

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПМЗ-03.00.00.000 ПЗ

Група АКПМЗ-24-1

Сергій Шатонський

2026

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут післядипломної освіти
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Шатонський Сергій Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Удосконалення технологічного процесу вакуумної установки вторинної

(назва роботи)

перегонки на основі фази логіки

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

доцент, к.т.н.

(посада)

А.І. Лагойда

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПмз-24-1

(шифр групи)

С.В. Шатонський

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент, к.т.н.

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Л.І. Фешанич

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут післядипломної освіти

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень другий (магістерський)

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

(шифр і назва)

робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

« ___ » _____ 20__ року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Хом'як Назар Мар'янович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення технологічного процесу вакуумної установки вторинної перегонки на основі фази логіки

керівник роботи Фешанич Лідія Ігорівна, к.т.н., доцент

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

затвержені наказом закладу вищої освіти від « ___ » _____ 20__ року № _____

2. Строк подання студентом роботи 02.02.2026

3. Вихідні дані до роботи Матеріали практик, науково-технічні журнали, довідники

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз технологічного процесу атмосферної перегонки нафти. 2. Математичне моделювання і ідентифікація об'єкта керування.

3. Структурне проектування системи автоматичного контролю.

4. Удосконалення системи автоматизації на основі нечіткої логіки.

Загальні висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 10.12.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу атмосферної перегонки нафти.		
2	Математичне моделювання і ідентифікація об'єкта керування.		
3	Структурне проектування системи автоматичного контролю.		
4	Удосконалення системи автоматизації на основі нечіткої логіки.		

Студент _____
(підпис)

Шатонський С.В. _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Фешанич Л.І. _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У магістерській роботі досліджено процес атмосферної та вакуумної перегонки нафти з метою підвищення ефективності автоматичного керування технологічними процесами. Описано основні стадії підготовки та ректифікації сировини, охарактеризовано ключові параметри фракціонування та енергетичної ефективності установки, а також технологічне обладнання вакуумної установки: трубчасту піч, колонну, насоси, конденсатори, теплообмінники та холодильники.

В роботі розроблено та проаналізовано одноконтурні та каскадні системи автоматичного керування з використанням класичного ПІД-регулятора та нечіткої логіки. Моделювання у середовищі Matlab/Simulink показало, що застосування нечіткого регулятора забезпечує високу точність керування, стабільність процесу та зменшення перерегулювання. Також здійснено аналіз сучасної контролерної техніки, здатної підтримувати нечітке регулювання, включно з програмованими логічними контролерами та спеціалізованими промисловими регуляторами з інтегрованою fuzzy logic.

Ключові слова: автоматичне керування, атмосферна перегонка, колонна, ПІД-регулятор, нечітка логіка

ABSTRACT

The master's thesis investigates the process of atmospheric and vacuum distillation of crude oil with the aim of improving the efficiency of automatic control in technological processes. The main stages of feed preparation and rectification are described, and the key parameters affecting fractionation precision and energy efficiency of the plant are characterized. The technological equipment of the vacuum unit, including the tubular furnace, distillation column, pumps, condensers, heat exchangers, and coolers, is also analyzed.

The work develops and analyzes single-loop and cascade automatic control systems using both classical PID controllers and fuzzy logic. Modeling in the Matlab/Simulink environment demonstrated that the application of fuzzy logic controllers ensures high control accuracy, process stability, and reduced overshoot. Additionally, a study of modern controller technology capable of supporting fuzzy control was carried out, including programmable logic controllers (PLCs) and specialized industrial controllers with integrated fuzzy logic.

Keywords: automatic control, atmospheric distillation, distillation column, PID controller, fuzzy logic

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасна нафтопереробна промисловість функціонує в умовах підвищених вимог до енергоефективності, якості продукції, екологічної безпеки та конкурентоспроможності виробництва. Атмосферна перегонка нафти є базовим процесом первинної переробки, від ефективності якого залежить робота всього нафтопереробного комплексу. Складність динаміки ректифікаційної колони, наявність значної інерційності, транспортних запізнень та змінних властивостей сировини зумовлюють необхідність удосконалення систем автоматичного керування. Традиційні системи регулювання не завжди забезпечують достатню стабільність технологічних параметрів у змінних умовах експлуатації, що призводить до перевитрат енергії та зниження якості продукції. У зв'язку з цим актуальним є впровадження сучасних методів автоматизації, адаптивних та інтелектуальних алгоритмів керування.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Вибір теми зумовлений необхідністю підвищення ефективності функціонування установок первинної переробки нафти типу ЕЛОУ-АВТ, які широко застосовуються на вітчизняних нафтопереробних підприємствах. Недосконалість існуючих систем автоматизації, їх обмежена адаптивність до зміни властивостей сировини та недостатня швидкодія при збуреннях вимагають модернізації із використанням сучасних засобів моделювання та синтезу регуляторів. Поєднання класичних методів теорії автоматичного керування з інтелектуальними технологіями відкриває можливість створення більш гнучких і робастних систем керування.

Мета і завдання дослідження. Метою магістерської роботи є розробка та обґрунтування удосконаленої системи автоматизації блоку атмосферної перегонки нафти з використанням сучасних методів регулювання та інтелектуальних технологій для підвищення ефективності технологічного процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати технологічний процес атмосферної перегонки нафти як

об'єкт керування;

- дослідити існуючу систему автоматизації та визначити її недоліки;
- розробити математичну модель об'єкта керування;
- виконати синтез одноконтурної та каскадної автоматичних систем

регулювання;

- провести порівняльний аналіз якості перехідних процесів;
- дослідити можливість впровадження інтелектуальних методів керування;
- розробити функціональну схему автоматизації з урахуванням вимог

безпеки та екологічності.

Об'єктом дослідження є технологічний процес атмосферної перегонки нафти в ректифікаційній колоні.

Предмет дослідження є система автоматичного регулювання основних технологічних параметрів процесу атмосферної перегонки нафти із застосуванням традиційних та інтелектуальних методів керування.

Методи дослідження. Дослідження реалізовано на основі положень теорії автоматичного керування з інтеграцією методологічного апарату нечіткої логіки та сучасних підходів до гібридизації штучних нейронних мереж із нечіткими інтелектуальними системами, що забезпечує формування адаптивних механізмів прийняття рішень та підвищення ефективності керування складними динамічними об'єктами.

Новизна отриманих результатів. У роботі реалізовано системний підхід до вдосконалення автоматизованої системи атмосферної перегонки нафти, що передбачає поєднання традиційних законів регулювання з адаптивними та інтелектуальними стратегіями керування. Запропоновано математичний опис об'єкта, модифікований з урахуванням параметрів і режимних характеристик конкретної технологічної установки, а також аргументовано ефективність впровадження каскадної структури керування як засобу підвищення якості регулювання та стійкості процесу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Тематика кваліфікаційного дослідження узгоджується з науково-освітнім

профілем кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій і виконується в межах програм, що фінансуються з державного бюджету. Методологічним і науковим підґрунтям роботи стали результати досліджень, реалізованих відповідно до планів наукової діяльності Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу у рамках держбюджетних тем: «Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» (ДР № 011U605890) та «Науково-організаційні засади нарощування видобутку вітчизняних нафти і газу та диверсифікації постачання енергетичних ресурсів для підвищення енергетичної безпеки України» (ДР № 0115U007099), що визначили концептуальні та прикладні орієнтири проведеного дослідження.

Практичне значення отриманих результатів. На основі синтезованих і змодельованих структур створено систему автоматизованого керування досліджуваним об'єктом.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Повний обсяг магістерської роботи становить 71 сторінку: обсяг основного тексту - 61 сторінку; список використаних джерел, що включає 12 найменувань та займає 2 сторінки; 3 додатки на 8 сторінках.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АТМОСФЕРНОЇ ПЕРЕГОНКИ НАФТИ.....	11
1.1. Технологічний процес атмосферної перегонки нафти.....	11
1.2. Опис технологічного обладнання.....	14
1.3. Обґрунтування задач дослідження.....	16
Висновки до розділу 1.....	17
РОЗДІЛ 2	
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	18
2.1. Обґрунтування та визначення об'єкта управління.....	18
2.2. Показники функціональної досконалості та принципи оптимізації автоматизованої системи керування.....	19
2.3. Експериментальне встановлення закономірностей динамічної реакції об'єкта на керуючі впливи.....	19
2.3.1. Аналітичне опрацювання експериментальних даних.....	20
Висновки до розділу 2.....	26
РОЗДІЛ 3	
СТРУКТУРНЕ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ.....	27
3.1 Обчислення характеристик одноконтурної САК.....	27
3.2. Обчислення характеристик каскадної САК.....	28
3.3. Дослідження параметрів стійкості одноконтурної автоматизованої системи регулювання.....	30
3.4. Дослідження параметрів стійкості каскадної автоматизованої системи регулювання.....	31

3.5. Аналіз якості регулювання на основі перехідних процесів.....	32
Висновки до розділу 3.....	34
РОЗДІЛ 4	
УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ.....	35
4.1. Актуальність використання інтелектуальних технологій у системах автоматизації.....	35
4.1.1. Використання нечіткої логіки в системах керування.....	37
4.1.2. Нейронні мережі як інструмент адаптивного керування.....	39
4.1.3. Гібридні нейро-нечіткі системи.....	40
4.1.4. Експертні системи.....	42
4.1.5. Генетичні алгоритми.....	42
4.2. Побудова одноконтурної САР з Fuzzy-регулятором.....	43
4.3. Технічна реалізація нечіткого контролера.....	50
4.3.1. ПЛК серії Siemens SIMATIC S7	51
4.3.2. PID Fuzzy Logic Controllers від Lumel	53
4.3.3. Контролери серії FuzyPro із реалізацією нечіткої логіки	56
Висновки до розділу 4.....	59
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	62
ДОДАТКИ.....	64

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АТМОСФЕРНОЇ ПЕРЕГОНКИ НАФТИ

1.1. Технологічний процес атмосферної перегонки нафти

Атмосферна перегонка нафти є основним і наймасовішим процесом первинної переробки нафтової сировини на сучасних нафтопереробних заводах. Вона базується на принципі фракційної ректифікації, який полягає у розділенні багатокомпонентної нафтової суміші на окремі фракції за температурами кипіння без зміни хімічного складу вуглеводнів. Метою процесу є отримання світлих нафтопродуктів — бензину, лігроїну, гасу, дизельного палива — та залишку перегонки — мазуту, який може використовуватися як паливо або спрямовуватися на вакуумну перегонку для подальшої переробки.

Процес здійснюється при атмосферному або невеликому надлишковому тиску, що дозволяє уникнути термічного розкладу вуглеводнів, який виникає при високих температурах. Технологічна схема атмосферної перегонки включає декілька послідовних стадій обробки сировини, кожна з яких виконує специфічні функції. Спочатку на установці ЕЛОУ проводиться електррознесення нафти для видалення механічних домішок, розчинених солей і води, що можуть спричинити корозію обладнання та отруєння каталізаторів.

Після цього нафта попередньо підігривається у теплообмінниках за рахунок тепла гарячих продуктових потоків з ректифікаційної колони, а потім у трубчастій печі доводиться до температури 350–360 °С, що забезпечує часткове випаровування легких і середніх фракцій. Підготовлена парорідинна суміш надходить у нижню частину атмосферної ректифікаційної колони — основного апарата процесу.

Колона, висотою 30–50 м і діаметром 4–6 м, оснащена тарілками або насадкою для багаторазового контакту парової та рідинної фаз. У ній легколеткі

компоненти піднімаються вгору, концентруючись у верхній частині, а важкі залишаються внизу у вигляді мазуту. По висоті колони підтримується температурний профіль: нижня секція — 350–360 °С (стрипінг-секція), середня — 200–300 °С (відбір дизельної та газойлевої фракцій), верхня — 120–140 °С (конденсація бензинової фракції).

Важливу роль відіграє система циркуляційного зрошення, яка регулює тепловий режим і чіткість розділення фракцій. Верхнє зрошення (флегмове число) визначає якість відбору бензину, проміжні — межі виходу гасо-лігроїнової та дизельної фракцій. Для покращення відбору світлих фракцій у нижню частину колони подається водяна пара, яка знижує парціальний тиск вуглеводнів і забезпечує повніший відбір легких компонентів.

Критичним параметром є температура нагріву нафти у печі: недостатня температура знижує вихід і якість середніх фракцій, надмірна — спричиняє термічний розклад і утворення коксу. Чіткість фракціонування контролюється через число теоретичних тарілок, величину флегмового числа та температурний профіль колони.

Енергетична ефективність забезпечується системою теплообміну, яка використовує тепло гарячих потоків для підігріву сирової нафти, що дозволяє економити 30–40 % палива. Сучасні установки досягають коефіцієнта рекуперації тепла 70–80 %, підвищуючи економічну ефективність процесу.

Управління процесом здійснюється через безперервний контроль температур, витрат сировини та зрошень, рівнів рідин і тиску. Складність об'єкта, транспортні запізнення та взаємодія контурів роблять традиційні ПІД-системи недостатньо ефективними, що обумовлює актуальність впровадження інтелектуальних систем керування на основі адаптивних алгоритмів, нечіткої логіки та нейронних мереж для підвищення ефективності та якості продукції.

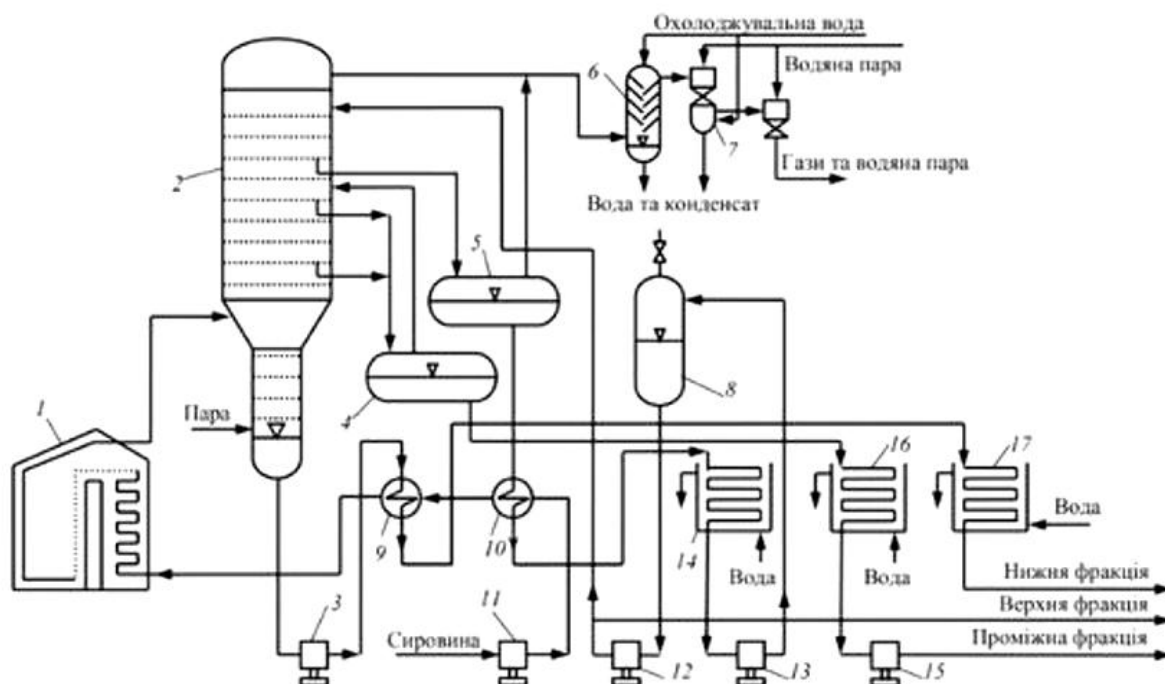


Рис. 1.1. Технологічна схема вакуумної установки вторинної перегонки:
 1-трубчаста піч; 2-вакуумна колонна; 3,11,12,13,15 – насоси; 4,5-вакуумні приймачі; 6 -барометричний конденсатор; 7 – двоступенева вакуумна пароежекторна система; 8-збирач; 9,10 – теплообмінники; 14,16,17 - холодильники

Нафта спочатку надходить у трубчасту піч, де вона нагрівається до температури 350–360 °С. Це забезпечує часткове випаровування легких та середніх фракцій, готуючи сировину до подальшого розділення. Після нагріву суміш рідини та пари подається у нижню частину атмосферної ректифікаційної колони, яка є основним апаратом процесу. У колоні підтримується температурний профіль, при якому температура поступово знижується від низу до верху. У нижній частині колони відбувається стріпінг, тобто відгін залишків легких фракцій з мазуту за допомогою перегрітої водяної пари. Середня частина колони оснащена бічними відборами, де здійснюється відбір дизельної фракції та важкого газойлю, а у верхній частині відбувається конденсація бензинової фракції. Частина конденсату повертається у колону як флегма для підтримання процесу ректифікації, а решта відбирається як готовий продукт.

Для забезпечення оптимального теплового режиму та чіткості розділення фракцій у колоні використовується система циркуляційного зрошення. Охолоджена вода та конденсат циркулюють по колоні, повертаючись на кілька тарілок вище місця відбору. Верхнє зрошення визначає якість відбору легкої бензинової фракції, а проміжні відбори регулюють межі виходу гасо-лігроїнової та дизельної фракцій. У нижню частину колони подається водяна пара, яка знижує парціальний тиск вуглеводнів, полегшуючи відбір легких компонентів з рідинної фази.

Для підвищення енергетичної ефективності процесу тепло гарячих продуктів, що виходять з колони, використовується у теплообмінниках для попереднього підігріву сирової нафти. Ця рекуперация тепла дозволяє значно знизити витрати палива на нагрівання у трубчастій печі. Після ректифікації фракції охолоджуються у холодильниках до температури, необхідної для зберігання та транспортування.

Контроль процесу здійснюється через безперервний моніторинг температури у різних точках колони та печі, витрати сировини та циркуляційного зрошення, рівнів рідин і тиску. Така організація дозволяє отримувати високоякісні нафтопродукти, забезпечуючи ефективність перегонки та максимальний вихід світлих фракцій.

1.2. Опис технологічного обладнання

Вакуумна установка вторинної перегонки призначена для розділення сумішей на фракції за допомогою пониженого тиску, що дозволяє уникнути термічного розкладу компонентів. Основні елементи установки включають трубчасту піч, вакуумну колонну, насоси, конденсатори та холодильники, які забезпечують ефективний процес перегонки та конденсації. Використання вакуумних систем і теплообмінників підвищує енергоефективність установки та якість отриманого продукту.

Трубчаста піч – забезпечує нагрів вихідної сировини до необхідної температури для початку процесу вторинної перегонки. Температурний режим контролюється автоматично для підтримки оптимальних умов випаровування компонентів суміші.

Вакуумна колонна – основний апарат для поділу суміші на фракції під вакуумом. Зменшення тиску дозволяє знижувати температуру кипіння компонентів, запобігаючи термічному розкладу чутливих речовин.

Насоси (3, 11, 12, 13, 15) – забезпечують підтримку вакууму в установці. Розташовані на різних ділянках системи для створення ступінчастого вакуумного режиму та відкачування пари і неконденсованих газів.

Вакуумні приймачі (4, 5) – резервуари для збору продуктів, що дистилуються з вакуумної колонни. Вони запобігають потраплянню парів у вакуумну систему та дозволяють контролювати об'єм отриманого продукту.

Барометричний конденсатор (6) – конденсує пари, що надходять з колонни, за допомогою охолоджувальної рідини. Конденсатор підтримує різницю тиску між колонною та атмосферою для стабільного процесу.

Двоступенева вакуумна пароежекторна система (7) – створює додатковий вакуум шляхом відсмоктування пари через струменеві ежектори. Застосовується для підтримки низького тиску в колонні та підвищення ефективності перегонки.

Збирач (8) – приймає сконденсовані рідини після конденсації у теплообмінниках та конденсаторах. Використовується для подальшої переробки або відбору готового продукту.

Теплообмінники (9, 10) – служать для передачі тепла між потоками рідин та парів, підвищуючи енергоефективність процесу та забезпечуючи необхідне охолодження або підгрів компонентів.

Холодильники (14, 16, 17) – забезпечують охолодження конденсату та підтримують потрібну температуру рідкої фази продукту. Дозволяють знизити температуру до безпечного рівня для відбору та зберігання продукту.

1.3. Обґрунтування задач дослідження

Метою даного дослідження є підвищення ефективності автоматизованих систем керування (АСК) технологічними процесами шляхом комплексного аналізу їх динамічних характеристик, математичного моделювання та застосування сучасних інтелектуальних методів регулювання. Досягнення цієї мети передбачає вирішення низки взаємопов'язаних науково-технічних задач, які дозволяють оцінити функціональні можливості системи та оптимізувати її роботу в умовах реального технологічного процесу.

Першою задачею є визначення передавальних функцій основного та допоміжного контурів АСК. Це дозволяє отримати аналітичне представлення динаміки системи, встановити взаємозв'язок між вхідними та вихідними сигналами, а також забезпечити основу для проведення подальшого моделювання та синтезу регуляторів. Виконання цієї задачі є необхідною умовою для оцінки стабільності та точності роботи системи у різних режимах функціонування.

Другим напрямом дослідження є моделювання одноконтурної АСК, яке дозволяє провести комп'ютерний аналіз динамічних властивостей базового контуру. Моделювання забезпечує можливість оцінки швидкодії, точності та стійкості системи, а також визначення оптимальних параметрів регулятора. Результати цього етапу формують експериментальну основу для подальшого впровадження більш складних структур автоматизації.

Третьою задачею є моделювання каскадної АСК, яке передбачає дослідження багаторівневої структури керування. Каскадне регулювання дозволяє підвищити точність та швидкодію системи, зменшити вплив зовнішніх збурень і забезпечити стабільне функціонування технологічного процесу в складних умовах. Моделювання каскадної структури дає змогу оцінити її переваги порівняно з одноконтурним регулюванням та обґрунтувати доцільність використання багаторівневої системи керування.

Четвертою задачею є аналіз інтелектуальних технологій керування, до яких відносяться адаптивні алгоритми, нейромережеві моделі та нечіткі регулятори. Дослідження цих технологій дозволяє враховувати нелінійності та невизначеності об'єкта керування, підвищуючи гнучкість, точність та стабільність роботи системи в умовах зміни технологічних параметрів.

П'ятою задачею є розробка та застосування нечіткого регулятора, який забезпечує ефективне керування об'єктом з урахуванням невизначеностей і нелінійностей. Нечітке регулювання дозволяє формалізувати досвід оператора у вигляді правил, що описують поведінку системи, та забезпечує більш плавний і точний контроль технологічного процесу. Використання нечіткого регулятора підвищує надійність системи та забезпечує стабільність функціонування навіть за значних коливань вхідних параметрів.

Комплексне вирішення зазначених задач дозволяє отримати цілісне уявлення про динаміку та функціональні можливості автоматизованих систем керування, а також забезпечує науково-обґрунтовану основу для впровадження сучасних інтелектуальних методів регулювання в технологічних процесах.

Висновки до розділу 1

У розділі 1 описано процес атмосферної перегонки нафти, виділено основні стадії підготовки та ректифікації сировини, охарактеризовано ключові параметри, що визначають чіткість фракціонування та енергетичну ефективність установки.

Виконано опис технологічного обладнання вакуумної установки вторинної перегонки, включаючи трубчасту піч, вакуумну колонну, насоси, конденсатори, теплообмінники та холодильники, та зазначено їхні функції у процесі розділення суміші на фракції. Обґрунтовано науково-дослідні задачі, пов'язані з автоматизацією керування технологічними процесами: визначення передавальних функцій основного та допоміжного контурів, моделювання одноконтурної та каскадної АСК, аналіз інтелектуальних технологій і застосування нечіткого регулятора.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1. Обґрунтування та визначення об'єкта управління

У попередньому розділі було встановлено, що вакуумна колона, призначена для фракціонування нафтової суміші на окремі компоненти, розглядається як об'єкт автоматичного регулювання. Для досліджуваної технологічної системи керуючим впливом виступає ступінь відкриття регулюючого органу, який визначає витрату пари, що подається в колону. Регульованою (вихідною) координатою прийнято температуру у верхній частині колони ВК-1 (див. рис. 2.1), яка характеризує ефективність процесу розділення.

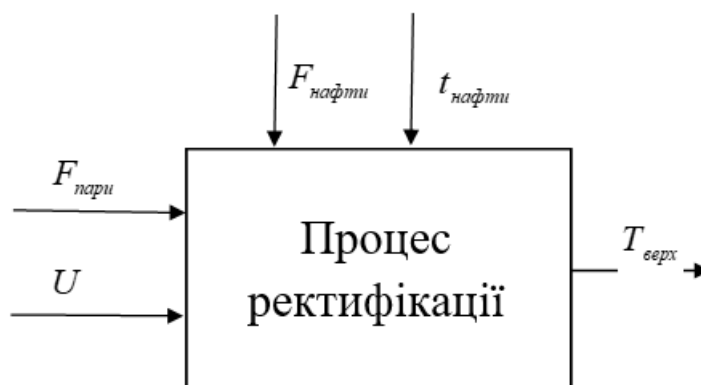


Рис. 2.1. Структурна схема вакуумної колони: $F_{нафти}$ - подавання підготовленої сировини (зневодненої, знесоленої та попередньо підігрітої нафти) до апарата; $t_{нафти}$ - температурний режим нафти на вході в вакуумну колону; $T_{верх}$ - значення температури у верхній частині колони; $F_{пари}$ - інтенсивність подачі гріючої пари в апарат; U - величина керуючого сигналу, що реалізується через ступінь відкриття регулюючого клапана на паровій лінії.

2.2 Показники функціональної досконалості та принципи оптимізації автоматизованої системи керування

У даному дослідженні функціональне призначення системи автоматичного керування полягає у забезпеченні стабілізації температурного режиму у верхній частині колони, що є необхідною умовою ефективного та безперервного перебігу процесу фракціонування. Регулювання температури здійснюється шляхом зміни витрати теплоносія, який подається до випарного пристрою, тим самим формуючи відповідний тепловий баланс апарата.

Для підвищення ефективності автоматичного регулювання та гарантування утримання параметрів у заданих технологічних межах застосовано систему кількісних критеріїв оцінювання якості. Узагальнені показники, що характеризують точність моделювання, динамічні властивості та стійкість системи, наведено нище:

- Похибка апроксимації експериментальних характеристик – не більше 2,5 %.
- Перерегулювання – менше 20 %.
- Відхилення регульованої величини від усталеного значення – не більше 5 %.
- Ступінь затухання коливального процесу – у межах 0,75–0,95.
- Запас стійкості за амплітудою – 0,5–0,6.
- Запас стійкості за фазою – 30°–60°.

Зазначені критерії забезпечують комплексну оцінку як статичних, так і динамічних характеристик системи автоматичного керування та визначають умови її оптимального налаштування.

2.3. Експериментальне встановлення закономірностей динамічної реакції об'єкта на керуючі впливи

Для визначення динамічних параметрів об'єкта керування необхідно

послідовно реалізувати три взаємопов'язані стадії:

1. Розроблення програми та організаційна підготовка експерименту.
2. Безпосереднє виконання експериментальних досліджень.
3. Аналіз та інтерпретація отриманих експериментальних даних.

У межах даної кваліфікаційної роботи застосовано метод аперіодичного збурення, що базується на припущенні квазілінійної поведінки об'єкта в обмеженому діапазоні зміни вхідної величини. Передбачається, що при незначних варіаціях керуючого впливу реакція вихідної координати може розглядатися як така, що не залежить від просторового розподілу параметрів об'єкта або залежить від нього неістотно.

Формування тестового впливу здійснюється шляхом зміни положення регулюючого органу, що зумовлює варіювання вхідного сигналу. У відповідь фіксується зміна вихідної величини — сигналу з вимірювального перетворювача, який характеризує динамічну реакцію системи.

Підготовчий етап передбачає також добір і налаштування вимірювальної апаратури, призначеної для реєстрації зміни вихідного параметра з необхідною точністю та часовою роздільною здатністю.

2.3.1. Аналітичне опрацювання експериментальних даних

Експериментальні результати, отримані під час активного дослідження для основного та залученого допоміжного контурів регулювання, систематизовано й наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Експериментальні дані, отримані в ході активного дослідження за основним і допоміжним каналами керування

t, c	%, ВХ	$T_{\text{верх}}, ^\circ C$	$F_{\text{пар}}, \text{м}^3/\text{ГОД}$
0	15,0	70,0	44,0
20	15,0	70,0	61,60

40	15,0	73,80	72,160
60	15,0	79,240	78,320
80	15,0	83,760	82,280
100	15,0	86,360	84,40
120	15,0	87,920	85,8440
140	15,0	88,80	86,70
160	15,0	89,30	87,0
180	15,0	89,560	87,73
200	15,0	89,760	87,82
220	15,0	89,860	88,0
240	15,0	89,920	88,0
260	15,0	89,960	88,0
280	15,0	89,980	88,0
300	15,0	89,980	88,0
320	15,0	90,0	88,0
340	15,0	90,0	88,0
360	15,0	90,0	88,0
380	15,0	90,0	88,0
400	15,0	90,0	88,0

На підставі експериментальних даних, наведених у таблиці 2.2, виконаємо побудову перехідних характеристик об'єкта для основного та допоміжного контурів регулювання. Відповідні графічні залежності зміни вихідної величини в часі подано на рис. 2.2 та рис. 2.3.

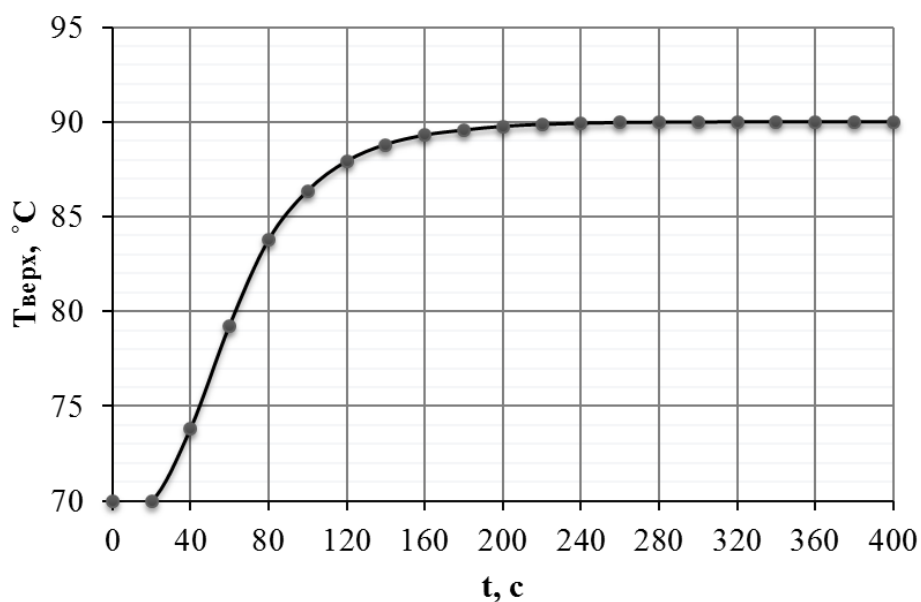


Рис. 2.2. Експериментально визначена перехідна характеристика керованого сигналу основного каналу

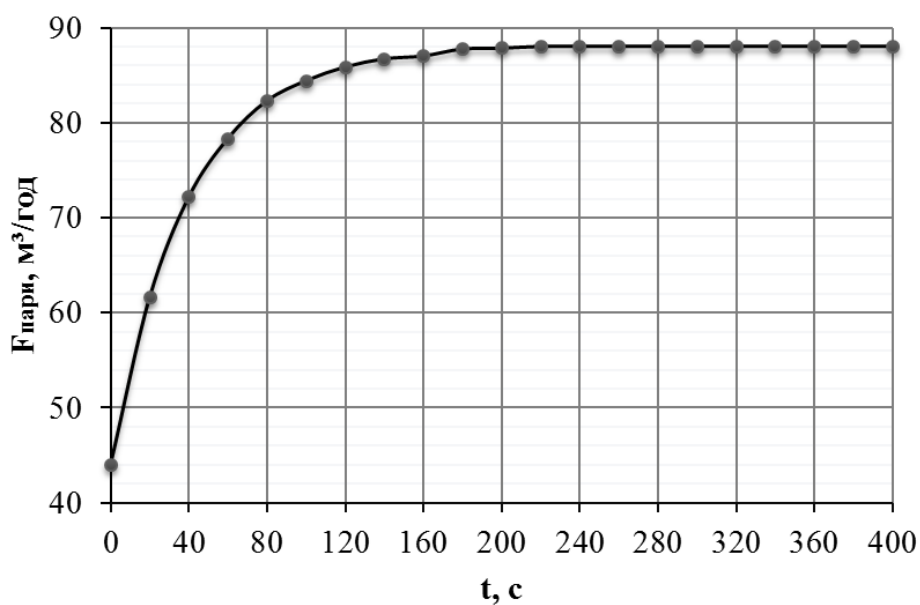


Рисунок 2.3 - Експериментальна перехідна крива допоміжного контуру автоматичного керування

Проведемо обчислення для даних основного контуру регулювання

$$x_{ex} = 1.$$

$$y_{вих0} = \frac{70,0 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 0,0;$$

$$y_{вих1} = \frac{70, -70,0}{90,0 - 70,0} = 0,0;$$

$$y_{вих2} = \frac{73,80 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 0,190;$$

$$y_{вих3} = \frac{79,240 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 0,4620;$$

$$y_{вих4} = \frac{83,760 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 0,6880;$$

$$y_{вих5} = \frac{86,360 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 0,8180;$$

$$y_{вих6} = \frac{87,920 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 0,8960;$$

$$y_{вих7} = \frac{88,80 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 0,940;$$

$$y_{вих8} = \frac{89,30 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 0,9650;$$

$$y_{вих9} = \frac{89,560 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 0,9780;$$

$$y_{вих10} = \frac{89,760 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 0,9880;$$

$$y_{вих11} = \frac{89,860 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 0,9930;$$

$$y_{вих12} = \frac{89,920 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 0,9960;$$

$$y_{вих13} = \frac{89,960 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 0,9980;$$

$$y_{вих14} = \frac{89,980 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 0,9990;$$

$$y_{вих15} = \frac{89,980 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 0,9990;$$

$$y_{вих16} = \frac{90,0 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 1,0;$$

$$y_{вих17} = \frac{90,0 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 1,0;$$

$$y_{вих18} = \frac{90,0 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 1,0;$$

$$y_{вих19} = \frac{90,0 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 1,0;$$

$$y_{вих20} = \frac{90,0 - 70,0}{90,0 - 70,0} = 1,0.$$

Результати розрахунків систематизовано в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Зведені експериментально-розрахункові дані основного каналу керування

t, c	$y_{вих}$	x_{ex}	t, c	$y_{вих}$	x_{ex}
0	0,0	1,0	200	0,9880	1,0
20	0,0	1,0	220	0,9930	1,0
40	0,190	1,0	240	0,9960	1,0
60	0,4620	1,0	260	0,9980	1,0
80	0,6880	1,0	280	0,9990	1,0
100	0,8180	1,0	300	0,9990	1,0

120	0,8960	1,0	320	1,0	1,0
140	0,940	1,0	340	1,0	1,0
160	0,9650	1,0	360	1,0	1,0
180	0,9780	1,0	380	1,0	1,0
			400	1,0	1,0

На основі даних, узагальнених у таблиці 2.3, побудуємо експериментальну перехідну характеристику у безрозмірних одиницях (рис. 2.4). Для визначення передавальної функції здійснено її апроксимацію за допомогою програмного забезпечення Arproх. За результатами виконаних розрахунків отримано наступне аналітичне представлення передавальної функції:

$$W_0(p) = \frac{-10,7920p + 1,0}{5689,8740p^3 + 1084,0770p^2 + 61,2330p + 1,0}$$

Максимальна величина похибки апроксимації у точці становить 1,5 % (додаток А1).

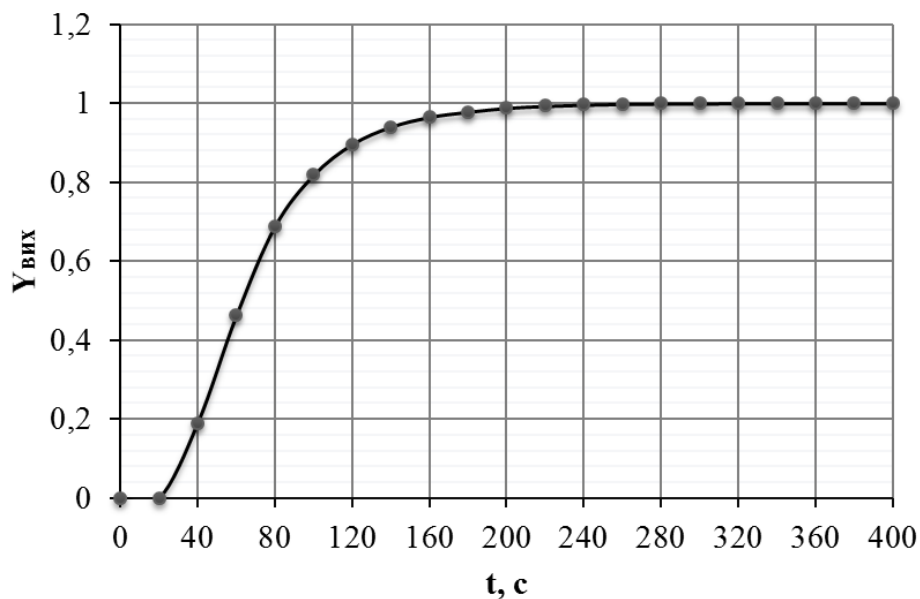


Рис. 2.4. Перехідна характеристика основного каналу автоматизації у нормованих (безрозмірних) одиницях

Здійснимо обчислення параметрів допоміжного контуру регулювання:

$$x_{ex} = 1.$$

$$y_{вих0} = \frac{44,00 - 44,00}{88,00 - 44,00} = 0,0;$$

$$y_{вих1} = \frac{61,60 - 44,00}{88,00 - 44,00} = 0,0;$$

$$y_{вих2} = \frac{72,16 - 44,00}{88,00 - 44,00} = 0,640;$$

$$y_{вих3} = \frac{78,32 - 44,00}{88,00 - 44,00} = 0,780;$$

$$y_{вих4} = \frac{82,28 - 44,00}{88,00 - 44,00} = 0,870;$$

$$y_{вих5} = \frac{84,40 - 44,00}{88,00 - 44,00} = 0,920;$$

$$y_{вих6} = \frac{85,844 - 44,00}{88,00 - 44,00} = 0,950;$$

$$y_{вих7} = \frac{86,70 - 44,00}{88,00 - 44,00} = 0,970;$$

$$y_{вих8} = \frac{87,00 - 44,00}{88,00 - 44,00} = 0,9770;$$

$$y_{вих9} = \frac{87,73 - 44,00}{88,00 - 44,00} = 0,9940;$$

$$y_{вих10} = \frac{87,82 - 44,00}{88,00 - 44,00} = 0,9960;$$

$$y_{вих11-20} = \frac{88,00 - 44,00}{88,00 - 44,00} = 1,0.$$

Результати виконаних розрахунків систематизовано в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Зведені експериментальні значення за допоміжним каналом регулювання у безрозмірних одиницях

t, c	$y_{вих}$	$x_{вх}$	t, c	$y_{вих}$	$x_{вх}$
0	0,0	1	200	0,9960	1
20	0,40	1	220	1,0	1
40	0,640	1	240	1,0	1
60	0,780	1	260	1,0	1
80	0,870	1	280	1,0	1
100	0,920	1	300	1,0	1
120	0,950	1	320	1,0	1
140	0,970	1	340	1,0	1
160	0,9770	1	360	1,0	1
180	0,9940	1	380	1,0	1
			400	1,0	1

На основі даних, узагальнених у таблиці 2.4, побудуємо експериментальну перехідну характеристику допоміжного каналу у безрозмірних одиницях (рис. 2.5).

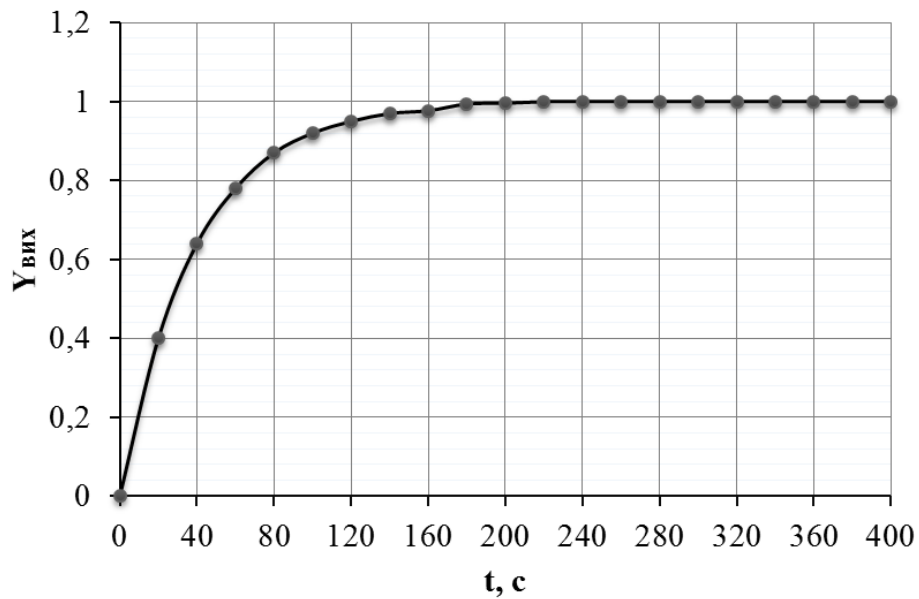


Рис. 2.5. Експериментально визначена перехідна залежність допоміжного контуру в безрозмірних величинах

Для визначення передавальної функції здійснено її апроксимацію за допомогою програмного забезпечення Апрох. За результатами виконаних обчислень отримано таку аналітичну форму передавальної функції:

$$W_1(p) = \frac{1,0}{39,1860p + 1,0}.$$

Максимальна величина відхилення апроксимації у точці дорівнює 0,06 % (додаток А2).

Висновки до розділу 2

Було проведено обґрунтування вибору об'єкта керування та визначено його структурну схему з позицій системи автоматизації. Для апроксимації експериментально отриманих даних використано програмне забезпечення Апрох.

РОЗДІЛ 3

СТРУКТУРНЕ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ

3.1 Обчислення характеристик одноконтурної САК

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що досліджуваний об'єкт характеризується властивістю самовирівнювання (рис. 3.1) та функціонує при повному навантаженні. Для забезпечення необхідного рівня якості роботи САК, оптимізації перехідних процесів та підвищення стійкості системи буде обрано регулятор з ПІ-законодавством автоматичного регулювання.

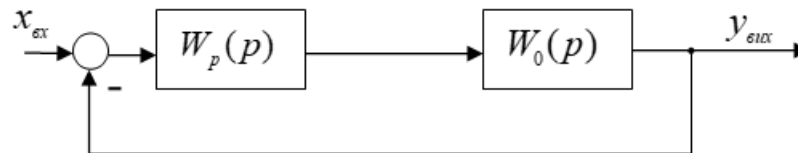


Рис. 3.1. Конфігурація одноконтурної САК: $W(p)$ - передавальна функція об'єкта керування; $W_p(p)$ - передавальна функція регулятора

Аналітичне представлення передавальної функції ПІ-регулятора має вигляд:

$$W_p(p) = \frac{C_1 p + C_0}{p}.$$

Аналітичне представлення передавальної функції розімкненої САК має вигляд:

$$W_{роз}(p) = W_p(p) \cdot \frac{-10,7920p + 1,0}{5689,8740p^3 + 1084,0770p^2 + 61,2330p + 1,0};$$

$$W_{роз}(p) = \frac{C_1 p + C_0}{p} \cdot \frac{-10,7920p + 1,0}{5689,8740p^3 + 1084,0770p^2 + 61,2330p + 1,0} =$$

$$= \frac{(C_1 p + C_0)(-10,7920p + 1,0)}{5689,8740p^4 + 1084,0770p^3 + 61,2330p^2 + 1,0p}.$$

Аналітичне представлення передавальної функції замкнутої САК у загальному вигляді має форму:

$$W_{зам}(p) = \frac{W_{роз}(p)}{1 + W_{роз}(p)};$$

$$W_{зам}(p) = \frac{(-10.792p + 1)(C_1p + C_0)}{5689.874p^4 + 1084.077p^3 + 61.233p^2 + p} =$$

$$1 + \frac{(-10.792p + 1)(C_1p + C_0)}{5689.874p^4 + 1084.077p^3 + 61.233p^2 + p} =$$

$$\frac{(-10.792p + 1)(C_1p + C_0)}{5689.874p^4 + 1084.077p^3 + 61.233p^2 + p + (-10.792p + 1)(C_1p + C_0)}.$$

Визначення оптимальних параметрів регулятора проведемо з використанням підпрограми Tune у програмному пакеті Matlab. Відповідно до даних, наведених у додатку Б1, отримано наступні результати: $K_p = C_1 = 0.6288$, $K_i = C_0 = 0.01421$.

Провівши відповідні перетворення, одержуємо передавальну функцію у такій формі:

$$W_{зам}(p) = \frac{-6.786p^2 + 0.475p + 0.01421}{5689.874p^4 + 1084.077p^3 + 54.447p^2 + 1.475p + 0.01421}.$$

3.2. Обчислення характеристик каскадної САК

Для реалізації каскадної системи автоматичного керування (рис. 3.2) до основного контуру необхідно включити додатковий допоміжний малоінерційний контур регулювання. Такою допоміжною ланкою виступає контур керування витратою пари, що подається у колонку РК-1.

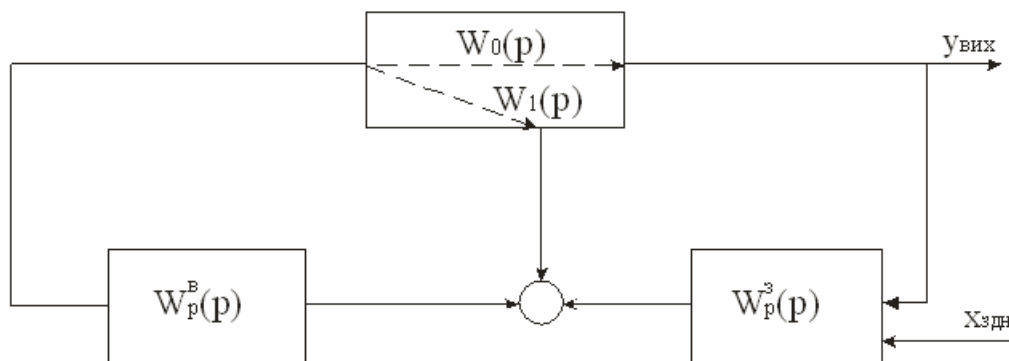


Рис 3.2. Структура каскадної САК: $W_0(p)$ - передавальна функція за основним

каналом регулювання; $W_p^3(p)$ - передавальна функція зовнішнього регулятора;
 $W_1(p)$ - передавальна функція за допоміжним каналом регулювання; $W_p^6(p)$ -
 передавальна функція внутрішнього регулятора

Розрахунок каскадної системи автоматичного керування розпочнемо з визначення параметрів основного регулятора, передавальна функція якого представлена у наступному вигляді:

$$W_e'(p) = \frac{W_p^6(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_p^6(p)} W_0(p),$$

Виконавши припущення, що частота основного контуру, яка являється робочою W_p' являється суттєво меншою за робочу частоту допоміжного контуру W_p'' та у випадку коли $W = W_p'$ справедливою являтиметься така нерівність:

$$\frac{1}{(W_p^6(j\omega))} \ll (W_1(j\omega)).$$

Таким чином, отримуємо наступні результати:

$$\begin{aligned} W_e'(p) &= \frac{W_0(p)}{W_1(p)} = \frac{-10.792p + 1}{5689.874p^3 + 1084.077p^2 + 61.233p + 1} = \\ &= \frac{1}{39.186p + 1} \\ &= \frac{-422.895p^2 + 28.394p + 1}{5689.874p^3 + 1084.077p^2 + 61.233p + 1}. \end{aligned}$$

Знаходження оптимальних параметрів налаштування ПІ - регулятора проведемо за допомогою підпрограми Tune програмного продукту Matlab. Відповідно до додатку Б2 отримаємо такі результати: $K_p = C_1 = 0,4537$, $K_i = C_0 = 0,02555$.

Беручи до уваги отримані результати, можна зробити висновок, що передавальна функція основного каналу регулювання приймає наступну форму:

$$W_p^3(p) = \frac{0,4537p + 0,02555}{p}.$$

Виконаємо обчислювальний аналіз параметрів допоміжного каналу регулювання:

$$W_e''(p) = W_1(p) + W_0(p) \cdot W_p^3(p).$$

Здійснивши деякі підстановки одержимо:

$$\begin{aligned} W_e''(p) &= \frac{-10.792p + 1}{5689.874p^3 + 1084.077p^2 + 61.233p + 1} \cdot \frac{0,4537p + 0,02555}{p} + \frac{1}{39.186p + 1} = \\ &= \frac{5689.874p^4 + 892.21p^3 + 63.31p^2 + 2.18p + 0.02555}{222963.403p^5 + 48170.51p^4 + 3483.55p^3 + 100.42p^2 + p}. \end{aligned}$$

Визначення оптимальних параметрів ПІ-регулятора буде проведено за допомогою підпрограми Tune у програмному пакеті Matlab. Відповідно до даних, наведених у додатку Б3, одержано таку передавальну функцію:

$$W_p^e(p) = \frac{187,60p + 15,71}{1,0p}.$$

Функція передачі каскадної САК у загальному випадку визначається таким чином

$$W_e^{кас}(p) = \frac{W_p^3(p)W_0(p)W_p^e(p)}{W_p^3(p)W_0(p)W_p^e(p) + W_1(p)W_p^e(p) + 1}.$$

Після виконання всіх необхідних підстановок та перетворень передавальна функція каскадної САК набуває наступного вигляду:

$$W_e^{кас}(p) = \left(\begin{array}{l} -35994,360p^4 - 2624,520p^3 + \\ +253,850p^2 + +23,320p + 0,4013905 \end{array} \right) / \left(\begin{array}{l} 222963,40p^6 + 1115590,90p^5 + \\ +260249,90p^4 + 25994,060p^3 + \\ +1404,420p^2 + 39,030p + 0,4013905 \end{array} \right).$$

3.3. Дослідження параметрів стійкості одноконтурної автоматизованої системи регулювання

Критерій стійкості Михайлова формулюється наступним чином: система автоматичного керування вважається стійкою, якщо при зміні частоти ω від 0 до ∞ годограф обводить початок координат проти годинникової стрілки та проходить n квадрантів, де n — порядок системи. У випадку, коли система перебуває на межі

стійкості, годограф проходить через початок координат, що відповідає наявності пари спряжених коренів.

Характеристичний поліном одноконтурної САК має наступну форму:

$$F(p) = 5689,8740p^4 + 1084,0770p^3 + 54,4470p^2 + 1,4750p + 0,014210.$$

Прирівнюємо даний поліном до нульового значення

$$5689,8740p^4 + 1084,0770p^3 + 54,4470p^2 + 1,4750p + 0,014210 = 0.$$

Характеристичний поліном після заміни $p = j\omega$ матиме такий вигляд:

$$5689,8740\omega^4 - 1084,0770j\omega^3 - 54,4470\omega^2 + 1,4750j\omega + 0,014210 = 0.$$

Із характеристичного полінома виділимо дійсну а також уявну складові:

$$P(\omega) = 5689,874\omega^4 - 54,447\omega^2 + 0,01421;$$

$$Q(\omega) = -1084,077\omega^3 + 1,475\omega.$$

За допомогою програмного забезпечення Mathcad проведено побудову годографа Михайлова, результати якої наведено у додатку В1. Аналіз даних із зазначеного додатку дозволяє зробити висновок про стійкість системи за критерієм Михайлова: годограф проходить чотири квадранти та прямує до нескінченності.

3.4. Дослідження параметрів стійкості каскадної автоматизованої системи регулювання

Характеристичний поліном каскадної САК має такий вигляд:

$$F(p) = 222963,40p^6 + 1115590,90p^5 + 260249,90p^4 + \\ + 25994,060p^3 + 1404,420p^2 + 39,030p + 0,40139050.$$

Виконаємо прирівняння даного полінома до нуля:

$$222963,40p^6 + 1115590,90p^5 + 260249,90p^4 + \\ + 25994,060p^3 + 1404,420p^2 + 39,030p + 0,40139050 = 0.$$

Характеристичний поліном після заміни $p = j\omega$ матиме такий вигляд:

$$- 222963,4\omega^6 + 1115590,9j\omega^5 + 260249,9\omega^4 - 25994,06j\omega^3 - \\ - 1404,42\omega^2 + 39,03j\omega + 0,4013905 = 0.$$

Із характеристичного полінома виділимо дійсну а також уявну складові:

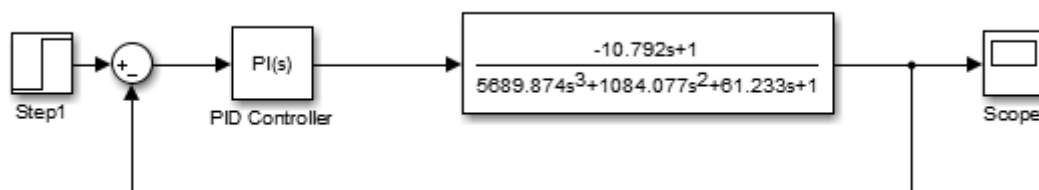
$$P(\omega) = -222963.4\omega^6 + 260249.9\omega^4 - 1404.42\omega^2 + 0.4013905;$$

$$Q(\omega) = 1115590.9\omega^5 - 25994.06\omega^3 + 39.03\omega.$$

За допомогою програмного забезпечення Mathcad проведено побудову годографа Михайлова, результати якої наведено у додатку В2. Аналіз матеріалів цього додатку дозволяє зробити висновок про стійкість системи за критерієм Михайлова, оскільки годограф проходить шість квадрантів і прямує до нескінченності.

3.5. Аналіз якості регулювання на основі перехідних процесів

Для об'єктивної оцінки якісних характеристик перехідного процесу здійснимо побудову перехідної кривої одноконтурної САК. Побудова буде виконана з використанням компонента Simulink у програмному пакеті Matlab (рис. 3.3).



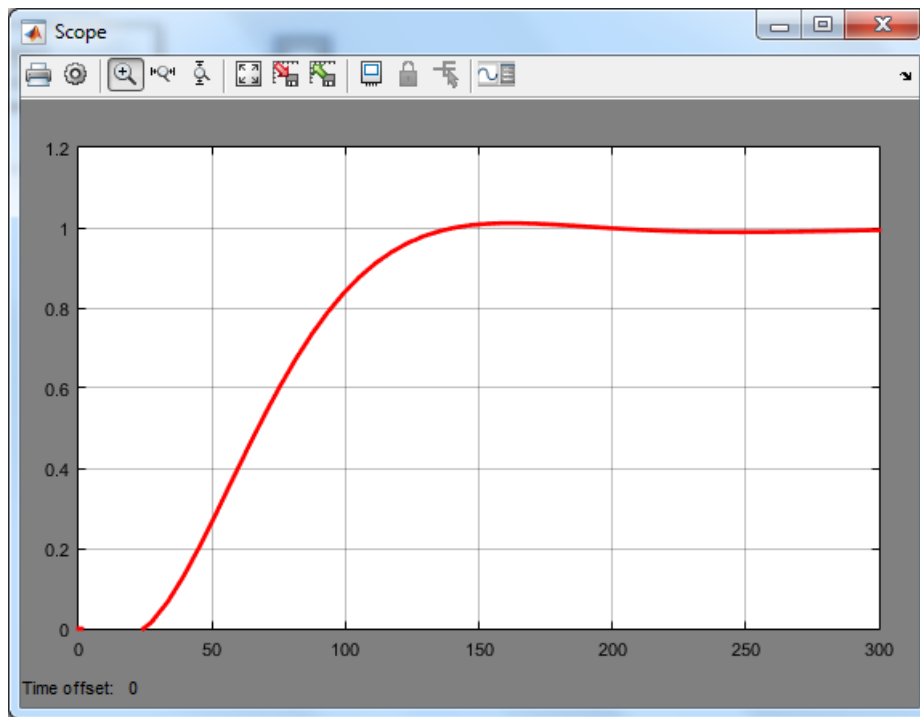


Рис. 3.3. Моделювання перехідної реакції одноконтурної САК проведено в Matlab

З наведеної перехідної характеристики виділимо такі показники:

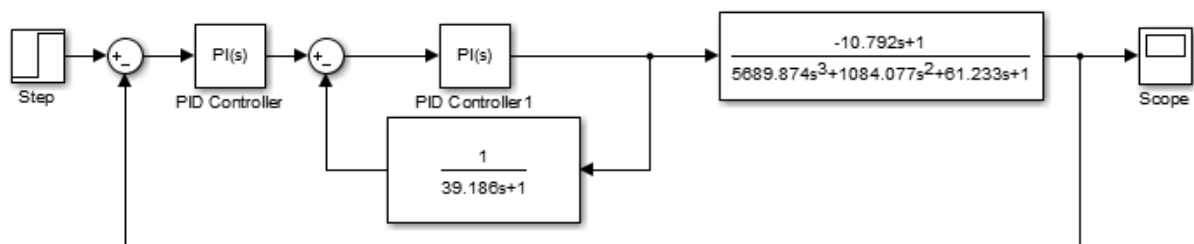
- перерегулювання:

$$\delta = \frac{x_{\max} - x_{\infty}}{x_{\infty}} \cdot 100\% = \frac{1,0 - 1,0}{1,0} \cdot 100\% = 0\% ;$$

- тривалість перехідного процесу:

$$t_n = 135,00 \text{ с.}$$

Для об'єктивної оцінки якісних характеристик перехідного процесу здійснимо побудову перехідної кривої каскадної САК. Моделювання буде проведено з використанням компонента Simulink, інтегрованого в програмний пакет Matlab (рис. 3.4).



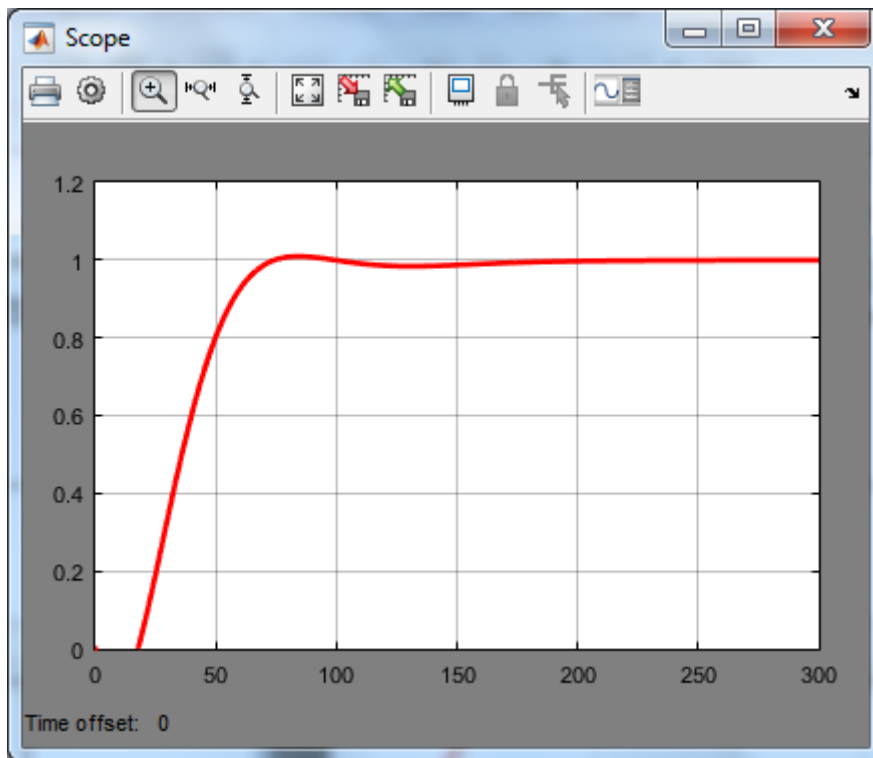


Рис. 3.4. Перехідна характеристика каскадної САК змодельована у Matlab

З наведеної перехідної характеристики виділимо такі показники:

- перерегулювання:

$$\delta = \frac{x_{\max} - x_{\infty}}{x_{\infty}} \cdot 100\% = \frac{1,0 - 1,0}{1,0} \cdot 100\% = 0\% ;$$

- тривалість перехідного процесу:

$$t_n = 70,00 \text{ с};$$

Висновки до розділу 3

Було здійснено розробку та дослідження одноконтурної та каскадної систем автоматичного керування. Проведено аналіз їхньої стійкості за критерієм Михайлова, який підтвердив стабільну роботу обох САК. Також виконано моделювання перехідних характеристик у програмному середовищі ****Matlab****, що дозволило визначити ключові показники якості систем автоматичного регулювання.

РОЗДІЛ 4

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

4.1. Актуальність використання інтелектуальних технологій у системах автоматизації

Сучасні системи автоматизації функціонують в умовах невизначеності, неповноти інформації, змінних режимів роботи та впливу численних зовнішніх факторів. Традиційні методи автоматичного керування, що ґрунтуються на побудові точних математичних моделей об'єкта, не завжди здатні адекватно відобразити складні нелінійні процеси, які характерні для реального виробництва. У багатьох випадках параметри технологічних процесів змінюються в широких межах, а їх точний аналітичний опис є складним або економічно недоцільним. Саме тому особливої актуальності набуває застосування інтелектуальних технологій, зокрема Fuzzy Logic, Artificial Neural Network та Neuro-fuzzy system, які дозволяють підвищити ефективність, адаптивність і надійність автоматизованих систем.

Інтелектуалізація систем автоматизації передбачає перехід від жорстко заданих алгоритмів до методів, здатних аналізувати дані, враховувати невизначеність та самостійно коригувати параметри керування. Одним із таких підходів є нечітка логіка, яка дає можливість працювати з якісними характеристиками процесу та формалізувати експертні знання. У реальних умовах оператори часто приймають рішення на основі досвіду та приблизних оцінок. Нечіткі системи дозволяють перенести цей досвід у структуру автоматизованого керування у вигляді набору правил, що забезпечує гнучкість і стійкість роботи системи навіть за відсутності точної моделі об'єкта.

Не менш важливим напрямом є використання штучних нейронних мереж. Їх застосування зумовлене здатністю до навчання на основі накопичених даних та

відтворення складних нелінійних залежностей між вхідними та вихідними параметрами. У системах автоматизації нейронні мережі можуть виконувати функції ідентифікації об'єкта, прогнозування стану обладнання, оптимізації режимів роботи та діагностики несправностей. Їх перевага полягає в адаптивності: система може змінювати свою поведінку відповідно до нових умов експлуатації без повного перепрограмування.

Поєднання нечіткої логіки та нейронних мереж у гібридних структурах дозволяє отримати додаткові переваги. Такі системи поєднують здатність до навчання з можливістю інтерпретації результатів через систему правил. Гібридні мережі автоматично налаштовують параметри нечітких моделей, що підвищує точність керування та зменшує вплив суб'єктивних факторів під час розроблення алгоритмів. Це особливо важливо для складних технічних об'єктів, де необхідно одночасно забезпечити високу точність, стійкість і прозорість прийняття рішень.

Окрім зазначених підходів, важливу роль у вдосконаленні систем автоматизації відіграють експертні системи. Вони ґрунтуються на формалізації знань і досвіду висококваліфікованих фахівців у вигляді баз правил і механізмів логічного виведення. Експертні системи дозволяють автоматизувати прийняття рішень у складних або нетипових виробничих ситуаціях, здійснювати діагностику несправностей, рекомендувати оптимальні режими роботи та підтримувати оператора під час керування технологічними процесами. Їх перевагою є збереження та накопичення професійного досвіду підприємства, що забезпечує стабільність і обґрунтованість керуючих дій незалежно від людського чинника.

Ще одним ефективним інструментом інтелектуалізації є Genetic Algorithm. Вони застосовуються для оптимізації параметрів систем керування, налаштування регуляторів, мінімізації енергоспоживання та пошуку раціональних режимів функціонування складних технічних об'єктів. Генетичні алгоритми імітують процеси природного відбору та забезпечують поступове покращення рішень шляхом відбору найкращих варіантів. Їх особливість полягає у здатності ефективно працювати з багатопараметричними, нелінійними та

багатокритеріальними задачами без необхідності точного математичного опису процесу.

Актуальність використання інтелектуальних технологій у системах автоматизації також пов'язана з потребою підвищення якості продукції, зменшення енерговитрат та забезпечення безпеки виробничих процесів. Інтелектуальні алгоритми дозволяють своєчасно виявляти відхилення від нормального режиму роботи, прогнозувати можливі відмови обладнання та мінімізувати ризики аварійних ситуацій. Крім того, вони сприяють оптимізації ресурсів і зниженню витрат, що має важливе економічне значення.

Отже, застосування нечіткої логіки, нейронних, гібридних мереж, експертних систем та генетичних алгоритмів є важливим етапом розвитку сучасних систем автоматизації. Вони забезпечують перехід до більш гнучких, адаптивних і самонавчальних систем керування, здатних ефективно функціонувати в умовах невизначеності та складності реальних виробничих процесів. Саме інтелектуальні технології формують основу подальшого вдосконалення автоматизованих систем і сприяють їх інтеграції в сучасне високотехнологічне середовище.

4.1.1. Використання нечіткої логіки в системах керування

Теорія нечітких множин, запропонована Лотфі Заде, стала основою для створення систем керування, здатних працювати з лінгвістичними змінними та нечіткими оцінками типу «висока температура», «низький тиск», «помірна швидкість». У реальних умовах багато параметрів технологічного процесу не можуть бути точно виміряні або ж характеризуються значною варіативністю. Нечітка логіка дозволяє формалізувати експертні знання оператора і реалізувати їх у вигляді правил типу «якщо–то».

На відміну від класичних підходів, що потребують чітко визначених меж і точних числових залежностей, нечітка логіка оперує поняттями часткової

належності. Це означає, що певний параметр може одночасно належати до кількох множин із різним ступенем. Такий підхід більш адекватно відображає реальні виробничі умови, де перехід між станами не є миттєвим або однозначним. Завдяки цьому система керування здатна приймати більш гнучкі та обґрунтовані рішення.

Актуальність використання нечіткої логіки полягає в її здатності забезпечувати стійке керування складними нелінійними об'єктами без необхідності створення точної математичної моделі. Це особливо важливо для хімічних, енергетичних, металургійних та біотехнологічних процесів, де параметри змінюються в широких межах і залежать від багатьох взаємопов'язаних факторів. У таких системах побудова повної аналітичної моделі є надзвичайно складною, тоді як нечіткий регулятор може бути розроблений на основі практичного досвіду та експериментальних даних.

Нечіткі регулятори демонструють високу стійкість до шумів, зовнішніх збурень і неточностей вимірювання. Вони не потребують надмірної точності вхідної інформації, оскільки сам принцип їх роботи передбачає обробку неточних або неповних даних. Це підвищує надійність систем автоматизації, особливо в умовах агресивного виробничого середовища або обмежених можливостей вимірювальних засобів.

Крім того, нечітка логіка дозволяє поєднати формалізовані алгоритми з досвідом фахівців, що є актуальним у випадках, коли повна автоматизація замінює або доповнює роботу людини-оператора. Знання кваліфікованого персоналу можуть бути представлені у вигляді бази правил, яка відображає типові ситуації та відповідні дії. Це сприяє збереженню експертного досвіду та його інтеграції в автоматизовану систему.

Важливим аспектом є також можливість модифікації та розширення бази правил у процесі експлуатації системи. За необхідності можна додавати нові правила або коригувати наявні без повної перебудови алгоритму керування. Така гнучкість забезпечує адаптацію системи до змін технологічних умов, модернізації обладнання або впровадження нових режимів роботи.

Тому, використання нечіткої логіки в системах керування є актуальним і доцільним напрямом розвитку автоматизації. Вона забезпечує ефективну роботу в умовах невизначеності, дозволяє формалізувати людський досвід і підвищує стійкість та гнучкість керування складними технічними об'єктами.

4.1.2. Нейронні мережі як інструмент адаптивного керування

Іншим важливим напрямом розвитку інтелектуальних систем є застосування Artificial Neural Network. Вони моделюють принципи функціонування біологічних нейронних систем і здатні навчатися на основі накопичених даних. У системах автоматизації нейронні мережі використовуються для ідентифікації об'єктів керування, прогнозування параметрів процесу, діагностики несправностей, розпізнавання станів обладнання та оптимізації режимів роботи.

Однією з ключових переваг нейронних мереж є їх здатність відтворювати складні нелінійні залежності між вхідними та вихідними параметрами без побудови явної аналітичної моделі. У багатьох технологічних процесах математичний опис об'єкта є або надто громіздким, або неточним через велику кількість змінних і взаємозв'язків. Нейронна мережа, навчаючись на експериментальних або виробничих даних, формує внутрішнє подання процесу та фактично створює його узагальнену модель. Це дозволяє використовувати її для прогнозування поведінки системи за різних умов експлуатації.

Актуальність нейронних мереж особливо проявляється в задачах, пов'язаних із великими обсягами даних. Сучасні автоматизовані системи оснащені численними датчиками, що генерують значні масиви інформації в реальному часі. Традиційні алгоритми часто не здатні ефективно обробляти такі потоки даних, тоді як нейронні мережі можуть виявляти приховані закономірності, тенденції та аномалії. Це відкриває можливості для раннього виявлення несправностей, прогнозного технічного обслуговування та зменшення простоїв обладнання.

Важливою перевагою нейронних мереж є їх адаптивність. У разі зміни умов функціонування система може бути перенавчена або донавчена, що забезпечує актуальність керуючих алгоритмів протягом усього життєвого циклу обладнання. Такий підхід дозволяє системі автоматично враховувати зношування механізмів, зміну властивостей сировини або вплив нових виробничих режимів. Це особливо актуально в умовах модернізації виробництва та впровадження гнучких автоматизованих ліній.

Крім того, нейронні мережі можуть застосовуватися як складова частина регуляторів, що працюють у замкнених контурах керування. Вони здатні формувати керуючий вплив з урахуванням попередніх станів системи, що підвищує точність і швидкодію регулювання. У поєднанні з іншими інтелектуальними методами нейронні мережі забезпечують підвищення стійкості та якості перехідних процесів.

4.1.3. Гібридні нейро-нечіткі системи

Попри значні переваги Fuzzy Logic та Artificial Neural Network окремо, їх поєднання відкриває ще ширші можливості для побудови ефективних систем керування. Гібридні нейро-нечіткі системи поєднують інтерпретованість нечітких правил із здатністю нейронних мереж до навчання та самоналаштування. Одним із відомих прикладів такої інтеграції є Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, у межах якої параметри нечіткої моделі оптимізуються за допомогою механізмів навчання.

Актуальність гібридних систем полягає в тому, що вони дозволяють автоматично формувати та коригувати нечіткі правила на основі експериментальних або виробничих даних. Якщо класична нечітка система потребує експертного налаштування функцій належності та бази правил, то нейро-нечітка структура здатна адаптувати ці параметри в процесі навчання. У результаті

зменшується вплив суб'єктивного чинника, підвищується об'єктивність налаштувань і забезпечується більша точність керування.

Суттєвою перевагою гібридних мереж є можливість поєднання якісних і кількісних даних. Вони можуть використовувати як формалізовані числові вимірювання, так і експертні оцінки, що особливо важливо для складних технологічних процесів із великою кількістю невизначених або слабо формалізованих параметрів. Завдяки цьому система здатна враховувати як об'єктивні показники, так і накопичений досвід фахівців.

Гібридні мережі особливо ефективні в задачах прогнозування, адаптивного регулювання та розпізнавання станів складних технічних систем. Вони можуть застосовуватися для побудови інтелектуальних регуляторів, що змінюють свої параметри залежно від режиму роботи об'єкта, або для створення систем діагностики, які визначають перед аварійні стани на основі аналізу сукупності ознак. Такий підхід забезпечує баланс між точністю, стійкістю та зрозумілістю алгоритмів, що є критично важливим для промислових систем автоматизації.

Крім того, гібридні системи сприяють підвищенню рівня автоматизації прийняття рішень. Вони здатні працювати в умовах багатофакторності та невизначеності, коли вплив окремих параметрів є взаємозалежним і нелінійним. Завдяки здатності до навчання система може поступово вдосконалювати свої характеристики, підлаштовуючись під конкретний об'єкт керування та специфіку виробництва.

Зростання складності виробничих процесів, необхідність підвищення якості продукції, зменшення енерговитрат і забезпечення безпеки обумовлюють перехід від традиційних методів автоматичного керування до інтелектуальних підходів. Нечітка логіка дозволяє працювати з невизначеністю та експертними знаннями, нейронні мережі — навчатися та адаптуватися до нових умов, а гібридні системи — поєднувати переваги обох підходів, формуючи більш досконалі алгоритми керування.

4.1.4. Експертні системи

Одним із важливих напрямів розвитку інтелектуалізації автоматизації є експертні системи, які базуються на формалізації знань висококваліфікованих фахівців у вигляді баз знань і механізмів логічного виведення. Основу таких систем становлять база фактів, база правил та модуль виведення, що здійснює аналіз наявної інформації й формує обґрунтовані рішення.

Такі системи дозволяють автоматизувати процес прийняття рішень у складних або нетипових ситуаціях, коли стандартні алгоритми не дають однозначного результату. Вони широко застосовуються для діагностики технічного стану обладнання, вибору оптимальних режимів роботи, локалізації несправностей, а також для підтримки оператора під час керування складними технологічними процесами.

Перевагою експертних систем є можливість накопичення, структуризації та збереження досвіду підприємства незалежно від кадрових змін. Крім того, вони забезпечують однакову якість прийняття рішень у різний час та за різних умов, що знижує вплив людського чинника. У поєднанні з іншими інтелектуальними технологіями експертні системи можуть виконувати роль консультативного або керуючого модуля в автоматизованих комплексах.

4.1.5. Генетичні алгоритми

Ефективним інструментом оптимізації параметрів систем автоматизації є Genetic Algorithm. Вони імітують механізми природного відбору, спадковості та мутації й дозволяють знаходити оптимальні або близькі до оптимальних рішення для багатопараметричних задач.

Принцип їх роботи полягає у формуванні початкової сукупності можливих рішень, їх оцінюванні за певним критерієм якості та подальшому «відборі» найкращих варіантів для створення нового покоління рішень. У результаті

багаторазового повторення цього процесу досягається поступове покращення параметрів системи.

У системах керування генетичні алгоритми застосовуються для налаштування параметрів регуляторів, оптимізації структури нейронних мереж, мінімізації енергоспоживання, оптимального планування виробничих процесів та підвищення їх продуктивності. Їх перевага полягає у здатності працювати з нелінійними, багатокритеріальними та складними функціями без необхідності точного аналітичного опису об'єкта. Це робить їх особливо цінними в умовах невизначеності та складної взаємодії параметрів.

Отже, аналіз сучасних інтелектуальних технологій свідчить, що для удосконалення систем керування найбільш доцільним є застосування нечіткої логіки. Вона дозволяє ефективно працювати в умовах невизначеності та неповноти інформації, формалізувати експертні знання операторів і переносити їх у структуру автоматизованого керування. На відміну від традиційних методів, нечітка логіка забезпечує стійке регулювання складних нелінійних процесів, високу адаптивність до змін параметрів об'єкта та робить систему більш гнучкою і «інтелектуалізованою». Саме ці властивості роблять її оптимальним інструментом для підвищення ефективності, надійності та безпеки сучасних автоматизованих систем.

4.2. Побудова одноконтурної САР з Fuzzy-регулятором

Основною метою даної магістерської роботи є удосконалення системи автоматичного керування вакуумною колоною шляхом упровадження нечіткої логіки (НЛ). Застосування нечіткого керування розглядається як ефективна альтернатива традиційним чисельним методам теорії керування, оскільки воно забезпечує можливість синтезу нелінійних регуляторів на основі евристичних знань та експертних правил, що особливо доцільно для складних об'єктів з нелінійною динамікою та невизначеними параметрами.

Теоретичні засади принципів побудови та впровадження нечітких регуляторів у системи автоматичного керування, що стали основою для підготовки цього розділу, були опрацьовані та узагальнені на основі відповідних матеріалів. У ньому наведено базові концепції нечіткої логіки, структуру нечітких систем керування, а також методи формування бази правил і вибору функцій належності.

На першому етапі дослідження виконується аналіз одноконтурної системи автоматичного регулювання (САР) з нечітким ПІД-регулятором. Зазначений регулятор було обрано як найбільш доцільний за показниками якості керування для даної САК, зокрема за критеріями швидкодії, перерегулювання та статичної похибки. Налаштування параметрів нечіткого ПІД-регулятора здійснювалося аналогічним методом, що й у попередньому експерименті, із використанням середовища моделювання Simulink програмного продукту Matlab. Структурну схему досліджуваної системи наведено на рис. 2.7.

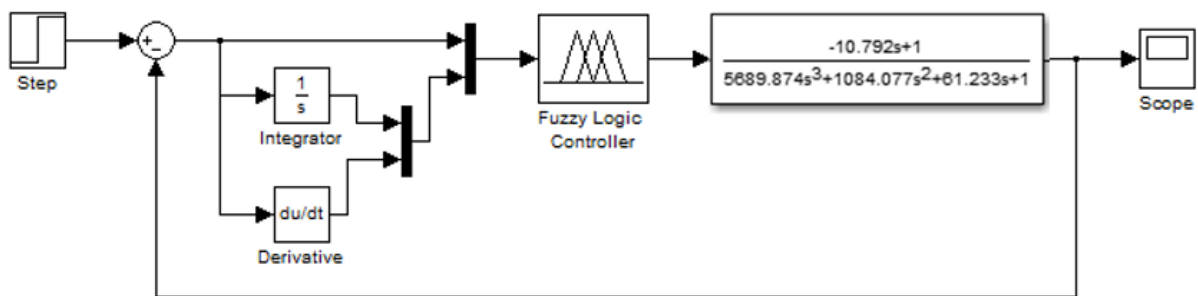


Рис. 4.1. Одноконтурна САР з нечітким регулятором

Зручним інструментом серед можливостей Matlab є спеціальний модуль Fuzzy Logic Toolbox. Він забезпечує створення та редагування систем автоматичного керування з використанням нечіткої логіки, відомих як Fuzzy Inference System. На початковому етапі побудови нечіткого регулятора необхідно визначити терми множин, тобто виконати його налаштування.

Для лінгвістичної змінної «Discharge» (витрата) представимо термножину:

«Discharge» = {«Very Little» (дуже мала), «Little» (мала), «Normal» (нормальна), «Big» (велика), «Very Big»(дуже велика)}.

Запишемо універсальну множину U , яка характеризує цю лінгвістичну змінну:

$$U = \{0; 1.4; 2.3; 3.3; 4\}.$$

Для лінгвістичної змінної «Outlet Temperature» (температура на виході) терм-множина наступна:

«Outlet Temperature» = {«Very Low» (дуже низька), «Low» (низька), «Average» (середня), «High» (висока), «Very High» (дуже висока),}.

$$U = \{20; 39; 57; 81; 95\}.$$

Для лінгвістичної змінної «Open valve» (відкриття регулюючого клапана на паровій лінії) сформуємо терм-множину:

«Open valve» = {«Very Little» (дуже мале), «Little» (мале), «Normal» (нормальне), «Big» (велике), «Very Big»(дуже велике)}.

Запишемо універсальну множину U що характеризуватиме дану лінгвістичну змінну:

$$U = \{0; 1.4; 2.2; 3.1; 4\}.$$

За даними сформованих терм-множин необхідно побудувати базу правил.

Спочатку необхідно виконати ввід вхідних та вихідних змінних. В нашому випадку витрата та температура на виході будуть вхідними, а відкриття клапану газу вихідним:

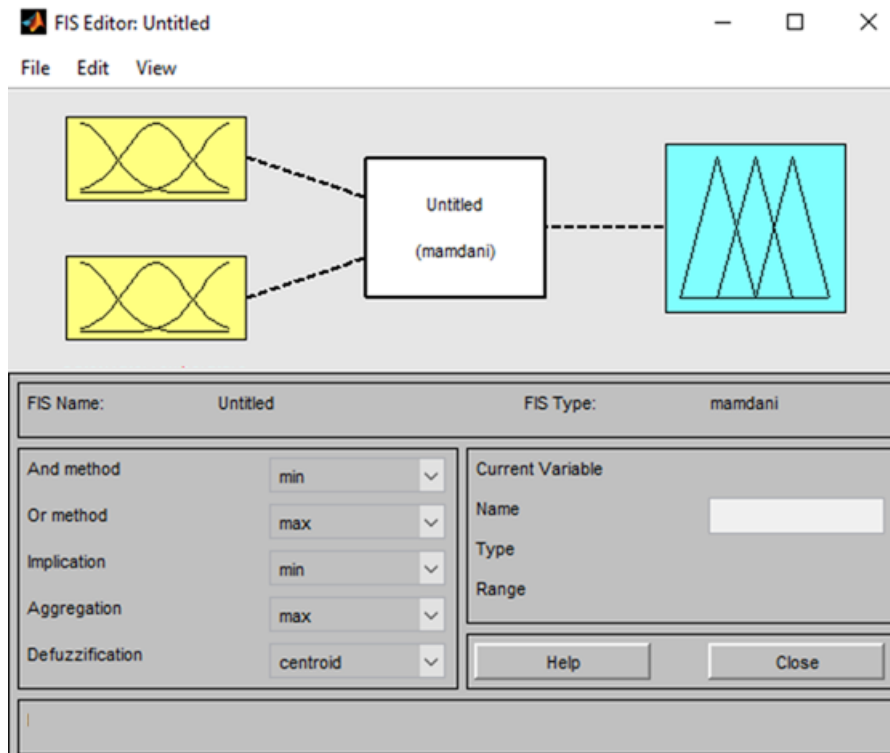


Рис. 4.2. Вхідні та вихідна змінні fuzzy-регулятора

Надалі необхідно підключити до Р базу всіх тих попередньо сформованих правил, для цього їх необхідно ввести в блок настройки правил:

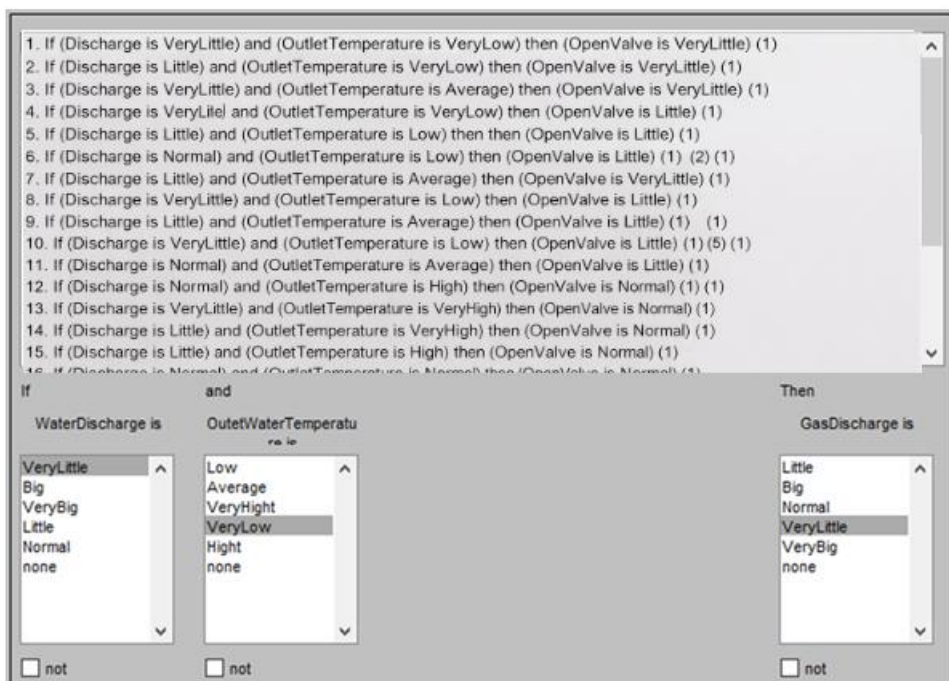


Рис. 4.3. База правил

Тепер залишилося сформувати функції належності обох вхідних та вихідної змінних:

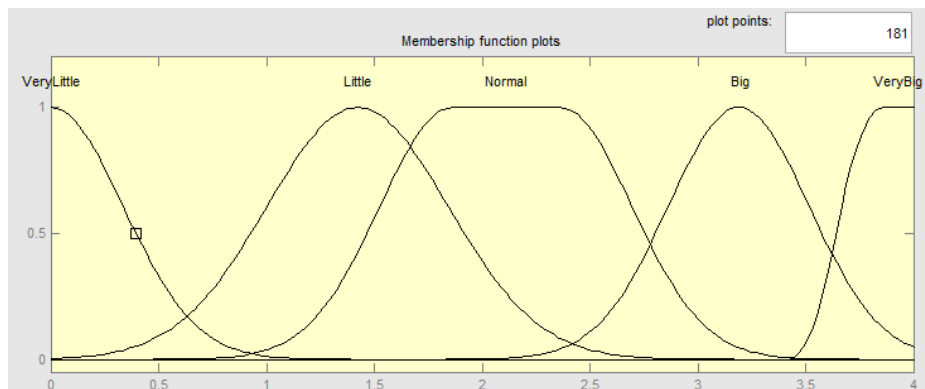


Рис. 4.4. Функції належності для термів вхідної змінної Discharge

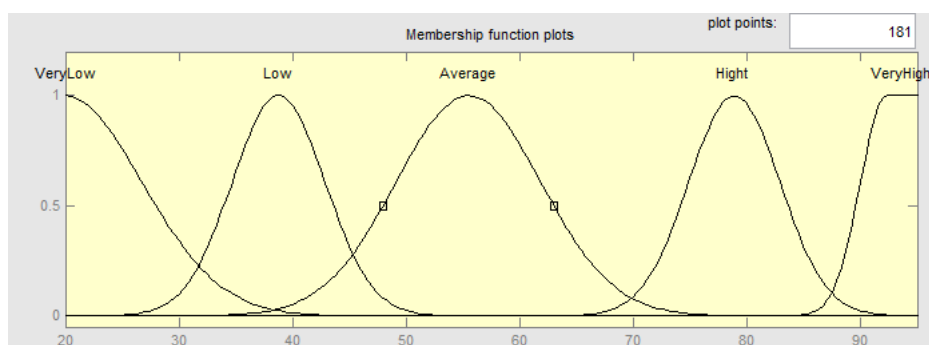


Рис. 4.5. Функції належності для термів вхідної змінної OutletTemperature

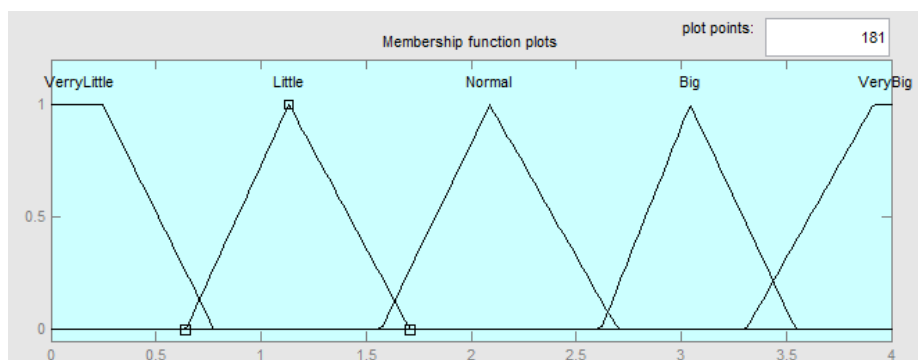


Рис. 4.6. Функції належності для термів вихідної змінної OpenValve

За даним підбором типів та форм функцій належності в результаті отримано нормальну якість процесу при відсутності значного перерегулювання та високу точність ці дані можна побачити на отриманій перехідній характеристиці:

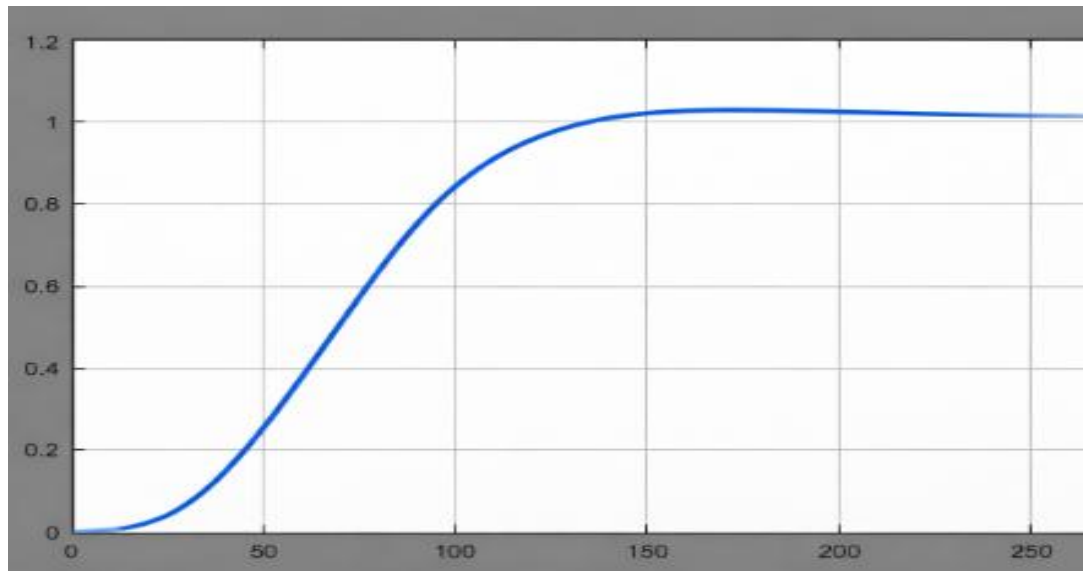


Рис. 4.7. Перехідна характеристика нечіткого ПІД-регулятора

Визначимо основні показники якості перехідної характеристики нечіткого ПІД-регулятора:

Час розгону: $T_{роз} = 150$;

Час перехідного процесу: $T_{ПП} = 250$ с;

Перерегулювання: $\sigma = \frac{A_1}{x(\infty)} \cdot 100 = \frac{1,01-1}{1} \cdot 100 = 1\%$.

На завершальному етапі дослідження необхідно виконати порівняльний аналіз двох змодельованих одноконтурних систем: однієї з класичним ПІД-регулятором та іншої з нечітким ПІД-регулятором. Для цього у середовищі Simulink було побудовано нову систему автоматичного регулювання, в якій обидві моделі об'єднано на спільний вихід:

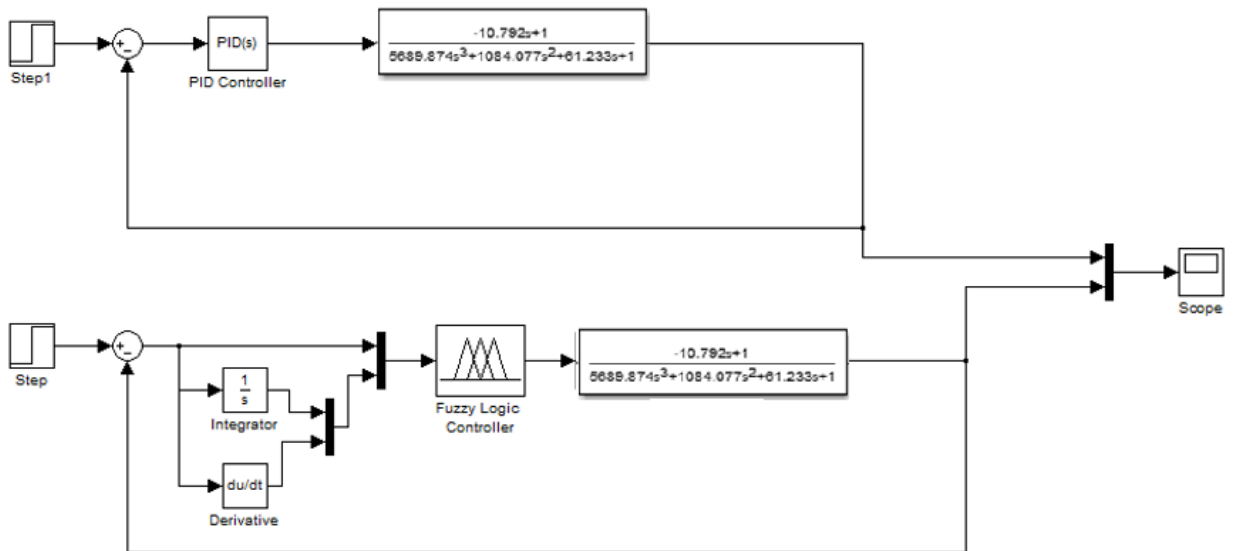


Рис. 4.8. Структурна схема з класичним ПД-регулятором та нечітким регулятором

При подачі одиночного впливу на системи, в результаті отримуємо графіки перехідних процесів:

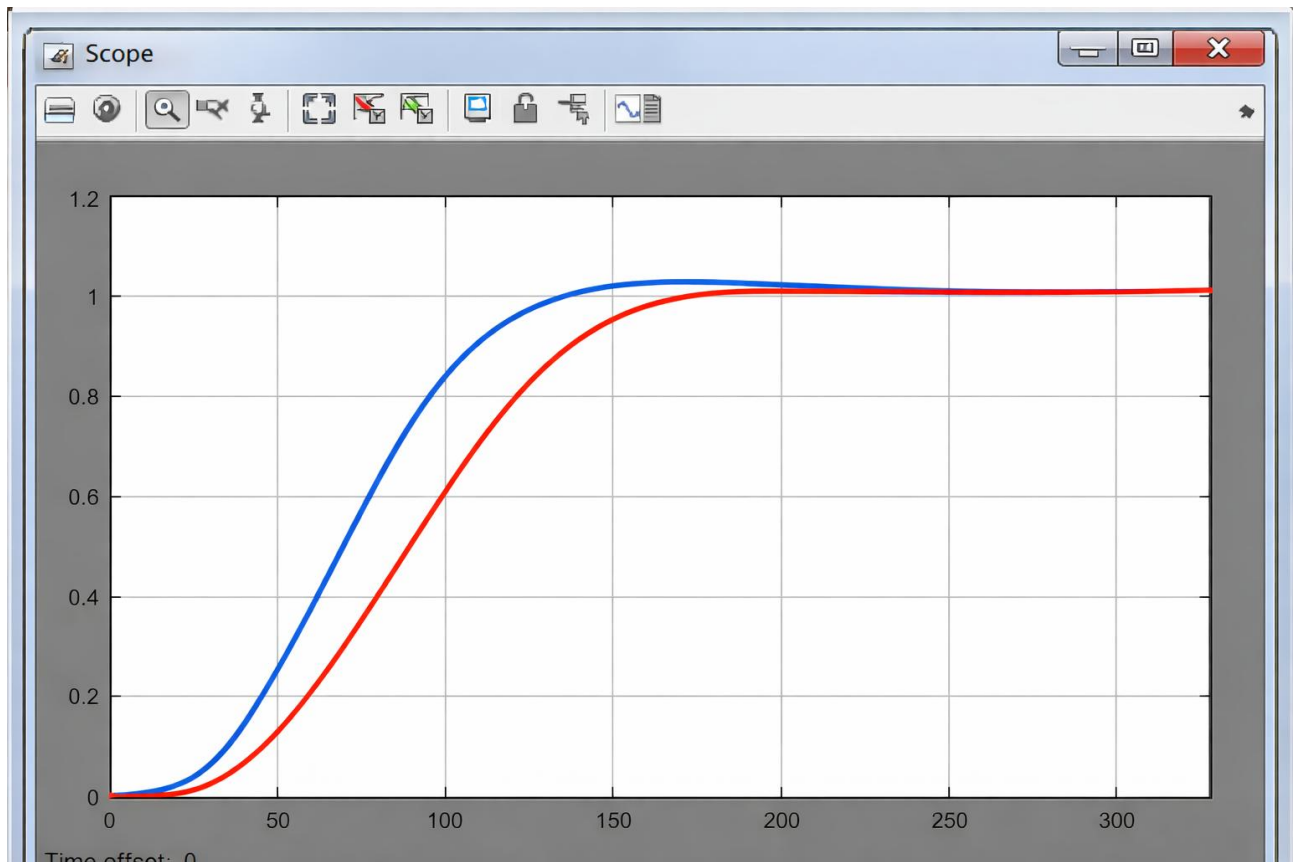


Рис. 4.9. Порівняння перехідних процесів

При порівнянні даних обох графіків, тобто показників якості та параметрів налаштування, чітко видно, що класичний регулятор є менш ефективним для цієї системи порівняно з нечітким. Це підтверджує, що впровадження нечіткого регулятора у САК є доцільним кроком для підвищення ефективності системи. За результатами налаштування параметрів нечіткого регулятора отримано наступну передавальну функцію (ПФ):

$$W_{\text{РП}}(p) = \frac{0,005p^2 + 0,00011p + 1,5724 \cdot 10^{-8}}{p}$$

4.3. Технічна реалізація нечіткого контролера

Промислова реалізація нечіткого регулювання здійснюється за допомогою сучасної контролерної техніки, яка підтримує інтеграцію алгоритмів нечіткого контролю на апаратному та програмному рівні. Такі системи забезпечують гнучке керування технологічними процесами навіть за наявності неповних або неточних даних.

Сучасні програмовані логічні контролери (ПЛК), що підтримують нечітке регулювання, мають такі ключові особливості:

1. Вбудована підтримка нечіткої логіки – багато моделей ПЛК оснащені готовими бібліотеками для реалізації правил «якщо–то», що дозволяє безпосередньо впроваджувати нечіткі алгоритми без додаткових зовнішніх обчислювальних модулів.
2. Висока швидкодія обробки сигналів – контролери забезпечують обробку великої кількості вхідних даних у реальному часі, що критично для промислових процесів із швидкими динамічними змінами.
3. Модульна архітектура та гнучкість програмування – дозволяє інтегрувати нечіткі контролери у існуючі автоматизовані системи та комбінувати їх із традиційними ПД-регуляторами.

4. Можливість віддаленого моніторингу та налаштування – сучасні ПЛК підтримують віддалене підключення та зміну параметрів нечіткої логіки без зупинки технологічного процесу.

5. Сумісність із стандартними промисловими інтерфейсами – контролери можуть взаємодіяти з датчиками та виконавчими механізмами через стандарти Modbus, Profibus, EtherNet/IP та інші.

Загальна технологічна схема реалізації нечіткого регулювання передбачає використання ПЛК як центрального обчислювального елемента, який збирає дані з датчиків, виконує фазифікацію вхідних сигналів, обробляє правила нечіткої логіки та формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів. Такий підхід дозволяє підвищити стабільність, точність та адаптивність промислових процесів.

4.3.1. ПЛК серії Siemens SIMATIC S7

Сучасні промислові автоматизовані системи вимагають високої адаптивності та здатності ефективно управляти технологічними процесами навіть у разі неповної або неточної інформації про стан об'єкта. Одним із ефективних рішень у цьому контексті є застосування нечітких контролерів, що реалізують принципи нечіткої логіки для формування керуючих сигналів. У промисловості найбільш поширеним обладнанням для впровадження таких алгоритмів є програмовані логічні контролери (ПЛК), зокрема серії Siemens SIMATIC S7-1200 та S7-1500.

ПЛК SIMATIC S7 відомі своєю модульною архітектурою та високою обчислювальною потужністю, що дозволяє інтегрувати різноманітні алгоритми управління, у тому числі й нечіткої логіки. Хоча ці контролери не мають апаратно вбудованих блоків для виконання нечітких обчислень, вони забезпечують повну підтримку таких алгоритмів на програмному рівні через середовище TIA Portal, яке надає інструменти для конфігурації, програмування та тестування ПЛК.

Реалізація нечіткої логіки на SIMATIC S7 здійснюється шляхом створення функціональних блоків, які виконують послідовні етапи обробки сигналів:

фазифікацію числових вхідних даних у нечіткі множини, оцінку правил «якщо–то», формування нечітких висновків та дефазифікацію результатів у числові керуючі сигнали. Для спрощення та прискорення розробки застосовуються спеціалізовані бібліотеки та інструментальні пакети, наприклад FuzzyControl++ або блоки, сумісні зі стандартом IEC 61131-7, що дозволяють конфігурувати нечіткі контролери без додаткового зовнішнього обладнання.



Рис. 4.10. ПЛК серії Siemens SIMATIC S7

Програмна реалізація нечіткої логіки на SIMATIC S7 підтверджується практичними прикладами у наукових дослідженнях, де такі контролери застосовувалися, наприклад, для керування швидкістю електродвигунів або температурними режимами у виробничих процесах. Використання нечіткої логіки дозволяє зменшити перерегулювання, підвищити точність підтримки заданих параметрів та забезпечити стабільність процесу навіть при змінних або частково невизначених вхідних умовах.

Таким чином, ПЛК серії Siemens SIMATIC S7, завдяки програмній підтримці нечітких алгоритмів, є універсальним і надійним засобом для реалізації адаптивних систем управління на промислових об'єктах. Їх застосування сприяє підвищенню ефективності, гнучкості та безпеки технологічних процесів, що є критично важливим для сучасної промислової автоматизації.

4.3.2. PID-Fuzzy Logic Controllers від Lumel

Серія RE4x контролерів від компанії Lumel становить собою сімейство промислових мікропроцесорних регуляторів, у яких алгоритм керування поєднує традиційну PID-регуляцію з нечіткою логікою (Fuzzy Logic). Такий підхід дозволяє значно підвищити якість автоматичного регулювання, зокрема скоротити перехідний процес при виході на задане значення та мінімізувати коливання під впливом зовнішніх перешкод.

Конструктивно контролери серії RE41, RE42, RE43 та RE44 є панельними пристроями зі світлодіодним індикатором, що відображає як вимірювану величину, так і задане значення. Вони розраховані на монтаж у щитах управління й призначені для безперервного промислового застосування в автоматизованих системах, де потрібне точне підтримання технологічних параметрів (наприклад, температури, тиску чи рівня).

Контролери серії RE4x побудовані на основі мікропроцесорної обчислювальної системи, яка реалізує комбінований алгоритм PID та нечіткої логіки. Традиційний PID-компонент забезпечує стабілізацію процесу згідно з класичними законами пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання, тоді як модуль *Fuzzy Logic* адаптує поведінку контролера на основі нечітких правил, що моделюють емпіричні знання оператора або специфіку технологічного об'єкта. Це дозволяє пристрою динамічно пристосовувати коефіцієнти регулювання до змін умов процесу, зменшуючи перерегулювання та прискорюючи вихід на установче значення.

Такий підхід забезпечує покращення характеристик регулювання в умовах змінних або частково невизначених параметрів технологічного середовища, де стандартні PID-алгоритми можуть бути недостатньо ефективними.

Контролери серії RE41–RE44 мають такі загальні технічні властивості:

- частота вимірювань: до *5 вимірів за секунду*, що забезпечує достатню швидкість реакції в реальному часі;
- універсальні входи: підтримка широкого діапазону сигналів (термоелементів, резистивних датчиків, стандартних аналогових сигналів);
- дві конфігурації меню: «базова» та «розширена» для різного ступеня налаштування користувачем;
- універсальне меню користувача з можливістю програмування функцій;
- різноманітні виходи для керування виконавчими пристроями;
- вбудовані функції технічної безпеки: виявлення розриву датчика, аварійне управління, захист від некоректних змін параметрів;
- цифровий фільтр для обробки шумів сигнального поля;
- інтерфейс RS-485 для обміну даними з вищими рівнями систем автоматички;
- ретрансляція аналогового сигналу на зовнішній пристрій для контролю або реєстрації.

Всі моделі мають схожі функціональні можливості, відмінності між ними, як правило, полягають у габаритних розмірах корпусу та форм-факторі монтажу:

- RE41 – панель 96 × 96 × 65 мм;
- RE42 – панель 48 × 96 × 80 мм;
- RE43 – панель 50,7 × 50,7 × 88,5 мм;
- RE44 – панель 50 × 26,5 × 110,5 мм.

Контролери забезпечують контроль стану підключеного датчика: розрив з'єднання або некоректні значення детектуються в автоматичному режимі із швидкістю реагування до 0,1–4 с залежно від типу входу. При виявленні несправності регулятор подає аварійний сигнал та може перейти у безпечний

режим керування. Це важливо для промислових процесів, де несправність датчика може призвести до критичних відхилень технологічних параметрів

Інтеграція нечіткої логіки в регуляторні алгоритми дозволяє:

- підвищити швидкість реакції на зміни процесу при збереженні стабільності;
- знизити перехідні коливання під час виходу на задану величину або при зовнішніх впливах;
- адаптувати регулятор до нелінійних або змінних характеристик об'єкта без ручного перенастроювання PID-коефіцієнтів;

Такі властивості роблять контролери серії RE4x придатними для використання на промислових об'єктах у хімічній, металургійній, енергетичній, харчовій та інших галузях, де потрібне точне автоматичне регулювання технологічних параметрів.



Рисунок 4.11 - PID-Fuzzy Logic Controllers серії RE4x від Lumel

4.3.3. Контролери серії *FuzyPro* із реалізацією нечіткої логіки

Серія *FuzyPro* контролерів, що виробляється компанією Heaters Controls and Sensors Ltd., представляє собою клас програмованих промислових контролерів, у яких методи нечіткої логіки (fuzzy logic) інтегровані безпосередньо в алгоритм регулювання. У цих пристроях поєднано традиційні ПД-алгоритми та нечітке управління, що дозволяє отримувати високоточні результати регулювання параметрів технологічного процесу та гнучко реагувати на зовнішні збурення.

Контролери серії *FuzyPro* розраховані на широкий спектр застосувань, включно з контролем температури, тиску, вологості, витрат, рівня та інших важливих технологічних параметрів. Вони доступні у форм-факторах 1/16 DIN та 1/8 DIN, що забезпечує їхню компактність і зручність монтажу в промислові щити керування.

FuzyPro контролери побудовані на базі мікропроцесорної архітектури з інтегрованою логікою нечіткого висновку (Fuzzy Logic). У таких пристроях нечітка логіка використовується разом із класичним ПД-регулятором задля адаптивного формування вихідних команд. Алгоритм роботи включає:

1. Отримання вхідних сигналів від датчиків технологічних параметрів (термопари, RTD, стандартні аналогові входи).
2. Попередню обробку сигналів, включно з лінійаризацією та компенсацією холодних з'єднань у разі температурних датчиків.
3. Порівняння виміряного значення з заданим та оцінку відхилень.
4. Прийняття рішення з використанням нечітких правил у поєднанні з ПД-компонентом для генерації керуючого впливу.
5. Видачу керуючих сигналів на виконавчі пристрої (реле, SSR, аналогові виходи), що реалізують безпосередній вплив на керований об'єкт. (HCS1)

Цей підхід дозволяє системі усунути перерегулювання та зменшити коливання параметрів процесу, оскільки нечітка логіка забезпечує неперервне адаптивне налаштування коефіцієнтів управління, що традиційно у класичних

ПІД-алгоритмах має виконуватися зовнішніми процедурами налаштування. (IHS | Industrial Heat Sources)

Характеристика моделей P-6100 та P-8100

Контролери серії FuzyPro P-6100 та P-8100 є типовими представниками високопродуктивних процесних контролерів із підтримкою нечіткої логіки. Особливості їхньої технічної реалізації та основні функції включають:

- компактний форм-фактор DIN (1/16 DIN для P-6100, що відповідає стандартним шафам керування);
- режими керування PID або ON/OFF, а також Fuzzy Logic для адаптивного регулювання;
- поле налаштування типу входів для температурних датчиків (термопари, RTD) або стандартних аналогових сигналів;
- автоматичне або ручне налаштування коефіцієнтів, із можливістю самотюнінгу для мінімізації перехідної реакції;
- вихідна конфігурація з підтримкою різних типів виходів (реле, твердотільні виходи SSR, аналоговий вихід 4-20 mA), що забезпечують гнучкість інтеграції з виконавчими механізмами;
- вбудовані функції аварійного сигналювання та захисту процесу, зокрема обмеження швидкості змін та контроль меж значень;
- зручний користувальницький інтерфейс зі світлодіодним або цифровим відображенням поточної величини та заданого значення, що полегшує експлуатацію в польових умовах.



У моделі P-8100 додатково передбачено функції self-tuning та регулювання як у режимі нагрівання, так і охолодження, що значно розширює сферу застосування таких контролерів у складних технологічних циклах.

Практичні переваги та застосування

Завдяки поєднанню ПД-регулювання з нечіткою логікою, контролери FuzyPro забезпечують:

- скорочення часу виходу на задане значення без значних перерегулювань;
- зменшення впливу зовнішніх збурень та невизначеностей техпроцесу;
- підвищення стабільності підтримки технологічних параметрів у широкому діапазоні робочих умов.

Ці властивості роблять їх придатними для застосування в автоматизованих системах машинобудування, харчової, хімічної, енергетичної та інших галузей, де висока точність і адаптивність регулювання мають критичне значення.

Висновки до розділу 4

У цьому розділі проведено аналіз сучасних інтелектуальних технологій. Визначено, що найкращим методом для удосконалення існуючої САК є нечітка логіка. Здійснено побудову та дослідження одноконтурної системи автоматичного регулювання (САР) з нечітким ПД-регулятором для вакуумної колони. Розглянуто принципи побудови нечітких регуляторів, формування терм-множин, функцій належності та бази правил на основі експертних знань.

Моделювання в середовищі Matlab/Simulink показало, що застосування нечіткої логіки забезпечує високу точність керування, відсутність значного перерегулювання та задовільну швидкодію системи. Порівняльний аналіз перехідних процесів одноконтурних САР з класичним та нечітким регуляторами продемонстрував, що нечіткий регулятор є більш ефективним за всіма основними показниками якості: час розгону, перехідний процес та перерегулювання.

Було здійснено комплексний аналіз сучасної контролерної техніки, яка здатна забезпечувати реалізацію алгоритмів нечіткого регулювання. У ході дослідження розглянуто особливості як програмованих логічних контролерів (ПЛК), так і спеціалізованих промислових регуляторів, які інтегрують механізми нечіткої логіки у поєднанні з традиційними ПД-алгоритмами. Аналіз дозволив визначити технічні характеристики та функціональні можливості таких пристроїв, їхню придатність для адаптивного управління технологічними процесами, а також особливості програмної реалізації *fuzzy logic*, включно з підтримкою бібліотек, функціональних блоків та інструментальних пакетів, що дозволяють ефективно реалізувати нечіткі алгоритми у промислових системах.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даній магістерській роботі описано процес атмосферної перегонки нафти, виділено основні стадії підготовки та ректифікації сировини, охарактеризовано ключові параметри, що визначають чіткість фракціонування та енергетичну ефективність установки. Виконано опис технологічного обладнання вакуумної установки вторинної перегонки, включаючи трубчасту піч, вакуумну колонну, насоси, конденсатори, теплообмінники та холодильники, та зазначено їхні функції у процесі розділення суміші на фракції. Обґрунтовано науково-дослідні задачі, пов'язані з автоматизацією керування технологічними процесами: визначення передавальних функцій основного та допоміжного контурів, моделювання одноконтурної та каскадної АСК, аналіз інтелектуальних технологій і застосування нечіткого регулятора.

Проведено обґрунтування вибору об'єкта керування та визначено його структурну схему з позицій системи автоматизації. Для апроксимації експериментально отриманих даних використано програмне забезпечення Arproх. Було здійснено розробку та дослідження одноконтурної та каскадної систем автоматичного керування. Проведено аналіз їхньої стійкості за критерієм Михайлова, який підтвердив стабільну роботу обох САК. Також виконано моделювання перехідних характеристик у програмному середовищі **Matlab**, що дозволило визначити ключові показники якості систем автоматичного регулювання.

Проведено аналіз сучасних інтелектуальних технологій. Визначено, що найкращим методом для удосконалення існуючої САК є нечітка логіка. Здійснено побудову та дослідження одноконтурної системи автоматичного регулювання (САР) з нечітким ПІД-регулятором для вакуумної колони. Розглянуто принципи побудови нечітких регуляторів, формування терм-множин, функцій належності та бази правил на основі експертних знань.

Моделювання в середовищі Matlab/Simulink показало, що застосування нечіткої логіки забезпечує високу точність керування, відсутність значного перерегулювання та задовільну швидкодію системи. Порівняльний аналіз перехідних процесів одноконтурних САР з класичним та нечітким регуляторами продемонстрував, що нечіткий регулятор є більш ефективним за всіма основними показниками якості: час розгону, перехідний процес та перерегулювання.

Здійснено комплексний аналіз сучасної контролерної техніки, яка здатна забезпечувати реалізацію алгоритмів нечіткого регулювання. У ході дослідження розглянуто особливості як програмованих логічних контролерів (ПЛК), так і спеціалізованих промислових регуляторів, які інтегрують механізми нечіткої логіки у поєднанні з традиційними ПІД-алгоритмами. Аналіз дозволив визначити технічні характеристики та функціональні можливості таких пристроїв, їхню придатність для адаптивного управління технологічними процесами, а також особливості програмної реалізації fuzzy logic, включно з підтримкою бібліотек, функціональних блоків та інструментальних пакетів, що дозволяють ефективно реалізувати нечіткі алгоритми у промислових системах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горбійчук, М. І. Теорія автоматичного керування. Нелінійні системи [Текст]: лаб. практикум / М. І. Горбійчук, Л. Я. Чигур. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2024. – 84 с.
2. Горбійчук, М. І. Теорія автоматичного керування. Лінійні системи. [Текст]: лаб. практикум / М. І. Горбійчук, Л. Я. Чигур. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2023. – 64 с.
3. Автоматичне управління [Текст]: навчальний посібник / Г. Н. Семенцов, Я. Р. Когуч, М. І. Когутяк [et al.]. – 2-е вид. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. – 398 с.
4. Штучні нейромережі та фаззі логіка в системах автоматизації [Текст] : конспект лекцій / Г. Н. Семенцов, І. І. Чигур, Я. Р. Когуч, Л. Я. Чигур. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ Факел, 2009. – 132 с.
5. Фазі-логіка в системах контролю [Текст] : навч. посіб. / Г. Н. Семенцов, І. І. Чигур, М. В. Шавранський, В. С. Борин. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2002. – 70 с.
6. Фазі-логіка в системах керування [Текст] : навч. посіб. / Г. Н. Семенцов, І. І. Чигур, М. В. Шавранський, В. С. Борин. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2002. – 84 с.
7. Чигур, І. І. Інтелектуальні методи прийняття рішень в технічних системах [Текст] : лаб. практикум / І. І. Чигур. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 69 с.
8. Чигур, І. І. Основи теорії інформації та кодування [Текст] : практикум / І. І. Чигур, В. М. Гарасимів, Л. Я. Чигур. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2021. – 24 с.
9. Когутяк, М. І. Мікроконтролери для систем автоматизації [Текст] : навч. посібник / М. І. Когутяк, А. І. Лагойда. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 290 с.
10. Когутяк, М. І. Мікроконтролери та програмовані логічні контролери [Текст] : метод. вказівки для викон. курс. робрти / М. І. Когутяк, А. І. Лагойда. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2025. – 72 с.
11. Когутяк, М. І. Алгоритмізація та програмування промислових

контролерів [Текст]: лаб. практикум. Ч. 2: Синтез цифрових статичних та динамічних коректорів / М. І. Когутяк, А. І. Лагойда, Л. І. Лагойда. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 89 с.

12. Когутяк, М. І. Програмно-технічні комплекси та програмне забезпечення автоматизованих систем управління технологічними процесами [Текст] : лаб. практикум / М. І. Когутяк, А. І. Лагойда, Л. І. Фешанич. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 87 с.

ДОДАТКИ

Додаток А1

Апроксимація V1.0

Поліном знаменника N
 Поліном чисельника M
 Вхідне збурення X_0

Крок дискретності T
 Кількість дискрет переходної x -ки NK

t,с	y(t)	h(t)	$\delta(t)$
0	0,0000	0,0000	0,0000
20	0,0000	-0,0150	0,0150
40	0,1900	0,2040	0,0140
60	0,4620	0,4730	0,0110
80	0,6880	0,6780	0,0100
100	0,8180	0,8110	0,0070
120	0,8960	0,8910	0,0050
140	0,9400	0,9380	0,0020
160	0,9650	0,9650	0,0000
180	0,9780	0,9800	0,0020
200	0,9880	0,9880	0,0000
220	0,9930	0,9930	0,0000
240	0,9960	0,9960	0,0000
260	0,9980	0,9980	0,0000

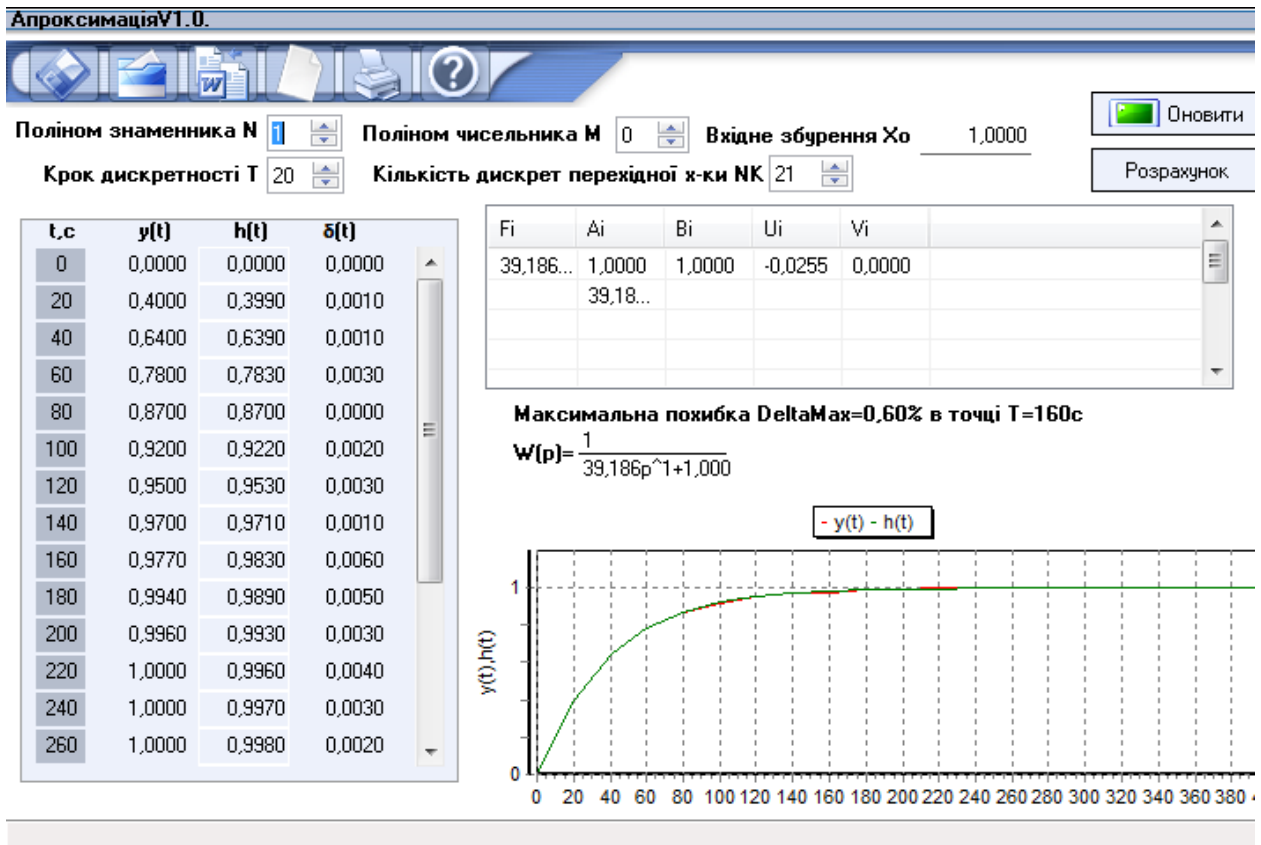
Fi	Ai	Bi	Ui	Vi
72,026...	1,0000	1,0000	-0,0288	0,0000
1861,4...	61,23...	-10,7...	-0,0601	0,0000
25779...	1084...		-0,1017	0,0000
27823...	5689...			

Максимальна похибка $\Delta_{\text{max}}=1,50\%$ в точці $T=20\text{с}$

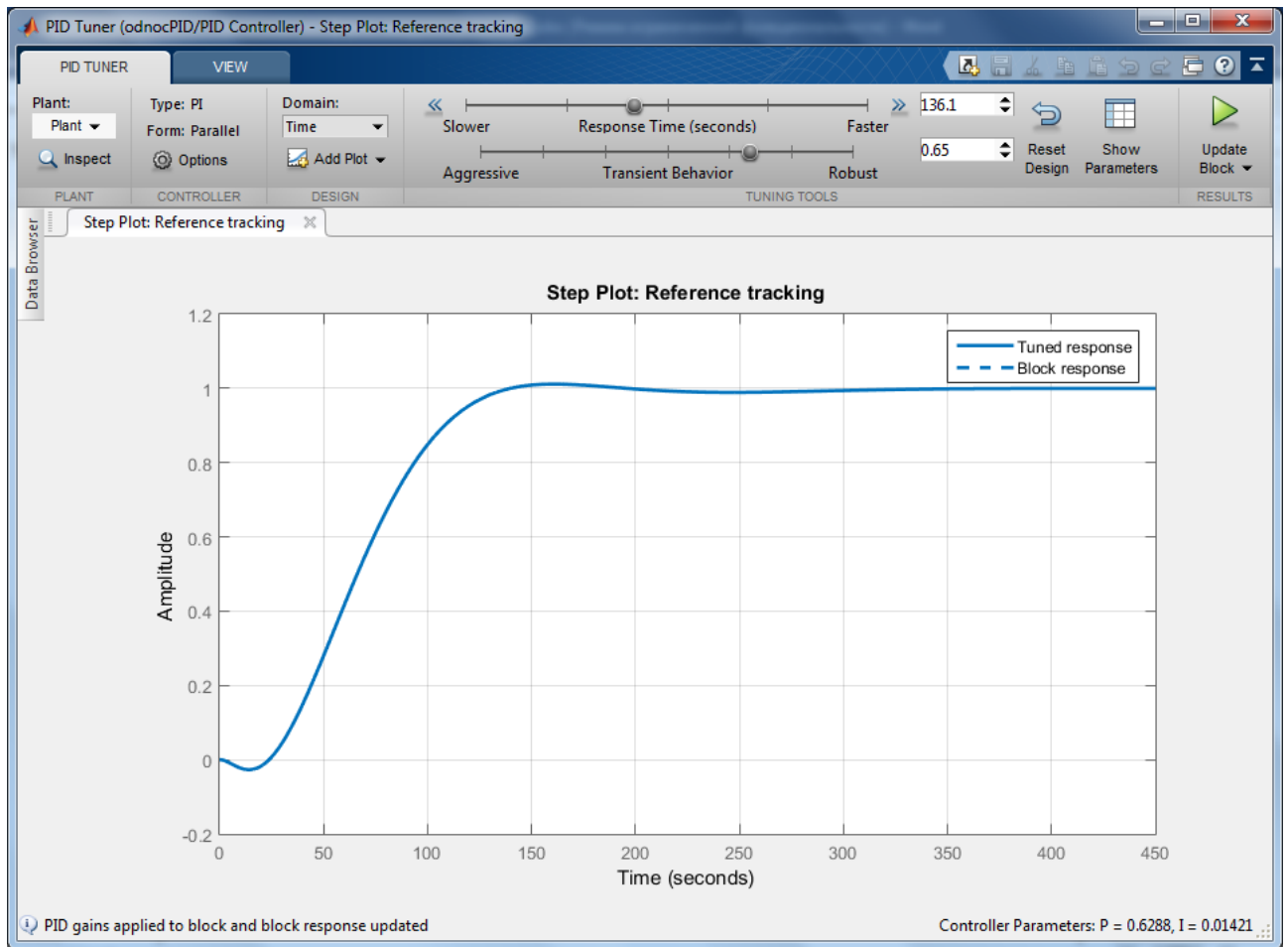
$$W(p) = \frac{1,000 \cdot (-10,792p^3 + 1,000)}{5689,874p^3 + 1084,077p^2 + 61,233p + 1,000}$$

- y(t) - h(t)

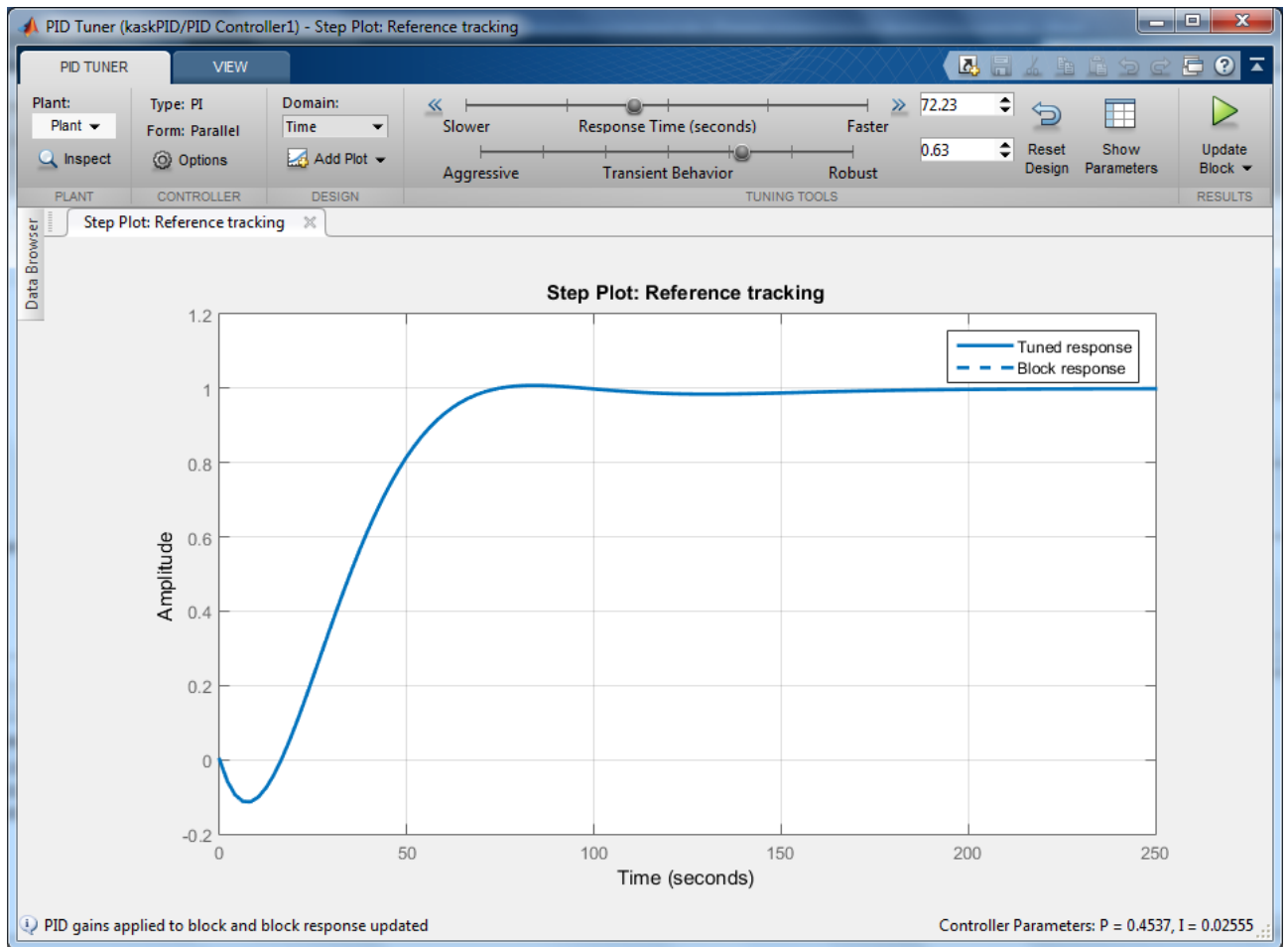
Додаток А2



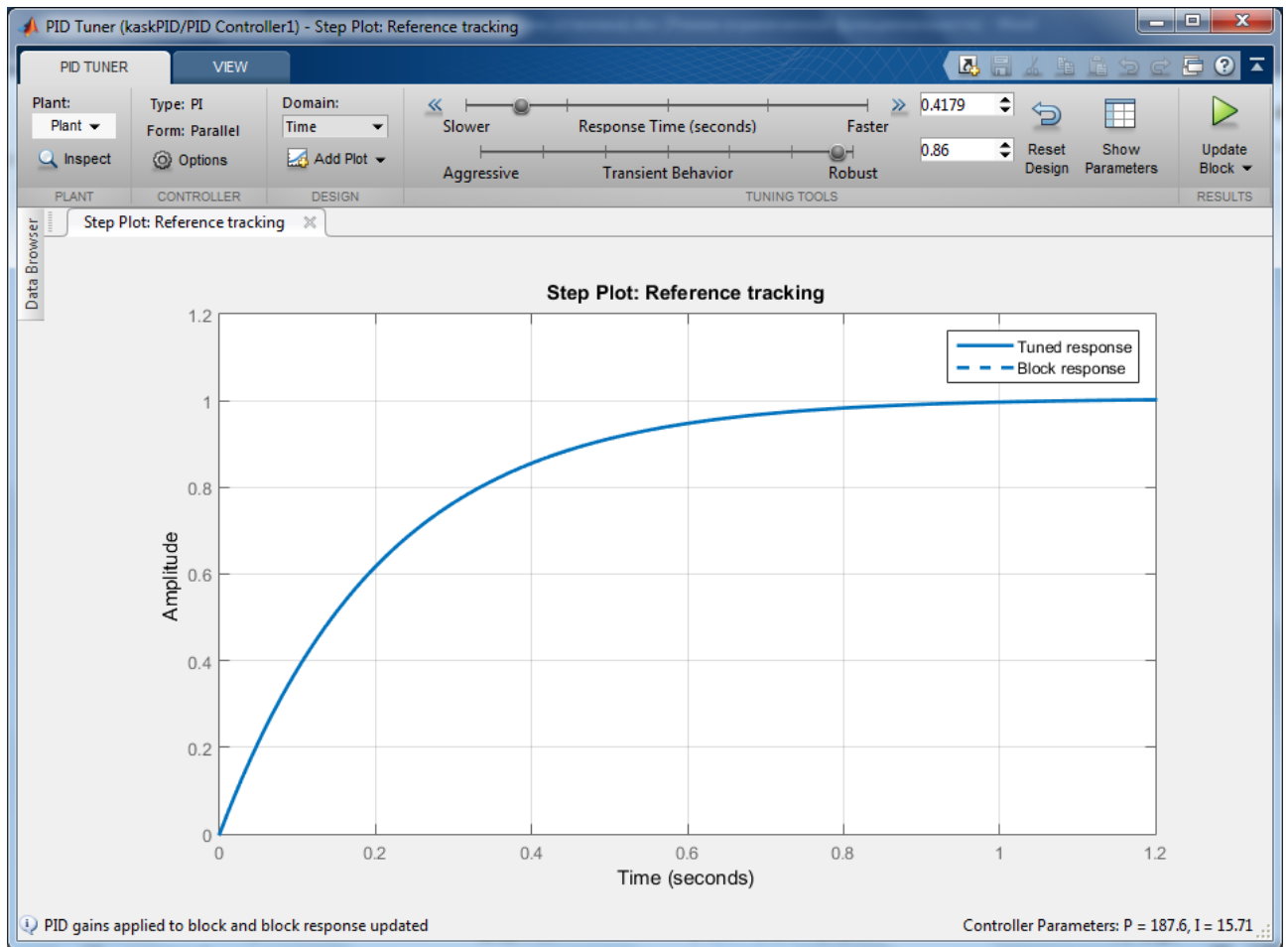
Додаток Б1



Додаток Б2



Додаток Б3

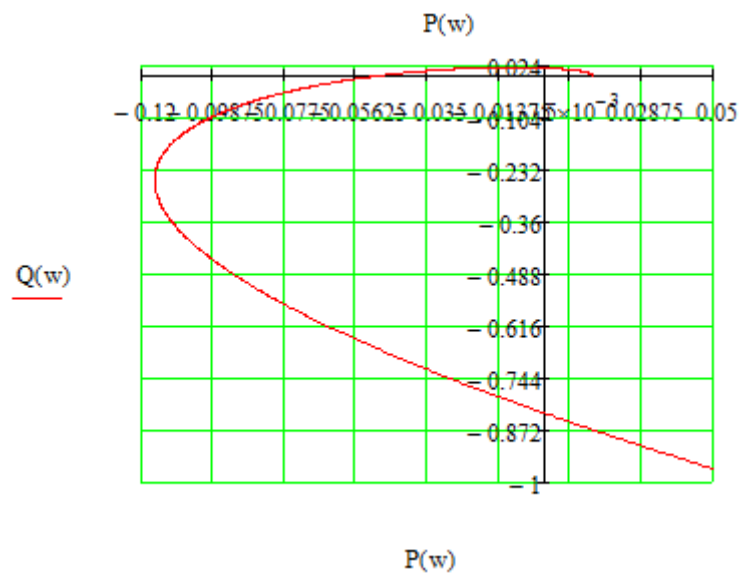
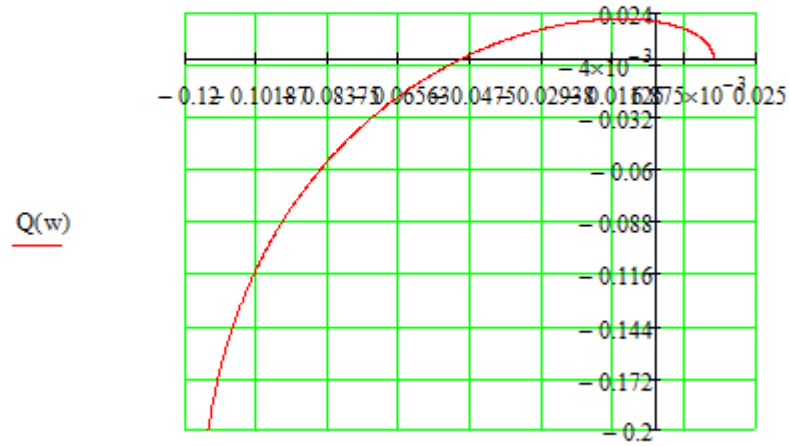


Додаток В1

$$P(w) := 5689.874w^4 - 54.447 \cdot w^2 + 0.01421$$

$$Q(w) := -1084.077 \cdot w^3 + 1.475 \cdot w$$

$$w := 0, 0.0001 \dots 30$$



Додаток В2

$$P(w) := -222963.4 \cdot w^6 + 260249.9 \cdot w^4 - 1404.42 \cdot w^2 + 0.4013905$$

$$Q(w) := 1115590.9w^5 - 25994.06 \cdot w^3 + 39.03 \cdot w$$

$$w := 0, 0.0001.. 30$$

