.
- 12–24 місяці: масштабування (ціль — регіональні партнери, 20–50 установок).

Запит на фінансування

- Потреба: €250,000–€500,000 (залежно від масштабу пілотів) на R&D, обладнання для пілота, зарплати, маркетинг на рік.
- Використання коштів: 40% R&D/прототип, 30% інсталяції пілотів, 20% маркетинг/сейлз, 10% операційні резерви.

Короткий опис процесу [14]

Стандартний технологічний ланцюг:

1. Вхід сирової оливи (нафтова/рослинна) — насос підживлення
2. Підігрів / теплообмінник
3. Дозатор відбілювальної глини (сипучий або пастоподібний) з приводом/шнеком

4. Змішувач (контактна ємність) — регульований час контакту
5. Контактний апарат (якщо відокремлено) / реактор
6. Фільтр-прес / центрифуга
7. Резервуар очищеної оливи
8. Відвідні лінії (відходи/глина) і пункт збору твердої фази

Кожен ключовий вузол має датчики: температура (Т), тиск (Р), рівень (L), витрата (F), стан приводів (М), та виконавчі механізми (клапани V, насоси Р, приводи дозаторів D) [15].

5.3 Логічна архітектура системи

- Field layer (польовий рівень): датчики (Т/Р/L/F), виконавчі елементи (насоси, клапани, двигуни, приводи шнеків), місцеві інтерфейси (вимикачі, ручне/автоматичне перемикання).
- Control layer (контролери): PLC (основний), резервний PLC (опціонально), remote I/O в зоні процесу.
- SCADA/HMI layer: сервер SCADA (Windows/Linux), HMI (локальна операційна панель + web-клієнт), історизація трендів (SQL/Time-series DB), alarm server, звітність (SaaS або локально).
- Cloud/Analytics (опціонально): модуль аналітики для оптимізації дозування глини (SaaS) з API.
- Network: промислова Ethernet (кабель/оптичне з'єднання), відокремлені VLAN для управління і для офісної мережі. Протоколи: OPC UA (рекомендовано) або Modbus TCP; для зв'язку з PLC — Modbus RTU/Modbus TCP/Profinet залежно від постачальника.

Перелік обладнання (базовий)

- PLC: 1 х основний (з резервуванням CPU або hot-standby за потреби). Рекомендація: 32–64 DI/DO, 16 AI, 8 AO (розширюваний).
- Remote I/O блоки (для зон з великою кількістю сигналів).
- HMI: операційна панель 12–15" + web/HMI server.
- SCADA сервер (міцний промисловий ПК або віртуальний сервер) з SSD та резервним живленням UPS.
- Датчики: Т (PT100/термопара), Р (4–20 mA або 0–10 V трансмітери), L (зонд / ультразвук / датчики поплавця), F (варіанти: витратомір коріоліс / вихровий / турбінний), датчики положення клапанів.
- Комунікаційне обладнання: промислові комутатори, firewall, OPC UA gateway (якщо потрібно).

I/O-лист (стандартний — адаптується під площадку)

Нижче приведено детальний I/O-лист. Адреси PLC-портів наведені прикладно (формат: %I/%Q/%AI/%AO або адреса Modbus). Інтегратор повинен узгодити конкретні адреси під обране PLC.

Вхідні дискретні сигнали (DI)

1. DI001 — Start/Stop загального насоса подачі сирової оливи (локальний кнопковий) — %I0.0
2. DI002 — Emergency Stop (E-Stop) — %I0.1
3. DI003 — Ручний/Автоматичний режим оператора (local/remote) — %I0.2
4. DI004 — Положення дверцят фільтр-преса (закрито) — %I0.3
5. DI005 — Датчик рівня бункера глини (нижній рівень) — %I0.4
6. DI006 — Датчик рівня бункера глини (верхній рівень) — %I0.5
7. DI007 — Fault насоса подачі (NC контакт) — %I0.6

8. DI008 — Fault приводу дозатора глини — %I0.7
9. DI009 — Ручний імпульс для шнеку дозатора — %I0.8
10. DI010 — Датчик дверцят теплообмінника / доступу — %I0.9

Вихідні дискретні сигнали (DO)

1. DO001 — Пуск/Стоп насос подачі сирової оливи — %Q0.0
2. DO002 — Пуск/Стоп насос циркуляції теплообмінника — %Q0.1
3. DO003 — Управління шнеком/дозатором глини (привід) — %Q0.2
4. DO004 — Операторський байпас клапану — %Q0.3
5. DO005 — Клапан подачі глини (пневматичний/електричний) — %Q0.4
6. DO006 — Старт циклу фільтр-преса — %Q0.5
7. DO007 — Оповіщення (сирена/лампа) — %Q0.6
8. DO008 — Клапан зливу відходів — %Q0.7

Аналігові входи (AI)

1. AI001 — Т подачі сирової оливи (PT100 / 4–20 mA) — %IW0
2. AI002 — Т після теплообмінника — %IW1
3. AI003 — Р на вході насосної лінії (transmitter 4–20 mA) — %IW2
4. AI004 — Р у контактному апараті — %IW3
5. AI005 — L у бункері очищеної оливи (ультразвук/4–20) — %IW4
6. AI006 — F потоку подачі (витраомір, 4–20 mA) — %IW5
7. AI007 — Вологість/Інші параметри (опціонально) — %IW6

Аналігові виходи (AO)

1. AO001 — Аналоговий вихід для регулювання частоти приводу насоса (0–10 V / 4–20 mA) — %QW0
2. AO002 — Аналоговий вихід для управління положення клапана (0–10 V) — %QW1

PLC-mapping (приклад для Modicon/Siemens/Allen-Bradley)

Приклад для умовного PLC (адреси умовні). Інтегратор має замінити на відповідні адреси під конкретну модель PLC.

- %I0.0 DI001 Start pump feed
- %I0.1 DI002 E-STOP
- %I0.2 DI003 Local/Auto
- %Q0.0 DO001 Pump feed start/stop
- %Q0.2 DO003 Doser motor start/stop
- %AI0 AI001 Temp raw in (scaled 4–20mA -> °C)
- %AQ0 AO001 Pump VFD setpoint (0–100%)

Розширення: Для Modbus — назначити регістри Holding/Input: HR4000 — AI001, HR4001 — AI002, Coil 100 — DO001 і т.д.

Контрольна логіка [19]

1. Запуск / зупинка: Пуск в Auto тільки якщо: E-Stop не активний, всі критичні датчики в нормі, бункер глини має достатній рівень.
2. PID-контроль температури: Тримати задану температуру в реакторі (T_{set}). Вихід — частота VFD циркуляційного насоса / нагрівальний елемент (AO001).
3. Дозування глини: Логіка залежить від типу дозатора:

- Якщо шнек з імпульсним управлінням — керування за таймером/імпульсами, з контролем рівня бункера та сигналом Fault.
 - Опціонально: адаптивна логіка по якості вихідної оливи (feedback) якщо доступний датчик якості.
4. Фільтраційний цикл: Послідовність: підготовка → пресування → випуск фільтрату → промивка (якщо передбачено). Блокування старту циклу якщо двері відкриті.
5. Аварійні блокування: при перевищенні P_{max} або T_{max} — аварійне зупинення, клапани закриваються, оповіщення.

НМІ — шаблони екранів

Нижче наведені рекомендовані НМІ-екрани. Для кожного екрану надати макет з розміщенням елементів управління, трендів і аварій [17].

Екран 1 — Overview / Головна

- Панорамна схема процесу з блок-схемою (вхід → підігрів → дозатор → реактор → фільтр-прес → резервуар).
- Стани насосів/клапанів (зелені/жовті/червоні індикатори).
- Основні параметри: T_{in} , T_{out} , P_{in} , $P_{contact}$, Flow ($m^3/год$), Level_clean.
- Короткі лунки alarm summary (останні 5 алармів).
- Кнопки: Go to Alarms, Trends, Recipes, Manual Control.

Екран 2 — Деталі дозатора та бункера глини

- Графічне представлення бункера, рівні (L_{high} , L_{low}), статус шнека, ручний управління шнеком з імпульсами.
- Лічильник ваги/доз (якщо є датчик ваги) — відображення добової витрати глини.

Екран 3 — PID/Process Control

- Налаштування T_set, режим PID (Auto/Manual), PV (current value), OP (controller output).
- Тренди останніх 24 годин: T, P, Flow.

Екран 4 — Filtration Cycle (фільтр-прес)

- Стан фільтр-преса, кнопки запуск/стоп циклу, поточний крок, таймери та лог подій.

Екран 5 — Alarms & Events

- Таблиця активних алармів з пріоритетом, часом, описом, АСК кнопкою.
- Історія подій (лог). Кнопка Export CSV.

Екран 6 — Recipes / Batch

- Меню для збереження/завантаження рецептів (دوزи, тривалість контакту, temperatures).

Екран 7 — Maintenance / Diagnostics

- Стан комунікацій, I/O тестування, health check PLC, логи помилок приводу.

Список аварій (Alarm list)

Кожен alarm повинен мати: код, пріоритет (Critical/Major/Minor), текст, умова сигналізації, дії оператора [15].

1. A001 — Emergency Stop (Critical) — негайна зупинка всього обладнання. Дія: усунення E-Stop, перезапуск оператором.
2. A002 — Overpressure in contact vessel (Critical) — $P > P_{max}$. Дія: авто закриття подачі, зупинка насосів, повідомлення.
3. A003 — Overtemperature in reactor (Critical) — $T > T_{max}$. Дія: зупинка циркуляції/нагріву, оповіщення.

4. A004 — Low clay bunker level (Major) — $L < L_{low}$. Дія: сигнал постачальнику, перехід у ручний режим дозування.
5. A005 — Filter-press door open during cycle (Major) — зупинка циклу.
6. A006 — Pump fault (Major) — заміна/перевірка насоса.
7. A007 — Communication loss with PLC (Critical) — перехід в безпечний стан, оповіщення техніку.
8. A008 — High power consumption / VFD fault (Minor/Major) — перевірка приводу.

(Додати додаткові аларми під місцеві вимоги)

Комунікації та кібербезпека [16]

- Рекомендації: фізично ізолювати промислову мережу, використовувати VLAN, обмежити доступ через VPN, застосувати рольову модель доступу для HMI/SCADA (operator/engineer/admin).
- TLS для OPC UA, шифрування паролів, журнали доступу.
- Виконати оцінку вразливостей після інсталяції.

Тестування і приймальні випробування

FAT (Factory Acceptance Test)

- Пакет тестів: I/O тест, логіка PID, екрани HMI, симуляція аварій, протокування даних. Підписаний інтегратором та замовником.

SAT (Site Acceptance Test)

- Повторення FAT на майданчику з реальними датчиками/актуаторами. Тестування в робочих умовах, перевірка інтерфейсів з існуючим обладнанням.

Документація для передачі [21]

- As-built wiring diagrams (схеми підключень), I/O лист (фінальний), користувальська документація HMI, логіка PLC (коментарі), інструкції з експлуатації та обслуговування.

Етапи впровадження та графік (орієнтовно)

1. Pre-site survey (2 тижні): перевірка обладнання, існуючих PLC, мережі.
2. Розробка та налаштування PLC/SCADA (4–8 тижнів).
3. FAT (1 тиждень).
4. Встановлення на майданчику та монтаж (2–4 тижні залежно від складності).
5. SAT та навчання операторів (1 тиждень).
6. Підтримка 3 місяці (гарантійний супровід) з можливістю продовження контракту.

Передача знань та навчання [21]

- Провести тренінг для операторів (1 день) та інженерів (2 дні). Матеріали: керівництво оператора, quick-reference cards, відео-демонстрації основних операцій.
- Додати датчик якості (наприклад, кольоромір / спектрофотометр) для зворотного зв'язку в алгоритмі дозування.
- Підключення до хмарного аналітичного модуля для машинного навчання оптимізації доз.
- Резервний PLC або dual-redundant архітектура для критичних застосувань.

Deliverables (що має надати інтегратор)

1. Повний I/O лист з адресацією під обране PLC.
2. PLC проект з коментарями та архівом.

3. SCADA/HMI проєкт, макети екранів, тренди.
4. Wiring diagrams та P&ID оновлені.
5. FAT/SAT протоколи та підписані акти.
6. Інструкції з експлуатації, гарантійний талон.

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації виконано комплексне дослідження та розробку системи автоматизації технологічного процесу установки контактного доочищення олив відбілювальними глинами. Робота спрямована на підвищення ефективності, стабільності та якості процесу очищення олив за рахунок застосування сучасних методів моделювання та керування.

У ході виконання роботи проаналізовано технологічну схему установки контактного доочищення олив, визначено основні стадії процесу та критичні параметри, що впливають на якість готової продукції. Особливу увагу приділено етапу підігріву оливи в трубчастій печі, як одному з найбільш інерційних та енергомістких об'єктів керування.

Розроблено математичну модель трубчастої печі, яка адекватно відображає теплові процеси нагріву оливи з урахуванням основних збурювальних впливів та динамічних властивостей об'єкта. На основі моделі проведено аналіз перехідних процесів і визначено параметри, необхідні для синтезу систем автоматичного керування.

Спроектовано систему автоматичного керування на базі класичного ПІД-регулятора. Виконано налаштування параметрів регулятора та досліджено якість регулювання за основними показниками – часом перехідного процесу, перерегулюванням і статичною похибкою. Отримані результати підтвердили працездатність ПІД-регулювання, однак виявили його обмеження за наявності нелінійностей та змінних режимів роботи установки.

З метою підвищення якості керування запропоновано та реалізовано систему з нечітким регулятором. Проведено порівняльний аналіз роботи ПІД- та нечіткої систем керування, який показав, що нечіткий регулятор забезпечує кращу адаптацію до змін технологічних параметрів, зменшення коливань та підвищення стійкості процесу нагріву оливи.

Розроблено SCADA-систему технологічного процесу установки контактного доочищення олив, яка забезпечує візуалізацію основних параметрів, моніторинг стану обладнання, архівацію даних та підтримку оператора при прийнятті рішень. Запропоновані рішення відповідають сучасним вимогам до промислових систем автоматизації та можуть бути використані при впровадженні на реальних виробничих об'єктах.

У цілому результати магістерської дисертації підтверджують доцільність застосування математичного моделювання, SCADA-систем та інтелектуальних методів керування для підвищення ефективності процесу контактного доочищення олив відбілювальними глинами. Отримані розробки можуть бути використані як основа для подальшого вдосконалення систем автоматизації в нафтопереробній та олійно-жировій промисловості.

Список використаної літератури

1. Коржиков В. В. Автоматизація теплообмінника в процесі очищення масла вибірчими розчинниками : магістерська дисертація. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. — 160 с. (укр.)
2. Кузнецов В. І. Технологія очищення та регенерації мастильних матеріалів. К. : Техніка, 2015. — 352 с. (укр.)
3. Ярощук Л. Д., Тюріна Є. О. Врахування стратегії сталого розвитку при автоматизації очищення олив та мастил адсорбентами. Вісник КПІ, 2019. (укр.)
4. Åström K. J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. ISA, 2018. — 512 p.
5. Austin G. Shreve's Chemical Process Industries. McGraw-Hill, 2018. — 936 p.
6. Camacho E. F., Bordons C. Model Predictive Control. Springer, 2019. — 460 p.
7. Korchak B., Grynyshyn O., Chervinsky T., Nagursky A., Stadnik V. Integrated Regeneration Method for Used Mineral Motor Oils. Chemistry & Chemical Technology, 2021.
8. Mang T., Dresel W. Lubricants and Lubrication. Wiley-VCH, 2017. — 1024 p.
9. Nebesskaya A. P., Balynin A. V. Ultrafiltration Separation of Crude Oil and Waste Oil. Membrany i membrannye tehnologii, 2024.
10. Nebesskaya A. P., Markelov A. V., et al. Ultrafiltration purification of waste motor oil using tubular polymer membranes. Membranes and Membrane Technologies, 2025.
11. Onishchenko O. A., Melnyk O. M., et al. Study of Efficiency and Advancement of Marine Engine Oil Purification and Filtration Technologies. Journal of Chemistry and Technologies, 2023.

12. Perry R. H., Green D. W. Perry's Chemical Engineers' Handbook. McGraw-Hill, 2019. — 2856 p.
13. Qin S. J., Badgwell T. A. "A survey of industrial model predictive control technology." Control Engineering Practice, 2003.
14. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A. Process Dynamics and Control. Wiley, 2016. — 792 p.
15. Totten G. E. Handbook of Lubrication and Tribology. CRC Press, 2016. — 1424 p.
16. Yaroshchuk L., Tiurina Y. Simulation of the Industrial Oil Adsorption Purification Process for Automation Tasks. Modelling and Simulation in Engineering, 2022.
17. Андреев Є. О. Автоматизація технологічних процесів. К. : Вид-во КПІ, 2018. — 368 с. (укр.)
18. Бойко О. М., Левченко С. А. Мастильні матеріали: властивості, очищення, регенерація. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. — 290 с. (укр.)
19. Kulykivskyi V. L., Yasin-skyi V. O., Shevchuk O. A. Аналіз методів очищення відпрацьованих моторних олиव : тези конференції, 2025. (укр.)
20. Червінський Т. І., Гринишин О. Б., Корчак Б. О. Регенерація відпрацьованих моторних олив у присутності карбаміду. Хімія та технології, 2023. (укр.)
21. Perry E. T., Ogata K. Modern Control Engineering. Prentice Hall, 2017. — 720 p.
22. MATLAB / Simulink User Guide : MathWorks Inc., 2024.
23. 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