

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПМ-23.00.00.000 ПЗ

Група АКПМ-24-1

Назарій Маслій

2025

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

Маслій Назарій Степанович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.514:622.25
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення адаптивної системи керування технологічним процесом

(назва роботи)

електродегідрування нафти

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм-22-1

(шифр групи)

Н.С. Маслій

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент, к.т.н.

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

М.І. Когутяк

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)

Л.І. Фешанич

(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)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень 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**

Маслію Назарію Степановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення адаптивної системи керування технологічним процесом електродегідрування нафти.

керівник роботи Когутяк М.І., к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «10» листопада 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 10.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики, аналіз літературних джерел.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Вивчення параметрів об'єкта керування з метою побудови адаптивного регулятора на прикладі процесу електродегідрування нафти.

2. Дослідження сучасних концепцій адаптивного керування технологічними системами. 3. Розроблення та синтез адаптивного нейрорегулятора на основі нечіткої бази знань. Загальні висновки. Список використаних джерел

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 22.10.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вивчення параметрів об'єкта керування з метою побудови адаптивного регулятора на прикладі процесу електродегідрування нафти.	22.10.2025 – 30.10.2025	
2.	Дослідження сучасних концепцій адаптивного керування технологічними системами	02.11.2025 – 20.11.2025	
3.	Розроблення та синтез адаптивного нейрорегулятора на основі нечіткої бази знань	21.11.2025 – 27.11.2025	
4.	Загальні висновки та список використаних джерел.	28.11.2025 – 30.11.2025	
5.	Оформлення магістерської роботи.	05.12.2025	

Студент _____
(підпис)

Маслій Н. С. _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Когутяк М. І. _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Маслій Н. С. Розроблення адаптивної системи керування технологічним процесом електродегідрування нафти.

Магістерська робота на отримання ступеня магістра з автоматизації за спеціальністю 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано- Франківськ, 2025 р.

Дослідження спрямоване на розроблення та удосконалення системи автоматизації процесу електродегідрування (зневоднення та знесолення) нафти з використанням сучасних інтелектуальних методів керування.

У рамках роботи сформовано нечіткий ПД-регулятор, функціонування якого ґрунтується на системі продукційних правил, що дає змогу підвищити якість процесів регулювання. Створення, налаштування та тестування регулятора здійснювалися в програмному середовищі MATLAB.

Результатом проведених досліджень є побудована модель нечіткого ПД-регулятора, яка демонструє поліпшені показники точності та стабільності керування за рахунок здатності враховувати значну варіативність робочих режимів та коригувати вихідні параметри відповідно до заданих вимог.

Розроблений нечіткий регулятор інтегровано до системи автоматичного керування як навчальний еталон для нейронної мережі, що сприяє формуванню адаптивної стратегії регулювання та покращенню динамічних характеристик технологічного процесу.

Ключові слова: адаптивна система керування, електродегідратор, знесолення нафти, зневоднення нафти, автоматизація технологічних процесів, математичне моделювання, оптимальне регулювання.

ANNOTATION

Masliy N. S. Development of an adaptive control system for the technological process of oil electrodehydrogenation.

Master's thesis for a master's degree in automation in specialty 174 - Automation, computer-integrated technologies and robotics. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. - Ivano-Frankivsk, 2025

The work is devoted to the development and improvement of an automation system for the process of oil electrodehydrogenation (dehydration and desalination) by implementing the latest developments.

A fuzzy PD-regulator was created that operates on the basis of a rule base and provides optimal control quality indicators. The work was performed in the Matlab software environment.

As a result of the study, a model of a fuzzy PD-regulator was obtained, which increased the efficiency and accuracy of control due to the fact that all possible situations in which it is necessary to bring the parameter to a given value were foreseen.

The fuzzy controller was included in the control system as a teacher for the neural network.

Keywords: adaptive control system, electrodehydrator, oil desalination, oil dehydration, automation of technological processes, mathematical modeling, optimal control.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ВИВЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ З МЕТОЮ ПОБУДОВИ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА НА ПРИКЛАДІ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОДЕГІДРУВАННЯ НАФТИ.....	11
1.1. Особливості об'єкта керування в електродегідруванні	11
1.2. Порівняння ПД та адаптивного регуляторів	16
1.2.1. Особливості ПД-регулятора у процесі електродегідрування.....	17
1.2.2. Функціональні можливості адаптивного регулятора.....	18
Висновки до розділу 1.....	19
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ КОНЦЕПЦІЙ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СИСТЕМАМИ..	20
2.1. Загальна структура адаптивного нейронного регулятора.....	21
2.2. Проведення експерименту на технологічному об'єкті електродегідрування	23
2.3 Переваги нейро-адаптивних та нечітко-адаптивних регуляторів.....	28
Висновки до розділу 2	30
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТА СИНТЕЗ АДАПТИВНОГО НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ БАЗИ ЗНАНЬ.....	31
3.1 Синтез нечіткого регулятора (вчителя).....	33
3.2 Самоналагоджування параметрів адаптивних регуляторів з еталонною моделлю.....	40
3.3 Впровадження в систему керування нейрорегулятора нечіткого регулятора (вчителя)	44
Висновок до розділу 3.....	51
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	53

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

АС – адаптивна система.

АСКТП – автоматизована система керування технологічним процесом.

АНР – адаптивний нейрорегулятор.

ГБШ – генератор білого шуму.

ЕлЗУ – електрознесолююча установка.

КЕ – керувальний елемент.

КП – керувальний пристрій.

ЛС – ланцюг самоналагоджування.

М – модель.

ОК – об'єкт керування.

ПА – пристрій адаптації.

САК – система автоматичного керування.

СД – синхронний детектор.

СНС – самоналагоджувальна система.

ПІД - пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор.

ПД - пропорційно- диференційний регулятор.

ПК - персональний комп'ютер.

ВСТУП

Актуальність роботи. Проектування систем автоматичного керування для об'єктів із невизначеними або змінними параметрами традиційно належить до ключових завдань теорії керування. За таких умов постає потреба у застосуванні регуляторів, здатних автоматично коригувати власні параметри таким чином, щоб забезпечити стабільність, необхідну точність та сталі показники якості функціонування системи. Системи, у яких регулятори здійснюють подібну перебудову в реальному часі, класифікують як адаптивні. У межах теорії адаптивного керування досліджуються різноманітні структури таких систем та основні підходи до їх проектування [1, 2].

Обґрунтування вибору теми дослідження. Нафтопереробна галузь сьогодні висуває жорсткі вимоги до якості підготовки сировини, раціонального використання енергоресурсів та забезпечення екологічної безпечності виробництва. Одним із визначальних етапів первинної підготовки нафти є процес електродегідрування, який передбачає усунення води та мінеральних домішок під дією електричного поля. Результативність цього процесу істотно впливає на надійність і стабільність подальших технологічних операцій, зменшення корозійних ушкоджень обладнання та трубопроводів, а також на кінцеві показники якості продукції.

Процес електродегідрування нафти належить до складних технологічних операцій, оскільки його поведінка формується під впливом великої кількості змінних та має виражений нелінійний і випадковий характер. На хід процесу суттєво впливають зміни фізико-хімічних властивостей нафти, температурний режим, концентрація води та стабілізаторів емульсій, а також зовнішні збурення. За таких умов системи автоматичного керування з регуляторами фіксованої структури часто не здатні підтримувати оптимальні параметри роботи. Це спричиняє додаткові витрати енергії, зниження стійкості технологічного процесу та погіршення ефективності зневоднення.

Тому постає завдання розроблення адаптивної системи керування, яка б могла автоматично змінювати власні налаштування відповідно до поточного стану об'єкта. Використання адаптивних методів регулювання дає можливість забезпечити більш точне дотримання технологічних режимів, знизити енергоспоживання та підвищити надійність функціонування електродегідратора.

Подальший розвиток автоматизації пов'язаний не лише з модернізацією обладнання та вдосконаленням апаратури, але й із впровадженням новітніх інформаційних технологій. Інтелектуальні методи, зокрема нейромережеві моделі, відкривають можливості для ефективного керування процесами в умовах невизначеності та змінних параметрів, що робить їх перспективним інструментом для оптимізації роботи складних технологічних систем, таких як установки електродегідрування нафти.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процесу обезсилення та обезводнення підготовленої нафти. Досягнення поставленої мети здійснюється розв'язанням таких основних задач:

- проаналізувати існуючі підходи до використання установок ЕлЗу;
- провести експеримент на об'єкті;
- розробити нечіткий ПД-регулятор;
- інтегрувати нечіткий ПД-регулятор в нейромережу;

Об'єктом дослідження є технологічний процес обезсилення та обезводнення нафти, що проходить в електродегідраторі в умовах постійної зміни параметрів.

Предметом дослідження є нечіткий нейрорегулятор.

Методи дослідження. Методи теорії автоматичного керування – для розробки системи керування та алгоритму її функціонування; методи спектрально-кореляційного аналізу і обробки експериментальних даних – для аналізу закономірностей досліджуваних процесів і їх статистичних характеристик; методи ідентифікації систем – для моделювання об'єкта

керування на основі вхідних і вихідних даних про досліджуваний об'єкт; теорія нечіткої логіки – для подальшого розвитку розробленої системи.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі аналізу статистичних характеристик процесу автоматичного регулювання продуктивності насосів, визначено математичні моделі автокореляційних функцій та доведено, що контрольований процес є стаціонарним, ергодичним і має нормальний закон розподілу, що дає змогу обгрунтовано вибрати схему автоматизації, проаналізувати якість регулювання, розрахувати параметри налаштування регулятора з типовим алгоритмом на основі використання математичного апарату стаціонарних ергодичних випадкових процесів.

На основі запропонованих моделей і методів удосконалено структуру системи автоматичного регулювання продуктивності бурових насосів, яка підвищує надійність і ефективність процесу промивання свердловин і може бути реалізована на основі сучасних технічних засобів автоматизації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Вибраний напрямок досліджень є складовою частиною тематичного плану Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ). Магістерська робота виконувалась автором відповідно до основного наукового напрямку діяльності кафедри автоматизації комп'ютерно-інтегрованих технологій ІФНТУНГ.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені в магістерській роботі моделі і системи керування дають змогу вирішувати задачу автоматичного регулювання параметрів на технологічних об'єктах. Одержаний результат є основою для розробки технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності автоматизованого керування складними технологічними процесами.

Структура магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, трьох розділів та переліку використаних джерел. Повний обсяг роботи – 54 стор., що містить 20 рисунків, 2 таблиці. Перелік використаних джерел складає 10 найменувань.

РОЗДІЛ 1

ВИВЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ З МЕТОЮ ПОБУДОВИ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА НА ПРИКЛАДІ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОДЕГІДРУВАННЯ НАФТИ

1.1. Особливості об'єкта керування в електродегідруванні

Електродегідрування нафти – це технологічний процес зневоднення та знесолення нафти за допомогою електричного поля високої напруги. Об'єкт відноситься до галузі технології підготовки нафти на нафтопромислах і нафтопереробних підприємствах, зокрема до техніки поділу емульгованих вуглеводневих середовищ, а саме - до установок для зневоднення та знесолення на нафтопромислах і нафтопереробних підприємствах.

Процес електродегідрування характеризується низкою параметрів, які змінюються у часі та залежать від якості вхідної сировини. Основні фактори, що впливають на динамічні властивості об'єкта:

- початкова вологість емульсії;
- вміст солей та механічних домішок, які змінюють електропровідність;
- в'язкість та температура нафти, що формують швидкість руху дисперсної фази;
- напруга електричного поля в камері;
- гідродинамічний режим та інтенсивність перемішування;
- ступінь коалесценції і темп розділення фаз.

Зміна будь-якого з цих факторів веде до варіації передатної функції об'єкта, часу реакції, нелінійностей та наявності запізнювання.

Установка забезпечена фільтруючими пристроями, встановленими після вузла змішування нагрітої нафти з нагрітими промивальними водами і виконаними у вигляді ємностей, оснащених вологовідділюючими пакетами, перекривають робочий переріз апаратів і складеними з композитних та полімерних матеріалів з фіксованою пористо-комірчастою структурою.

Технічний результат полягає в підвищенні ефективності і інтенсифікації, а також спрощення та здешевлення процесу зневоднення та знесолення нафти [1, 2, 3].

Для ефективного зневоднення та знесолення водонафтових емульсій, а також для одержання пластової води, придатної до повторного закачування у пласт, використовують спеціалізовані апарати — електродегідратори. Ці установки забезпечують комплексну підготовку нафти, поєднуючи процеси видалення води та мінеральних домішок.

Особливістю електродегідраторів із двома роздільними вводами є їхня технологічна гнучкість. Конструкція апарата дозволяє в разі потреби працювати лише з нижнім підведенням нафти, що є ефективним для легких та маловодних нафт, або тільки з верхнім вводом, який застосовується при підвищеній обводненості сировини середньої щільності. Високов'язкі нафти зазвичай обробляють із використанням обох входів одночасно, що забезпечує більш рівномірний розподіл емульсії та підвищує ефективність електродегідрування [1].

Весь процес як на нафтопромислах,¹ так і на нафтопереробних заводах (НПЗ) зводиться до деемульсації водонафтової емульсії і відділенню пластової води на першій ступені виробництва і солевмісних промивних вод на наступних, в результаті чого залишкова концентрація солей у товарній нафті на нафтопромислах досягає стандартизованого рівня не вище 40-50 мг/л, а в нафті на НПЗ, що подається на установки подальшої переробки не вище 5 мг/л.

Основною, практично повсюдно поширеною на сьогоднішній день в технологічній практиці нафтовидобувних і нафтопереробних підприємств, є комбінована установка, що поєднує теплохімічний відстій з електрохімічним зневодненням і обезсолюванням. Теплохімічний відстій може виконуватися в декілька ступенів, кількість яких залежить від глибини зневоднення та знесолення на кожній, обумовлений властивостями нафти і характером водонафтової емульсії, об'ємом оброблюваної сировини, ефективністю обраного деемульгатора, умовами та рівнем організації контакту промивних вод з водо-

нафтової емульсією, конструкційними особливостями. У виробничій технологічній практиці загальна назва комбінованої установки по зневодненню і знесоленню нафти визначено останньою стадією обробки - електрохімічної, і установка носить назву ЕлЗУ – електрознесолююча установка.

Встановлення зневоднення та знесолення при різних обсягах підготовки нафти на промислах і на НПЗ аналогічні, а основна відмінність полягає у кількості одиниць та обсягів технологічного і ємнісного обладнання.

Принципова діюча технологічна схема зневоднення та знесолення нафти, як на нафтопромислах, так і на НПЗ, включає в собі обладнання для проведення теплохімічного відстою, як правило, під тиском, і наступного електрохімічного процесу деемульсації та в загальному вигляді зображена на кресленні.

В основі першої ступені (термохімічної), лежить спосіб руйнування нафтової емульсії із застосуванням спільної дії деемульгаторів і температури.

В другій ступені руйнування емульсії і відділення води здійснюється в електродегідраторах (рис. 1.1) [1].

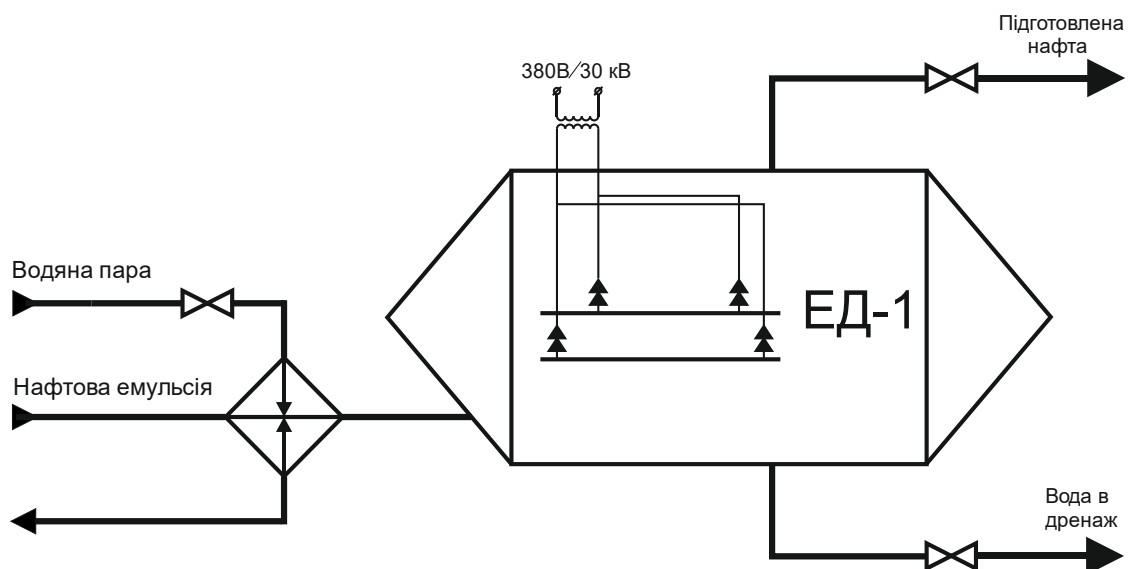


Рис. 1.1. Принципова технологічна схема роботи електродегідратора

Нафта з температурою 60-90°C з термодегідраторів під тиском 0,2-0,6 МПа поступає в змішувач, де змішується з водою, температура якої 50-60°C. Після змішувача з температурою близько 80°C нафта змішується з водою та підігрівається в теплообміннику водяною парою до температури 140°C

направляється в електродегідратори ЕД-1, ЕД-2, які можуть працювати як паралельно так і послідовно, в даному дипломі буде розглядатися робота одного з електродегідраторів. В електродегідраторах під впливом змінного електричного поля високої напруги 25-30 кВ, частинки води заряджаються різнойменно. При достатньо високому потенціалі заряду настає пробій оболонки діелектрика, в результаті малі частинки води з'єднуються в більш великі каплі і під дією сил тяжіння осідають вниз. Відстояна вода з розчиненими в ній солями виводиться із нижньої частини електродегідраторів.

В електродегідраторах ЕД-1, ЕД-2 за допомогою системи регулювання підтримується рівень на рівні 50% шкали, регулюючий клапан якої встановлений на трубопроводі дренажу із апарату. За допомогою системи регулювання в електродегідраторах підтримується постійний тиск в межах 0,2-0,6 МПа, регулюючий клапан, якого встановлений на лінії виходу нафти з електродегідраторів в місткість підготовленої нафти. При збільшенні тиску в електродегідраторах ЕД-1, ЕД-2 передбачений аварійний скид тиску запобіжними клапанами, які налагоджені на тиск 1,6 МПа.

Для якісного проходження технологічного процесу, а також для ефективної роботи системи автоматизації необхідно визначити вхідні, вихідні і збурюючі величини (рис. 1.2) [1].

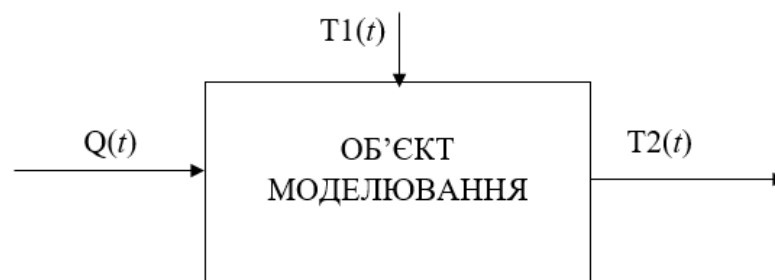


Рис. 1.2. Модель «вхід-вихід» об'єкта керування

Вихідна величина – витрата $T_2(t)$ (керована величина) системи залежить від керуючого впливу $Q(t)$ – кількості водяної пари і збурюючого впливу $T_1(t)$. Необхідний закон зміни величини $T_1(t)$ визначається задаючим впливом U_z . Внаслідок впливу збурення, в системі виникає сигнал різниці U_p .

Запишемо алгоритм функціонування ОК:

$$Q(t) = A_0[Q(t), T1(t)], \quad (1.1)$$

де A_0 - деякий оператор, що зв'язує вхідні і вихідні величини.

Алгоритм функціонування є впорядкованою сукупністю правил і процедур, які забезпечують коректне та послідовне виконання технологічного процесу окремим пристроєм або комплексом технічних засобів. У межах такого алгоритму операції керування можуть виконуватися частково або повністю автоматизованими технічними засобами, що гарантує узгодженість дій та стабільність роботи всієї системи.

Основна мета автоматичного керування таким технологічним об'єктом полягає у забезпеченні безперервного та стабільного підтримання заданої функціональної залежності між керованими параметрами, що описують поточний стан об'єкта, та формованими керуючими діями. Іншими словами, система повинна гарантувати узгоджену взаємодію між входами й виходами об'єкта в умовах постійної зміни зовнішніх та внутрішніх факторів. Це передбачає здатність системи оперативно реагувати на збурення будь-якої природи, компенсувати їх вплив і зберігати необхідну точність та якість регулювання навіть у складних, динамічних режимах роботи.

На установці підготовки нафти були здійснені промислові дослідження з визначення продуктивності електродегідраторів в блоці з промисловою системою нафто-газо збору, краплеутворювачем та іншими пристроями і досягнення при цьому ступеня знесолення нафти за даними «ходових аналізів».

Оброблена реагентом емульсія надходила в резервуар попереднього скидання води, а потім у буферний резервуар, з якого спрямовувалася на прийом сировинного насоса і далі прокачувалася через піч нагріву, краплеутворювач і два послідовно працюючих електродегідратори.

У період попередніх випробувань було встановлено наступні парметри: використання промислових систем збору в технологічних цілях призводить до глибокого руйнування емульсії і її зневоднення до 0,5-1,5% на об'єкті

попереднього скидання (технологічні резервуари) при температурі 20° С, проте, навіть при такій обробці сировини і прийнятій технології процесу, застосування електричного поля в два щаблі не забезпечувало отримання знесоленої нафти до 30 мг / л «сходу», у зв'язку з чим було потрібно додаткове введення деемульгатора на прийом сировинного насоса і зміна інших технологічних параметрів. Підвищення напруги на електродегідратор другого ступеня з 20 до 25 кв також не зробило помітного впливу на ступінь знесолення. При цих параметрах і більш високою, ніж раніше, продуктивності середній вміст солей в нафті після електродегідраторів склало 21 мг / л.

Таким чином, з аналізу результатів випробувань різних варіантів знесолення нафти з використанням електродегідраторів впливає наступне:

- ступінь знемолення нафти до 30 мг / л була отримана при підготовці нафти по поєднаній технологічній схемі з одночасним використанням наступних технологічних засобів; промисловий системи нафтогазо збору, змішувальної засувки, масообмінних секції краплеутворювача довжиною 60 м;
- отримання стабільних показників якості знесоленої нафти забезпечується, в основному, глибоким руйнуванням емульсії в трубопроводах промисловий системи краплеутворювача і технологічних апаратах до її обробки електричним полем;
- при зниженні ступеня зруйнованості емульсії в промислових трубопроводах (витрата реагенту 9-12 г / т) продуктивність системи знижується на 26% .

Зниження вмісту солей в нафті з 170 до 70 мг / л мало що змінило в якості знесоленої нафти після її обробки в електродегідраторах.

Використання в технологічних цілях промисловий системи збору і руйнування емульсії до надходження в електродегідратор гідродинамічними засобами істотно виправляють властиві їм дефекти і дозволяють збільшити продуктивність.

1.2. Порівняння ПД та адаптивного регуляторів

У системах автоматизації процесу електродегідрування нафти ключовою задачею є забезпечення стабільного рівня дегідрування за умов значної зміни властивостей водонафтової емульсії та режимних характеристик установки. Найпоширенішим типом регулятора у промисловості є ПД-регулятор, однак його ефективність істотно знижується при зміні параметрів об'єкта. У таких випадках доцільно використовувати адаптивні регулятори, здатні налаштуватися у реальному часі.

Установка ЕлЗУ є складним технологічним об'єктом з безліччю параметрів регулювання та контролю, центральною частиною установки являється два електродегідратори підтримка параметрів яких буде впливати на якість вихідного продукту обезсоленої та обезводненої нафти.

Особливо важливий параметр який необхідно контролювати є вміст води в вихідній продукції оскільки наступним етапом переробки нафти є перегонка нафти в АВТ першою ступінню якої є атмосферна колона в котру поступає нафта на нагрів. При збільшеному вмісті води в вхідній сировині в верхній частині атмосферної колони утворюється пара високого тиску, що може призвести до раптового збільшення тиску в колоні наслідком чого стане руйнування колони, тобто аварія. Отож, першим завданням є точне дотримання регламентного вмісту води в нафті після ЕлЗу.

Наступний параметр є вміст сірки в вихідній сировині цей параметр впливає на всю установку в цілому оскільки в випадку попадання на АВТ великого вмісту сірки почнеться посилена корозія всіх вузлів та компонентів установки а одже і збільшення амонтизайційних відрахувань, що призводить до низьких економічних показників роботи технологічного об'єкту, а та кож до збільшення кількості аварійних ситуацій на ньому.

Тому для максимальної ефективності роботи об'єкту необхідне точне регулювання всіх параметрів роботи електродегідраторів котрі будуть впливати на якість вихідної продукції установки ЕлЗУ.

1.2.1. Особливості ПД-регулятора у процесі електродегідрування

ПД-регулятор здійснює корекцію керуючого сигналу на основі пропорційної, інтегральної та диференціальної складових. Його переваги: простота реалізації; зрозумілі алгоритми налаштування; висока швидкодія у лінійних об'єктах; можливість використання у більшості промислових контролерів.

Однак у процесі електродегідрування ПД-регулятор стикається з низкою труднощів: чутливість до зміни динаміки об'єкта, спричиненої коливаннями в'язкості, електропровідності та початкової вологості; ускладнене налаштування при наявності довгих запізнень; висока ймовірність перерегулювання, особливо при різкій зміні електричного навантаження; статичні та динамічні нелінійності, які ПД-регулятор компенсує лише частково; ризик потрапляння в аварійні режими (пробій електродів) через обмеженість лінійної моделі керування.

Таким чином, ПД-регулятор є прийнятним лише для стабільних умов, коли параметри емульсії практично не змінюються.

1.2.2. Функціональні можливості адаптивного регулятора

Адаптивний регулятор має розширені функціональні можливості, що дозволяють йому самостійно перебудовувати параметри залежно від поточного стану об'єкта. Основні його властивості:

- ідентифікація параметрів у реальному часі, що забезпечує актуальність моделі процесу;
- автоматичне переналаштування коефіцієнтів регулятора;
- здатність працювати у нелінійних та змінних умовах;
- висока адаптивність до змін електропровідності, температури та структури емульсії;

– можливість запобігання критичним режимам шляхом корекції напруги.

У процесі електродегідрування адаптивний регулятор вирішує важливу технологічну задачу – підтримує високу якість сепарації навіть при значних коливаннях властивостей нафти.

Отож, порівняння показує, що ПД-регулятор може працювати лише у вузькому діапазоні режимів, коли: температура стабільна; в'язкість та електропровідність не змінюються суттєво; немає різких змін складу емульсії. Надходження сировини від різних свердловин, зміна сезону, наявність солей і механічних домішок призводять до непередбачуваних змін параметрів.

У таких ситуаціях адаптивний регулятор має переваги, оскільки: швидко перебудовує коефіцієнти; стабілізує напруженість електричного поля; підтримує оптимальну температуру; зменшує час розділення фаз; забезпечує високу якість дегідрування незалежно від властивостей емульсії.

Висновок до розділу 1

У даному розділі магістерської роботи вивчено об'єкт та визначено його характеристики які впливають на процес електродегідрування. Також було досліджено, що для сучасних установок електродегідрування найбільш ефективною є адаптивна система керування, яка забезпечує необхідну гнучкість та надійність при роботі з неоднорідними нафтопродуктами.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ КОНЦЕПЦІЙ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СИСТЕМАМИ

2.1. Загальна структура адаптивного нейронного регулятора

Сучасні системи керування технологічними об'єктами нафтогазової промисловості висувають підвищені вимоги до точності регулювання та здатності системи адаптуватися до змін параметрів технологічного процесу. Багато установок характеризуються змінними параметрами, а також нелінійними статичними та динамічними характеристиками, через що традиційні ПД-регулятори не завжди забезпечують необхідний рівень точності. Одним із перспективних рішень є використання нейрорегуляторів, здатних до самонавчання та адаптації, що дозволяє ефективно компенсувати нелінійності об'єкта та підтримувати стабільність роботи системи на високому рівні. На рис. 2.1 наведені компоненти структури роботи АНР.

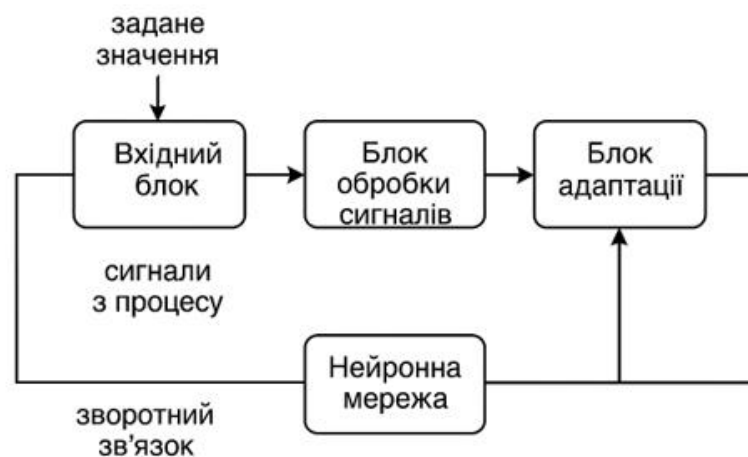


Рис. 2.1. Структура роботи адаптивного нейронного регулятора (АНР) [7]

Вхідний блок (сигнали з процесу) отримує поточні значення змінних технологічного процесу: контрольовані параметри (температура, тиск, рівень, концентрація тощо); приймає інформацію про задане значення (референс).

Блок обробки сигналів (попередня обробка) масштабує та нормалізує вхідні дані для нейронної мережі. Може включати фільтри шуму або диференціальні/інтегральні перетворення сигналу.

Нейронний регулятор (керуючий блок): ядро регулятора. Типова архітектура прямого проходження мережа (MLP) або рекурентна мережа для динамічних процесів.

Вхід: нормалізовані сигнали з процесу та задання. Вихід: керуючий сигнал для виконавчого механізму (актуатора).

Блок адаптації (навчання мережі) реалізує алгоритми самоналаштування ваг нейронів у режимі реального часу.

Блок керуючого сигналу (виконавчий) приймає сигнал від нейронної мережі і передає його на виконавчі механізми процесу (насоси, клапани, приводи тощо). Може включати обмеження на амплітуду або швидкість зміни сигналу для безпеки системи.

Блок зворотного зв'язку повертає значення керованого параметра у вхідний блок та забезпечує замкнений контур керування та оцінку ефективності регулятора.

За характером змін в керуючому пристрої адаптивні системи ділять на дві великі групи: самоналагоджувальні (змінюються тільки значення параметрів регулятора); самоорганізуються (змінюється структура самого регулятора).

За способом вивчення об'єкта системи діляться на пошукові та без пошукові. У першій групі особливо відомі екстремальні системи, метою яких є підтримання системи в точці екстремуму статичних характеристик об'єкта. В таких системах для визначення керуючих впливів, що забезпечують рух до екстремуму, до керуючого сигналу додається пошуковий сигнал.

Безпошукові адаптивні системи управління за способом отримання інформації для підстроювання параметрів регулятора діляться на системи з еталонною моделлю (ЕМ) системи з ідентифікатором, в літературі іноді називають, як системи з налаштованою моделлю (НМ).

При непрямому адаптивному управлінні спочатку робиться оцінка параметрів об'єкта, після чого на підставі отриманих оцінок визначаються необхідні значення параметрів регулятора і проводиться їх підстроювання. При прямому адаптивному управлінні завдяки обліку взаємозв'язки параметрів об'єкту і регулятора здійснюється безпосередня оцінка і підстроювання параметрів регулятора, чим виключається етап ідентифікації параметрів об'єкта.

За способом досягнення ефекту самонастроювання системи з моделлю діляться на системи з сигнальною (пасивною) системи з параметричної (активною) адаптацією.

У системах з сигнальною адаптацією ефект самонастроювання досягається без зміни параметрів керуючого пристрою за допомогою компенсуючих сигналів. Системи, що поєднують в собі обидва види адаптації називають комбінованими.

2.2. Проведення експерименту на технологічному об'єкті електродегідрування

Для оцінки ефективності розробленої адаптивної системи керування було проведено серію експериментів на діючому технологічному об'єкті електродегідрування нафти. Основним завданням випробувань було дослідження здатності системи підтримувати оптимальні параметри технологічного процесу в умовах змінних вхідних характеристик, різних режимів роботи та навантажень. Такий підхід дозволяє оцінити не лише стійкість регулювання, але й швидкість адаптації системи до несподіваних коливань параметрів об'єкта.

Для синтезу систем керування об'єктами з нелінійними та змінними параметрами, що за структурою представляють одномасові моделі, запропоновано застосування універсальних нейрорегуляторів першого та другого типів. Ці регулятори поєднують інтегральні та пропорційні

характеристики, що забезпечує гнучкість у налаштуванні системи та дозволяє ефективно компенсувати нелінійності процесу. Використання таких нейрорегуляторів підвищує точність підтримання заданих параметрів, зменшує коливання вихідних величин та сприяє стабільній роботі технологічного обладнання навіть за значних змін умов експлуатації.

Властивості об'єктів регулювання визначаються експериментально через аналіз їхніх статичних та динамічних характеристик, що дозволяє адаптувати параметри нейрорегулятора під конкретні умови експлуатації. Особливу увагу приділено дослідженню реакції об'єкта на збурення, спричинені змінами керованої величини, оскільки саме динамічна поведінка визначає ефективність регулювання та стабільність процесу. Використання нейрорегуляторів такого типу забезпечує високу точність підтримання оптимальних параметрів технологічного процесу навіть за умов змінних робочих параметрів та впливу зовнішніх факторів.

При проведенні експериментального визначення тимчасових характеристик об'єкта необхідно правильно встановити величину вхідного впливу. Оптимальною є така величина, яка максимально відповідає межах, допустимим для даного технологічного процесу. У разі, якщо збільшити вхідну дію до необхідного рівня технічно неможливо, допускається застосування меншого впливу, проте він повинен перевищувати рівень випадкових збурень, що можуть виникати під час зняття тимчасових характеристик. Такий підхід дозволяє отримати достовірні дані про динамічну поведінку об'єкта та забезпечити ефективне налаштування адаптивного регулятора.

Для більш точного налаштування нейрорегулятора використовують методи ідентифікації параметрів об'єкта, що дозволяють врахувати нелінійні ефекти та стохастичні коливання технологічного процесу.

Такий комплексний підхід до експериментального визначення характеристик об'єкта та налаштування нейрорегулятора забезпечує підвищення стабільності та надійності роботи системи керування, зменшення

коливань керованих величин, оптимізацію витрат енергії та підвищення якості кінцевого продукту.

На рис. 2.2 наведено спрощену схему оснащення приладами [2].

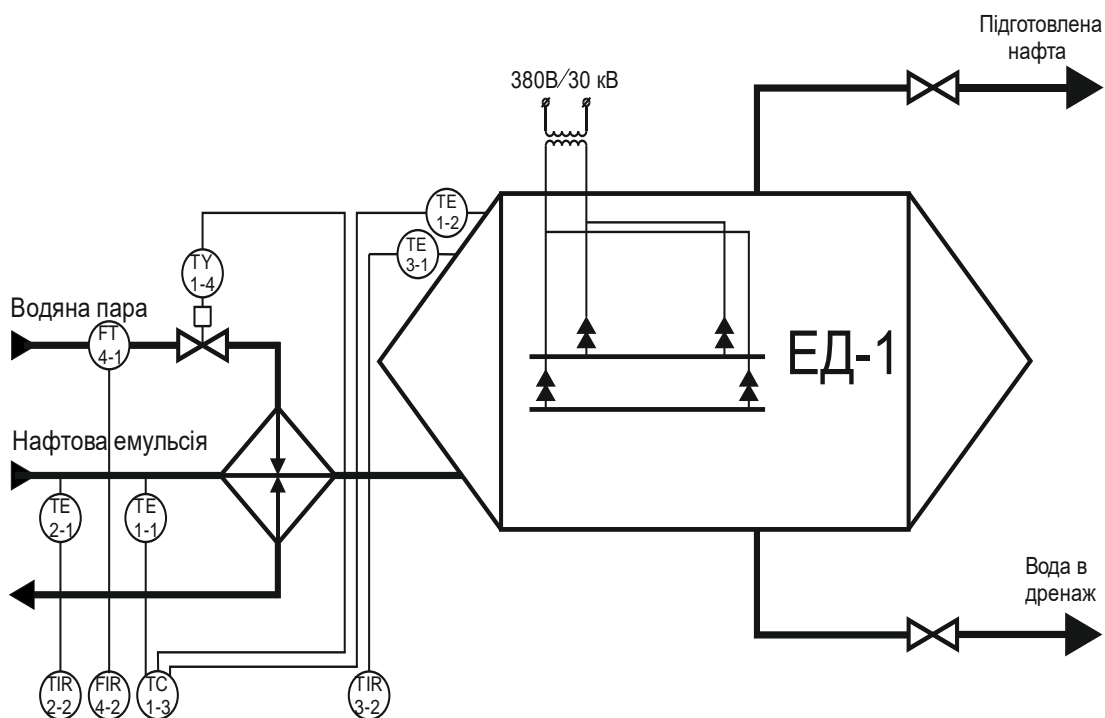


Рис. 2.2 Схема оснащення приладами

Тимчасові характеристики знімають наступним чином. Перед проведенням експерименту регулюючий об'єкт приводять в стан рівноваги і забезпечують умови, при яких вхідна і вихідна величини постійні. Після стабілізації об'єкта швидким переміщенням органу управління вносять збурення, відмічаючи при цьому час і величину його.

Далі слідкують за зміною вихідної величини, записуючи її значення до того часу, поки вихідна величина не прийме нового значення. При автоматичному записуванні перехідного процесу необхідно відмітити час вхідної дії (рис. 2.3).

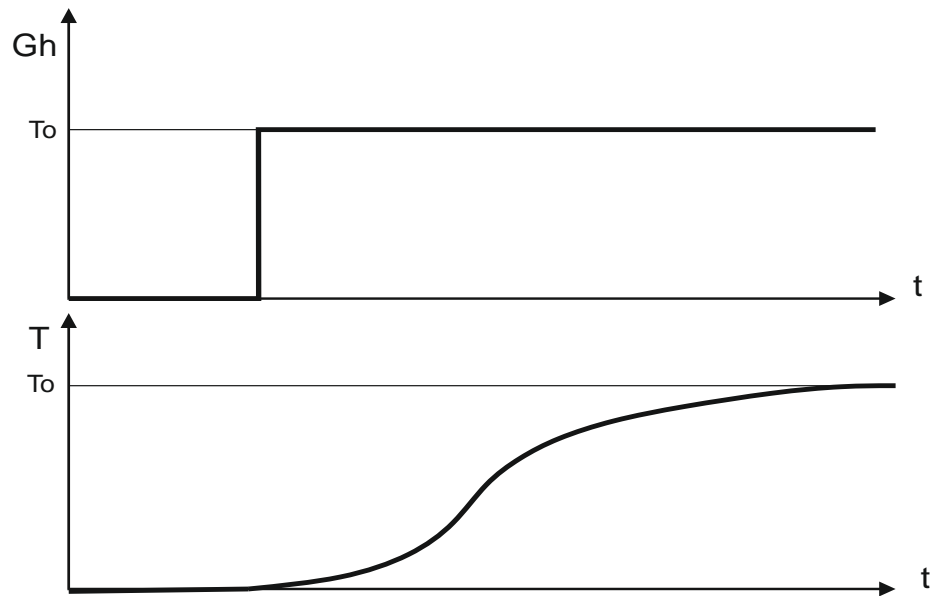


Рис. 2.3 Регулюючий вплив на температуру

Таблиця 2.1

Результати експерименту

t,с	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
T °C	81	81	81	81,5	82,5	87	93	104	109	115	122	124	131,5	135	136	137,5	138,5	140

Перед тим, як приступити до апроксимації перехідної функції слід перевести вхідні величини в безрозмірні. Робимо це за формулою:

$$x(t) = \frac{n(t) - n_{\min}}{n_{\max} - n_{\min}}; \quad (2.1)$$

де $n(t)$ беремо з табл. 2.1;

$n_{\min} = 80^\circ\text{C}$ – початкове (нульове) значення;

$n_{\max} = 140^\circ\text{C}$ – максимальне поточне значення;

$x(t)$ – поточне значення зміни температури в безрозмірній величині.

Обчислимо формулу (2.1) та отримані результати зводимо у табл.2.2. Отримуємо нові вхідні величини і нову перехідну функцію.

Значення вхідних і вихідних безрозмірних величин об'єкту

t,c	0	2	4	6	8	10	12	14	16
T °C	0	0	0	0,0083	0,041	0,1166	0,2166	0,3333	0,45
t,c	18	20	22	24	26	28	30	32	34
T °C	0,5833	0,6833	0,75	0,8416	0,9	0,95	0,9750	0,9916	1

Апроксимацію проводимо автоматично з допомогою програмного продукту Argox 1.0 . Провівши апроксимацію одержимо передавальну функцію об'єкта керування та визначимо похибку апроксимації по якій можна судити про адекватність системи. Похибка повинна не перевищувати значення 2.5% оскільки в іншому випадку система вважатиметься неадекватною (рис.2.4).

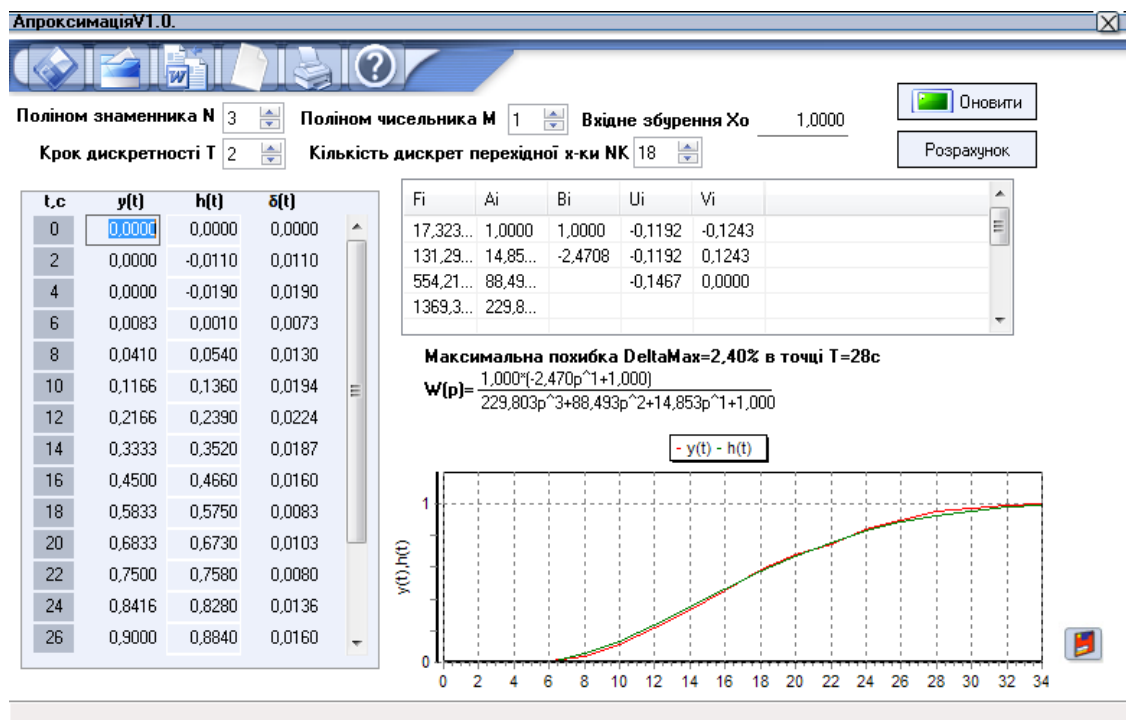


Рис. 2.4. Апроксимація функції [3]

Результати:

Поліном знаменника $N=3$, поліном чисельника $M=1$

Кількість дискрет $N_k=18$, крок дискретизації $T_s=2$

Вхідне збурення $X_0=1,0000$

Максимальна похибка $\Delta_{\max}=2,40\%$ в точці $T=28\text{хв}$

Після проведення апроксмації була отримана наступна передавальна функція об'єкту керування.

Передавальна функція:

$$W(\text{ок}) = \frac{(-2.470p + 1)}{229.804p^3 + 88.492p^2 + 11.864p + 1} \quad (2.2)$$

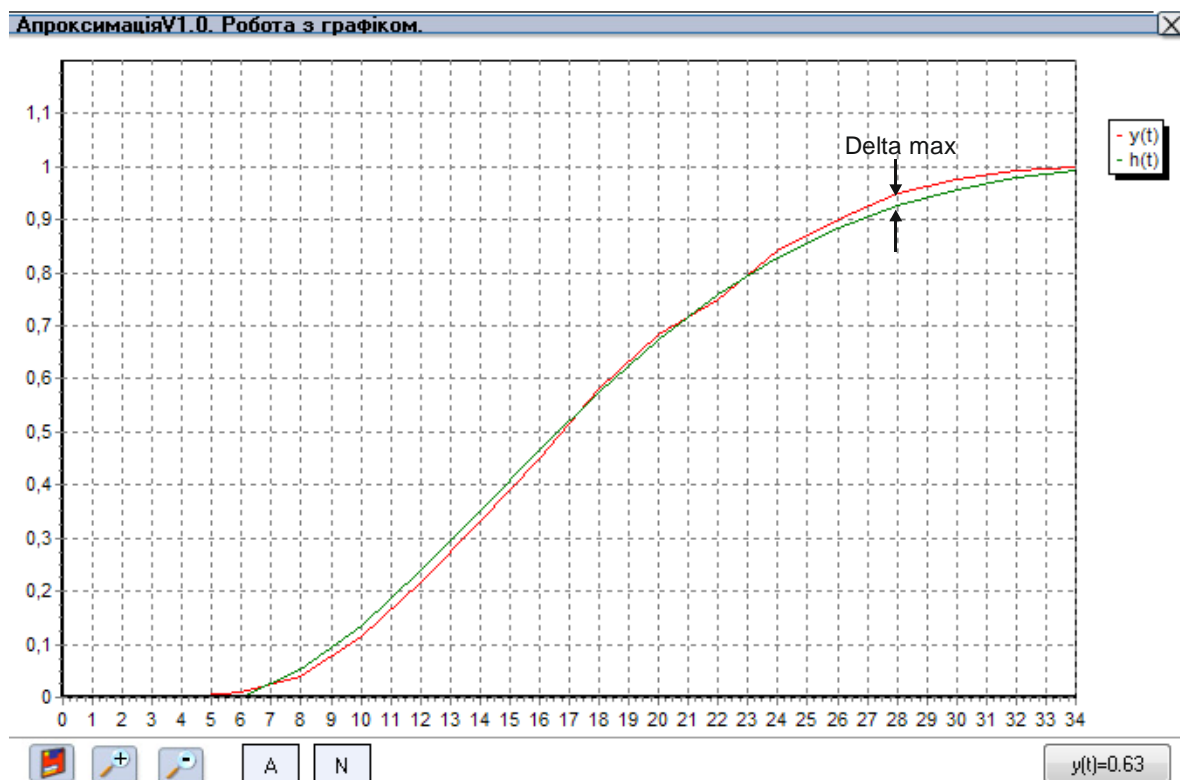


Рис. 2.5. Експериментальна і апроксимована крива розгону

Оскільки похибка апроксимації складає $2,40\%$ в точці $T=28\text{хв}$, то робимо висновок, що динамічна модель є адекватною.

При моделюванні об'єкта з змінними нелінійними параметрами було отримано сімейство навчальних характеристик для нейрорегулятора. В результаті навчання нейрорегулятора та тестування токового контуру з нейросамонастройкою був отриманий перехідний процес, що збігається з бажаним перехідним процесом еталонної моделі. По перехідним процесам, зображеним на рис.2.3 і рис. 2.4, можна зробити висновок, що система нейроуправлення з блоком прогнозуючої нейроідентифікації забезпечує

необхідні бажані статичні і динамічні характеристики об'єкту проте не повною мірою.

2.3. Переваги нейро-адаптивних та нечітко-адаптивних регуляторів

Нейро-адаптивні регулятори ґрунтуються на використанні штучних нейронних мереж, здатних навчатися та апроксимувати складні нелінійні залежності об'єкта керування. Сучасні технологічні процеси часто характеризуються високою нелінійністю, взаємозалежністю параметрів та змінністю зовнішніх умов. У таких умовах традиційні лінійні регулятори не завжди забезпечують необхідну точність і стабільність керування. Нейро-адаптивні та нечітко-адаптивні регулятори дозволяють подолати ці обмеження завдяки своїм унікальним властивостям.

Переваги нейро-адаптивних регуляторів:

- можливість навчання на основі даних об'єкта – нейронні мережі здатні апроксимувати складні нелінійні залежності без точного математичного моделювання об'єкта;
- адаптивність до змін параметрів процесу – регулятор самостійно підлаштовує свою поведінку у разі зміни динаміки об'єкта або зовнішніх впливів;
- прогнозування та оптимізація керування – завдяки здатності аналізувати історичні дані процесу, нейронні мережі можуть передбачати розвиток процесу та приймати оптимальні рішення заздалегідь.

Переваги нечітко-адаптивних регуляторів:

- обробка нечітких та неповних даних – нечітка логіка дозволяє враховувати експертні знання та нечіткі правила у керуванні;
- гнучкість налаштувань – зміна правил або функцій належності дозволяє швидко адаптувати регулятор до нових умов без повної перебудови системи;
- стійкість до шумів і нестабільності процесу – нечіткі регулятори більш толерантні до коливань вхідних сигналів та невизначеності моделі об'єкта.

У табл. 2.3 наведено порівняння переваг нейро-адаптивних та нечітко-адаптивних регуляторів, яка наочно демонструє їх сильні сторони.

Таблиця 2.3

Порівняння переваг нейро-адаптивних та нечітко-адаптивних регуляторів

Параметр	Нейро-адаптивні регулятори	Нечітко-адаптивний регулятор	Спільні переваги
Адаптивність	Автоматичне підлаштування під зміни параметрів процесу	Легка зміна правил та функцій належності	Висока адаптивність до складних та нелінійних процесів
Обробка даних	Може обробляти великі обсяги даних та прогнозувати розвиток процесу	Ефективна робота при неповних, нечітких або шумних даних	Забезпечення надійного керування у складних умовах
Модель об'єкта	Не потребує точного математичного моделювання, навчання на історичних даних	Використовує експертні знання та нечіткі правила	Поєднання навчання і експертного підходу
Прогнозування та оптимізація	Можливість прогнозування та оптимізації керування	Обмежене прогнозування, основна сила – експертні правила	Оптимізація процесу з урахуванням навчання та правил

Впровадження адаптивних регуляторів значно підвищує ефективність і надійність складних технологічних систем, автоматизує процеси, зменшує вплив людського фактора та забезпечує енергоефективність виробництва.

Висновок до розділу 2

У другому розділі магістерської роботи проведено експеримент на ОК, а також до схеми автоматичної системи електро-дегідрування нафти підбиралися прилади, які б забезпечували безперебійну роботу даного процесу. Також визначали перехідну функцію за допомогою програми Aproх 1.0 і отримали експериментальний і апроксимований графіки перехідного процесу. В результаті достовірилися в тому, що дана модель є адекватною, оскільки значення похибки становить менше 2,5%, а саме 2,4%. Досліджено переваги нейро-адаптивних та нечітко-адаптивних регуляторів.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ТА СИНТЕЗ АДАПТИВНОГО НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ БАЗИ ЗНАНЬ

Нейро-нечіткі регулятори (Neuro-Fuzzy Controllers, NFC) поєднують механізми нечіткої логіки та можливості навчання штучних нейронних мереж. Такий підхід дозволяє одночасно реалізувати інтерпретованість експертних правил і здатність до адаптації, що робить регулятор ефективним у системах зі змінними, нелінійними або слабо формалізованими характеристиками.

Ключовими складовими нейро-нечіткого регулятора є: нечітка база знань, що містить лінгвістичні правила типу "ЯКЩО – ТО"; модуль фазифікації, який переводить вхідні сигнали у нечіткі множини; модуль нейронного навчання, який оптимізує параметри функцій належності та вагові коефіцієнти; модуль дефазифікації, що перетворює нечіткий висновок у керуючу дію; адаптивний блок, який забезпечує корекцію параметрів у реальному часі. Поєднання цих механізмів створює гнучку, стійку й здатну до навчання систему керування, що враховує як експертний досвід, так і поточні дані з об'єкта.

Розглянемо ряд аспектів використання нечіткої логіки при керуванні ТО (технічними об'єктами). Побудова нечітких систем заснована на імітації дії людини-оператора або ЛПР за допомогою ПК. Дійсно, людині властиво оперувати не кількісними показниками, а якісними, але слід враховувати, що ці якісні поняття носять, по суті, нечіткий характер. При цьому використовуються лінгвістичні змінні, що описують вхідні ситуацію та управляючі на якісному рівні (наприклад, «Витрата пари» - «Трохи зменшити», «Температура» - «Середня», «Рівень нафти» - «Не змінювати»). Ці лінгвістичні змінні задаються на деякій кількісній шкалою, за допомогою якої визначаються ступенем відповідності даних розглядаються поняттям. Для цього використовуються функції приналежності, що приймають значення від 0 до 1. Можливі значення лінгвістичних змінних називаються термами

(наприклад, для лінгвістичної змінної - «Рівень пульпи» термами є «Знизити», «Підвищити», «Не змінювати»). Крім того, задається набір правил, що ставлять у відповідність вхідній ситуації певне керуючий вплив. Ці правила зазвичай мають вигляд «Якщо ..., то ...» і формуються за допомогою експерта або групи експертів. Таким чином, формується нечітка відповідність між простором передумов і простором висновків.

Після описаних процедур, виконуваних експертами, вступає в дію механізм нечіткого логічного висновку, в ході якого здійснюється композиція нечіткої множини. Композицію можна представити як аналог множення вектор-рядка на матрицю, тільки замість операції множення використовується розширене уявлення логічної операції І, а замість операції додавання - розширене АБО. У результаті визначається нечітке безліч керуючих впливів. Останнім етапом алгоритму нечіткого управління є дефазифікації (від англ. Слова «Fuzzy» - «нечіткий») - процес перекладу нечітких даних в конкретні фізичні керуючі величини.

Аналіз роботи нечітких САК дозволив виявити наступні основні фактори, що впливають на якість керування: кількість термів вхідних і вихідних змінних; вид функцій приналежності нечітких змінних, складових терм-множини лінгвістичних змінних; характер нечіткого відповідності між простором передумов і простором висновків; спосіб дефазифікації; вибір логічного базису.

Слід зауважити, що в багатьох публікаціях на підставі обмежених експериментальних даних робиться висновок про те, що нечіткі алгоритми забезпечують більш високу ефективність у порівнянні з класичними. Це далеко не завжди справедливо. У кожному конкретному випадку необхідно зіставляти необхідну якість управління з розташовуваними ресурсами. Поява теорії нечітких множин та алгоритмів управління на її основі обумовлено, в першу чергу, появою завдань, для вирішення яких традиційного математичного апарату просто не існує.

Тепер досить активно розвивається перспективний метод побудови автоматизованих систем управління (АСУ) на основі використання технологій штучного інтелекту (нейронні мережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми тощо). На відміну від «класичних» детермінованих АСУ, які засновані на використанні жорстких алгоритмів (або чіткої логіки), системи з використанням штучного інтелекту мають властивості навчання та самонавчання (тобто накопичення і узагальнення досвіду). Разом з тим, досвід показує, що на розробку і впровадження інтелектуальних систем управління витрачаються значно менші кошти за рахунок зменшення необхідності використання дорогого обладнання (датчики, комунікації).

Ефективність використання м'яких обчислень вельми висока. Про це можна судити з численних публікацій, присвячених цій темі. Однак ця ефективність помітно зростає, якщо поряд з м'якими обчисленнями застосовувати традиційні методи теорії автоматичного управління, випробувані протягом десятиліть і мають під собою досить жорстку математичну основу.

Даний об'єкт є посудиною в якій відбувається розділення водонафтової емульсії. В електродегідратор через теплообмінник поступає водонафтова емульсія температура якої може мінятися а відповідно і мінятиметься температура в електродегідраторі. З метою забезпечення стабільної температури на об'єкті до теплообмінника підводиться теплоносій (водяна пара) змінюючи кількість пари яка подається буде мінятися температура водонафтової емульсії. Тому на лінії подачі водяної пари встановлений регулюючий клапан для визначення необхідної степені відкриття чи закриття клапану для забезпечення найоптимальнішого регулювання температури.

3.1. Синтез нечіткого регулятора (вчителя)

У світовій практиці поширення набули різні види нечітких регуляторів. У останні роки інтенсивно ведуться роботи з реалізації нечітких ПД-, ПІ- і ПІД-

контролерів [5, 6]. Якість роботи більшості з них оцінюється за реакцією системи регулювання на зміну заданого значення регульованого параметра. Однак важливо звертати увагу на їх здатність якісно утримувати технологічні змінні на заданих значеннях в умовах постійно діючих збурень, тобто на вирішення задачі стабілізації. Крім того, реалізація нечіткого ПД-регулятора ускладнена тим, що він повинен мати тривимірну таблицю правил відповідно до трьох доданків в рівнянні регулятора, яку надзвичайно складно заповнити, користуючись експертним методом визначення параметрів. Остаточне або близьке до оптимального налаштування такого регулятора досі залишається важкою задачею [6].

Структура системи автоматичного керування (рис. 3.1) температурою повітря в приміщенні із нечітким регулятором має ряд характерних сигналів: похибка регулювання вихідної координати (e) об'єкта і швидкість її зміни — похідна (de/dt); керуючий вплив (u). У блоці фазифікації дві складові сигналу похибки після блоку автоналаштування перетворюються в нечіткі змінні. Ці змінні використовуються в блоці нечіткого логічного висновку (дефазифікаторі) для формування керуючого впливу u .

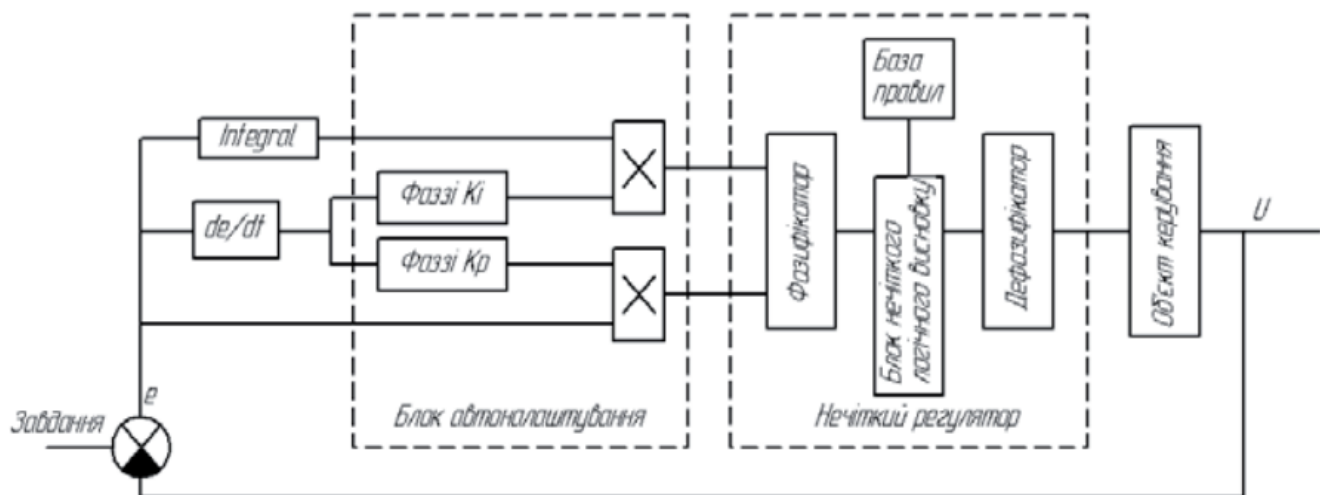


Рис. 3.1. Структурна схема регулятора на базі нечіткої логіки [6]

Основні функції при використанні нечіткої логіки в розробленому регуляторі – це формування коефіцієнтів налаштувань регулятора (k_p , k_i) залежно від поточного значення помилки регулювання і швидкості її зміни.

Процес автоналаштування нечіткого регулятора починається з пошуку початкових наближень коефіцієнтів k_p , k_i . Зазвичай подібна задача вирішується використанням методу Зіглера-Нікольса, виходячи з періоду та амплітуди коливань технологічної змінної в контрольованому експерименті на межі стійкості.

Проведемо опитування експертів для побудови функції приналежності термів «Дуже висока», «Висока», «Оптимальна», «Низька», «Дуже низька» використовуваних для лінгвістичної оцінки змінної температура. Результати опитування п'яти експертів зведені в табл.3.1. Верхні числа в рядку відповідають кількості голосів, відданих експертами за приналежність нечіткій множині відповідного елемента універсальної множини. Нижні числа в рядку відповідають ступеню приналежності, розраховані таким чином [6]:

$$S = \frac{N}{M}, \quad (3.1)$$

де S – ступінь приналежності;

N – кількість експертів;

M – кількість відданих голосів.

На рис. 3.2 враховано, що кожній вхідній і вихідній змінній відповідає три лінгвістичних терми: S — малий; M — середній; L — великий. Функції належності мають трикутну та Z-подібну форми. Такі форми функцій належності вхідних і вихідних змінних фаззи-регулятора

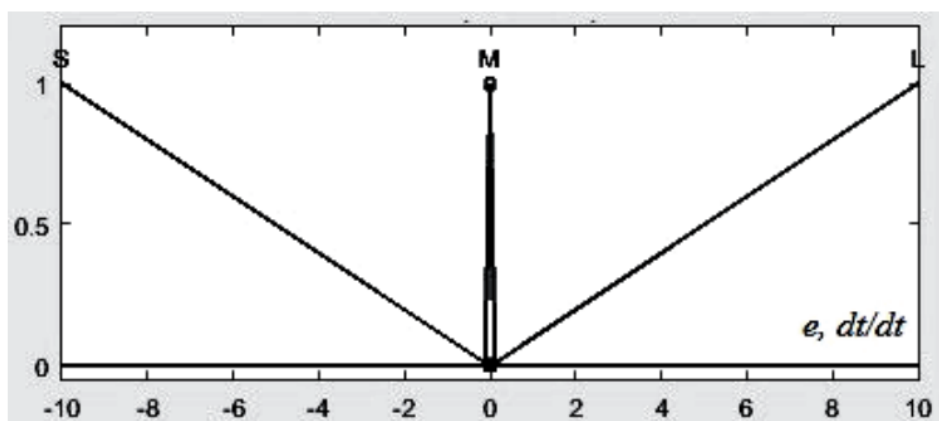


Рис. 3.4. Функцій належності вхідних і вихідних змінних фаззи-регулятора

Створюємо структуру програми для ПД-регулятора, і задаємо вхідні та вихідні величини регулятора [6] .

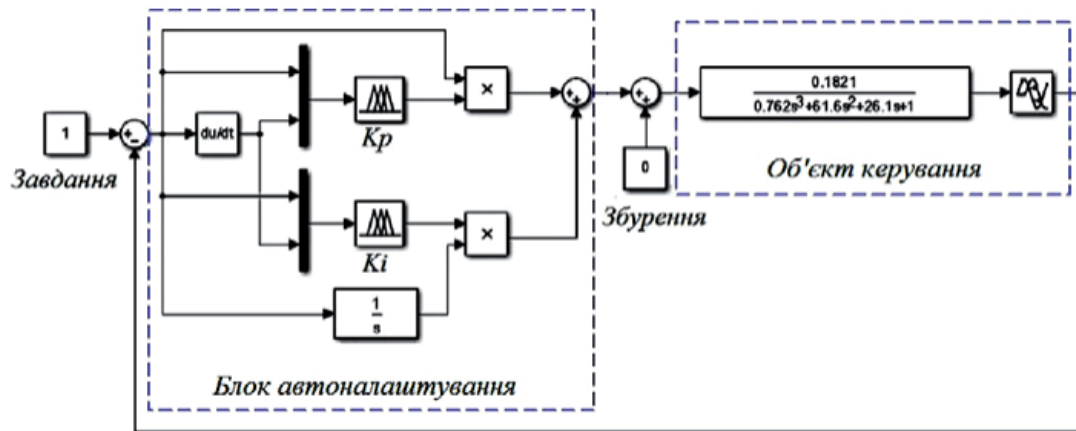


Рис. 3.2. Структура нечіткого ПД-регулятора регулятора: ерс – це позиційна складова , de – Диференційна складова

Задаємо функціональну належність вхідних величин (рис. 3.3)

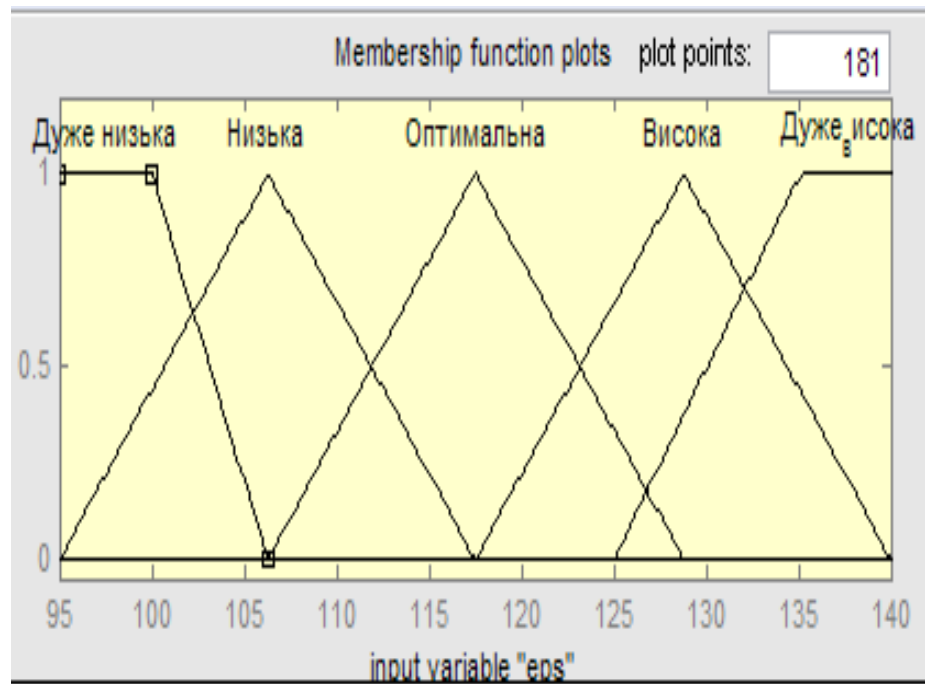


Рис. 3.3. Функціональна залежність для ерс

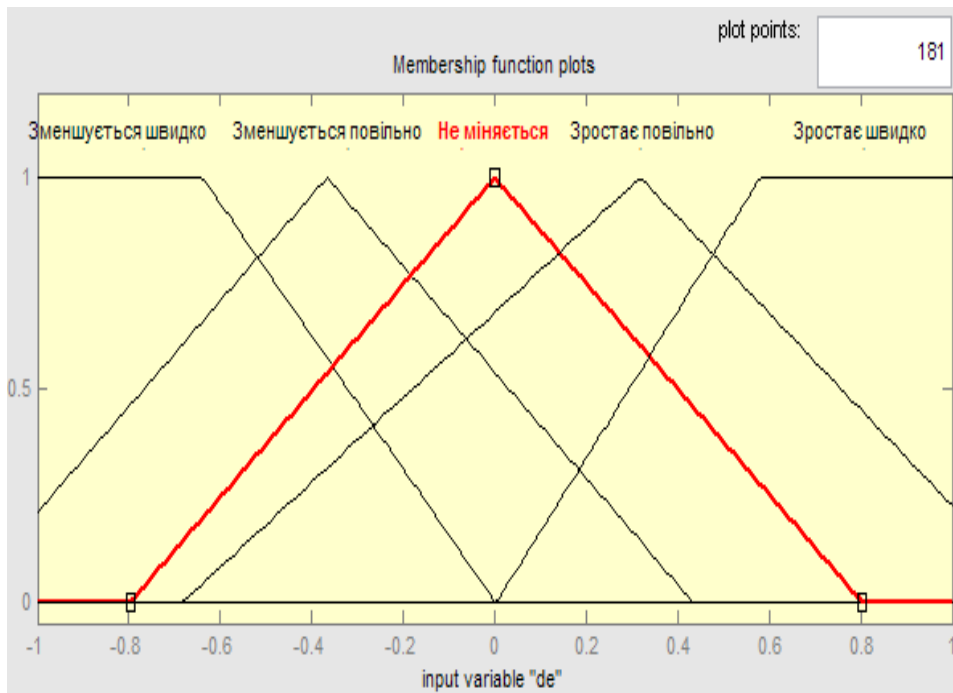


Рис.3.4 Функціональна належність для de

Оскільки регулюючим органом є клапан який характеризується ступенем відкриття задаємо вихідну величину у відсотках.

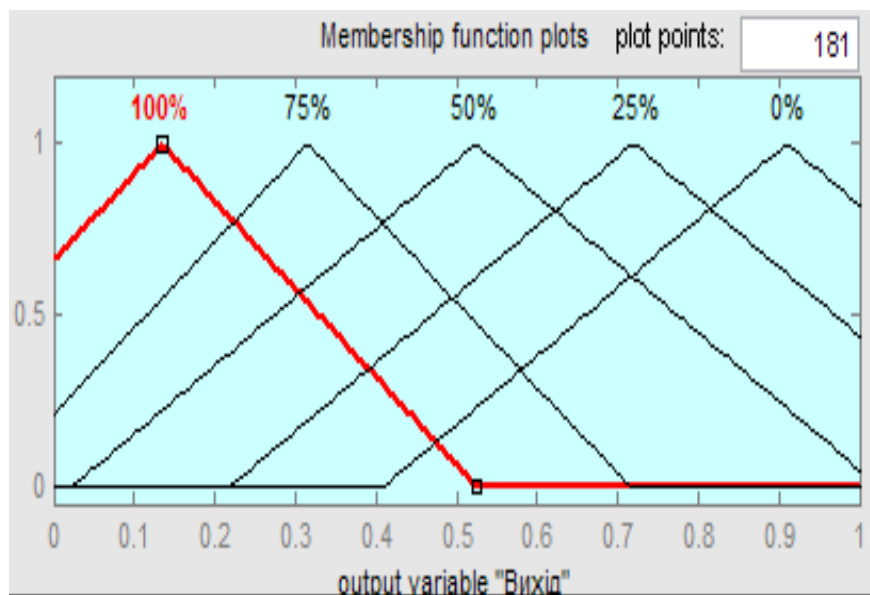


Рис. 3.5 Вихідна характеристика ПД-регулятора

На рис. 3.6 (а, б) зображено отримані моделюванням поверхні відгуку вихідних змінних k_p та k_i розробленого регулятора з урахуванням змін його

вхідних координат e і de/dt показують чутливість нечіткого регулятора до вхідних впливів [6].

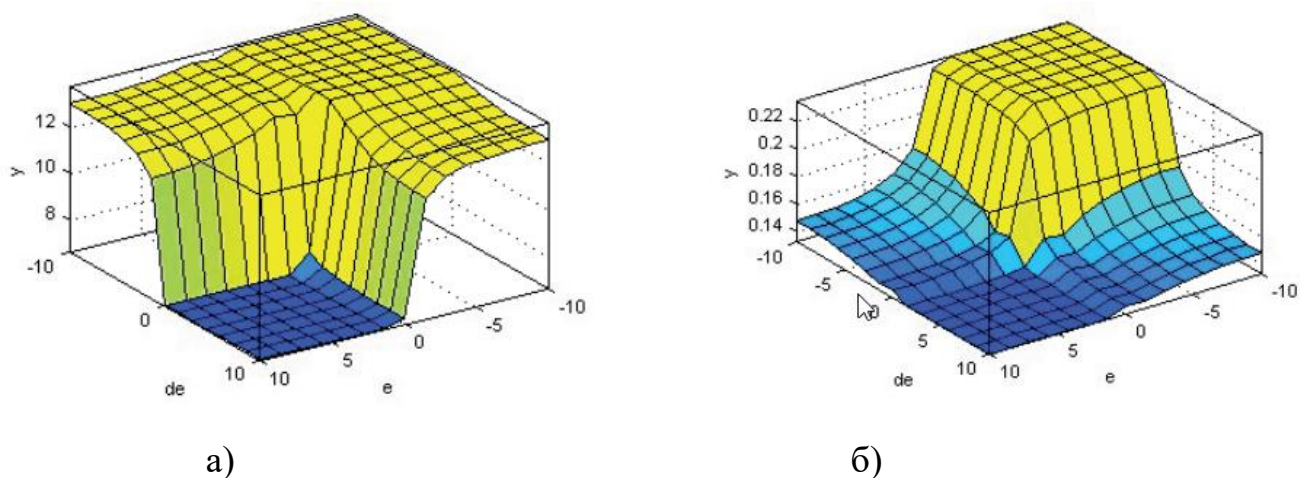


Рис. 3.6. Поверхні відгуку вихідних змінних k_p (а) та k_i (б)

Провівши дослідження ПД-регулятора одержано наступні залежності (рис. 3.7 і 3.8).

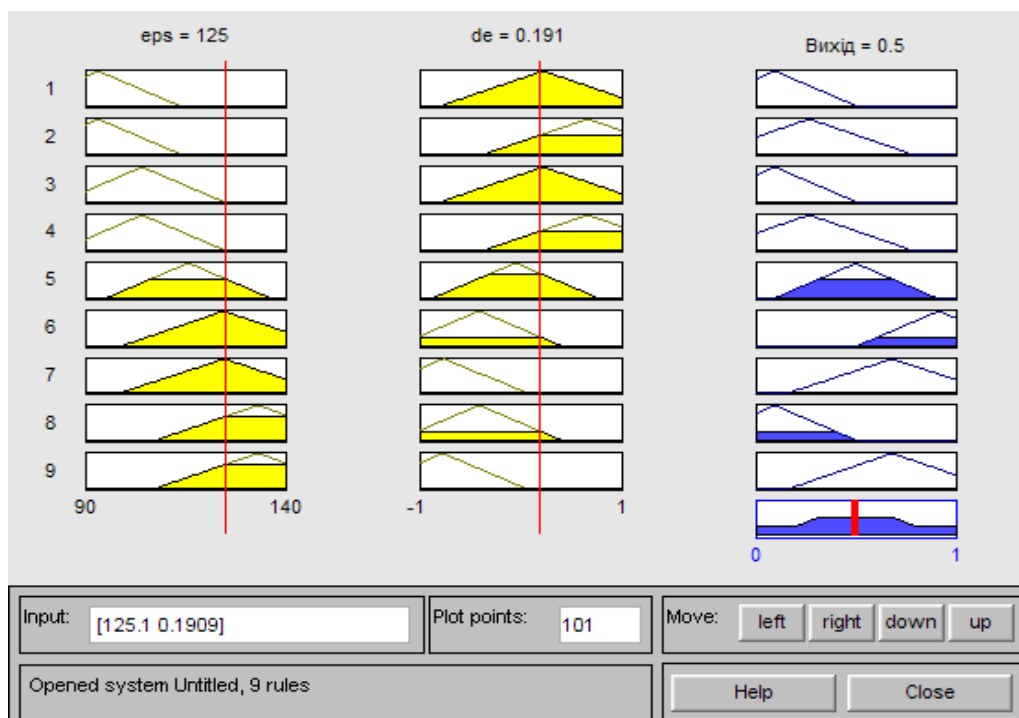


Рис 3.7. Залежність зміни вихідного сигналу від зміни складових закону регулювання

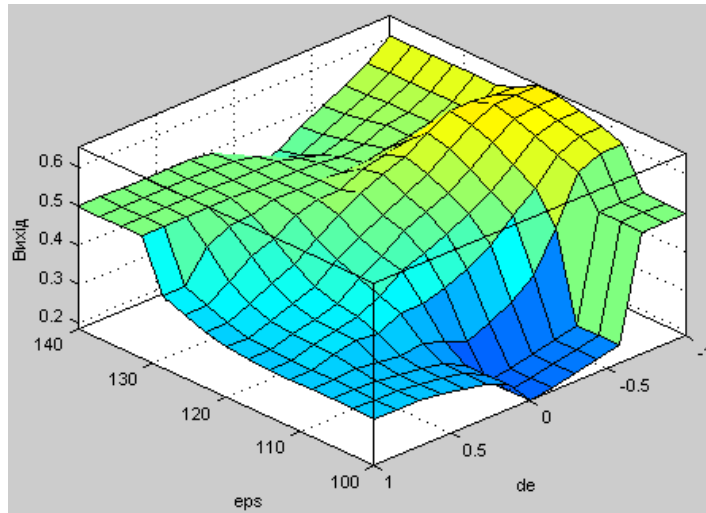


Рис. 3.8. 3D модель залежності зміни вихідного сигналу від зміни складових закону регулювання

Провівши розробку нечіткого ПД-регулятора отримали такий регулятор який задовільняє умови подані в базі правил та може реально функціонувати.

Отож, наведені результати моделювання динаміки систем з класичним ПІ-регулятором та нечітким регулятором при відпрацюванні зміни завдання (рис. 3.9) та нанесенні збурення зі сторони виконавчого механізму (рис. 3.10) показують потенціал використання нечіткої технології для досліджуваного об'єкта [6].

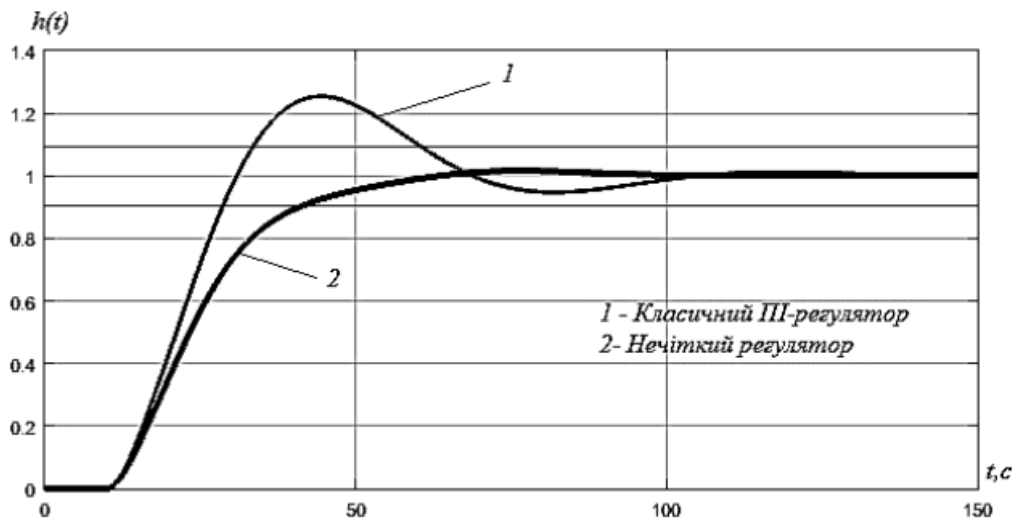


Рис. 3.9. Перехідна характеристика об'єкта керування із класичним ПІ-регулятором та регулятором на базі нечіткої логіки

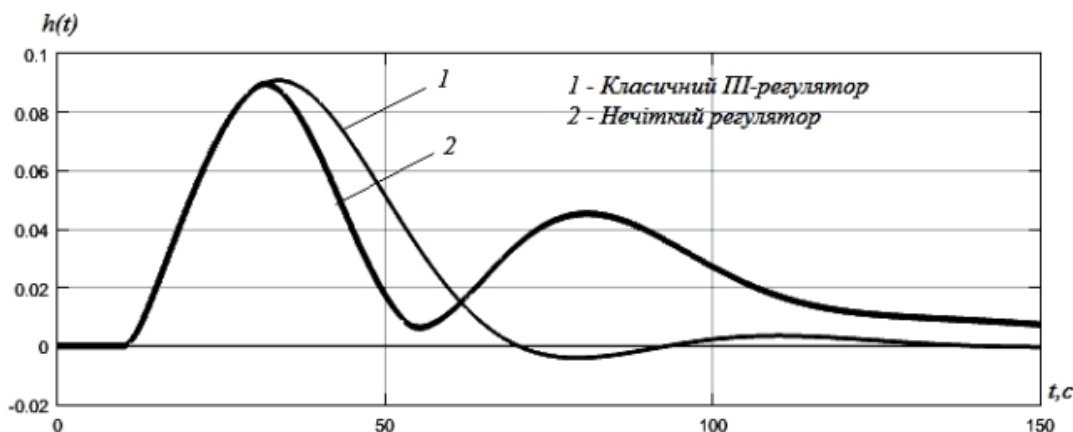


Рис. 3.10. Перехідна характеристика об'єкта керування із класичним ПІ-регулятором та регулятором на базі нечіткої логіки

Отримані результати показали, що система керування з регулятором на базі нечіткої логіки володіє кращими динамічними характеристиками у порівнянні з класичним ПІ-регулятором. Використання даного регулятора дозволяє знизити перерегулювання, зменшити час перехідного процесу системи та динамічне відхилення.

Схема розробленого регулятора на базі нечіткої логіки рекомендується для використання в нелінійних керованих системах.

3.2. Самоналагоджування параметрів адаптивних регуляторів з еталонною моделлю

Механізм самоналагоджування параметрів у розробленій адаптивній системі керування технологічним процесом електродегідрування нафти забезпечує автоматичну зміну внутрішніх коефіцієнтів регулятора відповідно до зміни динаміки об'єкта, зовнішніх збурень та технологічних умов. Його основною задачею є підтримання оптимальних характеристик регулювання без необхідності ручного переналаштування, що є критично важливим для процесів із вираженою нелінійністю та часовою зміною параметрів, таких як електродегідрування.

Механізм самоналагоджування реалізовано за комбінованим алгоритмом:

– оцінювання похибки та її похідних, тобто у системі обчислюються такі параметри: поточна похибка $e(t)$; приріст похибки $e(t) = e(t) - e(t-1)$;

– прогнозована похибка на короткий інтервал часу, що дозволяє визначити тенденцію поведінки об'єкта та ступінь відхилення від оптимальних траєкторій.

Нейронна адаптація: сигнал керування $u(t)$; вимірний вихід $y(t)$. Мережа працює у режимі on-line learning, використовуючи один із методів: градієнтну оптимізацію; адаптивний алгоритм Ляпунова.

Передбачається, що математична модель об'єкта має вигляд:

$$A(z^{-1})y_t = z^{-(d+1)}B(z^{-1})u_t + \eta_t, \quad (3.1)$$

де $B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_rz^{-r}$ (3.2)

і $A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_mz^{-m}$, (3.3)

де d – дискретне запізнювання об'єкта.

Задача самоналаштування адаптивного регулятора з еталонною моделлю полягає у визначенні поліномів $H(z^{-1})$, $D(z^{-1})$, $F(z^{-1})$, при яких реакція замкнутого основного контуру у на зміну задаючого впливу, визначається еталонною моделлю, рівняння якої

$$y_{m_t} = z^{-(d+1)} \frac{B_m(z^{-1})}{A_m(z^{-1})} G_t, \quad (3.4)$$

де $A_m(z^{-1})$, $B_m(z^{-1})$ – задані поліномні вирази, що входять до складу еталонної моделі.

Ціль цифрового регулятора при використанні явно вираженої еталонної моделі полягає в ліквідації помилки неузгодженості вихідного сигналу об'єкта й еталонної моделі

$$e_t = y_t - y_{m_t}, \quad (3.5)$$

для чого необхідно підібрати поліномний вираз, щоб виконувалася рівність

$$R(z^{-1})e_{t+d+1} = C(z^{-1})\xi_{t+d+1}. \quad (3.6)$$

Полином визначає динаміку перехідного процесу при усуненні помилки неузгодженості (3.5). Якщо математична модель об'єкта має вигляд (3.1) –(3.3), то дискретна передавальна функція замкнутого основного контуру (ОК), приведеного на рис. 3.11, дорівнює

$$\frac{Y(z)}{G(z)} = \frac{z^{-(d+1)} H(z^{-1}) B(z^{-1})}{A(z^{-1}) D(z^{-1}) + z^{-(d+1)} B(z^{-1}) F(z^{-1})}. \quad (3.7)$$

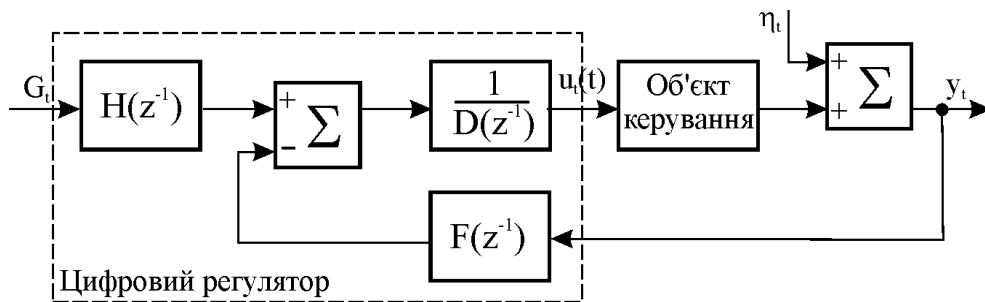


Рис. 3.11. Автоматична система керування адаптивним регулятором

Поліномний вираз $D(z^{-1})$ має вигляд

$$D(z^{-1}) = B(z^{-1}) G_1(z^{-1}), \quad (3.8)$$

де
$$G_1(z^{-1}) = 1 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2} + \dots + g_{\bar{g}} z^{-\bar{g}}. \quad (3.9)$$

Тоді у виразі (3,7) відбудеться скорочення полінома $B(z^{-1})$, і характеристичне рівняння, що визначає динаміку замкнутого основного контуру $R(z^{-1})$, буде дорівнювати:

$$A(z^{-1}) G_1(z^{-1}) + z^{-(d+1)} F(z^{-1}) = R(z^{-1}), \quad (3.10)$$

а дискретна передавальна функція замкнутого контуру (3.7) набуде вигляду

$$y_t = z^{-(d+1)} \frac{H(z^{-1})}{R(z^{-1})} G_t. \quad (3.11)$$

Оскільки задача проектування адаптивного регулятора полягає в забезпеченні відповідності реакції еталонної моделі (3.4) і замкнутого основного контуру (3.11) на зміну задаючого впливу, то, прирівнюючи праві частини цих виразів, одержимо

$$H(z^{-1}) = R(z^{-1}) \frac{B_M(z^{-1})}{A_M(z^{-1})}. \quad (3.12)$$

Виконаємо синтез оптимального цифрового регулятора. З виразу для еталонної моделі (3.4) можна записати прогнозоване значення вихідної координати

$$y_{M_t+d+1} = \frac{B_M(z^{-1})}{A_M(z^{-1})} G_t. \quad (3.13)$$

яке з врахуванням (3.13) можна представити в такий спосіб:

$$y_{M_t+d+1} = \frac{H(z^{-1})}{R(z^{-1})} G_t. \quad (3.14)$$

Визначимо задаючий вплив з рівняння (3.14) і підставимо його в основне рівняння цифрового регулятора (3.1), яке після цього набуде вигляду

$$D(z^{-1})u_t = R(z^{-1})y_{M_t+d+1} - F(z^{-1})y_t. \quad (3.15)$$

Для ідентифікації параметрів регулятора представимо вираз (3.15) у вигляді

$$R(z^{-1})y_{M_t+d+1} = D(z^{-1})u_t + F(z^{-1})y_t = \bar{\theta}^T \bar{X}_t, \quad (3.16)$$

Алгоритм роботи адаптивної системи керування з еталонною моделлю в кожен період квантування можна представити послідовністю виконання наступних операцій:

1) прогнозування вихідної координати еталонної моделі на тактів квантування уперед відповідно до моделі

$$\hat{\theta}_t = \hat{\theta}_{t-1} + \bar{P}_{t-d-1} \bar{X}_{t-d-1} \nu_t, \quad (3.17);$$

2) фільтрація вихідного сигналу еталонної моделі за допомогою проходження через цифровий фільтр, представлений дискретною моделлю $R(z^{-1})$;

4) вимірювання вихідного сигналу об'єкта керування y_t у моменти часу $t = nT_0$;

5) фільтрація вихідного сигналу об'єкта y_t за допомогою проходження через цифровий фільтр, представлений дискретною моделлю $t = nT_0$;

6) зсув у часі вбік відставання на $(d + 1)$ тактів квантування вихідного сигналу фільтра по п. 2, тобто визначення сигналу

7) обчислення відфільтрованої помилки неузгодженості між вихідним сигналом об'єкта й еталонною моделлю;

8) корекція параметрів регулятора на основі оцінки вектора $\hat{\theta}_t$ і перехід до 1 для реалізації алгоритму в наступному такті квантування.

Отже, принцип побудови адаптивних регуляторів з еталонною моделлю полягає у використанні порівняння фактичної поведінки об'єкта керування з бажаною, заданою еталонною моделлю. Це дозволяє визначати похибку моделювання та автоматично коригувати параметри регулятора в режимі реального часу. Перевагами такого підходу є швидка адаптація до змінних умов, мінімізація перерегулювання та можливість реалізації складних нелінійних законів керування, що значно підвищує ефективність і надійність системи порівняно з класичними ПІ/ПІД-регуляторами.

3.3. Впровадження в систему керування нейрорегулятора нечіткого регулятора (вчителя)

Попри всі переваги нечітких регуляторів в них є одний суттєвий недолік, це не можливість самостійно змінювати свої параметри налаштування необхідність в чому виникає при зміні пір року чи характеристик вхідної сировини технологічного об'єкта [5, 6].

Проведення навчання нейрорегулятора безпосередньо на об'єкті може привести до пошкодження технологічного обладнання оскільки у процесі навчання контрольовані параметри можуть неодноразово виходити за межі регламентних показників. Виходом може стати навчання нейрорегулятора за

допомогою нечіткого регулятора який вже має базу знань що може забезпечити якісне навчання нейрорегулятораю

Нейронна мережа налаштовується таким чином, щоб мінімізувати похибку $\Sigma = (u^* - u)^2$, що виникає між сигналом u^* , отриманим за участю навченого нечіткого регулятора і сигналом u , отриманим у процесі «навчання» мережі. Після виконання процедури «навчання» параметри нейромережі заносяться в блок автоналаштування. У відповідності з теорією нейронних мереж, навчена нейромережа повинна вести себе так само як і нечітки регулятор, причому навіть при тих вхідних впливах, які не були включені в набір сигналів, використаних при навчанні.

Найбільш загальний спосіб застосування методу навчання до нечіткої системи полягає в тому, щоб подати її у вигляді архітектури, подібної нейронній мережі. Однак звичайні (градієнтні) методи навчання нейронних мереж не можуть безпосередньо застосовуватися до такої системи, оскільки функції, використовувані в процесі виведення звичайно є недиференційовані. Ця проблема може бути вирішена шляхом використання диференційованих функцій у системі виведення або не використання стандартних методів навчання нейромереж. У нейро-нечітких мережах використовуються реалізації трикутних норм (множення і імовірнісне АБО), що диференціюються, а також гладкі функції приналежності. Це дозволяє застосовувати для налаштування нейро-нечітких мереж швидкі алгоритми навчання нейронних мереж, засновані на методі зворотного поширення помилки.

Інтегрована нейро-нечітка модель є інтерпретованою і здатна до контрольованого навчання. У ANFIS процес навчання сконцентрований тільки на настроюванні значень параметрів у межах установлених структур. ANFIS реалізує систему нечіткого виводу Сугено у вигляді п'ятишарової нейронної мережі прямого поширення сигналу. Призначення шарів таке:

- перший шар – терми вхідних змінних;
- другий шар – антецеденти (посилки) нечітких правил;
- третій шар – нормалізація ступенів виконання правил;

- четвертий шар – укладення правил;
- п'ятий шар – агрегування результату, отриманого за різними правилами.

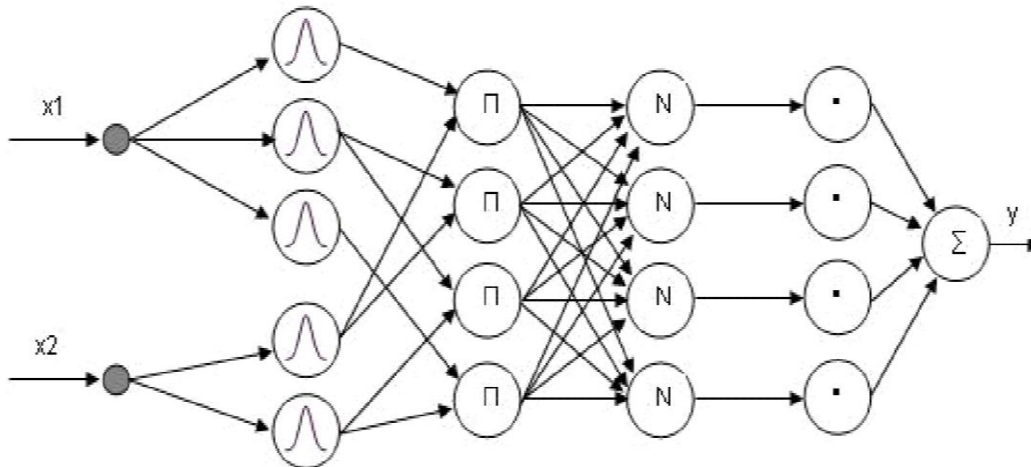


Рис. 3.12. Структура нейромережі [5]

База правил являє собою безліч нечітких правил R^k , $k=1, \dots, N$ виду

$$R^k : \text{IF} \left(x_1 \text{ it } A_1^k \text{ AND } x_2 \text{ it } A_2^k \text{ AND } \dots x_n \text{ then } A_n^k \right) \text{ THEN} \\ \left(y_1 \text{ it } B_1^k \text{ AND } y_2 \text{ it } B_2^k \text{ AND } \dots y_m \text{ it } B_m^k \right),$$

де N – кількість нечітких правил: A_j^k, B_j^k - нечіткі множини.

Якщо об'єднати математичні описи всіх елементів мережі отримуємо один із варіантів реалізації ANFIS мережі:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}^k \left(\prod_{i=1}^n e^{-\frac{(x_i - x_{i^*})^2}{\sigma_i^k}} \right)}{\sum_{i=1}^N \left(\prod_{i=1}^n e^{-\frac{(x_i - x_{i^*})^2}{\sigma_i^k}} \right)}$$

На рис. 3.13 запропонована схема яка передбачає, що вихідний параметр нечіткого регулятора виступає як вхідний сигнал нейрорегулятора.

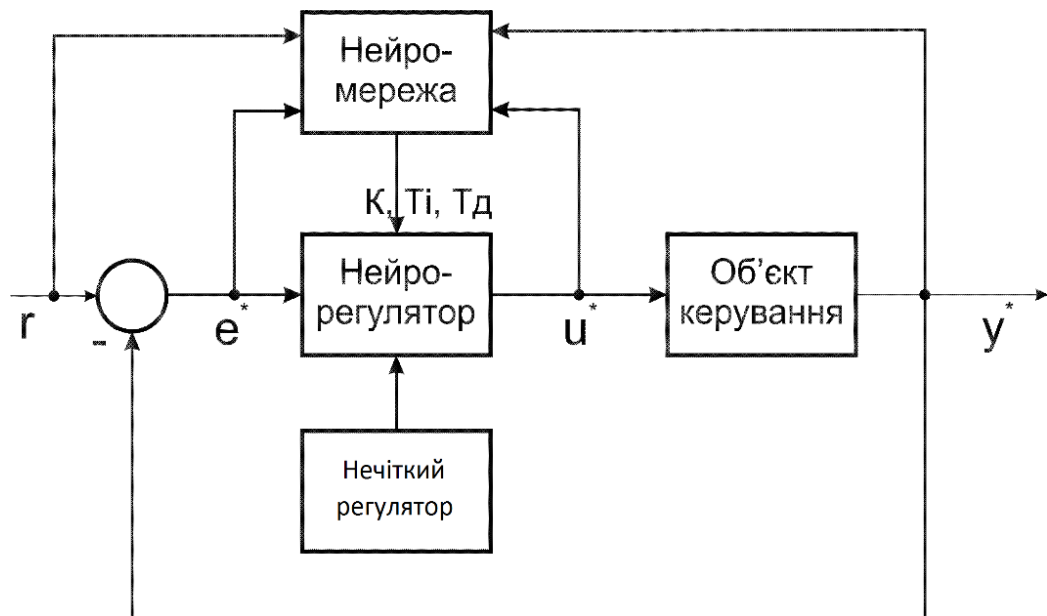


Рис. 3.13. Структура адаптивного нейрорегулятора [5]

Нейромережа у даному випадку відіграє роль функціонального перетворювача, який для кожного набору сигналів r , e , u генерує коефіцієнти налаштування ПД-регулятора – K , T_i , T_d .

Найскладнішим етапом проектування нейрорегуляторів є процедура «навчання». У більшості випадків для навчання нейромережі використовують алгоритми навчання які відповідають парадигмі мережі. Для пошуку координат глобального мінімуму поверхні функції помилок мережі, що відповідають параметрам налаштування мережі в останні роки широкого використання набули генетичні і еволюційні алгоритми.

Створення ANFIS-моделі забезпечення необхідної температури дисперсного матеріалу виконуємо з використанням графічного інтерфейсу гібридних нейронних мереж у пакеті прикладних програм.

Для моделювання використаємо три блоки даних, отриманих у результаті проведених експериментальних досліджень та математичної моделі – навчальні, контрольні та дані для перевірки.

Розробку системи автоматичного керування напругою установки залежно від початкової температури дисперсного матеріалу та діючої напруги мережі розпочнемо з завантаження даних експерименту в редактор моделі.

Використовуємо дані Training data (рис.3.10). У групі опцій ANFIS активуємо опцію grid partition. Не змінюючи інші налаштування, генеруємо структуру нейронної моделі типу input_gbellmt та output_linear. Кількість циклів змінимо на 600. Навчання мережі за експериментальними даними припинилось після 515 циклу з середньоквадратичною похибкою 0,0029026.

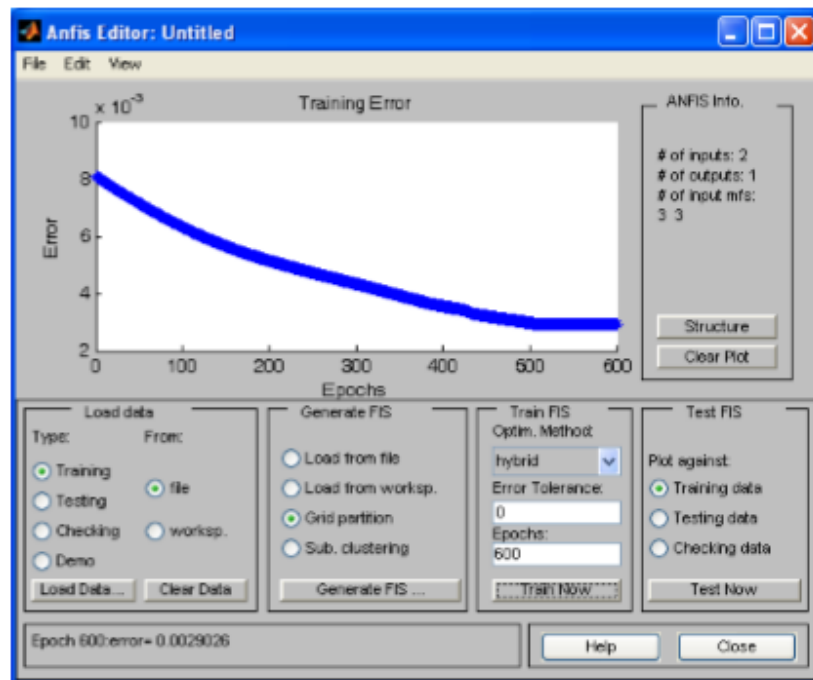


Рис 3.14. Результати навчання мережі

Наступним кроком розробки є введення в редактор контрольної вибірки – Testing data (рис. 3.15).

За результатами отримали середньоквадратичне відхилення 0,0034573. Таке відхилення у визначенні коефіцієнта m цілком нас влаштовує. Якість роботи гібридної нейронної мережі оцінимо, завантаживши в ANFIS контрольну вибірку даних – Cheking data. Середньоквадратичне відхилення становила 0,0037069, отже ANFIS навчання мережі завершено.

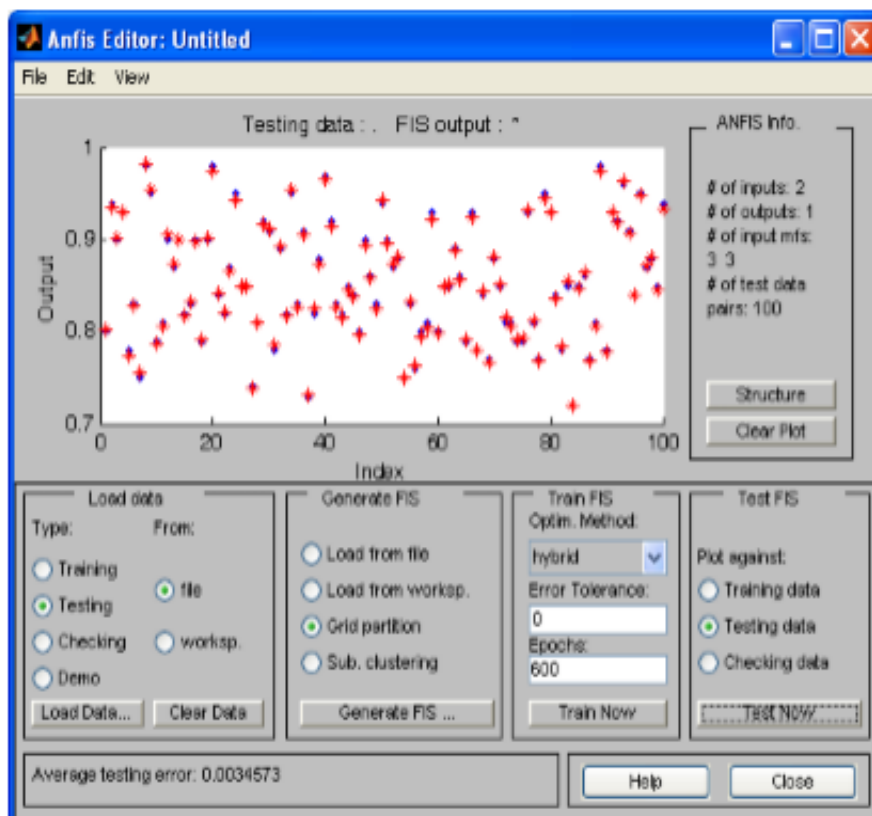


Рис. 3.15. Введення контрольної вибірки

Поверхня відгуку мережі при коливаннях t_0 в межах від 100 до 140°C та діапазон роботи мережі від 0 до 100% В. Візуалізацію взаємодії всіх параметрів показано на рис.3.16.

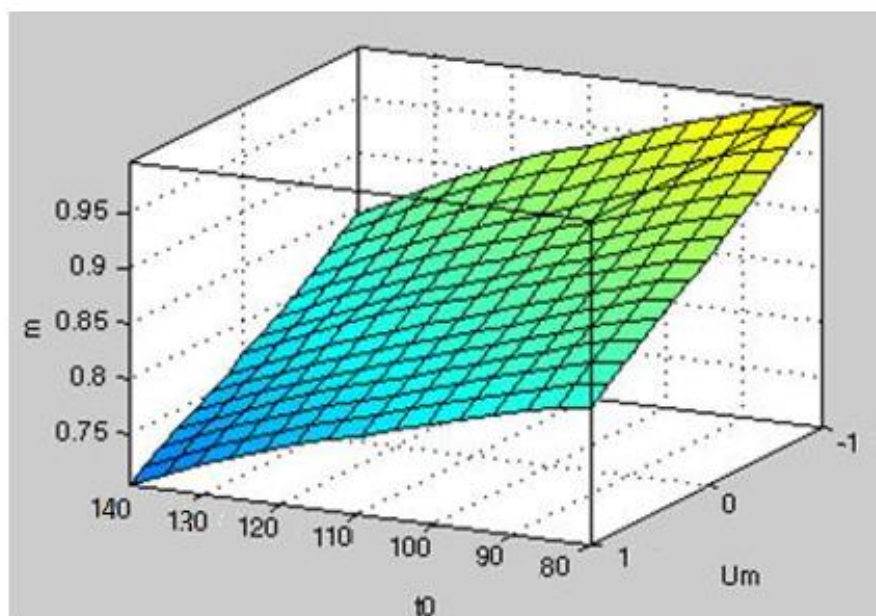


Рис 3.16. Візуалізація роботи нейрорегулятора

Навчена ANFIS забезпечує необхідну точність регулювання в та показує можливість адаптації мережі до роботи в режимі невизначеності, а також показує швидкість та якість регулювання що задовольняє вимоги до технологічного процесу електродегідрування нафти.

Побудуємо структуру об'єкту регулювання в програмному пакеті Simulink Matlab (рис. 3.17), [5].

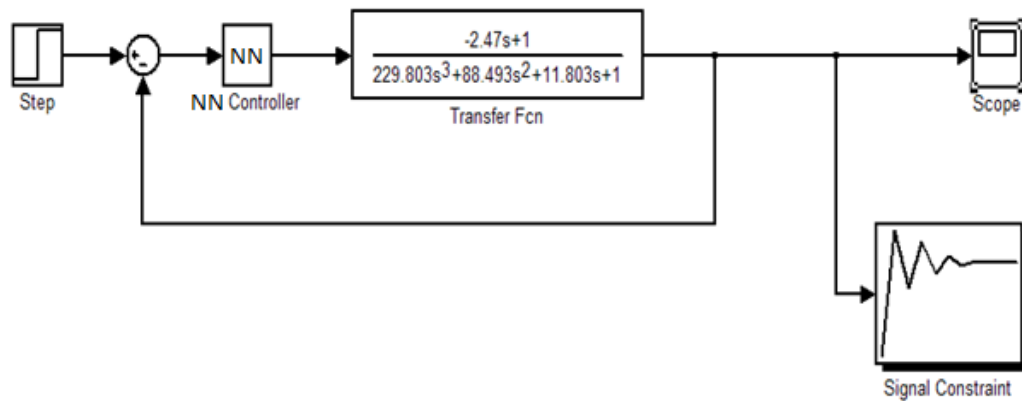


Рис. 3.17. Структура об'єкту регулювання

Побудований графік перехідного процесу відповідає всім показникам якості (рис. 3.18).

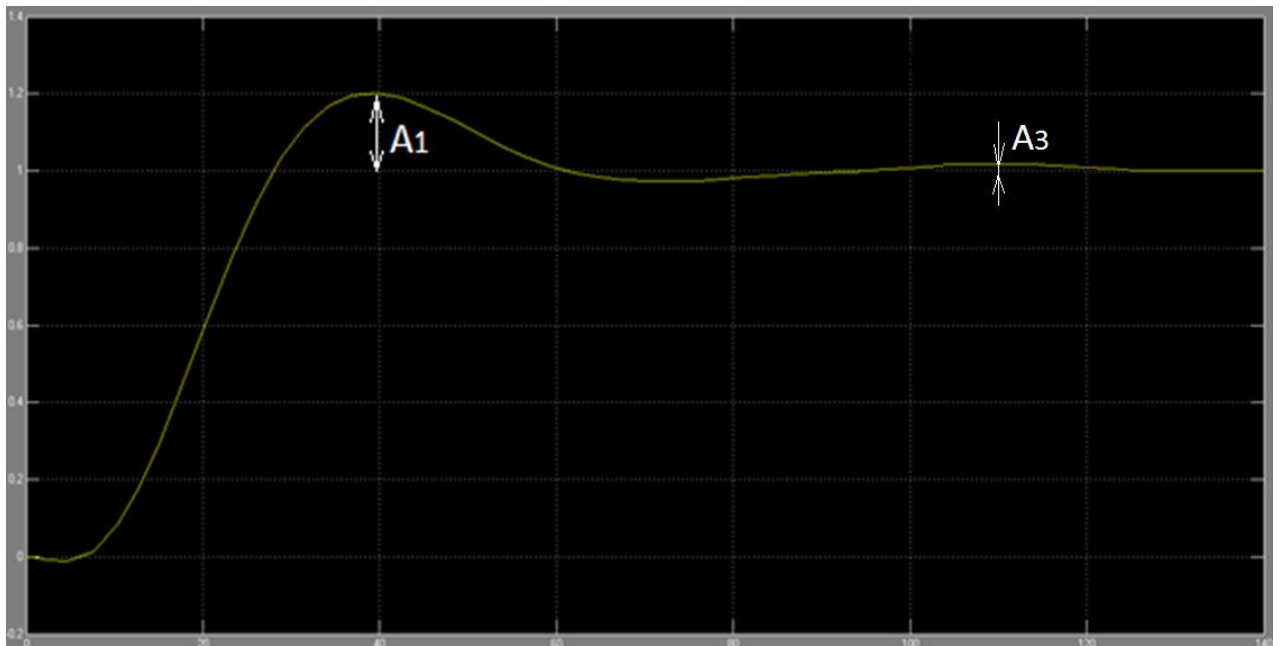


Рис. 3.18. Перехідний процес

Перерегулювання δA становить менше 20 % , дискримент затухання $d=3$, тому можна зробити висновок, що система працює задовільняючи основні параметри якості.

Висновок до розділу 3

У розділі було розроблено регулятор на основі нечіткої бази знань, який забезпечує стабільне підтримання оптимального рівня електродегідрування нафти, зменшує коливання та перевищення допустимих відхилень параметрів, що є критичним для підвищення якості продукту. Використання нечіткого регулятора дозволяє гнучко налаштовувати реакцію системи на зміну зовнішніх умов і властивостей сировини без необхідності точного математичного моделювання об'єкта.

Було проаналізовано принципи побудови адаптивних регуляторів з еталонною моделлю для визначення похибки моделювання та автоматично коригувати параметри регулятора в режимі реального часу. Отримані результати моделювання та експериментів підтверджують ефективність обраної структури регулятора та можливість його подальшого впровадження у реальні технологічні установки для підвищення продуктивності та надійності процесу електродегідрування нафти.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було проведено дослідження розробки та впровадження адаптивних нейрорегуляторів для систем електродегідрування нафти. У ході роботи було проаналізовано існуючі автоматичні системи керування електродегідраторами та виявлено обмеження стандартних ПД-регуляторів. На основі цього запропоновано нову систему керування, що використовує нейрорегулятор із нечітким учителем.

Було проведено експериментальні дослідження на об'єкті керування, а також підібрано прилади для забезпечення безперервної роботи процесу електродегідрування. Для оцінки динамічних характеристик системи визначено перехідну функцію за допомогою програми Aprox 1.0 та порівняно експериментальні та апроксимовані графіки перехідного процесу. Отримані результати підтвердили адекватність моделі, оскільки похибка становила менше 2,5% (2,4%).

Розроблений регулятор на основі нечіткої бази знань забезпечує стабільне підтримання оптимального рівня електродегідрування, зменшує коливання та перевищення допустимих відхилень параметрів, що є важливим для підвищення якості кінцевого продукту. Було також проаналізовано принципи побудови адаптивних регуляторів з еталонною моделлю, що дозволяє визначати похибку моделювання та автоматично коригувати параметри системи в реальному часі.

Результати моделювання та експериментів підтвердили ефективність обраної структури регулятора і її потенціал для впровадження у промислові установки, що забезпечує підвищення продуктивності та надійності процесу електродегідрування. Використання нечіткого регулятора дозволяє гнучко реагувати на зміни зовнішніх умов і властивостей сировини без необхідності точного математичного опису об'єкта.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мотрій О.В. Конструктивні особливості електродегідраторів зневоднення нафти / О.В.Мотрій, О.А. Пащенко // НТУ «Дніпровська політехніка». Режим доступу: <https://ir.nmu.org.ua/server/api/core/bitstreams/b923f691-5410-4f64-951d-3ce689996814/content>
2. Соколов С. В. Оптимальні та адаптивні системи: [конспект лекцій] / С.В. Соколов. – Суми : Сумський державний університет, 2012. – 166 с.
2. Назаренко М.В. Теоретичні засади та принципи побудови моделей динамічних процесів та їх регуляторів: [монографія] / М.В.Назаренко. – Кривий Ріг: Діоніс (ФОП Чернявський Д.О.). – 2010. – 204 с.
3. Семенцов Г.Н. Автоматизація неперервних технологічних процесів. Регулятори: [навч. посібн.]. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. 2016. 201 с.
4. Чигур І. І. Інформаційні технології та системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень: [навч. посібн.] / І. І. Чигур, Л. Я. Чигур. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2023. – 107 с.
5. Chyhur I. APPROACHES TO ADJUSTING CONTROLLERS TAKING INTO ACCOUNT THE ESTABLISHED QUALITY CRITERIA. The 9th International scientific and practical conference “Scientific research in the modern world” (June 28-30, 2023) Perfect Publishing, Toronto, Canada. 2023. – P. 85-90.
6. Singhala, P. Temperature Control using Fuzzy Logic [Text] / P. Singhala, D. N. Shah, B. Patel // International Journal of Instrumentation and Control Systems. — 2014. — Vol. 4, № 1. — P. 1–10.
7. Маслій Н.С. Впровадження у систему керування нейрорегулятора нечіткого; збірник тез Всеукр. інтернет-конф. молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості» / Н.С. Маслій, М.І.Когутяк: ІФНТУНГ; 09 жовтня 2025 р. – С. 62.64.
8. Семенцов Г.Н. Інтегровані та адаптивні системи керування:[конспект лекцій] / Г.Н. Семенцов, І.І.Чигур, М.М.Дранчук. – Івано-Франківськ:

ІФНТУНГ, 2010. – 65 с.

9. Програмування у середовищі Matlab. Режим доступу:
<http://www.mathworks.com/discovery/matlab-mapreduce-hadoop.html>

10. Busher V., Aldairi A. Synthesis and technical realization of control systems with discrete fractional integral-differentiating controller [Text]/ Eastern/European Journal of Enterprise Technologies. ISSN 1729-3774. Industry Control System. Kharkov: PC Technology Center, 2018. Vol/2, № 4(94). 2018. P. 63-71.