

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПм-41.00.00.000 ПЗ

Група АКПм-24-2

Дутов В`ячеслав

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

Дутов В'ячеслав Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.518:004.8:661.631

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Синтез і дослідження інтелектуальних алгоритмів управління

(назва роботи)

процесом отримання фосфорного ангідриду

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

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм -24-2

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

В.О. Дутов

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент, к.т.н

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Л.Я. Чигур

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

А.І. Лагойда

Рецензент

доцент, к.т.н

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Л.І. Фешанич

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

Івано-Франківськ - 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень магістерський

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

« ____ » _____ 2025 року

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

Дутову В`ячеславу Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Синтез і дослідження інтелектуальних алгоритмів управління процесом отримання фосфорного ангідриду

керівник роботи Чигур Людмила Ярославівна, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 10 » 11 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 10.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики, аналіз науково-технічної літератури

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

4.1. Опис технологічного процесу як об'єкта автоматизації

4.2. Обґрунтування вибору напрямку дослідження та постановка завдання

4.3. Розробка моделі об'єкту управління

4.4. Синтез нечітких моделей управління процесами

4.5. Синтез нейро-мережових моделей управління процесами

4.6. Синтез нейро-нечітких моделей управління процесами

4.7. Дослідження отриманих моделей на адекватність

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

Не передбачено завданням

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 22.10.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Опис технологічного процесу як об'єкта автоматизації	30.10.2025 р.	
2	Обґрунтування вибору напрямку дослідження та постановка завдання	05.11.2025 р.	
3	Розробка моделі об'єкту управління	10.11.2025 р.	
4	Синтез нечітких моделей управління процесами	15.11.2025 р.	
5	Синтез нейро-мережових моделей управління процесами	20.11.2025 р.	
6	Синтез нейро-нечітких моделей управління процесами	30.11.2025 р.	
7	Дослідження отриманих моделей на адекватність	08.12.2025 р.	

Студент _____
(підпис)

Дутов В.О. _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Чигур Л.Я. _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота: 82 ст., 53 рис., 18 табл., 9 джерел

Тема. Синтез і дослідження інтелектуальних алгоритмів управління процесом отримання фосфорного ангідриду.

Об'єкт дослідження. Технологічний процес одержання (виробництва) сухого фосфорного ангідриду шляхом високотемпературного спалювання (окислення) жовтого фосфору, включаючи стадії спалювання, утилізації тепла та кристалізації продукту.

Мета дослідження полягає у розробці та впровадженні інноваційної, економічно ефективної та надійної інтелектуальної системи оптимального управління технологічним процесом виробництва сухого фосфорного ангідриду на основі використання інтелектуальних технологій (ШІ) та досвіду експертів.

Методи дослідження: системний аналіз технологічного процесу та експертні методи, які дозволили формалізувати знання технологів через матрицю планування повного факторного експерименту, методи нечіткої логіки, нейронні мережі (з використанням алгоритму навчання Левенберга-Маркардта) та гібридні нейро-нечіткі системи (ANFIS), чисельне моделювання у середовищі MATLAB/Simulink.

Результати магістерської роботи. У роботі було розроблено новий методологічний підхід до синтезу систем оптимального управління, який базується на формалізації експертних знань для створення моделі процесу управління за допомогою інтелектуальних технологій. Було успішно синтезовано та досліджено гібридні нейро-нечіткі моделі (ANFIS) для ключових стадій виробництва фосфорного ангідриду (спалювання, охолодження, осадження).

Висновки. Дослідження підтвердило адекватність, чутливість та стійкість розроблених алгоритмів. Отриманий результат має високу практичну значущість, оскільки дозволяє створити діючу інтелектуальну систему, яка забезпечить ведення процесу в оптимальних режимах, призведе до економії ресурсів та підвищення якості продукту, а також готова до інтеграції у промислові контролери (PLC).

Ключові слова: фосфорний ангідрид, інтелектуальні алгоритми управління, нейро-нечіткі системи, ANFIS, нечітка логіка, нейронні мережі, експертні знання, ПФЕ (Планування повного факторного експерименту).

ANNOTATION

Master's work: 82 items, 53 fig., 18 tables, 9 sources.

Subject. Synthesis and research of intelligent algorithms for controlling the process of obtaining phosphoric anhydride.

Object of research. Technological process of obtaining (manufacturing) dry phosphoric anhydride by high-temperature combustion (oxidation) of yellow phosphorus, including the stages of combustion, heat utilization and product crystallization.

The purpose of the research is to develop and implement an innovative, cost-effective and reliable intelligent system for optimal control of the technological process of producing dry phosphoric anhydride based on the use of intelligent technologies (AI) and the experience of experts.

Research methods: system analysis of the technological process and expert methods, which allowed to formalize the knowledge of technologists through the full factorial experiment planning matrix, fuzzy logic methods, neural networks (using the Levenberg-Marquardt learning algorithm) and hybrid neural-fuzzy systems (ANFIS), numerical modeling in the MATLAB/Simulink environment.

Results of the master's thesis. The work developed a new methodological approach to the synthesis of optimal control systems, which is based on the formalization of expert knowledge to create a control process model using intelligent technologies. Hybrid neuro-fuzzy models (ANFIS) were successfully synthesized and investigated for the key stages of phosphoric anhydride production (combustion, cooling, deposition).

Conclusions. The study confirmed the adequacy, sensitivity and stability of the developed algorithms. The obtained result has high practical significance, as it allows you to create an operating intelligent system that will ensure the process operation in optimal modes, will lead to resource savings and increased product quality, and is also ready for integration into industrial controllers (PLC).

Keywords: phosphoric anhydride, intelligent control algorithms, neuro-fuzzy systems, ANFIS, fuzzy logic, neural networks, expert knowledge, FFE (Full Factorial Experiment Design).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1	
ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ	
1.1. Фізико-хімічні особливості фосфорного ангідриду.....	13
1.2. Опис технологічного процесу.....	15
Висновки до розділу 1.....	19
РОЗДІЛ 2	
ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ	
2.1. Огляд проблем, які виникають в процесі автоматизації виробництва.....	20
2.2. Постановка завдання дослідження.....	22
Висновки до розділу 2.....	24
РОЗДІЛ 3	
РОЗРОБКА МОДЕЛІ ОБ'ЄКТУ УПРАВЛІННЯ	
3.1. Теоретичні основи планування повного факторного експерименту.....	25
3.2. Концепція синтезу інтелектуальних алгоритмів управління технологічними процесами одержання P ₂ O ₅	28
3.3. Розрахунок матеріального та теплового балансів виробництва ангідриду фосфору.....	31
3.4. Формування матриці ПФЕ для синтезу інтелектуальних алгоритмів керування процесом спалювання.....	38
Висновки до розділу 3.....	43
РОЗДІЛ 4	
СИНТЕЗ НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ	
4.1. Синтез нечіткої моделі управління процесом спалювання.....	44

4.2. Синтез нечіткої моделі управління процесом охолодження.....	46
4.3. Синтез нечіткої моделі управління процесом осадження.....	47
Висновки до розділу 4.....	49

РОЗДІЛ 5

СИНТЕЗ НЕЙРО-МЕРЕЖЕВИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ

5.1. Синтез нейро-мережевої моделі управління процесом спалювання.....	50
5.2 Синтез нейро-мережевої моделі управління процесом охолодження.....	52
5.3. Синтез нейро-мережевої моделі управління процесом осадження.....	54
Висновки до розділу 5.....	56

РОЗДІЛ 6

СИНТЕЗ НЕЙРО-НЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ

6.1. Синтез нейро-нечіткої моделі управління процесом спалювання.....	57
6.2. Синтез нейро-нечіткої моделі управління процесом охолодження.....	60
6.3. Синтез нейро-нечіткої моделі управління процесом осадження.....	63
Висновки до розділу 6.....	66

РОЗДІЛ 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ОТРИМАНИХ МОДЕЛЕЙ НА АДЕКВАТНІСТЬ

7.1 Оцінка адекватності моделей управліннями процесами спалювання, охолодження та осадження.....	67
7.2. Оцінка моделей управління адекватністю процесом осадження	76
Висновки до розділу 7.....	80

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	81
-------------------------------	-----------

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	82
--	-----------

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

САУ - система автоматичного управління

P2O5 - Фосфорний ангідрид

APC - Advanced Process Control (удосконалене управління утехнологічними процесами)

PLC - Programmable Logic Controller (Промисловий контролер)

MPC - Model Predictive Controller (модальний предиктивний контролер)

MIMO — Multiple Input Multiple Output (багатовимірний/багатозв'язкова система з множинними входами та множинними виходами)

ПФЕ - Планування повного факторного експерименту (використовується для формалізації експертних знань)

ШІ - Штучний інтелект

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність роботи обумовлена критичною важливістю автоматизації промислового виробництва для підвищення продуктивності, безпеки та раціонального використання ресурсів (енергії, сировини), особливо у складних хімічних процесах, як-от одержання фосфорного ангідриду. Традиційні методи створення систем оптимального управління, що ґрунтуються на розробці адекватних математичних моделей самого технологічного процесу, є тривалими, високозатратними та часто неефективними на практиці. У зв'язку з цим, робота є актуальною завдяки вдосконаленню та розвитку інформаційних технологій шляхом застосування методів штучного інтелекту (нейронних мереж, нечітких алгоритмів) для синтезу безпосередньо моделі оптимального управління процесом на основі "готових знань" та досвіду експертів. Це дозволяє швидко створювати ефективні алгоритми керування, мінімізувати вплив "людського фактора" та забезпечувати стабільність і високу економічну віддачу виробництва.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Вибір теми дослідження, зосередженої на розробці та впровадженні інтелектуальних систем оптимального управління технологічним процесом виробництва фосфорного ангідриду, є обґрунтованим з огляду на такі ключові фактори. Сучасне промислове виробництво вимагає максимальної економії ресурсів (теплової та електричної енергії, мінеральної сировини), і впровадження інтелектуальних систем дозволяє вести процес в оптимальних режимах, що безпосередньо призводить до скорочення витрат (прогнозується економія електроенергії до 50%) та підвищення економічної віддачі, а також сприяє зниженню екологічних проблем шляхом мінімізації утворення небажаних побічних продуктів. Технологічна складність процесу одержання P_2O_5 із жовтого фосфору, який включає високотемпературні (до 2000 °C) та багатостадійні хімічні перетворення, ускладнює його точний опис традиційними математичними моделями. Тема дослідження пропонує інноваційний підхід: розробку моделі процесу управління, а не моделі самого технологічного процесу, що дозволяє створювати алгоритми керування напряму. Методи ШІ (нейронні та нейронечіткі мережі) дозволяють інтегрувати багаторічний досвід та інтуїцію досвідчених операторів-технологів ("готові знання" через матриці планування повного факторного експерименту — ПФЕ) у базу знань інтелектуальної системи.

Впровадження інтелектуальної системи гарантує постійне ведення процесу в оптимальних режимах, усуваючи вплив "людського фактора". Таким чином, вибір теми дослідження є актуальним та своєчасним, оскільки він пропонує практично реалізований та економічно вигідний механізм для досягнення оптимального та надійного управління хімічним виробництвом шляхом застосування передових інтелектуальних технологій.

Мета і завдання дослідження. Основна мета дослідження полягає у розробці та впровадженні інноваційної, економічно ефективною та надійною інтелектуальною системою оптимального управління технологічним процесом виробництва сухого фосфорного ангідриду на основі використання інтелектуальних технологій (ШІ) та досвіду експертів. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання, які відповідають триетапній процедурі, описаній у роботі. Априорні дослідження та підготовка включає: проведення априорного аналізу технологічних особливостей процесу одержання P_2O_5 (спалювання фосфору, охолодження, кристалізація) на основі літературних джерел та заводської документації; визначення та класифікацію всіх вхідних (керовані, некеровані) та вихідних (контрольованих) змінних для ключових об'єктів управління (камера згоряння, котел-утилізатор, економайзер); формулювання основної мети управління (цільової функції) та розробку ієрархічної структури майбутньої інтелектуальної системи керування. Розробка інтелектуальної ієрархії управління передбачає: визначення основних керуючих змінних за допомогою опитування досвідчених операторів-технологів; складання матриці планування повного факторного експерименту (ПФЕ), що містить оцінки експертів щодо оптимальних керуючих дій для різних поєднань вхідних змінних; синтез моделей управління технологічним процесом, використовуючи різні методи інтелектуальних технологій, такі як планування експерименту, нечіткі алгоритми, нейронні мережі та нейронечіткі мережі. Дослідження, порівняння та впровадження включає: проведення порівняльного аналізу отриманих моделей управління за критеріями адекватності, чутливості та стійкості, використовуючи матрицю порівняння; виконання імітаційних випробувань найкращої моделі в умовах, наближених до діючого виробництва, порівнюючи результати моделювання з реальними діями оператора; розробку інструментальних засобів та здійснення інтеграції фінальної моделі управління (зокрема, з пакета MatLab) у промисловий контролер для практичного впровадження.

Об'єктом дослідження є технологічний процес одержання (виробництва) сухого фосфорного ангідриду шляхом високотемпературного спалювання (окислення) жовтого фосфору, включаючи стадії спалювання, утилізації тепла та кристалізації продукту.

Предметом дослідження Предметом дослідження є інтелектуальні алгоритми та методи синтезу систем оптимального управління складними хіміко-технологічними процесами, зокрема, триетапна процедура створення гібридних та інтелектуальних моделей керування, що базується на використанні експертних знань (оцінки досвідчених технологів). Формуванні матриці планування повного факторного експерименту (ПФЕ) як основи знань. Застосуванні методів штучного інтелекту (нечіткі алгоритми, нейронні мережі) для розробки моделі процесу управління, що дозволяє виключити необхідність у створенні традиційної аналітичної математичної моделі самого технологічного процесу.

Новизна отриманих результатів дослідження полягає у розробці та теоретичному обґрунтуванні нового підходу до створення систем оптимального управління складними хіміко-технологічними процесами, які неможливо адекватно описати традиційними математичними моделями. Ключові елементи наукової новизни:

- запропоновано використовувати інтелектуальні технології безпосередньо для синтезу моделі процесу управління, а не для ідентифікації складної математичної моделі самого технологічного процесу (P_2O_5);
- розроблено методологію передачі знань, досвіду та інтуїції досвідчених технологів у базу знань інтелектуальної системи через інструмент матриці планування повного факторного експерименту (ПФЕ), що значно спрощує та здешевлює етап створення моделі.
- обґрунтовано та деталізовано триетапну процедуру, що дозволяє інтегрувати різні методи ШІ (нечіткі алгоритми, нейронні мережі) для підвищення адекватності та надійності керуючих алгоритмів.
- вперше запропоновано та апробовано підхід до інтеграції моделей управління, розроблених у пакеті MatLab (Simulink), безпосередньо у промисловий контролер, забезпечуючи швидке перенесення результатів теоретичного моделювання у реальне виробництво.

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

Наукова підтримка обраного напрямку дослідження забезпечена його включенням до тематичного плану науково-дослідних робіт Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ). Робота повністю відповідає ключовим пріоритетам кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, а її актуальність і практична цінність додатково обґрунтовуються тим, що вона є подальшим розвитком і логічно продовжує результати, отримані в ході виконання державної бюджетної наукової теми.

Практичні значення дослідження полягає у можливості безпосереднього впровадження його результатів у промислове виробництво, що приведе до значних економічних та технологічних ефектів. Ключові практичні результати включають створення діючої інтелектуальної системи оптимального управління. Розроблені інтелектуальні алгоритми (на основі нейронних мереж, нечіткої логіки та експертних знань) дозволяють створити ефективну систему автоматичного керування, яка здатна вести технологічний процес виробництва P_2O_5 (спалювання фосфору) в оптимальних режимах без постійного втручання людини. Це призводить до підвищення економічної ефективності виробництва шляхом забезпечення оптимальних режимів роботи агрегатів, що, в свою чергу, веде до зменшення питомих витрат ресурсів (економія природного газу, електроенергії до 50%) та збільшення виходу і покращення якості кінцевого продукту (кристалічного P_2O_5). Крім того, розроблена методологічна основа для інших виробництв (триетапна процедура створення інтелектуальних моделей управління та методика використання матриці ПФЕ для формалізації знань експертів) є універсальною та може бути застосована для швидкого створення систем оптимального управління на інших складних промислових об'єктах. Інструментальна база для впровадження, зокрема створення інструментальних засобів для інтеграції моделей з MatLab/Simulink у промислові контролери (PLC), забезпечує практичну реалізованість розроблених алгоритмів на діючих виробничих майданчиках.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота має традиційну структуру та містить: вступ, 7 основних розділів, загальні висновки, список використаних джерел (включає 9 найменувань). Основний текст роботи займає 82 сторінок, які ілюстровані 53 рисунками та містять 18 таблиць.

РОЗДІЛ 1

ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1. Фізико-хімічні особливості фосфорного ангідриду

Взаємодія фосфору з киснем залежно та умовами веде до утворення різних продуктів. При згорянні фосфору надлишку кисню (або повітря) виходить його вищої оксид – фосфорний ангідрид (P_2O_5). Навпаки, горіння при нестачі повітря або повільне окиснення дає головним чином фосфористий ангідрид (P_2O_3).

Має собою білий порошок, дуже отруйний. Він надзвичайно енергійно притягує вологу і тому часто застосовується як осушувач газів. Разом з тим P_2O_5 у багатьох випадках забирає від різних речовин також хімічно зв'язану воду, чим користуються при отриманні деяких сполук. Теплота утворення P_2O_5 із елементів становить 1490 кДж/моль. Визначення молекулярної ваги фосфорного ангідриду в парах вказує на подвоєну формулу – P_4O_{10} .

Твердий фосфорний ангідрид – (P_2O_5)_n – відомий у трьох кристалічних модифікаціях. Перша, на вигляд схожа на сніг, складається з окремих молекул P_4O_{10} , пов'язаних один з одним лише міжмолекулярними силами, вона досить легко виганяється (т. возг. 359°C).

При нагріванні цієї форми до 400°C у запаяній трубці виходить полімерна форма, утворена нескінченними шарами тетраедрів PO_4 із загальними (трьома з чотирьох) атомами кисню.

Тривале витримування цієї форми в запаяній трубці при 450°C супроводжується її переходом в іншу полімерну форму. Це найстійкіша модифікація фосфорного ангідриду.

Фосфорний ангідрид, що надходить у продаж, зазвичай є сумішшю першої і другої форм, більш-менш забруднену домішками води і продуктів неповного згорання фосфору. Очищення P_2O_5 здійснюється його сублимацією в швидкому струмі сухого кисню (причому виходить перша форма). Чистий фосфорний ангідрид не має запаху.

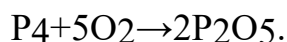
Зі порівняння видно, що з інтенсивності осушуючого впливу P_2O_5 далеко перевершує всі інші речовини. Однак при користуванні технічним продуктом слід враховувати можливість забруднення газів, що очищаються, фосфористим воднем (через наявність у P_2O_5 домішки нижчих оксидів фосфору).

У багатьох випадках не виключена можливість протікання при сушінні хімічних процесів. [1]

При високих концентраціях фосфорного ангідриду у системі $P_2O_5-H_2O$ мають місце складні рівноваги між різними кислотами фосфору. У розплавленому (або склоподібному) стані жодна з кислот не є індивідуальною хімічною сполукою. За іншими даними, система, що розглядається, складається з суміші H_3PO_4 з різними лінійно полімеризованими фосфорними кислотами, що мають в молекулі до 10 і навіть більше атомів фосфору.

Азеотропна суміш фосфорного ангідриду з водою, що кипить при $869^\circ C$, містить 92% P_2O_5 і приблизно відповідає складу $3P_2O_5 \cdot 2H_2O$.

Окислення фосфору киснем у повітрі є ланцюговою реакцією і може проходити з вибухом:



Фосфорний ангідрид (п'ятиокис фосфору) $P_2O_5(P_4O_{10})$ -молекулярна вага 142 (111) у.о. - найважливіший оксид фосфору. Фосфорний ангідрид (P_2O_5) – біла кристалічна або аморфна речовина. Температура плавлення $563^\circ C$, температура сублимації $360^\circ C$, щільність 2,39. На фосфорних заводах P_2O_5 утворюється при горінні фосфору надлишку кисню у вигляді білого задушливого диму; при взаємодії із водою він утворює фосфорну кислоту.

Отруйність його залежить від домішок фосфору та інших сполук його неповного окислення. Він утворюється в результаті горіння фосфору при нестачі повітря або за повільного окислення фосфору при звичайних температурах. Це біла схожа на віск кристалічна маса. Він отруйний. Температура плавлення 24° , температура кипіння $175^\circ C$. При нагріванні його у повітрі утворюється фосфорний ангідрид [5].

П'ятиокис фосфору стійкий до дуже високих температур. При нагріванні твердої $P_2O_5(P_4O_{10})$ можуть відбуватися її фазові перетворення та перехід з одного агрегатного стану в інший, але розпад на оксиди іншого типу не відбувається. Фосфорний ангідрид являє собою білий кристалічний порошок (5-50мкм), що відрізняється винятковою гігроскопічністю.

Теплота утворення P_2O_5 із фосфору (ккал/моль):

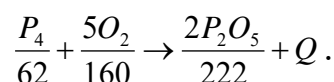
Форма P_2O_5	$\Delta H^\circ 298$
Тверда	720
Н-форма(тверда)	717 ± 5
Газоподібна	687 ± 5

Мольна теплоємність газоподібного фосфорного ангідриду (при 631-1371°K) складає $C_p = 73.6 \pm \text{кал}/(\text{моль} \cdot \text{град})$, питома теплоємність при (при 631-1371°K) рівна $c_p = 0.259 \text{кал}/(\text{г} \cdot \text{град})$.

Фосфорний ангідрид використовується як осушувач газів та рідин (сильний водовіднімний засіб). У невеликих кількостях присутні у деяких добривах. Якість фосфорного ангідриду має задовольняти вимогам основних споживачів (нафтопереробка, промисловість основного органічного синтезу та інших хімічних виробництв) [10].

1.2. Опис технологічного процесу

Процедура отримання фосфорного ангідриду з фосфору складається з окислення (спалювання) фосфору за реакцією:

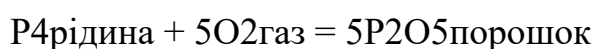


Окислення (спалювання) фосфору реакції до P_2O_5 без присутності в ньому нижчих оксидів фосфору можна отримати тільки при температурах вище 773-873°K і надлишку кисню не менше 30%.

Вихідна сировина для отримання фосфорного ангідриду наведена у таблиці 1.1

У існуючих виробництвах ТФК (термічної фосфорної кислоти) обидві ці стадії проводять у одному апараті – вежі спалювання. У ОППУ ці стадії розділені з різних апаратів. Спалювання елементарного фосфору проводиться в камері спалювання (топці) з подальшим охолодженням продуктів згоряння з метою утилізації тепла згоряння фосфору в котлі-утилізаторі та осадження кристалів P_2O_5 у газоході-економайзері.

Спалювання фосфору - гетерогенний екзотермічний процес, що протікає за рівнянням:



Характеристика вихідної сировини

Найменування сировини, матеріалів та напівпродуктів	ГОСТ, ОСТ, ТУ, регламент чи методика на підготовку сировини	Показники обов'язкові для перевірки	Регламентовані показники з допустимими відхиленнями
1	2	3	4
жовтий фосфор	ГОСТ8986-82(СТ СЕВ3371-81)	Зовнішній вигляд	Парафіноподібна маса від світло-жовтого до зелено-жовтого кольору
		Масова частка фосфору, % не менше	99.9
		Масова частка шламу, % не більше	відсутність
Стиснене осушене повітря		Пара води, г/м ³	Не більше 0.2
Дистильована вода		Жорсткість, мг*екв/л,	Не менше 0.5

Ступінь окиснення фосфору залежить від температури в зоні горіння та від швидкості дифузії стисненого повітря до поверхні рідкого фосфору. За недостатнього доступу кисню або за надто низьких температур можливе утворення нижчих оксидів фосфору, таких як P_2O_3 або змішані продукти окиснення, що негативно впливає на якість кінцевого продукту та ускладнює подальші технологічні операції.

Щоб забезпечити повноту згорання та виключити ймовірність утворення нижчих оксидів, процес здійснюють при температурі 1000–1400 °С у умовах двократного надлишку повітря. Такий режим гарантує інтенсивне окиснення фосфору до ортооксиду (P_2O_5), стабільність полум'я та достатню швидкість масообміну між газовою фазою і поверхнею розплаву.

Крім того, підвищена температура сприяє зменшенню в'язкості рідкого фосфору та покращує його розпилення, що збільшує площу контакту з повітрям і прискорює реакцію. Контрольоване подавання повітря та оптимізація турбулентності в зоні горіння дозволяють підтримувати стійкий температурний профіль, мінімізувати локальні зони нестачі кисню та отримувати максимально чистий оксид фосфору, придатний для подальшого виробництва фосфорної кислоти чи інших продуктів.

Зі складу жовтого фосфору цеху №5 по трубопроводах, що обігріваються, фосфор надходить у дозаторне відділення. Загалом у дозаторному відділенні встановлено 8 сховищ-дозаторів, ємністю 32 м³ кожне, по 4 ємності на кожному нитку. Сховища-дозатори забезпечені лопатевими мішалками, які працюють періодично і створюють гомогенну суміш. Для підтримки фосфору в розплавленому стані дозатори виконані з сорочкою, якими циркулює вода з температурою 70°-90° С. На рисунку 1.1 представлена технологічна схема отримання сухого P₂O₅ із застосуванням одного апарату (вежі) для спалювання фосфору та поглинання фосфорного ангідриду.

Температура та тиск внутрішнього середовища у дозаторах контролюються приладами. Вода для обігріву сорочок гріється у збірці паром, а потім подається насосами в сорочки дозаторів. Фосфор з дозатора, після попереднього там відстоювання не менше 2 годин, надходить системою трубопроводів у видатковий збірник (монжус). З видаткового збірника по фосфоропроводу, що обігрівається, подається в камеру згоряння фосфору поз.402. Перед спалюванням фосфор проходить через випарник, розміщений усередині камери згоряння. Випаровування фосфору відбувається за рахунок тепла його ж згоряння. Спалювання фосфору відбувається шляхом його розпилення стисненим повітрям із тиском не менше 0,45 МПа. Стиснене повітря перед подачею на форсунку підігрівається в теплообміннику поз.Т-05 до температури не менше 353°К, яка контролюється приладом поз.Т-1707.

Тиск стисненого повітря, що подається до форсунки, контролюється та сигналізується на ЦПУ приладом. При зниженні тиску автоматично вимикається подача фосфору до башти спалювання.

Спалювання пароподібного фосфору виключає необхідність застосування форсунок для його розпилювання та стиснутого повітря. Як дуття для спалювання фосфору використовуються рециркуляційні гази після циклону-осадника з підживленням їх технічним киснем і коригуванням складу осушеним стисненим повітрям, з метою доведення концентрації кисню в дутті до 21%об. Витрата стисненого повітря при цьому не перевищує 0.0314нм³/кг фосфору, що спалюється. Використання рециркуляційних газів з підживленням їх киснем виключає необхідність в осушенні дуття, так як вміст вологи рециркуляційних газів дуже низький - 0.00001г/нм³.

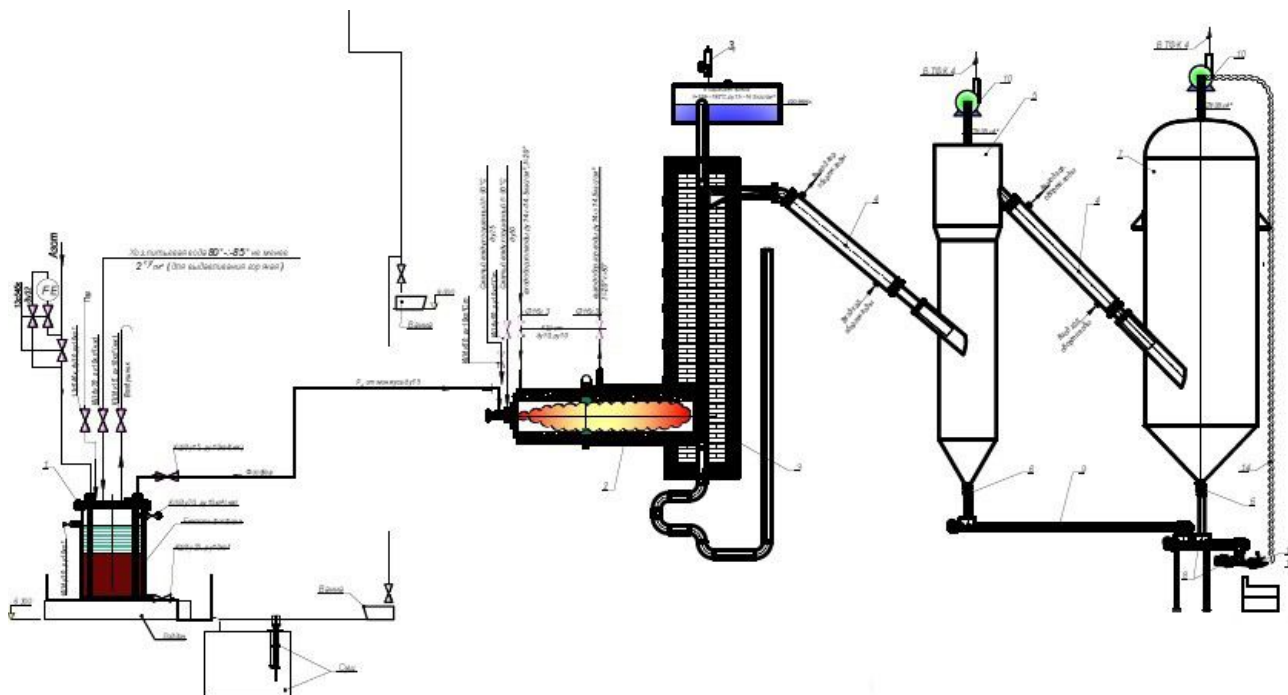


Рис. 1.1. Технологічна схема виробництва сухого P₂O₅

Дуття з таким низьким вмістом вологи не створює умов для утворення при спалюванні фосфору парів поліфосфорних і фосфорних кислот, і охолодження таких топкових газів не призведе до конденсації кислот на холодних (охолоджуваних) поверхнях і до туманоутворення.

Введення дуття в камеру згоряння фосфору проводиться так само тангенційно. Камера згоряння фосфору виконана з нержавіючої сталі та має водоохолоджувальну сорочку для захисту зовнішніх стінок камери від впливу високих температур (1912°C-1850°C). Як охолодна вода використовується циркуляційна (господарська питна) вода.

Зниження температури в камері згоряння фосфору досягається такими конструктивними особливостями: розміщення у внутрішній порожнині камери згоряння теплообмінних поверхонь; введення пароподібного фосфору і дуття проводиться по довжині камери 2-х точках, причому, в першу точку вводиться 40% фосфору та 60% дуття. У другу - кількість фосфору і дуття, що залишилася. Гази, що утворюються в камері згоряння фосфору, після передачі тепла охолодній воді, з температурою 1570°C-1590°C надходять у котел утилізатор Г-подібної конструкції. У середині вертикальної, найбільш гарячої і довгої частини апарату розташовані змійовики з водою, що охолоджується, і в нижній, горизонтальній частині котла, також розташовані змійовики з охолоджуваною водою.

Охолодження газів від згоряння фосфору в котлі-утилізаторі проводиться до температури 450°C-480°C і фосфорний ангідрид, що утворився, знаходиться в газоподібному стані. Внутрішня поверхня котла-утилізатора футерована вогнетривкою шамотною цеглою, а в проміжку між корпусом апарату та цеглою знаходиться шамотний порошок. З котла-утилізатора газу надходять у газохід-економізатор з водоохолоджувальною сорочкою. Тут газу піддаються подальшому охолодженню до температури 160-180°C метою осадження фосфорного ангідриду в кристалічному вигляді P₂O₅. Охолодження газів проводиться циркуляційною водою із «сорочки» камери згоряння. Після газоходу-економізатора газу з кристалічним P₂O₅ надходять у циклон-осаджувач. У ньому під дією відцентрових сил кристалічний P₂O₅ відокремлюється від газової фази і збирається в бункері циклону-осадника. Газу прямують до вентилятора і далі повертаються до камери згоряння. Незначна частина газів відбирається на продування для запобігання збільшення в них кількості азоту та збереження постійного обсягу дуття. Кристалічний P₂O₅ з бункера циклону-осадника через шлюзовий затвор надходить на течку, що подає фосфорний ангідрид на фасування. Основною особливістю у виробництві сухого P₂O₅ є відведення великої кількості тепла, що виділяється при спалюванні фосфору. Залежно від методу відведення тепла розрізняють циркуляційний і випарний способи виробництва фосфорного (і поліфосфорного) ангідриду, що виникли одночасно в 30-х роках і надалі значного вдосконалення. Стоки, що утворюються в процесі роботи ОППУ, занурювальні насоси з приямка перекачуються в існуючу збірку кислих стоків. І далі за існуючою схемою стоки перекачують у цех №7 на нейтралізацію.

Висновки до розділу 1

В цьому розділі, описано властивості жовтого фосфору та умови його зберігання. Детально розглянуто реакцію окислення фосфору до P₂O₅, залежно від умов, описано фізичні властивості P₂O₅ та наведені термодинамічні дані. Описано процедуру отримання P₂O₅ із фосфору, яка включає окислення фосфору при високих температурах, охолодження газів з метою утилізації тепла та осадження P₂O₅. Наведено опис ключових апаратів та зазначено конструктивні особливості, спрямовані на контроль температури та відведення великої кількості тепла.

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

2.1 Огляд проблем, які виникають в процесі автоматизації виробництва

В процесі автоматизації виробництва фосфорного ангідриду виникає низка специфічних і критичних проблем, які вимагають застосування інноваційних інтелектуальних рішень. Насамперед, існують проблеми, пов'язані зі складністю об'єкта та моделюванням. Ключова проблема полягає у тому, що традиційні методи розробки адекватних аналітичних математичних моделей високотемпературних хімічних процесів, таких як спалювання фосфору, є тривалими, високозатратними і часто неуспішними на практиці, що унеможлиблює використання класичних методів оптимального управління. Ця складність посилюється складністю вимірювання параметрів: температура всередині пальника досягає екстремальних значень (до 2000 °C), що робить пряме замірювання цього ключового параметра вкрай складним, змушуючи використовувати непрямі методи оцінки (за температурою на виході з пальника). Крім того, витрати охолоджувальної води, пари, що утворилася, та відхідних газів також не вимірюються напряму і мають оцінюватися опосередковано (за тиском або сумарними витратами сировини). По-друге, існують проблеми технологічних обмежень та ризиків. Процес вимагає строгого підтримання режиму (температурний діапазон 1000 °C - 1400 °C та двократний надлишок повітря) для запобігання утворенню небажаних нижчих оксидів фосфору, які погіршують якість продукту. Основна особливість виробництва — необхідність відведення величезної кількості тепла згоряння, що вимагає точного і надійного управління системою охолодження (водоохолоджувальна сорочка та котел-утилізатор).

Також варто відзначити високий ризик аварійних ситуацій: проведення активних експериментів для ідентифікації моделей в умовах діючого виробництва нереально через ризик аварій при зміні технологічних змінних.

По-третє, автоматизація покликана вирішити проблеми, пов'язані з людським фактором, оскільки, хоча досвідчені оператори здатні керувати процесом, їхня діяльність схильна до впливу втоми, недостатньої психологічної стійкості та повільної реакції, що є неприпустимим для такого високоризикового та енергоємного виробництва. Саме ці проблеми обґрунтовують необхідність застосування інтелектуальних технологій, які використовують експертні знання для розробки моделі управління напряду .

2.2 Постановка завдання дослідження

У зв'язку з чим у цій роботі було поставлено мету подальшого вдосконалення та розвитку інформаційних технологій з урахуванням особливостей управління технологічними процесами. Для досягнення цієї мети розроблено інструментальні засоби інтеграції моделей управління із Simulink у промислові контролери [10].

Аналіз деяких публікацій показав, що ІТ можна використовувати для розробки безпосередньо моделі оптимального управління процесом. Тобто розглянуті технології дозволяють розробляти відразу ж алгоритми управління, на відміну від традиційного ланцюжка: розробка структури моделі процесу → проведення експериментальних досліджень на об'єкті → ідентифікація моделі → формулювання оптимізаційної задачі → підбір методу оптимізації → розробка алгоритму оптимального управління.

Традиційний підхід передбачає тривалий (іноді кілька років), дорогий і який завжди успішний шлях створення системи оптимального управління. Використання ІТ дозволяє вирішувати аналогічні завдання відразу ж і як показав досвід досить успішно. Справа в тому, що методи штучного інтелекту передбачають використання знань, досвіду та інтуїції людей-експертів, які добре знайомі з предметною областю. Тобто, тут використовується так званий ефект «готових знань». На відміну від цього, розробка математичної моделі (основного компонента системи) є процесом створення «нових знань», і тому вимагає досить тривалого часу на проведення теоретичних досліджень, а також великих матеріальних і трудових витрат для проведення експериментальних досліджень та ідентифікації моделі. До того ж, досвідчені оператори-технологи за час тривалої роботи навчилися вести технологічний процес в оптимальних режимах при різних вихідних ситуаціях.

Передача «готових знань» від людей-експертів в базу знань інтелектуальної системи значно спрощує створення інтелектуальних систем, а їх експлуатація дозволяє виключити ефект «людського фактора» при управлінні процесом (це такі властивості людського організму як: втома, недостатньо швидка реакція, недостатня психологічна стійкість, сон причини).

Застосовуючи основну ідею роботи (розробка замість моделі технологічного процесу моделі процесу управління ним) та розвиваючи наявні методи ІТ, була запропонована наступна триетапна процедура створення систем оптимального керування технологічними процесами.

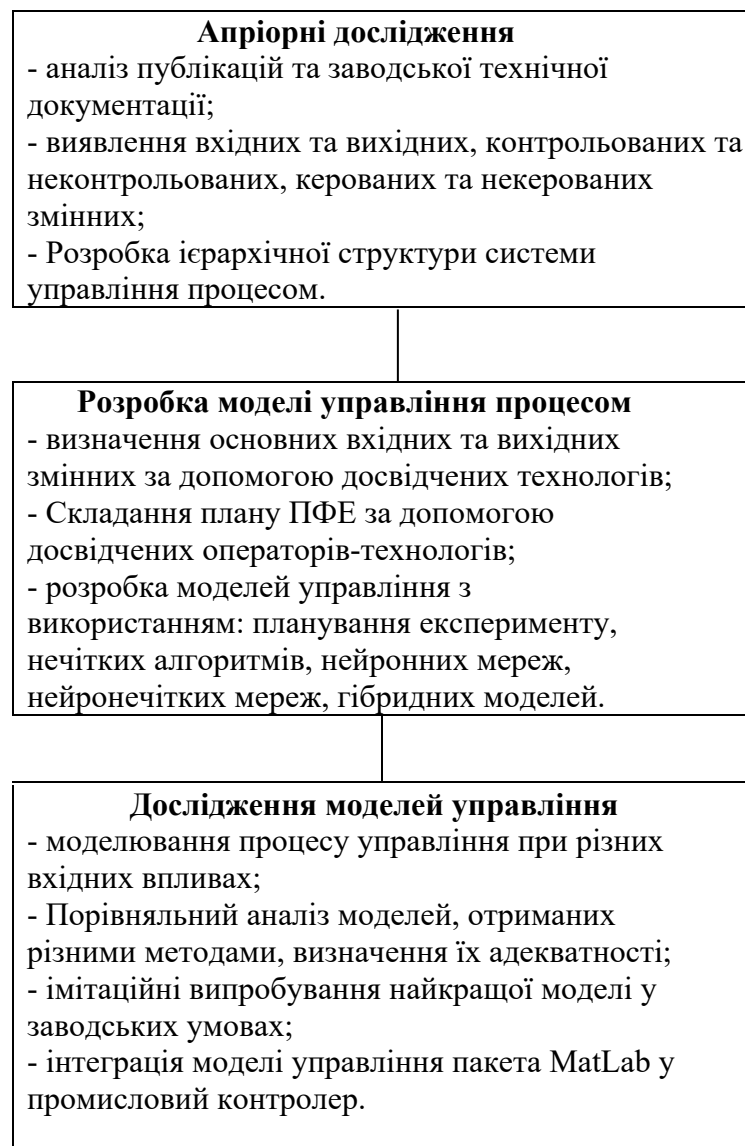


Рис.2.1. Триетапна процедура створення гібридних та інтелектуальних систем управління технологічними процесами

Як правило, діючі технологічні процеси мали пройти тривалий етап наукових досліджень, дослідно-промислових та промислових випробувань, перш ніж вони були впроваджені у виробництво. Залишилися матеріали цих досліджень, а також спроби створення математичних моделей даного процесу.

Отже, для досягнення поставленої мети — розробки та впровадження інтелектуальної системи оптимального управління технологічним процесом виробництва P2O5 — необхідно виконати три основні етапи робіт, кожен з яких включає специфічну послідовність завдань.

Провести аналіз об'єкта керування, що включає визначення та оцінку всіх змінних процесу: виявлення вхідних (керованих, некерованих) та вихідних (контрольованих) змінних для ключових апаратів, а також оцінку інерційності об'єкта та його класів. Завершується етап складанням ієрархічної структури майбутньої інтелектуальної системи управління та формулюванням основної мети управління (цільової функції).

Розробити інтелектуальну модель управління, реалізувати збір експертних знань через опитування досвідчених операторів-технологів для визначення основної мети управління та ключових керуючих змінних. Потім здійснити формалізацію знань шляхом складання матриці планування повного факторного експерименту (ПФЕ), де експерти надають оцінки оптимальних керуючих дій для різних комбінацій нормалізованих вхідних змінних. На основі цієї матриці виконати синтез моделей управління з використанням різних методів ШІ, таких як планування експерименту, нечіткі алгоритми, нейронні мережі або нейронечіткі мережі.

Дослідити, порівняти синтезовані моделі на чутливість, стійкість та однозначність. Далі необхідно здійснити порівняльний аналіз та оцінку адекватності моделей шляхом розрахунку вихідних змінних і їх порівняння з експертними оцінками для визначення абсолютної помилки моделювання та вибору найбільш адекватної моделі. Після цього виконати імітаційні випробування найкращої моделі в умовах, максимально наближених до реального виробництва, порівнюючи результати керуючої змінної моделі з діями досвідченого оператора. Завершальним кроком є інтеграція та впровадження — розробка інструментальних засобів та інтеграція фінальної моделі (наприклад, з пакета MatLab) у промисловий контролер (PLC) для практичного застосування на виробництві.

Висновки до розділу 2

У даному розділі, обґрунтування актуальності через аналіз проблем, систематизовано проблеми, які ускладнюють автоматизацію виробництва P2O5, розділивши їх на категорії.

Складність моделювання - неможливість розробки адекватних аналітичних математичних моделей високотемпературного процесу традиційними методами.

Складність вимірювань - необхідність використання непрямих методів оцінки для ключових параметрів, таких як температура в пальнику (до 2000°C) та витрати газів/води, через складність прямого вимірювання).

Технологічні обмеження та ризики - жорсткі вимоги дотримання температурного режиму та надлишку кисню для уникнення P2O3, а також високий ризик аварій, що забороняє проведення активних експериментів для ідентифікації.

Здійснено постановку завдання дослідження, сформульовано мету подальшого вдосконалення та розвитку інформаційних технологій для управління процесами. Обґрунтовано інноваційний підхід — перехід від традиційного, тривалого та дорогого ланцюжка розробки системи управління до використання інтелектуальних технологій (ІТ). Введено та обґрунтовано концепцію використання "готових знань" (досвіду та інтуїції технологів-експертів) для розробки безпосередньо моделі оптимального управління процесом, що дозволяє вирішувати завдання швидше і успішніше, ніж при створенні "нових знань" (математичної моделі).

Представлено та описано триетапну процедуру створення гібридних та інтелектуальних систем управління, що включає: апіорні дослідження та системний сналіз (аналіз документації, виявлення змінних, розробка структури), розробку моделі управління процесом (визначення змінних з експертами, складання матриці ПФЕ, синтез моделей на базі ІІІ) та дослідження доделей управління (порівняльний аналіз, імітаційні випробування, інтеграція моделі з MatLab у промисловий контролер).

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ОБ'ЄКТУ УПРАВЛІННЯ

3.1 Теоретичні основи планування повного факторного експерименту

Необхідний ретельний аналіз всієї інформації для того, щоб використовувати її при розробці інтелектуальних систем управління. Особливо це важливо за умови можливого створення гібридних систем управління. На цій же стадії необхідно піддати аналізу процес, що досліджується, як об'єкт управління з виявленням вхідних та вихідних, контрольованих та неконтрольованих, керованих та некерованих змінних. При цьому обов'язковим є оцінити інерційність об'єкта по різних каналах, клас об'єкта, ступінь повноти інформації про змінні об'єкти, робочий діапазон зміни змінних об'єктів тощо. Після ретельного розгляду наявної інформації необхідно скласти структуру майбутньої системи управління, що значно полегшить подальшу роботу. З другого етапу створюється модель процесу управління. За допомогою досвідчених експертів (оператори-технологи, або ІТП цеху або заводу) визначається основна мета управління (аналог цільової функції в оптимізаційних задачах), яка, як правило, відома і яку зазвичай прагнуть досягти досвідчені оператори. Потім методом ранжирування із загального переліку всіх типів змінних визначаються тим, які, на думку експертів, є основними для цього об'єкту (процесу). Головною метою другого етапу є складання матриці планування повного факторного експерименту (ПФЕ). За допомогою матриці ПФЕ створюється модель управління об'єктом (процесом). При двох вхідних змінних складається матриця планування ПФЕ. Таблиці є основою для розробки інтелектуальних систем, тому що в них зосереджений багаторічний досвід, знання та інтуїція людей-експертів у конкретній предметній галузі. Від якості матриці ПФЕ залежатиме ефективність роботи системи управління. Величини: 0,0; 0,5; 1,0 означають мінімальне, середнє та максимальне значення вхідних змінних X_1 та X_2 . Нормалізація в діапазоні від 0 до 1 вхідних та вихідних змінних проводиться за формулою:

$$\bar{x} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (3.1)$$

де \bar{x} - нормалізоване (от 0 до 1) значення вхідної чи вихідної змінної;

x – поточне значення змінної;

x_{\min} , x_{\max} – мінімальне та максимальне значення змінної.

Створення матриці планування експериментів набагато зручніше для експертів, ніж рекомендоване у всіх підручниках та публікаціях складання правил нечітких продукцій. При цьому експерту немає необхідності вигадувати нескінченні терми: («дуже багато», «дуже-дуже мало», «цілком нормально» тощо) – він просто ставить значення вихідної (керуючої) змінної в діапазоні від 0,0 до 1,0. При цьому матриця планування ПФЕ може бути використана для чотирьох різних методів створення моделі управління: планування експерименту, експертні системи, нейронні мережі, нейронечіткі алгоритми.

На відміну від добре відомого традиційного способу планування експерименту, складання матриці планування ПФЕ за допомогою експертів значно прискорює і здешевлює цю процедуру.

Експерти проводять так звані «мисленні експерименти» замість дорогих активних експериментів, що реально проводяться. Крім того, необхідно враховувати, що проведення активних експериментів в умовах діючого виробництва нереально через можливе виникнення аварійних ситуацій при зміні змінних процесу від мінімальних їх значень до максимальних значень і назад. До того ж на багатьох підприємствах просто немає можливості змінювати змінні згідно матриці планування ПФЕ.

Слід звернути увагу, що вихідні значення Y_i насправді управляють змінними, тому матриця планування відображає модель управління процесом для всіх запланованих експертами поєднань вхідних змінних. Для розрахунку значень у проміжних поєднаннях вхідних змінних (наприклад, для $X_1=0,21$ та $X_2=0,74$) необхідно синтезувати модель управління процесом, що є головним завданням другого етапу. Важливим вважається і те, що матриця планування ПФЕ може бути використана для створення моделі керування чотирма різними методами: планування експерименту, нечітких алгоритмів, нейронних мереж, нейро-нечітких мереж, гібридних моделей.

Найбільш ефективно спільно з інтелектуальними моделями використовувати відомі математичні залежності, виявлені першому етапі досліджень. При цьому необхідно бути впевненим у тому, що такі залежності адекватно відображають ті чи інші фізико-хімічні закономірності конкретного процесу. На етапі виконується вивчення створених моделей управління. У цьому виконуються такі події.

Отримані моделі піддаються ретельному дослідженню та аналізу їхньої чутливості, стійкості, однозначності. Для чого проводиться моделювання процесу управління за різних змін вхідних змінних, будуються криві зміни вихідних змінних при зміні вхідних змінних, і проводиться їх аналіз спільно з експертами.

Після завершення дослідження моделей, отриманих різними методами, проводиться порівняльний аналіз з їхньої адекватності. Для чого за допомогою моделей розраховуються вихідні змінні при значеннях вхідних змінних, взятих з матриці планування ПФЕ та порівнюються з оцінками, даними експертом. Після чого формується матриця порівняння (див. таблицю 1.3), що дозволяє розрахувати величину помилки моделювання у різний спосіб. Наприклад, абсолютна похибка у відсотках розраховується за формулою:

$$\delta = 100 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y^e - Y^p|, \quad (3.2)$$

де Y^e і Y^p - відповідно експериментальні та розрахункові значення вихідних змінних.

Найбільш адекватна модель має пройти імітаційні випробування у умовах чинного виробництва. При цьому на вхід моделі подають дійсні вхідні змінні, зняті з вимірювальної апаратури промислового агрегату, а результати моделювання (вихідна керуюча змінна) порівнюється зі значенням управління, реально здійснюваним досвідченим оператором-технологом. У випадку задовільного результату імітаційних випробувань проводиться інтеграція моделі в промисловий контролер. В іншому випадку, все починається спочатку - повернення до першого етапу, і уточнення всіх параметрів моделі. Матриця порівнянь є ключовим інструментом на етапі дослідження, і її основна мета — оцінити адекватність та точність синтезованих інтелектуальних моделей шляхом прямого порівняння їхніх розрахункових результатів з оцінками, наданими експертами-технологами, які слугують "експериментальними" або базовими значеннями. На основі цієї матриці розраховуються узагальнюючі критерії (наприклад, сумарна або середня абсолютна помилка), які дозволяють кількісно оцінити адекватність кожної моделі. Мета порівняння полягає у виборі тієї моделі (наприклад, нейронна мережа чи нечіткий регулятор), яка забезпечує мінімальну помилку порівняно з експертними знаннями, оскільки саме ця модель буде вважатися найбільш адекватною і перейде на етап імітаційних випробувань.

3.2 Концепція синтезу інтелектуальних алгоритмів управління технологічними процесами одержання P₂O₅

Відповідно до запропонованої триетапної процедури (рисунок 2.1) спочатку необхідно провести апріорні дослідження, що було зроблено вище.

Наступним етапом є розробка моделей управління технологічним процесом, для чого спочатку необхідно виявити всі вхідні та вихідні змінні процесів, що протікають (рисунок 3.1).

Процес відстоювання у дозаторі: у зв'язку з цим фосфор у дозаторі відстоюється при температурі 70°C – 85°C. Відповідно, за хімічними властивостями фосфор при температурі вище +70°C перетворюється на твердий стан, а якщо нижче +43°C, то перетворюється на рідкий вид фосфору. У дозаторі фосфор відстоюється разом із водою та азотом, оскільки азот запобігає появі отруйного газу – фосфіну. Щільність фосфору в дозаторі розподіляється так, що він осідає на дні, тоді як вода за високої температури на 30 сантиметрів заповнює верхню частину дозатора, а між ними в дозаторі міститься азот. Оскільки температура в дозаторі становить 70°C, фосфор і вода не змішуються.



Рис. 3.1. Етапи одержання сухого P₂O₅

У зв'язку з тим, що процес відстоювання є періодичним, і в ньому не протікають ніякі хімічні перетворення – він є простим об'єктом із запізненням і служить як дозатор, ми не розглядатимемо його як об'єкт управління. У зв'язку з чим нам не потрібно проводити експериментальні дослідження з метою синтезу системи управління ним.

З дозатора у рідкому вигляді виходить фосфор і подається до пальника. У пальник подається з двох сторін стиснене повітря, і із зовнішніх сторін йде холодна вода, яка по круговим потокам виходить гарячим. Цей принцип триває безперервно для того, щоб тримати постійну температуру. А стиснене повітря проникає всередину пальника з двох сторін: принцип дії першого - по центру розпорошує фосфор, а другого - периферія, подібний до вихрового образу запалює фосфор.

Це забезпечить повну якість фосфору. У пальнику фосфор горить при температурі від 1500°C до 2000°C. Після горіння фосфор у газоподібному вигляді прямує у котел-утилізатор для того, щоб охолоне.

Процес спалювання є основним процесом, в якому, власне, і відбувається отримання ангідриду фосфору в газоподібному стані. При опитуванні досвідчених технологів було визначено такі основні вхідні змінні:

- X1 – витрата рециркуляційних газів;
- X2 – витрата стисненого повітря;
- X3 - витрата технічного кисню O₂;
- X4 – витрати жовтого фосфору дозатора.

Основний вихідний змінної, від якої залежить повнота згорання фосфору є температура у грільці, у зв'язку з тим, що температура всередині пальника дуже висока (до 2000°C) – заміряти її дуже складно, побічно про температуру в пальнику можна судити за температурою на виході з неї (до 600°C). Тому як вихідний змінний процес спалювання нами обрано температуру на виході з пальника (або на вході котла) – Y1.

Котел-утилізатор складається з футерованої цегли (для посилення вогнестійкості матеріалів) усередині якої знаходиться труба. У цій трубі тече холодна вода, і між цеглою і трубою є простір, через який проходить газоподібний фосфор. Вода, що проходить усередині труби, охолоджує гарячий фосфор. На верхній частині котла-утилізатора встановлено барабан, у якому рівень води становить половину його обсягу. Холодна вода сприяє підтримці температури утилізатора котла в рівномірному стані. Вода, що проходить крізь труби, зробивши цикл назад наводиться в барабан. Вода за низької температури входить у котел-утилізатор, а виходить за досить високої температури. Якщо в барабані є малий об'єм води, то труба може розплавитися. Для уникнення цього об'єм води потрібно завжди контролювати.

В якості вхідних приладів за допомогою досвідчених технологів були обрані наступні вхідні змінні:

X5 – витрата газів, що відходять з камери згорання. Так як ця витрата виміряти вкрай складно, побічно можна її визначити за загальною сумою витрат: рециркуляційних газів, стиснутого повітря та технічного кисню, тобто $X5 = X1 + X2 + X3$;

X6 - температура на вході в котел утилізатор, яка дорівнює температурі на виході з камери згоряння, тобто $X6 = Y1$;

X7 – витрата води, що охолоджує. У зв'язку з тим, що витрата води не вимірюється - опосередковано його можна оцінити по тиску вод на вході в котел-утилізатора, тобто $X7 = P_{BK}$.

Вихідними змінними процесу охолодження в котлі-утилізаторі є: температура на виході з котла - Y2 і витрата пари, що утворилася - Y3. У зв'язку з тим, що витрата пари не вимірюється – опосередковано її можна оцінити з його тиску – Pд.

Процес осадження, або кристалізації P2O5 відбувається в економайзері при подальшому охолодженні до температури нижче 160°C, а в циклоні відбувається лише відділення кристалічного P2O5 від рециркуляційних газів. Було визначено такі вхідні змінні:

X8 - витрата газів, що відходять від котла-утилізатора, при цьому

$$X8 = X1 + X2 + X3;$$

X9 - температура на вході в економайзер, яка дорівнює температурі на виході з котла утилізатора, тобто $X9 = Y2$;

X10 – витрата охолоджувальної економайзером води. У зв'язку з тим, що витрата води не вимірюється – опосередковано його можна оцінити тиску води на вході в економайзер, тобто $X10 = P_{Be}$;

Вихідними змінними процесу охолодження газів в економайзері є: температура на виході з економайзера - Y4 і витрата твердого ангідриду фосфору, що утворився - Y5.

Таким чином, запропонована концепція синтезу інтелектуальних моделей управління процесами отримання ангідриду фосфору дозволила виявити 10 вхідних та 5 вихідних змінних для процесів: спалювання, охолодження та осадження твердого P2O5.

Відповідно до запропонованої триетапної процедури на малюнок 2.1 синтезу інтелектуальних систем управління технологічними процесами в першому розділі, за допомогою досвідчених операторів технологів було виявлено основні вхідні та вихідні змінні процесів одержання сухого ангідриду фосфору. Таким чином, результатом досліджень, наведених у розділі 1 є виконання першого пункту другого етапу. Другим пунктом другого етапу є формування матриць планування повного факторного експерименту окремих процесів отримання сухого ангідриду фосфору.

Основним завданням розробки моделі управління є складання матриці планування повного факторного експерименту. Від якості матриці ПФЕ залежатиме ефективність роботи системи управління.

3.3. Розрахунок матеріального та теплового балансів виробництва ангідриду фосфору

У основу розрахунку покладено такі показники, прийняті з урахуванням практичних даних діючого виробництва фосфорної кислоти.

1. Масова частка P4 у фосфорі, що надходить на спалювання 99,9%.
2. Коефіцієнт надлишку повітря спалювання фосфору – 5,0.
3. Об'ємна частка в повітрі: кисню – 21%, азоту – 79%, (вмістом вологи в повітрі, що надходить, можна знехтувати).
4. Норма утворення фосфоровмісних стоків 0,9 м3 на 1 т кислоти.
5. Масова частка P4 у стоках 0,274 кг/м3.

У цьому маємо такі матеріальні потоки цехом (таблиця 3.1)

Таблиця 3.1.

Матеріальні потоки

№	Найменування потоку	Якісна характеристика	Витрата (кг/год)
1	Фосфор технічний	99,9%P4, 70-85°C	25-50
2	Вода госп.питтєва	75-85°C	0,374
3	Вода циркуляційна	173-190°C	400,87
4	Стиснене повітря	15-30°C	≤2,02
5	Рециркуляційні газы		≤438,07
6	Топкові газы	1570-480°C	554,81
7	Фосфорний ангідрид газоподібний	450-480°C	120,13
8	Пара	190°C; P=13кг/см ²	250-291
9	Фосфорний ангідрид кристалічний	160-180°C	
10	Вода дистильована		58,27
11	Азот		
12	Фосфорний ангідрид кристалічний товарний		57-114,12

Тоді матеріальний та тепловий баланси матимуть вигляд, показаний у таблицях 3.2 та 3.3

Таблиця 3.2

Матеріальний баланс

ПРИХІД			ВИТРАТА		
Найменування сировини, продуктів та напівпродуктів	кількість		Найменування сировини, продуктів та напівпродуктів	кількість	
	кг	нм ³		кг	нм ³
1. Стадія спалювання фосфору					
1. Фосфор техніч., у тому числі:	<u>50,0</u>	-	1. Фосфорний ангідрид (P ₄ O ₁₀)	120,132	9,5245
- P ₄	49,85	-	домішки	0,1582	-
2. Стиснене повітря, у тому числі:	0,15	-	2. Паливні гази, у тому числі:	434,521	340,819
- O ₂	<u>2,0295</u>	<u>1,5696</u>	- O ₂	51,4579	36,011
- N ₂	0,471	0,3296	- N ₂	383,063	304,808
3. Рециркуляційні гази, у тому числі:	1,5582	<u>1,24</u>			
	<u>438,075</u>	<u>338,926</u>			
- O ₂	51,1728	35,8115			
- N ₂	380,935	303,115			
- P ₄ O ₁₀	2	0			
- домішки	5,959	-			
	0,0082	-			
4. Кисень технічний, у тому числі:	<u>64,7065</u>	<u>45,3372</u>			
- O ₂	64,1367	44,8838			
- N ₂	0,5698	0,4534			
РАЗОМ:	554,811	385,833	РАЗОМ:	554,811	350,343

Продовження таблиці 3.2

3. Стадія осадження P ₄ O ₁₀ у циклоні.					
1. Фосфорний ангідрид (P ₄ O ₁₀)	120,132	-	1. Фосфорний ангідрид (P ₄ O ₁₀) обложений	114,12	-
2. Примеси		-	2. Домішки осаджені	0,1503	-
3. Топкові гази, у тому числі:	0,1582	340,819	3. Топкові гази на продування, у тому числі:	2,4404	1,8929
- O ₂	434,521		- O ₂	0,2851	0,2
- N ₂	51,4579	36,011	- O ₂	2,1283	1,6929
	383,063	304,808	- N ₂	0,0269	-
			- P ₄ O ₁₀	0,0001	-
			- домішки	438,08	338,929
			4. Топкові гази на рециркуляцію:		
			- O ₂	51,172	35,8115
			- N ₂	380,93	303,115
			- P ₄ O ₁₀	5,9732	-
			- домішки	0,0078	-
РАЗОМ:	554,811	340,819	РАЗОМ:	554,80	340,819

Таблиця 33

Тепловий баланс

ПРИХІД		ВИТРАТА	
Найменування статей приходу	кДж/час	Найменування статей витрати	кДж/час
Камера спалювання фосфору			
1. Тепло, що вноситься жовтим фосфором	3424	1. Втрати тепла через зовнішні поверхні камери спалювання	37867,6
2. Тепло, що вноситься стисненим повітрям	30,6	2. Винос тепла випарними поверхнями котла, встановленими в камері	189337,8
3. Тепло, що вноситься киснем технічним	1187,9	3. Винесення тепла теплообмінними поверхнями	100980,1
4. Тепло, що вноситься рециркуляційними газами	58332,2	4. Тепло, що витрачається на випаровування фосфору	21201,2
5. Тепло, що вноситься реакцією горіння фосфору	1199277,1		

Продовження таблиці 3.3

		5. Тепло, що вноситься топковими газами в котлі	912288,96
РАЗОМ:	1262251,8	РАЗОМ:	1261675,66
Котел-утилизатор			
1.Тепло, що вноситься топковими газами в котел-утилизатор	912288,96	1. Втрати тепла через зовнішні поверхні утилизатора котла 2. Винесення тепла, що утилізується. 3. Тепло, що вноситься топковими газами в газохід-економайзер	36491,6 621915,1 253882,3
РАЗОМ:	912288,96	РАЗОМ:	912289
Газохід-економайзер			
1.Тепло, що вноситься топковими газами в газохід	253882,3	1. Втрати тепла через зовнішні поверхні газоходу 2. Винесення тепла, що утилізується, з газоходу 3. Тепло, що вноситься топковими газами з газоходу-економайзера	7616,5 156144,7 90121,1
РАЗОМ:	253882,2	РАЗОМ:	253882,2
Циклон-осаджувач			
1.Тепло, що вноситься топковими газами в циклон	90121,1	1. Втрати тепла через зовнішні поверхні циклону 2. Винесення тепла осадженим у циклоні фосфорним ангідридом 3. Тепло вноситься топочними газами з циклону	10792 11830 67499,1
РАЗОМ:	90121,1	РАЗОМ:	90121,1

Дуже важливим для успішного ведення процесу отримання ангідриду фосфору є дотримання технологічних режимів, відпрацьованих у цеху №6 протягом налагодження та експлуатації напівпромислової установки. Дотримання цих норм, описаних у таблиці 2.4, дозволяє вести процес отримання ангідриду фосфору безпечно та ефективно.

Таблиця 3.4

Норми технологічного режиму

Найменування параметра	Одиниці вимірювання	Величина параметру	Примітки
1	2	3	4
1.Продуктивність по: -P4O10 -73%НЗРО4	кг/год	25-50 57-114.12 108-215.98	99.9%P4
2.Температура газів: - у камері спалювання фосфору	°C	1500-1900 1370-1590	

Продовження таблиці 3.4

1	2	3	4
поз.2 - на вході в котел-утилізатор поз.3 - на виході з котла-утилізатора поз.3 - на вході в циклон-осаджувач поз.5 - на виході з циклону-осадника поз.5 - перед вентилятором		450-480 160-180 150-160 140-150 120-140	
3. Коефіцієнт надлишку кисню у дутті для спалювання фосфору(£)		1.75-1.85	
4. Вологовміст дуття на основі рециркуляційних газів	г/нм ³	Не більше 0.00001	Вологовміст стисненого повітря осушеного ≤0.02г/нм
5. Вологовміст кисню технічного	г/нм ³	Не более 1.6x10 ⁻²³	
6. Температура жовтого фосфору на вході до камери спалювання фосфору	°C	70-85	
7. Кількість стисненого повітря, що подається в дуття	кг/год нм ³ /год	≤2.0295 ≤1.5696	
8. Температура стисненого повітря на вході до камери спалювання	°C	15-30	
9. Кількість кисню, що подається в дуття	кг/год нм ³ /год	≤64.7065 ≤45.3372	
10. Температура кисню на вході до камери спалювання фосфору	°C	10-30	
11. Кількість рециркуляційного газу, що подається в дуття	кг/год нм ³ /год	≤438.0751 ≤338.9265	
12. Температура 73% фосфорної кислоти, що подається на гідратацію та склад після теплообмінників	°C	48-53	
13. Температура 73% фосфорної кислоти, що подається на теплообмінник та в реактор	°C	72-77	
14. Кількість води, що подається в реактор для гідратації та розведення	кг/год	≤105	

Продовження таблиці 3.4

утворюється знову кислоти			
15. Кількість циркуляційної кислоти, що подається в змішувач	кг/год	≤5410.5	
16. Кількість оборотної води для охолодження циркуляційної кислоти	кг/год	≤3000	
17. Температура оборотної води на вході в теплообмінник	°C	28-30	
18. Температура оборотної води на виході з теплообмінника	°C	38-40	
19. Розрідження в камері спалювання	мм.вод.ст.	1.5-3.5	
20. Температура води на передавлювання фосфору з монжусу	°C	75-85	
21. Тиск води на передавлювання фосфору з монжусу	кг/год	не менше 2.0	

З метою синтезу інтелектуальної системи управління процесами отримання ангідриду фосфору дуже важливо мати можливість здійснювати контроль і регулювати діями в автоматичному порядку. При цьому впровадження інтелектуальної системи буде тим дешевше, чим більш оснащений приладовий парк цеху №6, що діє.

При синтезі інтелектуальної системи управління процесом одержання ангідриду фосфору дуже важливо враховувати можливість аварійних ситуацій та передбачити заходи їх ліквідації. Для чого розгляне список інцидентів, що є в цеху №6, їх причини та дії персоналу в тій чи іншій ситуації, який описаний у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Перелік можливих інцидентів

Інциденти	Можливі причини виникнення інцидентів	Дії персоналу та спосіб усунення інцидентів
1	2	3
Не надходить фосфор з дозатора на монжус	а) Не промитий трубопровід перекачування фосфору	а) Промити гарячою водою трубопровід
	б) Не подається пара в	б) Подати пару в паро-

Продовження таблиці 3.5

1	2	3
	пароспутники	спутники
	в) Застигання фосфору	в) Обігрівати арматуру
Наявність фосфорного ангідриду у повітрі робочої зони дозатора	Порушення герметичності фосфору-проводів та арматури	Усунути виявлені нещільності
Фосфор не поступає до форсунки	а) Не ввімкнено або не виправлено насос подачі води на видавлювання	а) Включити насос подачі води та перевірити його роботу за манометром
	б) Не розігрітий фосфоропровід	б) Розігріти фосфоропровід
Підвищення температури циркуляційної води в камері згоряння	а) Недостатня кількість охолоджувальної води	а) Включити насос подачі води та перевірити його роботу за манометром
	б) Забруднились трубопроводи	б) Промити трубопроводи розчином лугу і кислотою
Зниження розрядження на хвостовому вентиляторі	а) Забруднились трубопроводи	а) Припинити подачу фосфору і визначити які трубопроводи не працюють. , прочистити забиті трубопроводи
	б) Поява нориці на трубопроводі охолодження	б) Усунути нориць на трубопроводі
Підвищення температури циркуляційної води у котлі-утилізаторі	а) Недостатня кількість охолоджувальної води	а) Збільшити витрати циркуляційної води
	б) Забруднились трубопроводи	б) Промити трубопроводи розчином лугу кислотою і
Загазованість робочої зони башти спалювання	а) Велике навантаження на камеру	а) Зменшити витрату фос-фору
	б) Знизилосся розрідження у камері	б) Перевірити справність вентилятора, відрегулювати розрідження у башті спалювання
Підвищення (зниження) об'ємної частки кисню в рециркуляційних газах	Високий (низький) витрата вторинного повітря за рахунок зміни розрідження в камері	Відрегулювати розрідження у системі
Зниження напруги на підвищуючих агрегатах, пробою ізоляції	Порушення центрування або обрив електродів	Відрегулювати тягу в системі, відцентрувати або змінити електроди
Тріск в ізоляторних коробках: витік електрики, пробою високовольтних агрегатів	Скупчення конденсату кислоти на кварцових трубах, вихід з ладу труб	Зупинити високовольтний агрегат, протерти і просушити труби, при виході їх з ладу зробити заміну

3.4 Формування матриці ПФЕ для синтезу інтелектуальних алгоритмів керування процесом спалювання

Головною метою розробки моделі управління є створення матриці планування повного факторного експерименту. Від якості матриці ПФЕ залежатиме результативність якостей системи управління. Матриця планування ПФЕ має відображати досвід, знання та інтуїцію технологів - операторів, які тривалий час працювали на триконтурних фосфорних печах.

Як було зазначено вище, завданням підсистеми оптимального управління процесу є виявлення оптимальних значень температури газу після камери згоряння (Y_1) залежно від витрати рециркуляційних газів (X_1), витрати стисненого повітря (X_2), витрати технічного кисню (X_3) та витрати жовтого фосфору з дозатора (X_4). Принципово такі розрахунки слід проводити постійно (приблизно один раз на протязі 5-7 хвилин) в залежності від ситуації. Анкетування технологів цеху дозволив скласти матрицю планування ПФЕ для експерименту 81 при трирівневій оцінці (0,0; 0,5 і 1,0) і чотирьох вхідних змінних: $N=81$ (див. таблицю 3.7).

Нормалізація в діапазоні від 0 до 1 вхідних та вихідних змінних проводилася за формулою (1.1). При цьому нижні та верхні межі діапазонів, наведені в таблиці 3.4, були (за рекомендацією досвідчених операторів технологів) розширені з урахуванням можливих коливань змінних вхідних, що не дозволяють переходити в аварійні режими ведення процесу горіння фосфору. Передбачена можливість керувати процесом у широкому діапазоні зміни вхідних змінних, що дозволить керувати процесом горіння ефективніше. З урахуванням рекомендацій досвідчених оператора діапазон зміни вхідних змінних було вирішено розширити так:

$$\begin{aligned} 238,0 \text{ нм}^3/\text{год} < X_1 < 438,0 \text{ нм}^3/\text{год}; \\ 1,0 \text{ нм}^3/\text{год} < X_2 < 2,0 \text{ нм}^3/\text{год}; \\ 40,0 \text{ нм}^3/\text{год} < X_3 < 50,0 \text{ нм}^3/\text{год}; \\ 10,0 \text{ кг}/\text{год} < X_4 < 60,0 \text{ кг}/\text{год}; \\ 350^\circ\text{C} < Y_1 < 550^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

У таблиці 3.7 зосереджено багаторічний досвід роботи технологів.

Таблиця 3.7

Матриця планування ПФЕ процесу спалювання жовтого фосфору

№	Вхідні змінні				Вихідна змінна
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₁
1	2	3	4	5	6
1	0.0	0.5	0.0	0.5	0.76
2	0.5	0.5	0.0	0.5	0.53
3	1.0	0.5	0.0	0.5	0
4	0.0	0.0	0.0	0.5	0.72
5	0.5	0.0	0.0	0.5	0.49
6	1.0	0.0	0.0	0.5	0
7	0.0	1.0	0.0	0.5	0.81
8	0.5	1.0	0.0	0.5	0.58
9	1.0	1.0	0.0	0.5	0.046
10	0.0	0.5	0.5	0.5	0.81
11	0.5	0.5	0.5	0.5	0.58
12	1.0	0.5	0.5	0.5	0.046
13	0.0	0.0	0.5	0.5	0.76
14	0.5	0.0	0.5	0.5	0.53
15	1.0	0.0	0.5	0.5	0
16	0.0	1.0	0.5	0.5	0.86
17	0.5	1.0	0.5	0.5	0.63
18	1.0	1.0	0.5	0.5	0.092
19	0.0	0.5	1.0	0.5	0.87
20	0.5	0.5	1.0	0.5	0.66
21	1.0	0.5	1.0	0.5	0.1
22	0.0	0.0	1.0	0.5	0.81
23	0.5	0.0	1.0	0.5	0.6
24	1.0	0.0	1.0	0.5	0.07
25	0.0	1.0	1.0	0.5	0.9
26	0.5	1.0	1.0	0.5	0.72
27	1.0	1.0	1.0	0.5	0.15
28	0.0	0.5	0.0	0.0	0.81
29	0.5	0.5	0.0	0.0	0.61
30	1.0	0.5	0.0	0.0	0.07
31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
32	0.5	0.0	0.0	0.0	0.58
33	1.0	0.0	0.0	0.0	0.046
34	0.0	1.0	0.0	0.0	0.87
35	0.5	1.0	0.0	0.0	0.4
36	1.0	1.0	0.0	0.0	0.09
37	0.0	0.5	0.5	0.0	0.84
38	0.5	0.5	0.5	0.0	0.64
39	1.0	0.5	0.5	0.0	0.12
40	0.0	0.0	0.5	0.0	0.84
42	1.0	0.0	0.5	0.0	0.046
43	0.0	1.0	0.5	0.0	0.9
44	0.5	1.0	0.5	0.0	0.69
45	1.0	1.0	0.5	0.0	0.15

Продовження таблиці 3.7

№	1	2	3	4	5
46	0.0	0.5	1.0	0.0	0.87
48	1.0	0.5	1.0	0.0	0
49	0.0	0.0	1.0	0.0	0.8
50	0.5	0.0	1.0	0.0	0.64
51	1.0	0.0	1.0	0.0	0.07
52	0.0	1.0	1.0	0.0	1
53	0.5	1.0	1.0	0.0	0.76
54	1.0	1.0	1.0	0.0	0.2
55	0.0	0.5	0.0	1	0.72
56	0.5	0.5	0.0	1	0.6
57	1.0	0.5	0.0	1	0.046
58	0.0	0.0	0.0	1	0.67
59	0.5	0.0	0.0	1	0.49
60	1.0	0.0	0.0	1	0
61	0.0	1.0	0.0	1	0.76
62	0.5	1.0	0.0	1	0.58
63	1.0	1.0	0.0	1	0.03
64	0.0	0.5	0.5	1	0.76
66	1.0	0.5	0.5	1	0
67	0.0	0.0	0.5	1	0.72
68	0.5	0.0	0.5	1	0.49
69	1.0	0.0	0.5	1	0
70	0.0	1.0	0.5	1	0.81
71	0.5	1.0	0.5	1	0.58
72	1.0	1.0	0.5	1	0.8
74	0.5	0.5	1.0	1	0.56
75	1.0	0.5	1.0	1	0
76	0.0	0.0	1.0	1	0.75
77	0.5	0.0	1.0	1	0.6
78	1.0	0.0	1.0	1	0.04
79	0.0	1.0	1.0	1	0.78
80	0.5	1.0	1.0	1	0.63
81	1.0	1.0	1.0	1	0.07

Як позначилося, завданням підсистеми оптимального управління процесом є визначення оптимальних значень температури газу після котла- утилізатора (Y2) і кількості пари, що утворилася (Y3) в залежності від витрати відходять з камери згоряння газів (X5), температури на вході котла- утилізатора (X6) і витрати тиску охолоджувальної води (X7). Опитування технологів цеху дозволило скласти матрицю планування ПФЕ для 27 експериментів при трирівневій оцінці (0.0; 0.5 та 1,0) та трьох вхідних змінних: N=27 (див. таблицю 3.8).

Стандартизація в діапазоні від 0 до 1 вхідних та вихідних змінних проводилася за формулою (3.1). У таблиці 3.8 усі змінні наведено до стандартної форми в діапазоні від 0.0 до 1.0. При цьому нижні та верхні межі діапазонів, наведені в таблиці 2.4, були розширено з урахуванням можливих коливань вхідних змінних, що не дозволяють переходити до аварійних режимів ведення процесу горіння фосфору. З урахуванням рекомендацій досвідчених оператора діапазон зміни вхідних змінних було вирішено розширити так:

$$280,0 \text{ нм}^3/\text{год} < X_5 < 500,0 \text{ нм}^3/\text{год};$$

$$350^\circ\text{C} < X_6 < 550^\circ\text{C};$$

$$11 \text{ кг}/\text{см}^2 < X_7 < 18 \text{ кг}/\text{см}^2;$$

$$160^\circ\text{C} < Y_2 < 220^\circ\text{C};$$

$$10,0 \text{ кг}/\text{год} < Y_3 < 60,0 \text{ кг}/\text{год}.$$

Таблиця 3.8

Матриця планування ПФЕ для процесу охолодження

№	X_5	X_6	X_7	Y_2	Y_3
1	1.0	1.0	1.0	0.68	1
2	1.0	1.0	0.0	0.68	1
3	1.0	1.0	0.5	0.68	1
4	1.0	0.5	1.0	0.33	0.9
5	1.0	0.5	0.0	0.33	0.9
6	1.0	0.5	0.5	0.33	0.9
7	1.0	0.0	1.0	0.16	0.37
8	1.0	0.0	0.0	0.16	0.37
9	1.0	0.0	0.5	0.16	0.37
10	0.0	1.0	1.0	0.32	0.16
11	0.0	1.0	0.0	0.32	0.16
12	0.0	1.0	0.5	0.32	0.16
13	0.0	0.5	1.0	0.2	0.18
14	0.0	0.5	0.0	0.2	0.18
15	0.0	0.5	0.5	0.2	0.18
16	0.0	0.0	1.0	0.05	0.3
17	0.0	0.0	0.0	0.05	0.3
18	0.0	0.0	0.5	0.05	0.3
19	0.5	1.0	1.0	0.6	0.33
20	0.5	1.0	0.0	0.6	0.33
21	0.5	1.0	0.5	0.6	0.33
22	0.5	0.5	1.0	0.52	0.35
23	0.5	0.5	0.0	0.52	0.35
24	0.5	0.5	0.5	0.52	0.35
25	0.5	0.0	1.0	0.2	0.6
26	0.5	0.0	0.0	0.2	0.6
27	0.5	0.0	0.5	0.2	0.6

Метою підсистеми оптимального управління процесом осадження кристалічного ангідриду в економайзері є визначення оптимальних значень температури газу після економайзера (Y_4) і витрата утвореного твердого ангідриду фосфору (Y_5) в залежності від витрати газів, що відходять з котла-утилізатора (X_8), температури на вході в економайзер (X_{10}).

Опитування технологів цеху дозволив скласти матрицю планування ПФЕ для 27 експериментів при трирівневій оцінці (0,0; 0,5 та 1,0) та трьох вхідних змінних: $N=27$ (див. таблицю 3.9).

Нормалізація в діапазоні від 0 до 1 вхідних та вихідних змінних проводилася за формулою (1.1). У таблиці 3.9 всі змінні наведено нормалізованої формі в діапазоні від 0,0 до 1,0. При цьому нижні та верхні межі діапазонів, наведені в таблиці 3.4, були (за рекомендацією досвідчених операторів технологів) розширені з урахуванням можливих коливань вхідних змінних, що не дозволяють переходити до аварійних режимів ведення процесу горіння фосфору таким чином:

$$150,0 \text{ нм}^3/\text{год} < X_8 < 500,0 \text{ нм}^3/\text{год};$$

$$160^\circ\text{C} < X_9 < 220^\circ\text{C};$$

$$10 \text{ кг}/\text{см}^2 < X_{10} < 19 \text{ кг}/\text{см}^2;$$

$$140^\circ\text{C} < Y_4 < 200^\circ\text{C};$$

$$10 \text{ кг}/\text{см}^2 < Y_5 < 16 \text{ кг}/\text{см}^2.$$

З урахуванням прийнятих діапазонів зміни вхідних змінних було складено матрицю планування ПФЕ досвідченими операторами-технологами за допомогою «мисленого» експерименту. У таблиці 3.9 зосереджено багаторічний досвід роботи технологів цеху.

Таблиця 3.9

Матриця планування ПФЕ для процесу осадження

№	X_8	X_9	X_{10}	Y_4	Y_5
1	1.0	1.0	1.0	0.48	1
2	1.0	1.0	0.0	0.52	1
3	1.0	1.0	0.5	0.61	1
4	1.0	0.5	1.0	0.31	0.88
5	1.0	0.5	0.0	0.36	0.91
6	1.0	0.5	0.5	0.17	0.91
7	1.0	0.0	1.0	0.18	0.35
8	1.0	0.0	0.0	0.18	0.37
9	1.0	0.0	0.5	0.33	0.39
10	0.0	1.0	1.0	0.34	0.18
11	0.0	1.0	0.0	0.37	0.15

12	0.0	1.0	0.5	0.21	0.18
13	0.0	0.5	1.0	0.23	0.17
14	0.0	0.5	0.0	0.21	0.19
15	0.0	0.5	0.5	0.2	0.21
16	0.0	0.0	1.0	0.06	0.4
17	0.0	0.0	0.0	0.07	0.5
18	0.0	0.0	0.5	0.08	0.4
19	0.5	1.0	1.0	0.71	0.35
20	0.5	1.0	0.0	0.82	0.39
21	0.5	1.0	0.5	0.65	0.31
22	0.5	0.5	1.0	0.57	0.39
23	0.5	0.5	0.0	0.51	0.36
24	0.5	0.5	0.5	0.52	0.39
25	0.5	0.0	1.0	0.21	0.56
26	0.5	0.0	0.0	0.23	0.59
27	0.5	0.0	0.5	0.27	0.62

Отримані дані від досвідчених експертів-технологів надалі піддадуться дослідженню методом штучного інтелекту. За допомогою цих даних буде навчена нейромережна система для подальшого застосування у виробництві в наступному розділі.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі було виконано ключовий етап дослідницької роботи, а саме: детально проаналізовано технологічний процес отримання ангідриду фосфору та проведено системний аналіз об'єкта управління, в результаті якого було виявлено 10 вхідних та 5 вихідних змінних для трьох основних апаратів: камери спалювання, котла-утилізатора та економайзера/циклону. Як основа для розробки інтелектуальних систем (нейронних мереж, нечітких алгоритмів) було теоретично обґрунтовано та практично сформовано три основні матриці Планування повного факторного експерименту: для процесу спалювання (з 81 експериментом), процесу охолодження в котлі та процесу осадження в економайзері. Ці матриці, які використовують нормалізовані значення змінних у діапазоні від 0.0 до 1.0, безпосередньо відображають багаторічний досвід та інтуїцію експертів як готову модель оптимального керування, що є головним результатом даного розділу. Крім того, наведено розрахунки матеріального та теплового балансів виробництва, а також перелік можливих аварійних інцидентів та норм технологічного режиму, необхідних для подальшого синтезу та імітаційного моделювання.

РОЗДІЛ 4

СИНТЕЗ НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ

4.1. Синтез нечіткої моделі управління процесом спалювання

Розробку нечіткої моделі виконуватимемо з використанням графічних засобів системи Matlab [15]. Потім визначаємо функції приналежності для двох вхідних та однієї вихідної змінної, навіщо скористаємося редактором функцій приналежності системи Matlab. Вигляд графічного інтерфейсу редактора функцій приладдя показаний на малюнку 3.1, де наведено функції приналежності для чотирьох вхідних змінних: витрата рециркуляційних газів (X1), витрати стисненого повітря (X2), витрати технічного кисню (X3) та витрати жовтого фосфору дозатора (X4), а також однієї вихідної змінної температури газу після камери згоряння (Y1).

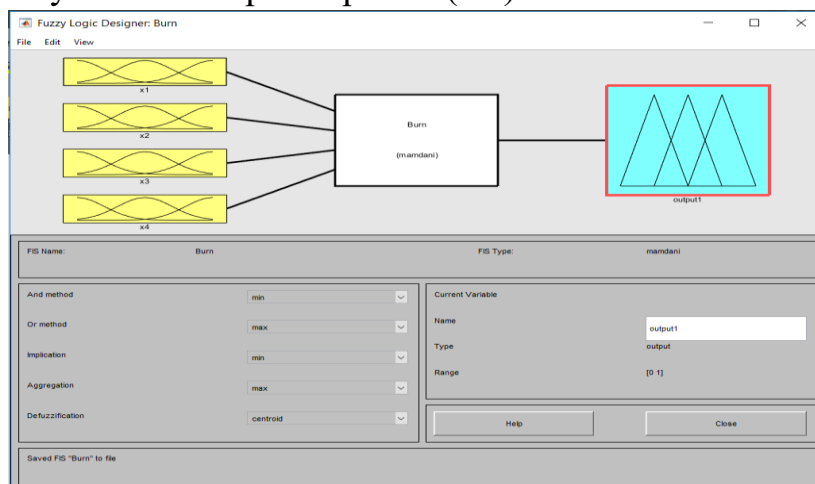


Рис. 4.1. Графічний інтерфейс редактора функцій належності для 4 вхідних та 1 вихідної змінної для процесу спалювання

Потім формуються правила нечіткої продукції, тобто кожному експерименту з таблиці 2.7 відповідає своє правило продукції, наприклад [12]:

ПРАВИЛО 1: «ЯКЩО X1 РІВНО 0» І «X2 РІВНО 0» ТО «Y РІВЕНИЙ 0,86».

ПРАВИЛО 2:: «ЯКЩО X1 РІВНО 0» І «X2 РІВНО 0.5» ТО «Y РІВЕНИЙ 0,6».

ПРАВИЛО 3: «ЯКЩО X1 РІВНО 0» І «X2 РІВНО 1» ТО «Y РІВЕНИЙ 0.56».

ПРАВИЛО 4:: «ЯКЩО X1 РІВНО 0.5» І «X2 РІВНО 0» ТО «Y РІВЕНИЙ 0,1».

Аналогічно складаються правила продукцій всім 81 експериментів з таблиці 3.7, як і наведено малюнку 4.2.

Після того, як Matlab зробить усі необхідні процедури відповідно до обраного алгоритму нечіткого виведення (наприклад, алгоритму Mamdani), у графічному інтерфейсі перегляду правил буде представлена нечітка модель оптимального керування процесом спалювання фосфору (рисунок 4.3). Таким чином, інтерфейс, показаний на рисунку 4.3, є модель (алгоритм) оптимального управління, за допомогою якої можна промоделювати різні режими при всіляких поєднаннях значень вхідних змінних.

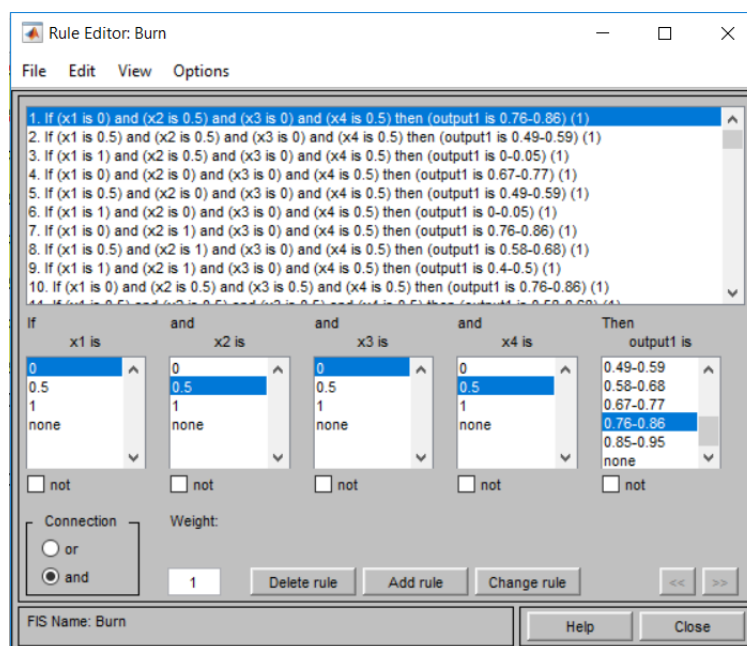


Рис. 4.2. Графічний інтерфейс редактора правил після завдання бази правил даної системи нечіткого виводу

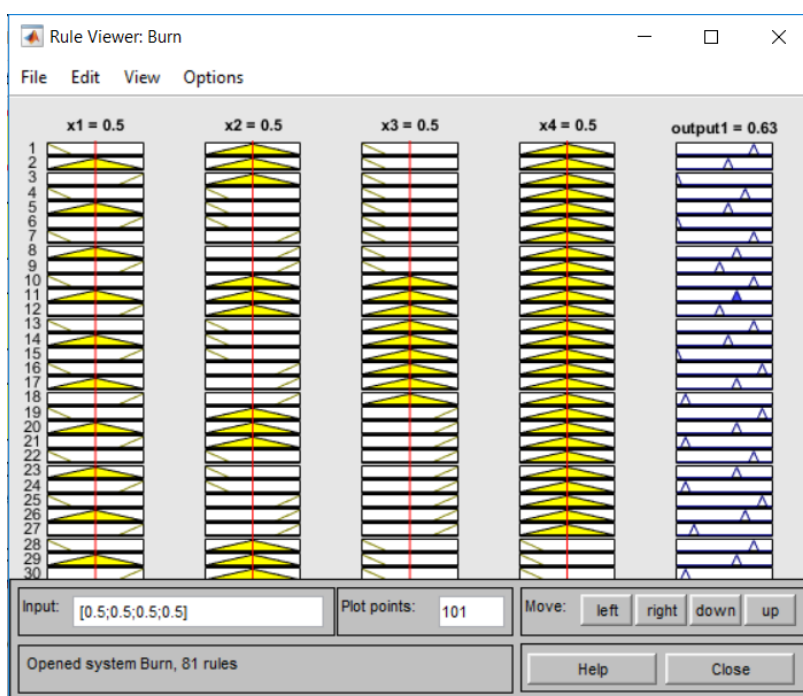


Рис. 4.3 – Нечітка модель управління процесом

4.2 Синтез нечіткої моделі управління процесом охолодження

Аналогічно, весь процес виконується для процесу охолодження. Вигляд графічного інтерфейсу редактора функцій приладдя показаний на малюнку 3.4, де наведено функції приналежності змінних: залежно від витрати газів, що відходять з камери згоряння (X_5), температури на вході котла-утилізатора (X_6) і витрати тиску охолоджувальної води (X_7), а також двох вихідних змінних утвореної пари (Y_3).

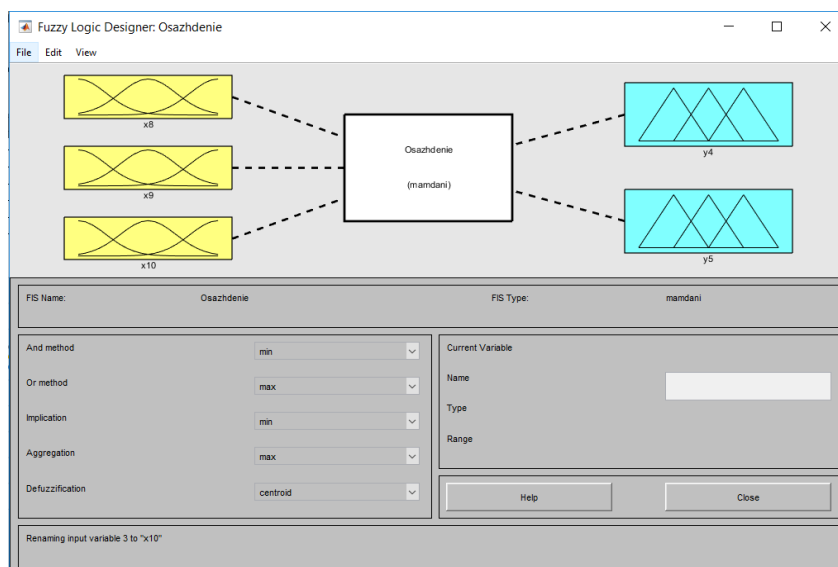


Рис.4.4 . Графічний інтерфейс редактора функцій приладдя для трьох вхідних та двох вихідних змінних

Так само складаються правила продукції всім 27 експериментів з таблиці 2.8, як і наведено малюнку 4.5.

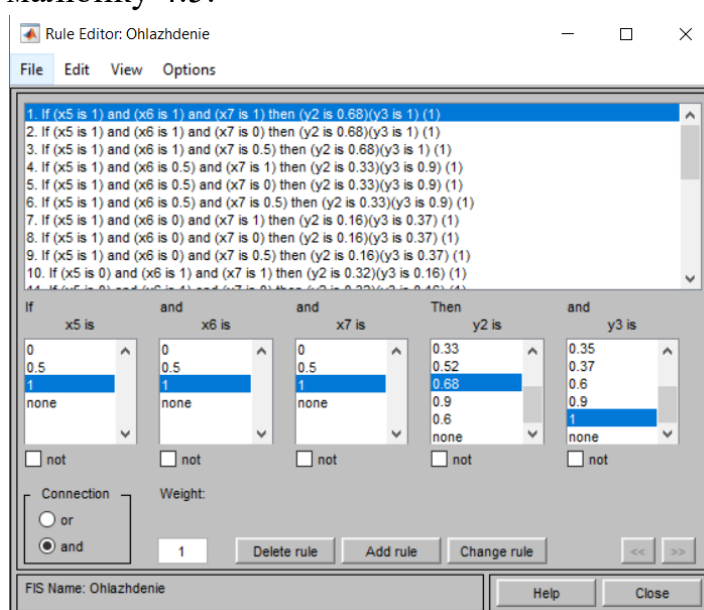


Рис. 4.5. Графічний інтерфейс редактора правил після завдання бази правил для цієї системи нечіткого висновку

Після того, як Matlab зробить усі необхідні процедури відповідно до обраного алгоритму нечіткого виведення (наприклад, алгоритму Mamdani), у графічному інтерфейсі перегляду правил буде представлена нечітка модель оптимального управління процесом спалювання фосфору (рисунок 4.6).

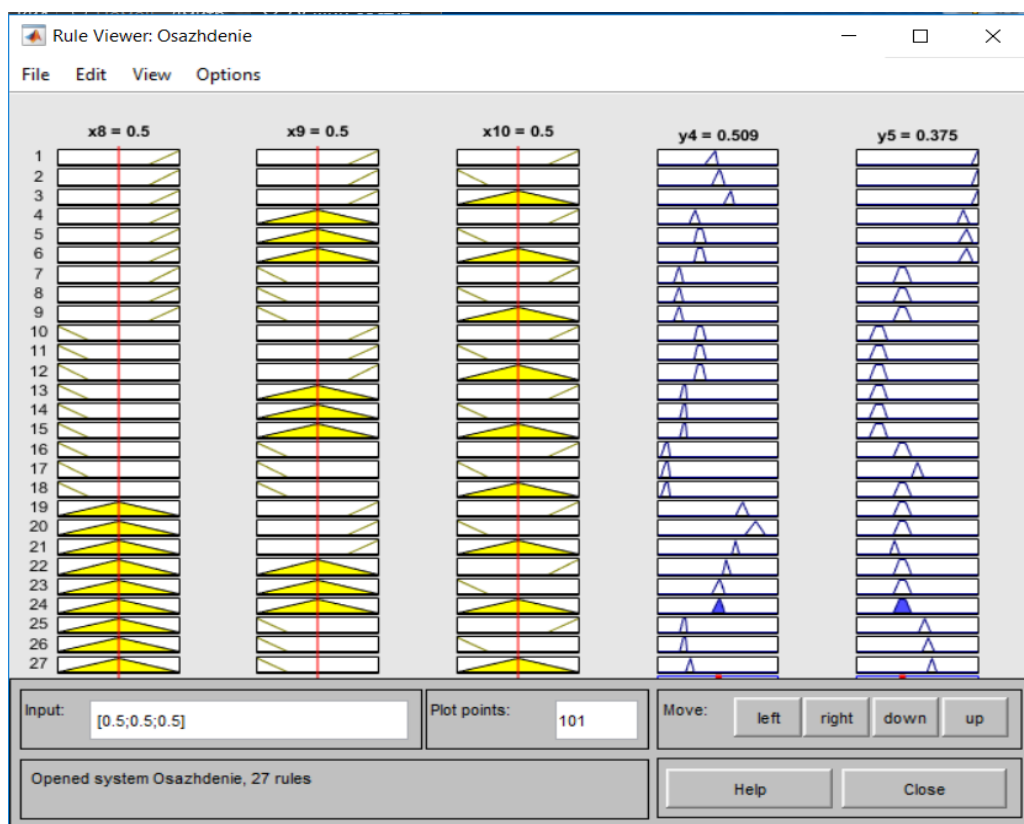


Рис. 4.6 Нечітка модель управління процесом

4.3. Синтез нечіткої моделі управління процесом осадження

Нечітка модель створюється так само, як і зазначалося вище для процесу осадження.

Вигляд графічного інтерфейсу редактора функцій приналежності показаний на малюнку 4.7, де наведено функції приналежності для трьох вхідних змінних: в залежності від витрати газів, що відходять з котла-утилізатора (X8), температури на вході в економайзер (X9) і витрати тиску охолоджуючої економайзером води (X10) (Y4) і витрата твердого ангідриду фосфору (Y5), що утворився.

Складаються правила продукції всім 27 експериментів з таблиці 3.9, як і наведено малюнку 4.8.

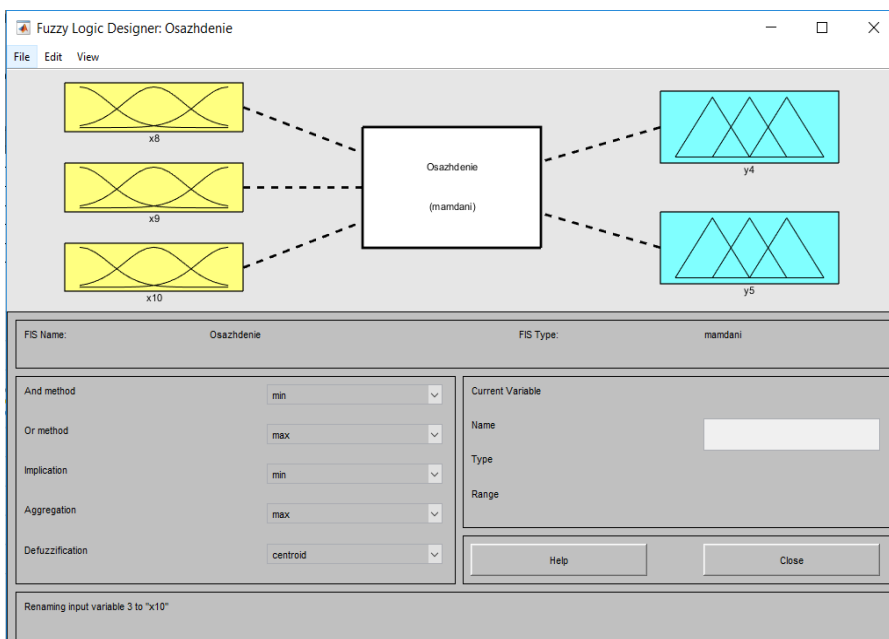


Рис. 4.7. Графічний інтерфейс редактора функцій приладдя для трьох вхідних та двох вихідних змінних

У графічному інтерфейсі перегляду правил буде представлена нечітка модель оптимального управління процесом осадження фосфору (рис. 3.8). Таким чином, інтерфейс, показаний на малюнку 3.9, є модель (алгоритм) оптимального управління, за допомогою якої можна промоделювати різні режими при всіляких поєднаннях значень вхідних змінних.

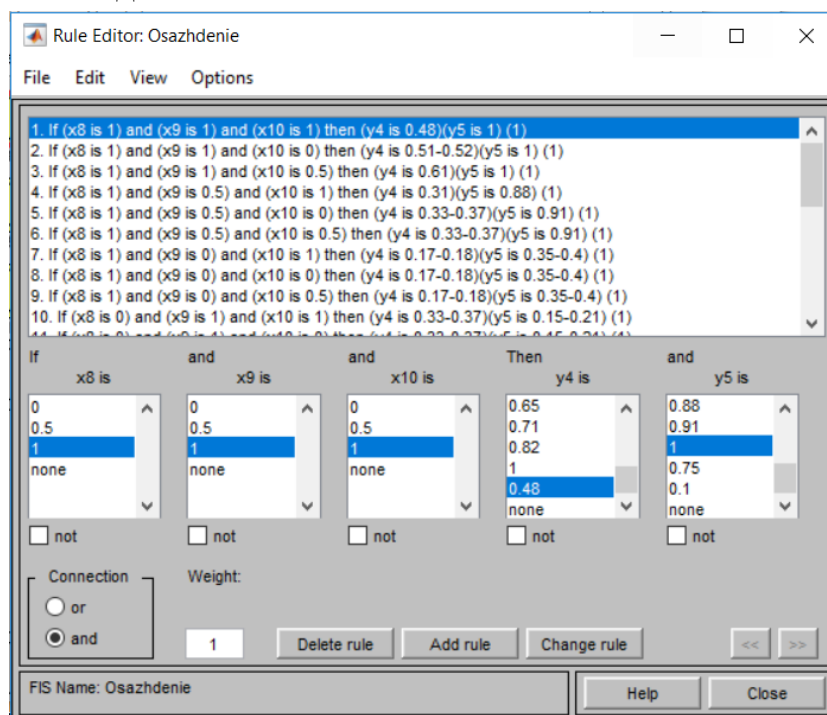


Рис. 4.8. Графічний інтерфейс редактора правил після завдання бази правил даної системи нечіткого висновку процесу осадження

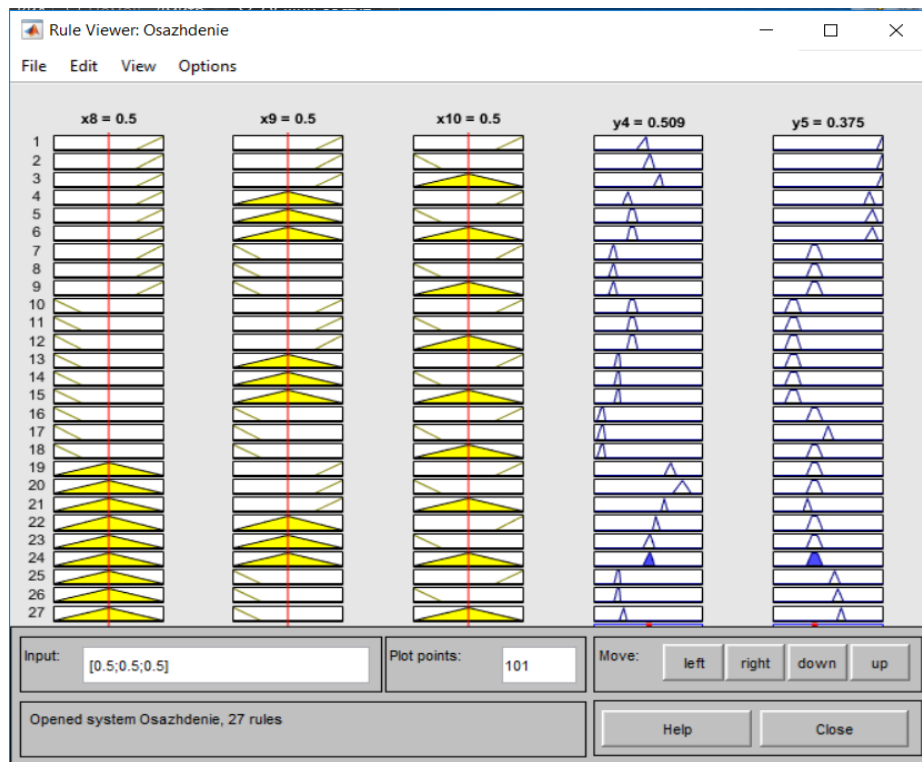


Рис. 4.9. Нечітка модель управління процесом осадження

Висновки до розділу 4

У розділі було синтезовано три окремі нечіткі моделі управління для кожного основного технологічного процесу — процесу спалювання, процесу охолодження в котлі-утилізаторі та процесу осадження в економайзері. Для кожної моделі з використанням графічного редактора функцій належності MATLAB були визначені та налаштовані функції належності для всіх вхідних та вихідних змінних. На основі даних, отриманих з матриць ПФЕ, були сформовані бази правил продукцій (нечіткі правила) для кожної з трьох систем нечіткого виведення (за алгоритмом Мамдані). Зокрема, для процесу спалювання створено модель для визначення оптимальної температури газу на виході залежно від 4 вхідних змінних; для процесу охолодження — модель для визначення температури на виході котла та кількості утвореної пари залежно від трьох вхідних змінних; і для процесу осадження — модель для визначення температури на виході економайзера та витрати твердого ангідриду фосфору також залежно від 3 вхідних змінних. Представлено візуалізацію отриманих нечітких моделей управління як алгоритмів оптимального керування.

РОЗДІЛ 5

СИНТЕЗ НЕЙРО-МЕРЕЖЕВИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ

5.1. Синтез нейро-мережевої моделі управління процесом спалювання

Замість нечітких моделей для моделювання процесу управління можна використовувати нейронні мережі. Для навчання нейронної мережі треба запровадити результати експерименту з матриці планування ПФЕ (див. таблицю 3.7). MATLAB має графічний інтерфейс, який дозволяє ввести необхідні дані для вибору архітектури мережі та методу її навчання.

Для навчання нейронної мережі вводимо вихідні дані з матриці планування ПФЕ (таблиця 3.7), приклад такого введення наведено на рисунку 5.1.

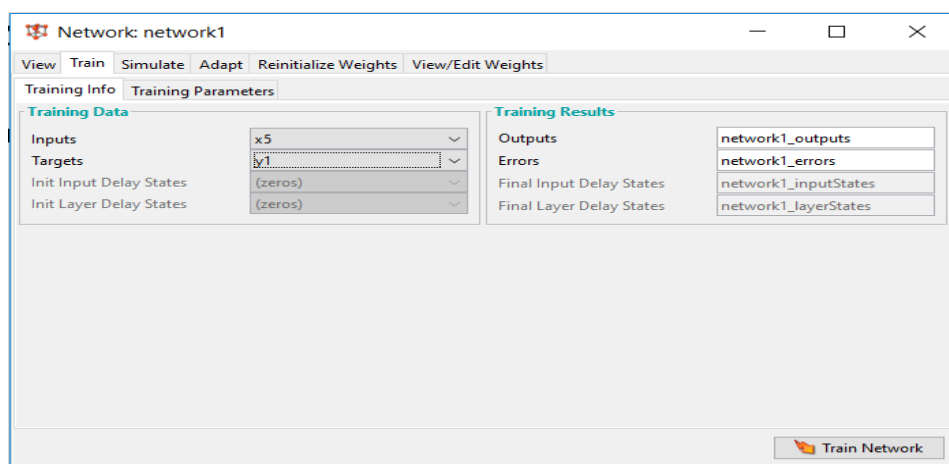


Рис.5.1. Введення вхідних даних

Далі створюємо нейронну мережу (див. рисунок 5.2).

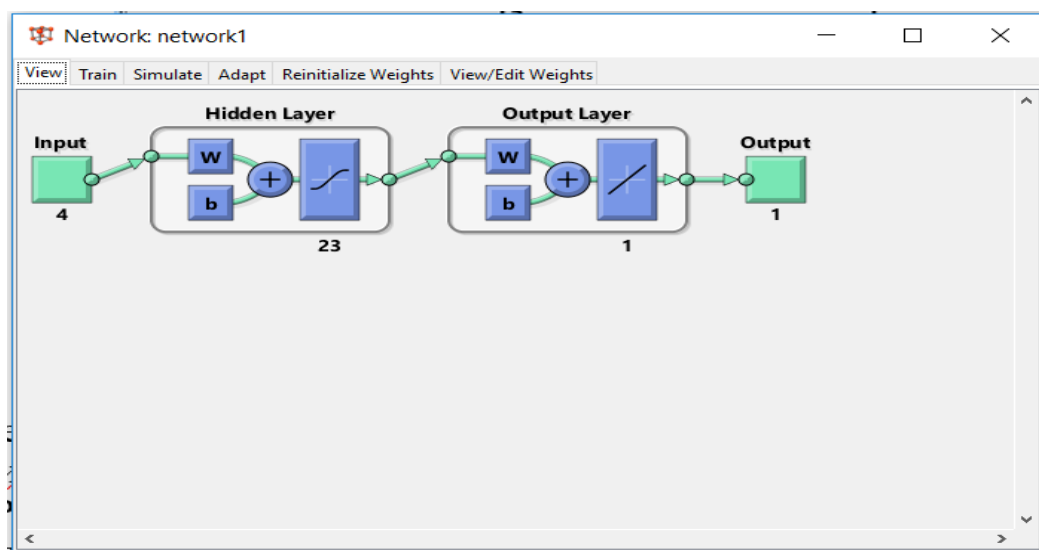


Рис. 5.2. Нейро-мережева модель управління

У полі вхідні дані вказуємо заздалегідь створені дані, задаємо тип нейронної мережі, виберемо перцептрон (Feed-ForwardBackPropa-gation) з 10 сигмоїдними (TANSIG) нейронами прихованого шару та одним лінійним (PURELIN) нейроном вихідного шару. Навчання будемо проводити за допомогою алгоритму Левенберга-Маркардта (Levenberg-Marquardt), який реалізує функція TRAINLM. Функція помилки – MSE [15].

Програма покаже прогрес і результат навчання, як показано рисунку 5.3. На рисунку 5.4 можна побачити графічно порівняння експериментальних значень та розрахункових значень.

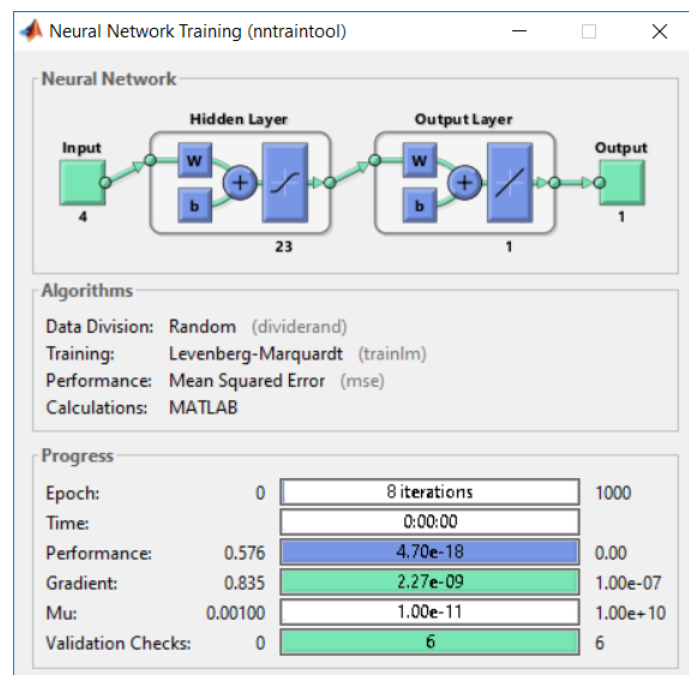


Рис. 5.3. Навчання нейронів за епохами

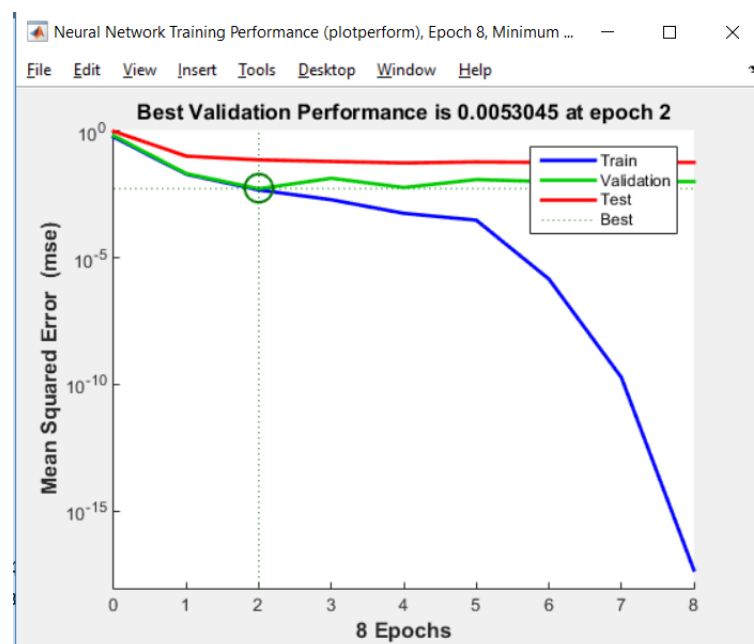


Рис. 5.4. Прогрес навчання нейронної мережі

5.2. Синтез нейро-мережевої моделі управління процесом охолодження

Для навчання нейронної мережі вводимо вихідні дані з матриці планування ПФЕ (таблиця 2.8), приклад такого введення наведено малюнку 4.5.

Щоб навчити цю мережу вибираємо вхідні та вихідні дані з таблиці планування.

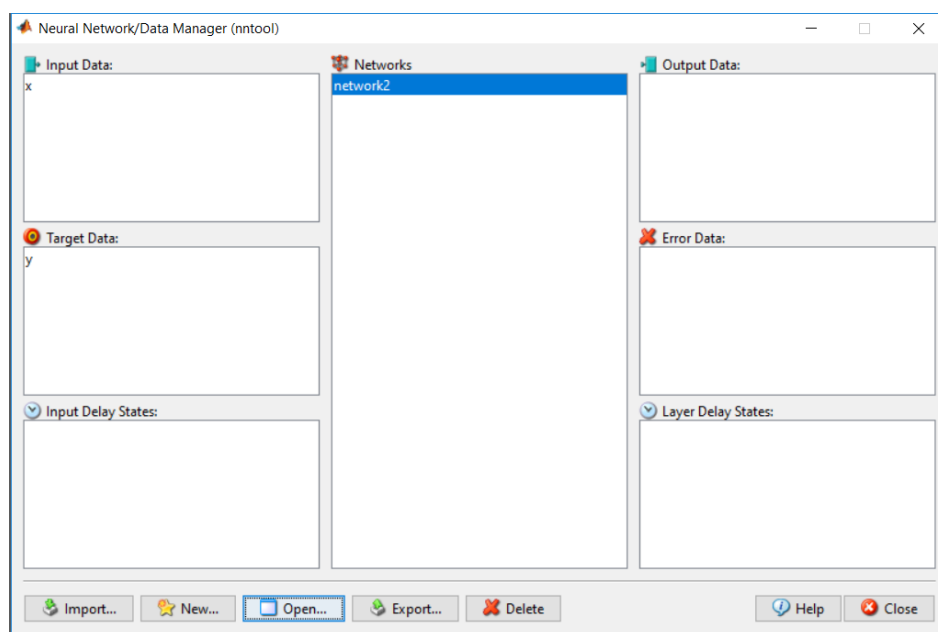


Рис. 5.5. Введення вхідних даних

Далі створюємо нейронну мережу (див. рисунок 5.6).

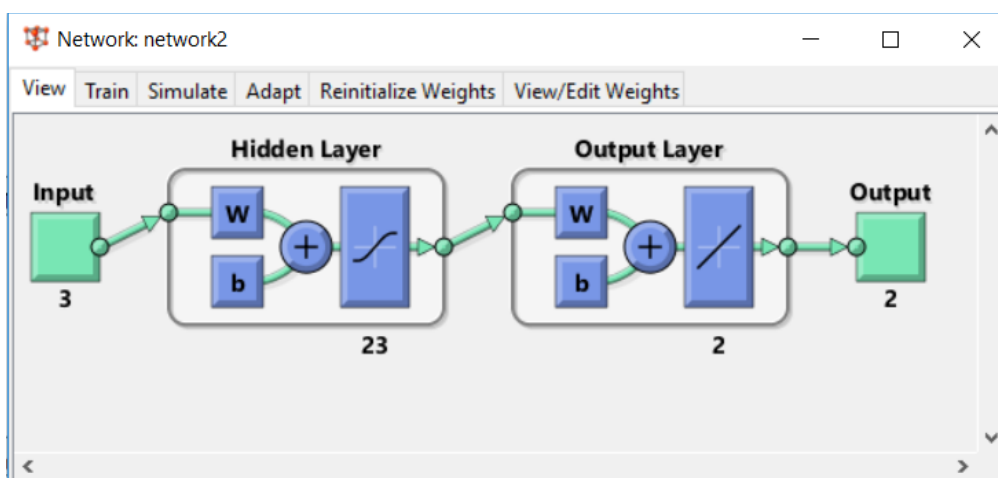


Рис. 5.6. Нейро-мережева модель управління

Програма покаже прогрес та результат навчання, як показано рисунку 5.7.

На рисунку 5.8 можна побачити графічно порівняння експериментальних значень та розрахункових значень.

Нейронна структура виглядає так:

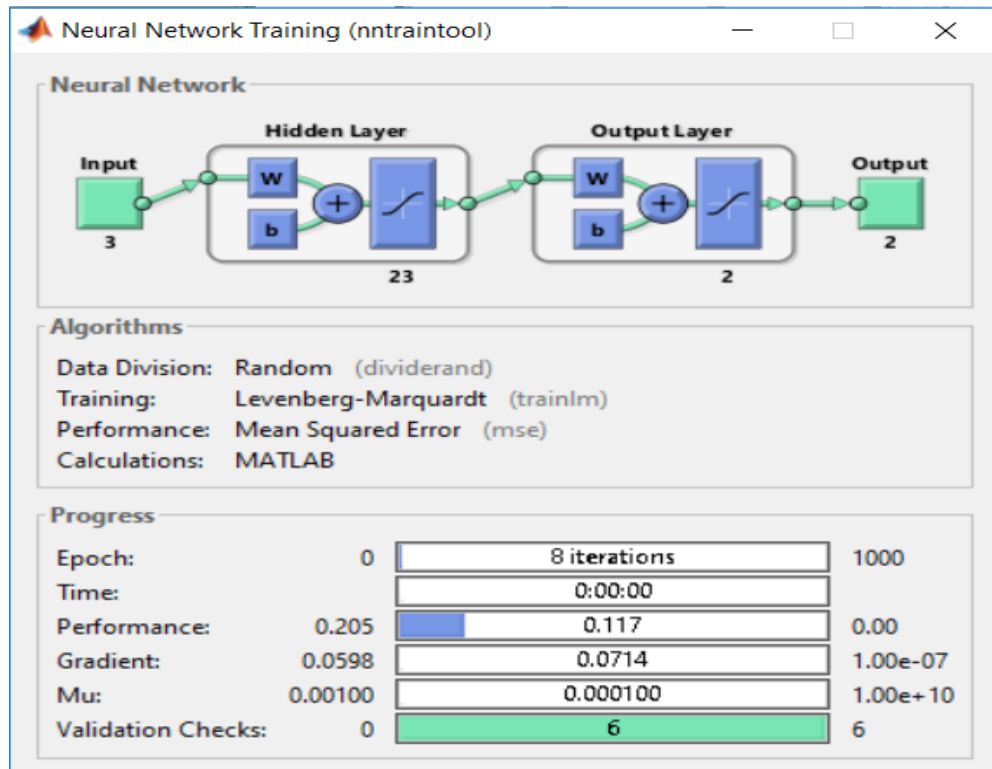


Рис. 5.7. Навчання нейронів за епохами

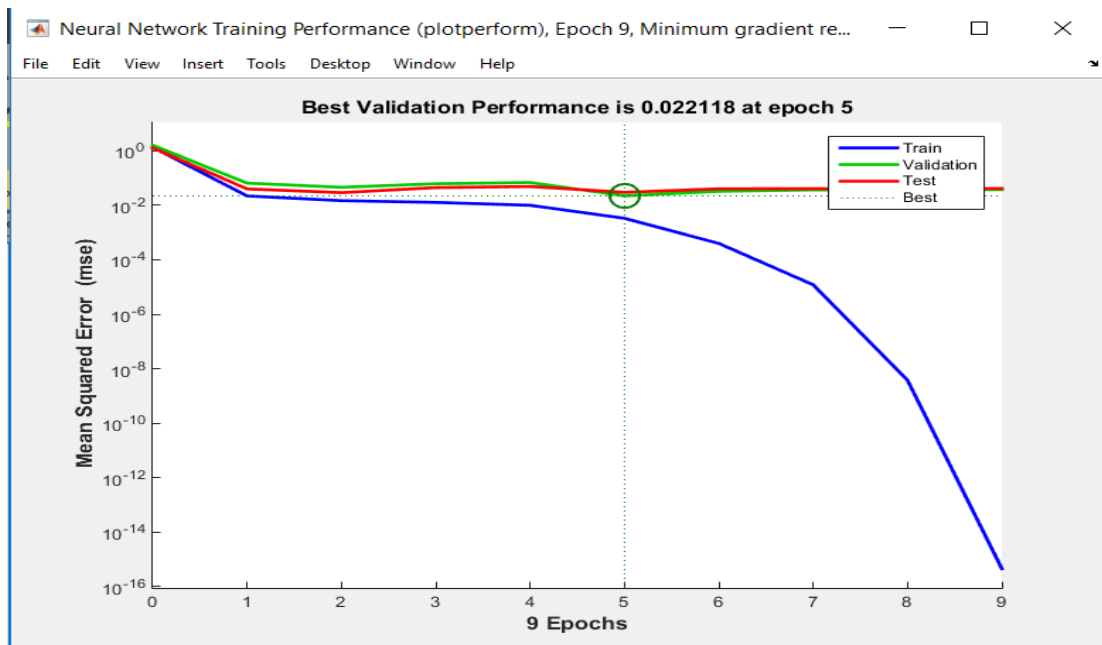


Рис. 5.8. Поогрес навчання нейронної мережі

5.3. Синтез нейро-мережевої моделі управління процесом осадження

Для навчання нейронної мережі вводимо вихідні дані з матриці планування ПФЕ (таблиця 3.9), приклад такого введення наведено рисунку 5.9.

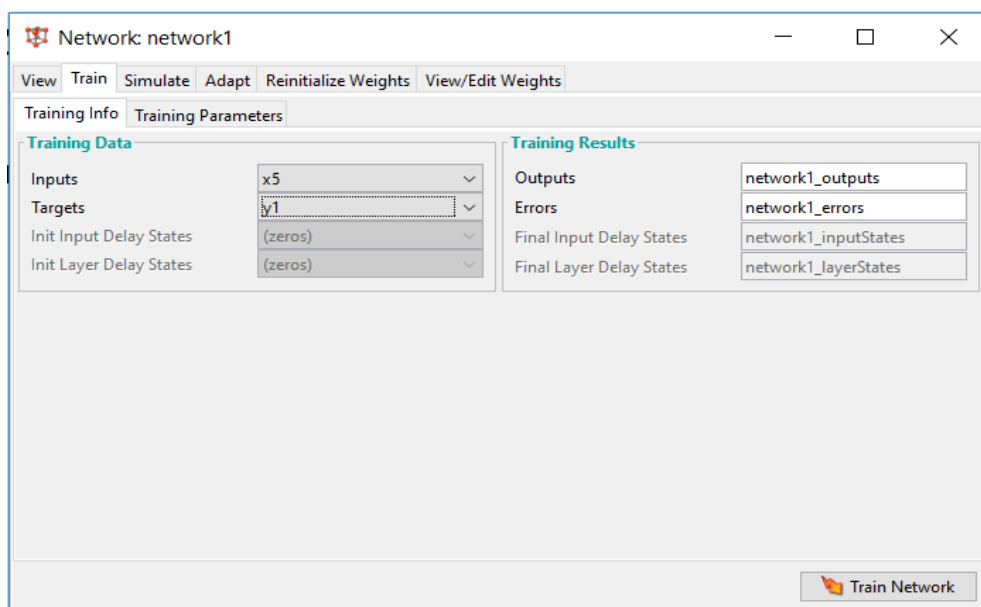


Рис.5.9. Введення вхідних даних

Далі створюємо нейронну мережу (див. рисунок 5.10).

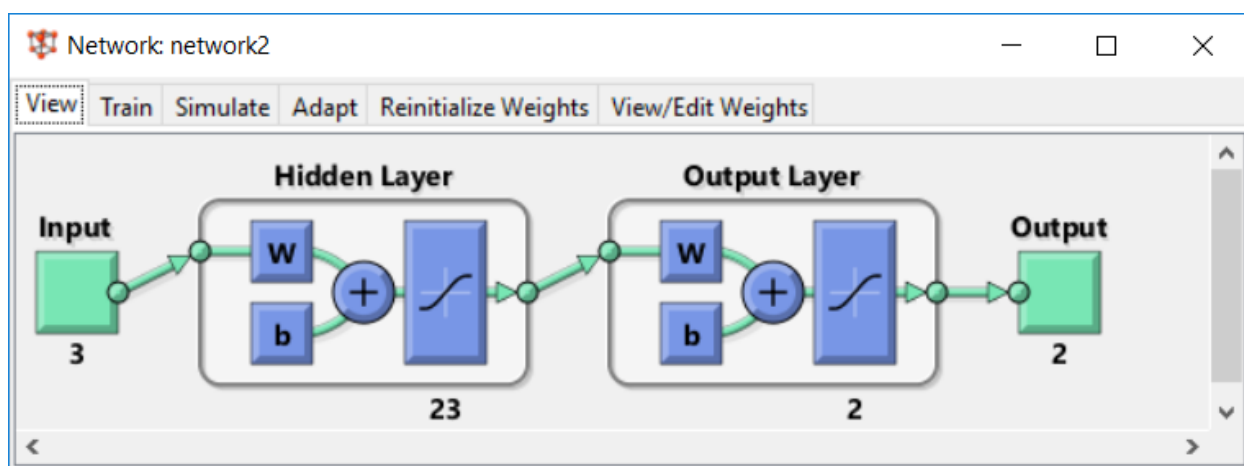


Рис. 5.10. Нейро-мережева модель управління

Програма покаже прогрес та результат навчання, як показано рисунку 5.11. На рисунку 5.12 можна побачити графічно порівняння експериментальних значень та розрахункових значень. Для того, щоб програма показала ці дані необхідно завантажити туди вхідні параметри та вихідні параметри.

Надалі процес навчання буде здійснюватись з епохами для навчання. Навчання за епохами виглядає так:

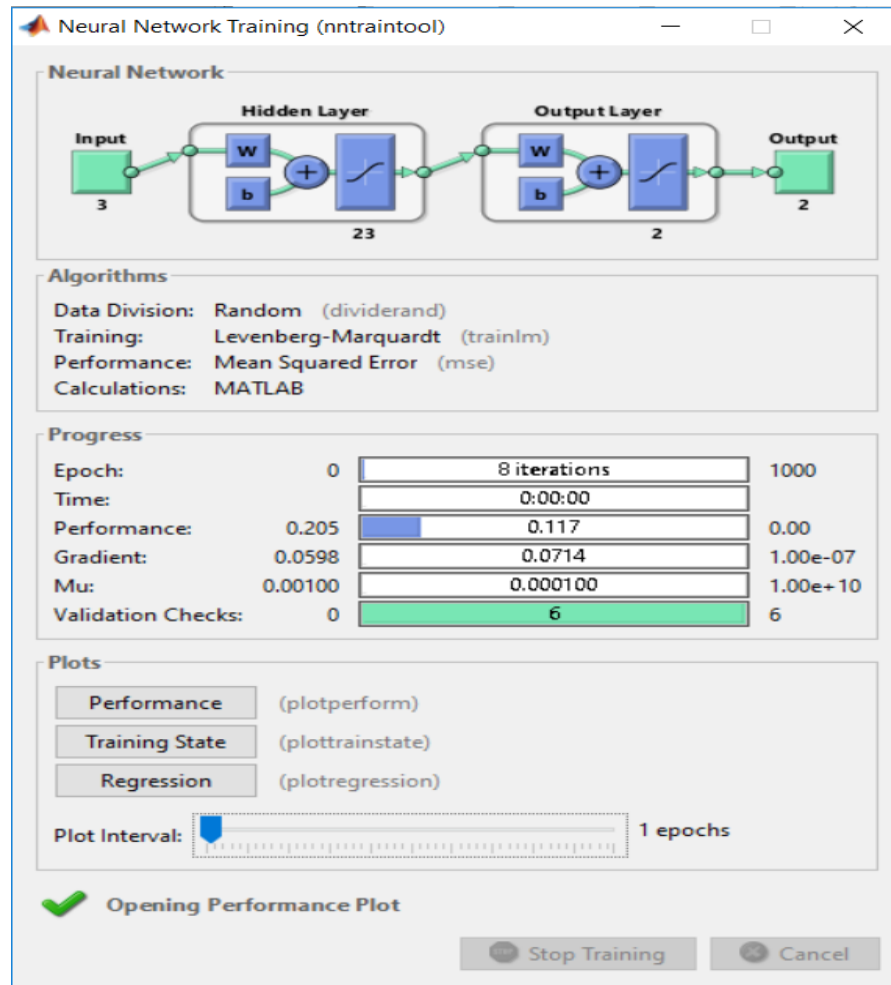


Рис. 5.11. Навчання нейронів за епохами

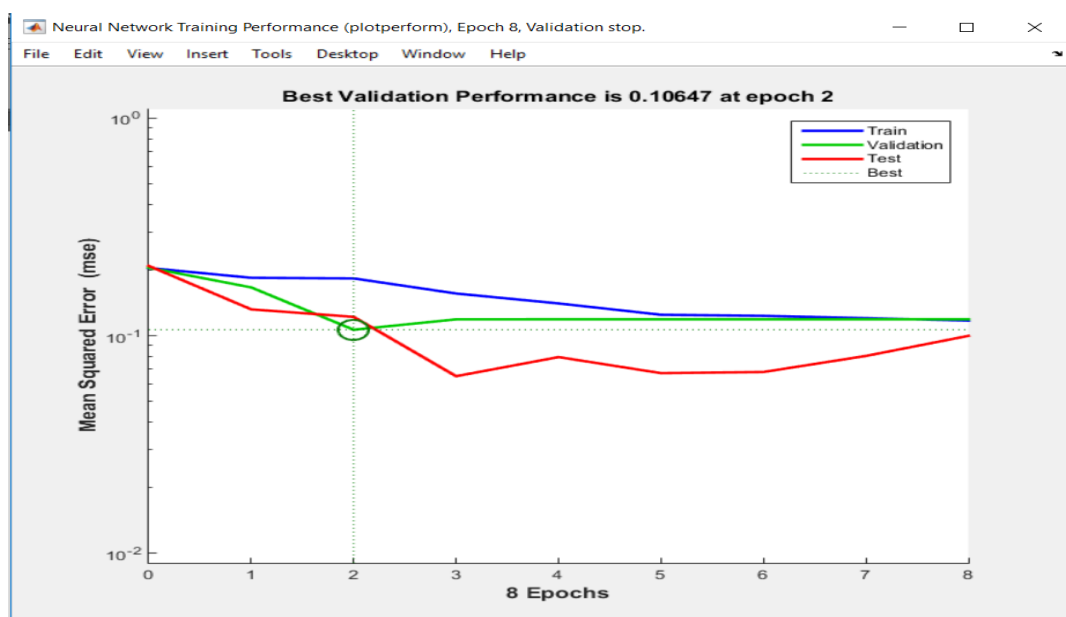


Рис. 5.12. Прогрес навчання нейронної мережі

Висновки до розділу 5

У цьому розділі було проведено синтез та навчання нейро-мережевих моделей для управління технологічними процесами охолодження та осадження. Для побудови моделей використано нейронну мережу типу перцептрон (Feed-Forward Backpropagation), що складається з прихованого шару з 10 нейронами із сигмоїдною функцією активації (TANSIG) та вихідного шару з одним лінійним нейроном (PURELIN).

Процес навчання здійснювався за допомогою високоефективного алгоритму Левенберга-Маркардта (функція TRAINLM), а точність моделювання оцінювалася за показником середньоквадратичної помилки (MSE).

Розроблено модель для процесу охолодження, де як вхідні дані використано показники з матриці планування повного факторного експерименту. В ході роботи було зафіксовано прогрес навчання за епохами та виконано графічне порівняння експериментальних значень із розрахунковими даними, отриманими мережею.

Аналогічна процедура синтезу була реалізована для процесу осадження на основі відповідних даних планування експерименту. Після завантаження вхідних і вихідних параметрів програма відобразила результати навчання, які продемонстрували високу збіжність розрахункових значень із реальними даними.

Підсумкові графіки підтвердили адекватність створених нейро-мережевих моделей та їхню здатність точно відтворювати динаміку досліджуваних процесів.

РОЗДІЛ 6

СИНТЕЗ НЕЙРО-НЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ

6.1. Синтез нейро-нечіткої моделі управління процесом спалювання

Замість нечітких моделей та нейронних мереж можна застосовувати гібридні моделі, такі як нейро-нечіткі мережі, які за задумом повинні поєднувати всі переваги двох вище перерахованих методів. Можливості MATLAB дають змогу провести ці дослідження. Для цього в MATLAB існує редактор ANFIS, який дозволяє створювати або завантажувати конкретну модель адаптивної системи нейро-нечіткого виведення, виконувати її навчання, візуалізувати її структуру, змінювати та налаштовувати її параметри, а також використовувати налаштовану мережу для отримання результатів нечіткого виведення.

Вводимо у головному вікні команд програми MATLAB `anfisedit` і натиснемо `enter` - відкривається вікно як у малюнку 6.1.

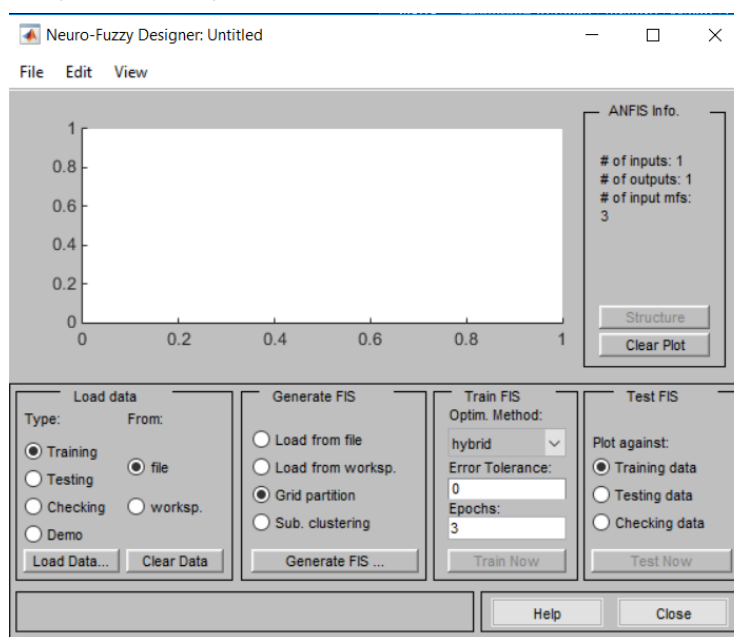


Рис. 6.1. Запуск редактора AnfisEdit

Відкривається редактор `anfis`, як показано на рис. 6.2. Кожному рядку даних відповідає окрема точка графіки, яка для навчальних даних зображена кружком. На горизонтальній осі вказуються порядковий номер (індекс) окремого рядка даних, а вертикальна вісь служить для вказівки значень вихідної змінної. Наступним етапом створення гібридної мережі є створення структури системи нечіткого виведення. На даному етапі можна переглянути архітектуру мережі (рисунок 6.3)

Щоб переглянути архітектуру мережі, необхідно задати епохи. Як буде задана епоха, програма відобразить процес. Перегляд архітектури мережі:

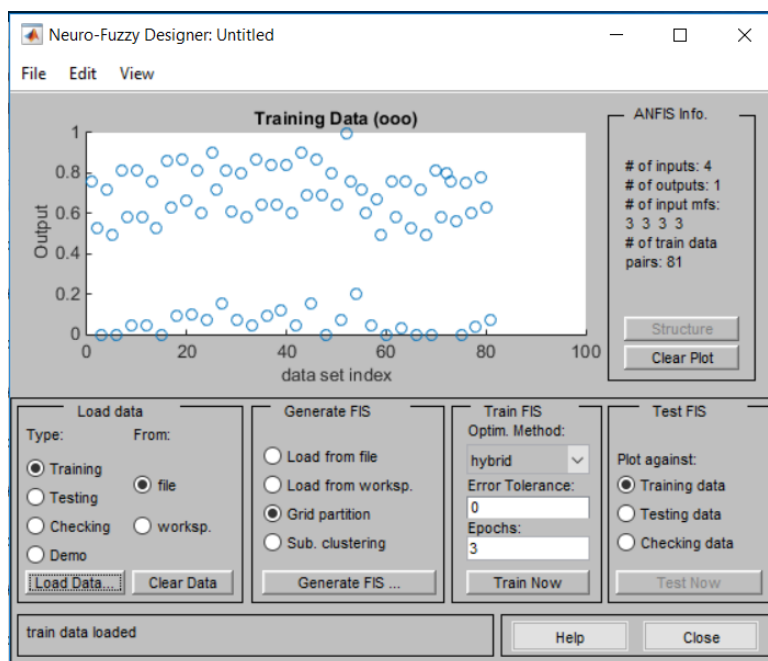


Рис. 6.2. AnfisEdit після завантаження даних нейронної мережі

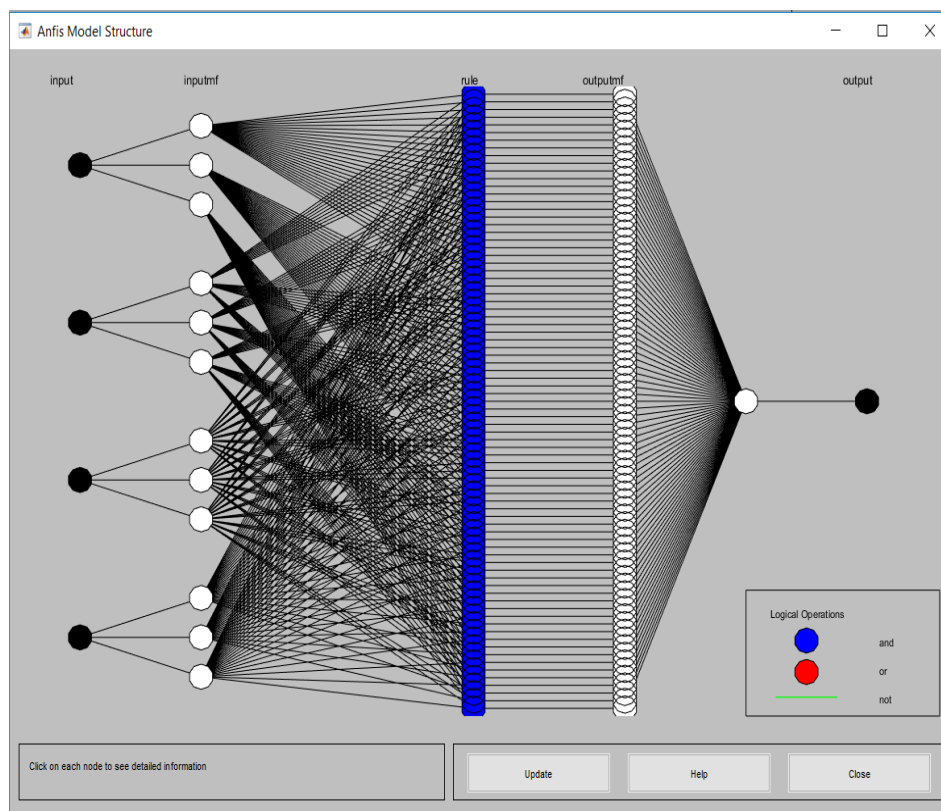


Рис. 6.3. Структура гібридної мережі

Тепер необхідно вибрати метод навчання гібридної мережі, наприклад, метод оптимізації, кількість епох навчання та припустиму помилку (рис.6.4).

Представлена на рис. 6.3 мережа є модель управління верхньому рівні ієрархії з допомогою нейро-нечетких алгоритмів. Надалі цю модель можна використовувати для розрахунку вихідних змінних за будь-яких змін вхідних.

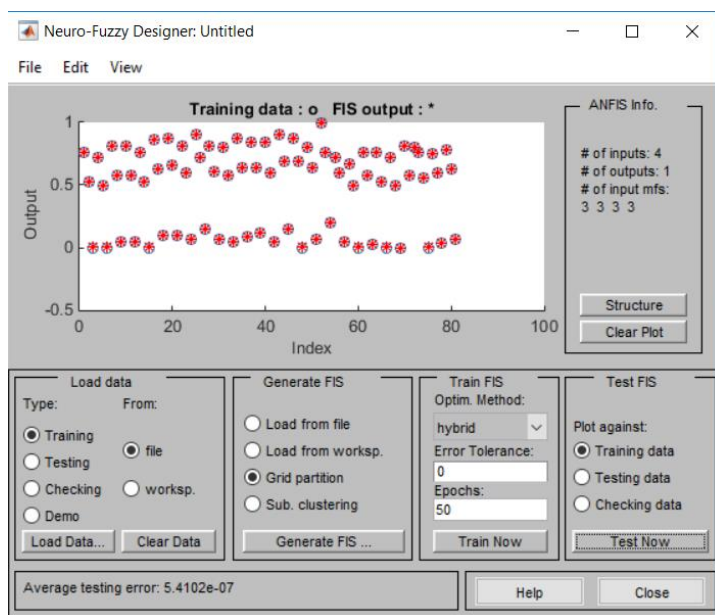


Рис. 6.4. Графічний інтерфейс редактора після завдання параметрів навчання гібридної мережі

Після завершення навчання мережі (рис. 6.5), її можна протестувати, завантажити перевіірочні дані або переглянути і задати будь-які допустимі значення у FIS редакторі RuleViewer, так само як і поза чіткою логікою рисунок 6.6, який є нейро-нечіткою моделлю управління на середньому рівні АСУТП.

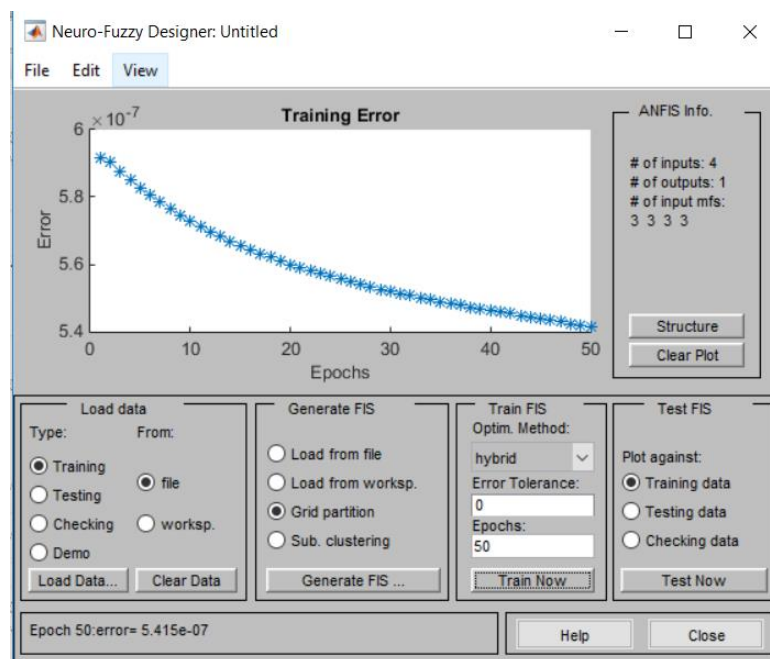


Рис. 6.5. Навчена нейро-нечітка мережа для процесу спалювання

Після навчання цієї мережі у правилах буде відображено навчену структуру. Ця структура відповідає правильному та адекватному навчанню.



Рис. 6.6. Нейро-нечітка модель управління процесом спалювання

6.2. Синтез нейро-нечіткої моделі управління процесом охолодження

Аналогічно мережа будується для процесу охолодження. На даному етапі можна переглянути архітектуру мережі. рисунок 6.7-8

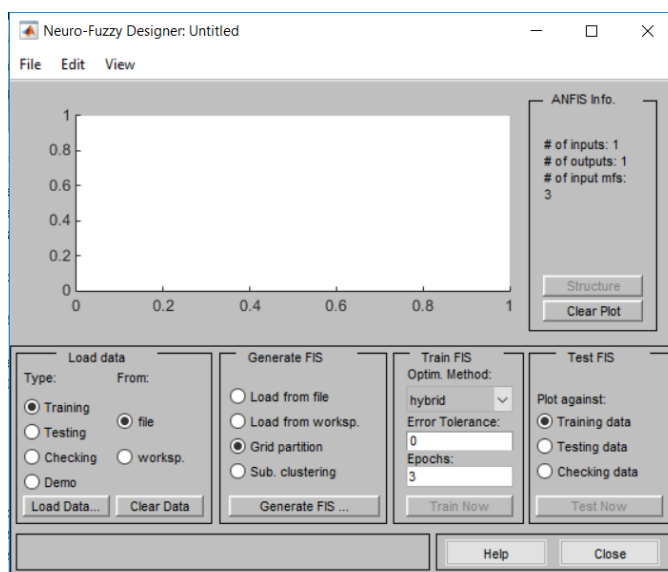


Рис. 6.7. Запуск редактора AnfisEdit

Перегляд архітектури мережі:

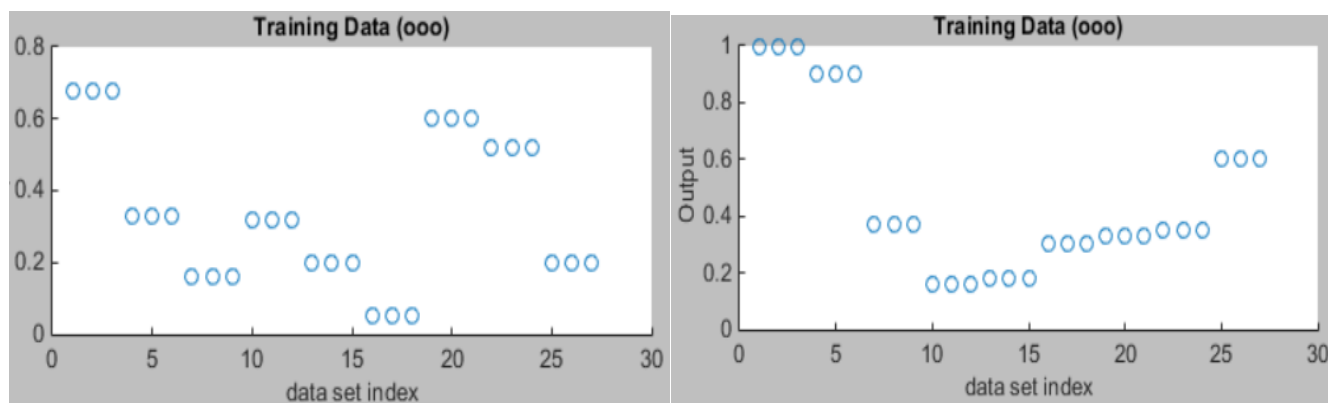


Рис. 6.8. AnfisEdit після завантаження даних нейронної мережі

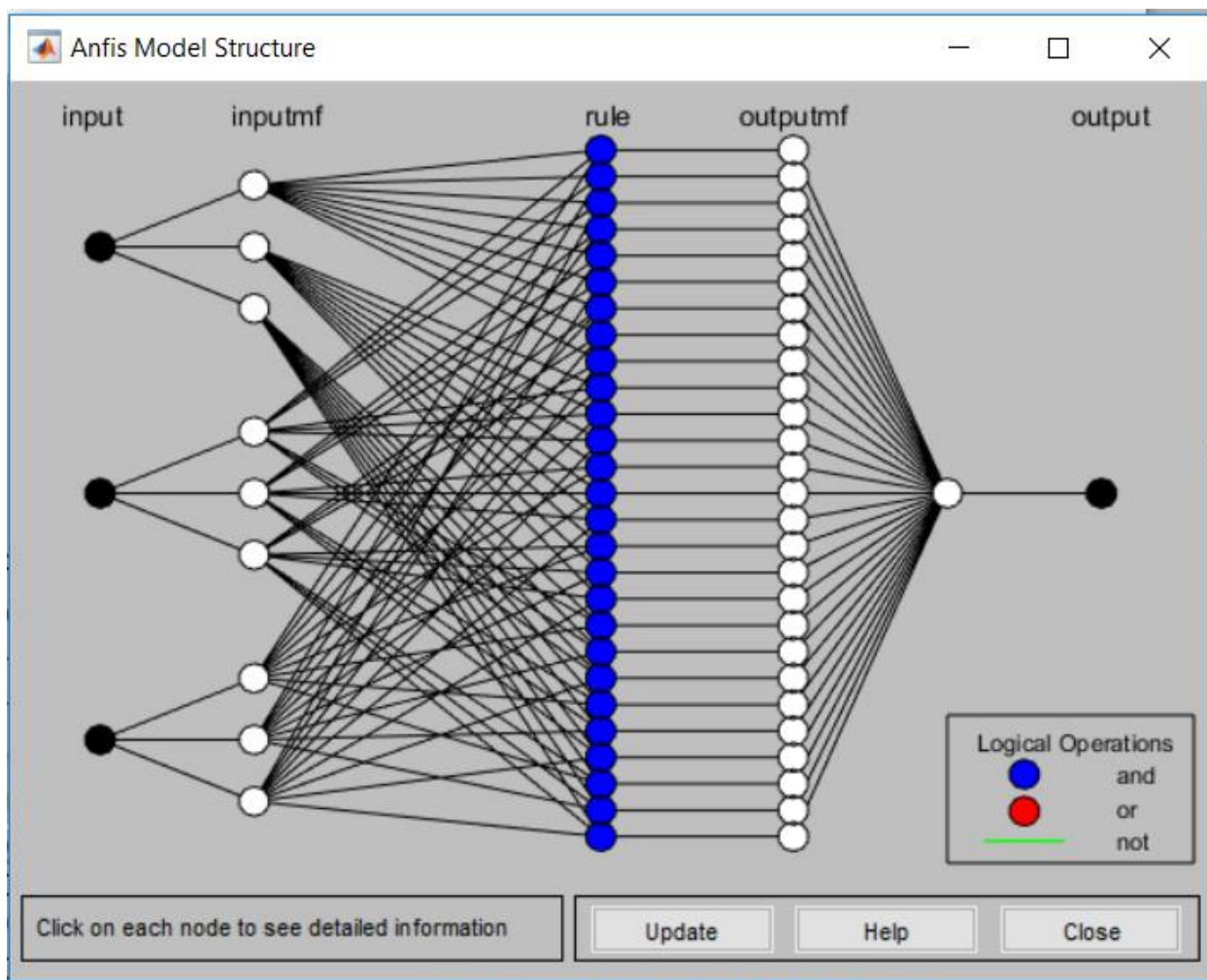


Рис. 6.9. Структура гібридної мережі

Тепер необхідно вибрати метод навчання гібридної мережі, наприклад, метод оптимізації, кількість епох навчання, та припустиму помилку (див. рис. 6.10).

Представлена на рисунку 6.9 мережа є модель управління верхньому рівні ієрархії з допомогою нейро-нечітких алгоритмів. Надалі цю модель можна використовувати для розрахунку вихідних змінних за будь-яких змін вхідних.

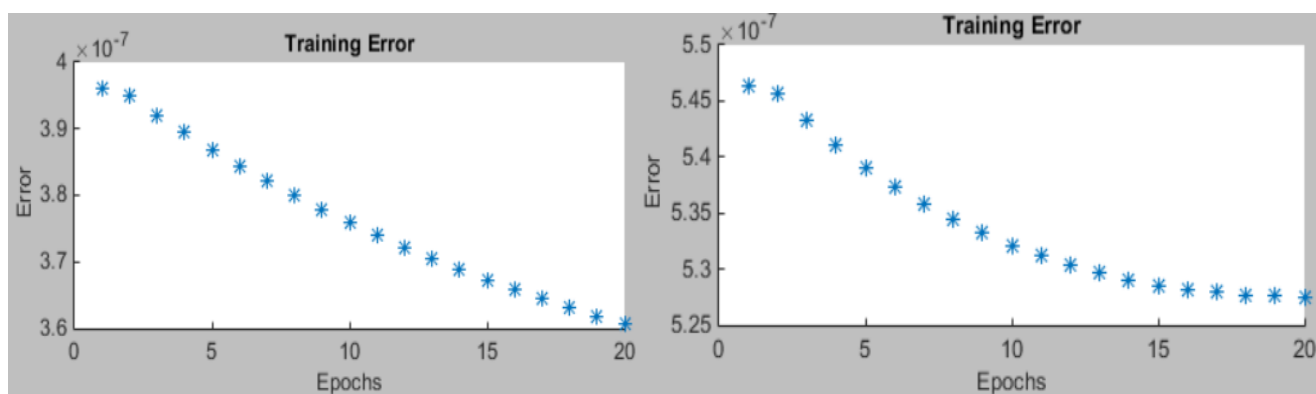


Рис. 6.10. Графічний інтерфейс редактора після завдання параметрів навчання гібридної мережі

Після завершення навчання мережі (рисунок 6.11), її можна протестувати, завантажити перевіірочні дані або переглянути та задати будь-які допустимі значення у FIS редакторі RuleViewer, так само як і поза чіткою логікою рис. 6.12, який є нейро-нечіткою моделлю управління на середньому рівні АСУТП.

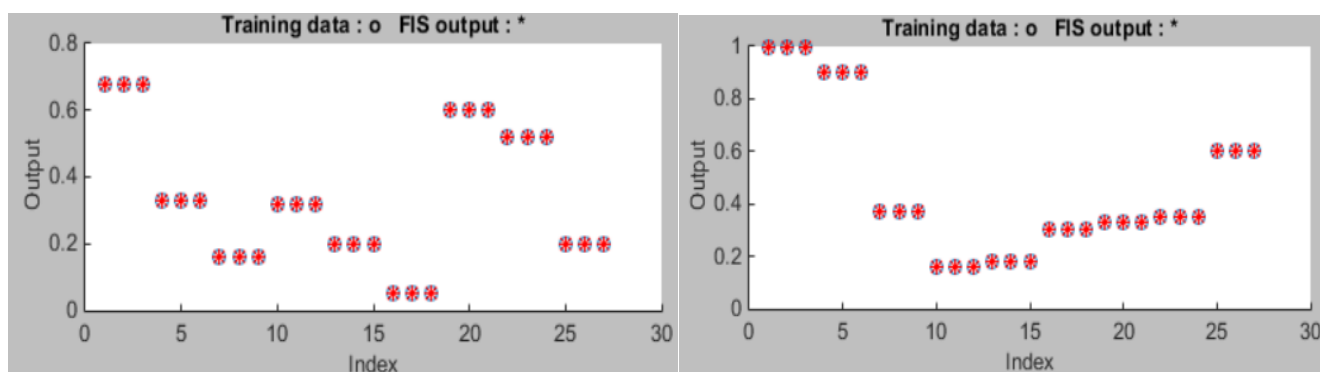


Рис. 6.11. Нейро-нечітка мережа для процесу охолодження навчена

Після навчання цієї мережі отримуємо нечіткий вихід (рисунок 6.12).

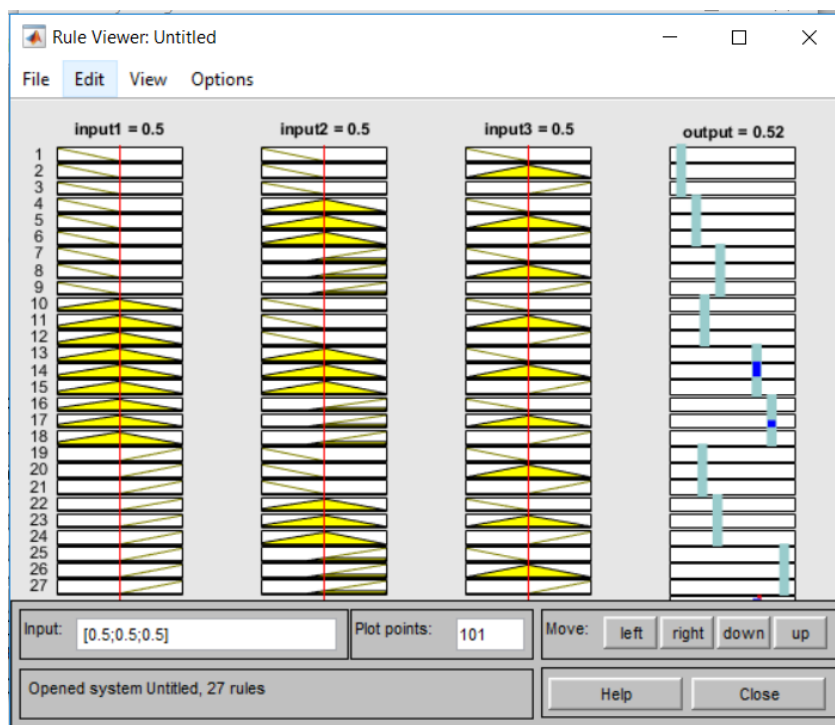


Рис. 6.12. Нейро-нечітка модель управління процесом охолодження

6.3. Синтез нейро-нечіткої моделі управління процесом осадження

Так само побудуємо мережу для осадження. У цьому етапі можна переглянути архітектуру мережі малюнок 6.13-14.

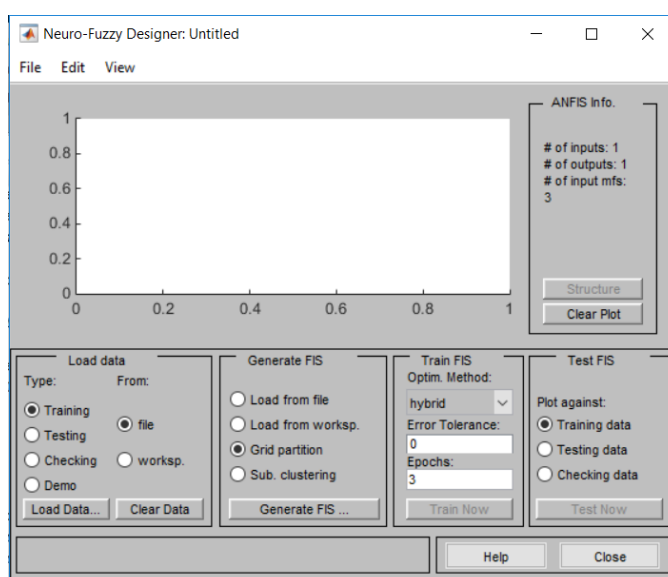


Рис. 6.13 - Запуск редактора AnfisEdit

Перегляд архітектури мережі:

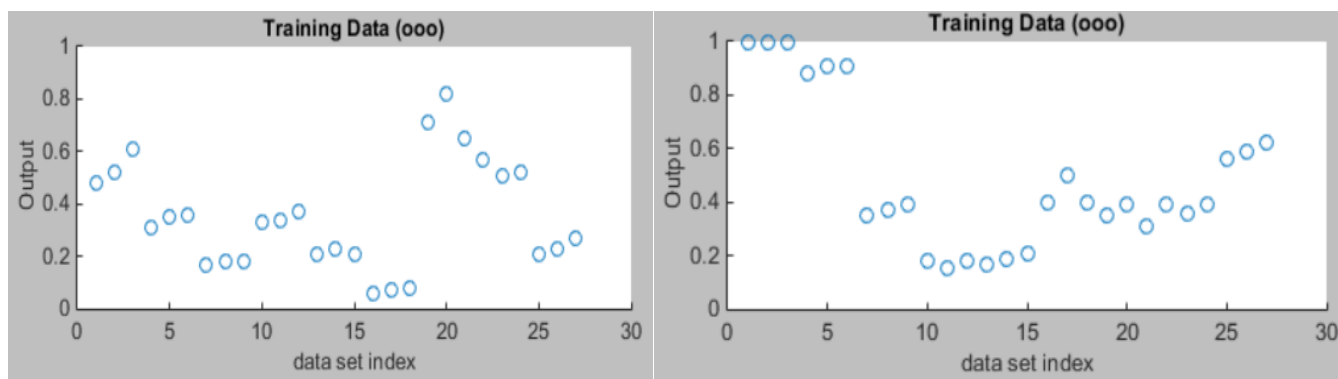


Рис. 6.14. AnfisEdit після завантаження даних нейронної мережі

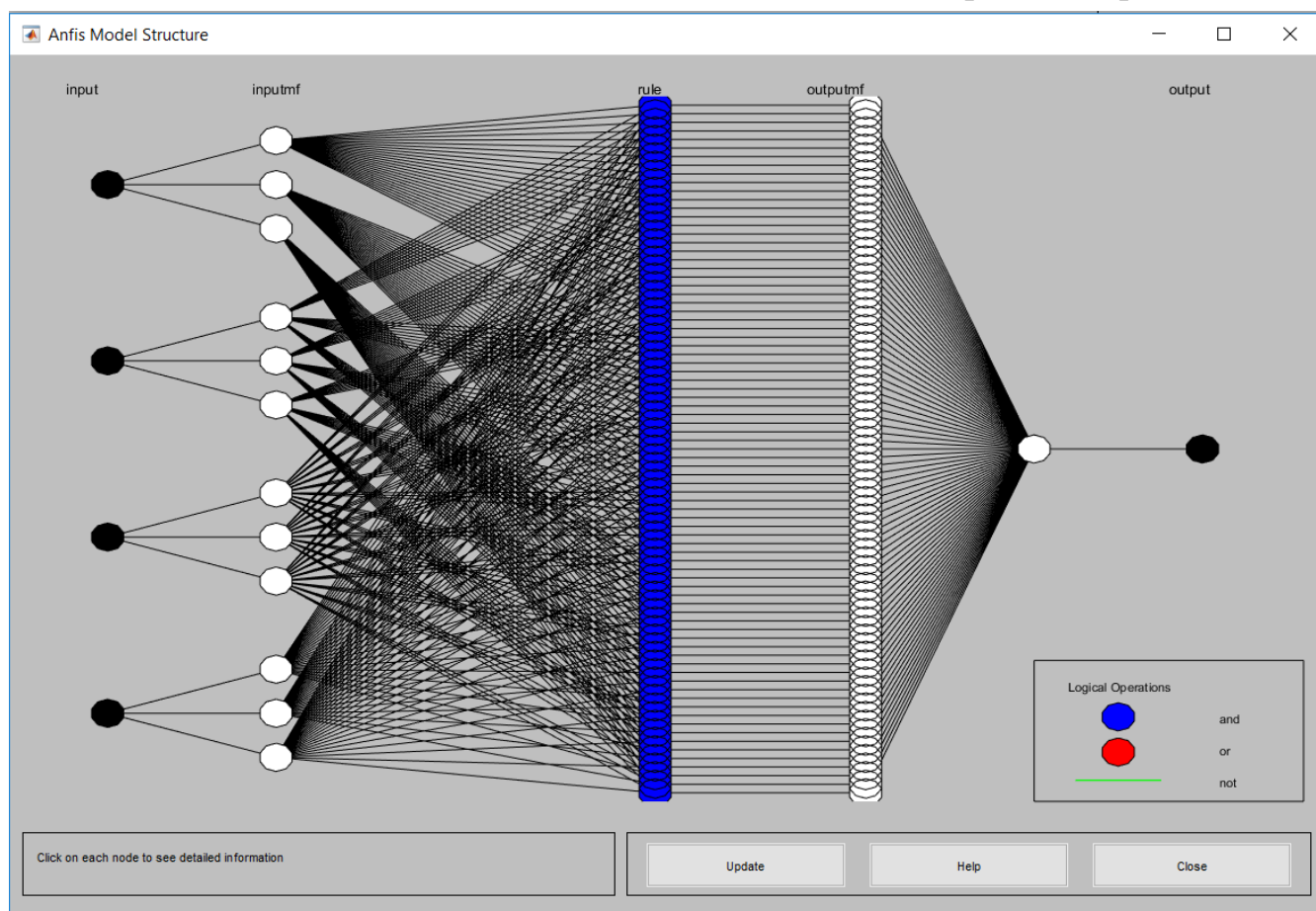


Рис. 6.15 - Структура гібридної мережі

Тепер необхідно вибрати метод навчання гібридної мережі (див. рис. 6.16). Представлена рис. 6.15 мережу є модель управління верхньому рівні ієрархії з допомогою нейро-нечітких алгоритмів. Надалі цю модель можна використовувати для розрахунку вихідних змінних за будь-яких змін вхідних.

Після завершення навчання мережі (рис. 6.17), її можна протестувати, завантажити перевіірочні дані або переглянути і задати будь-які допустимі значення у FIS редакторі RuleViewer.

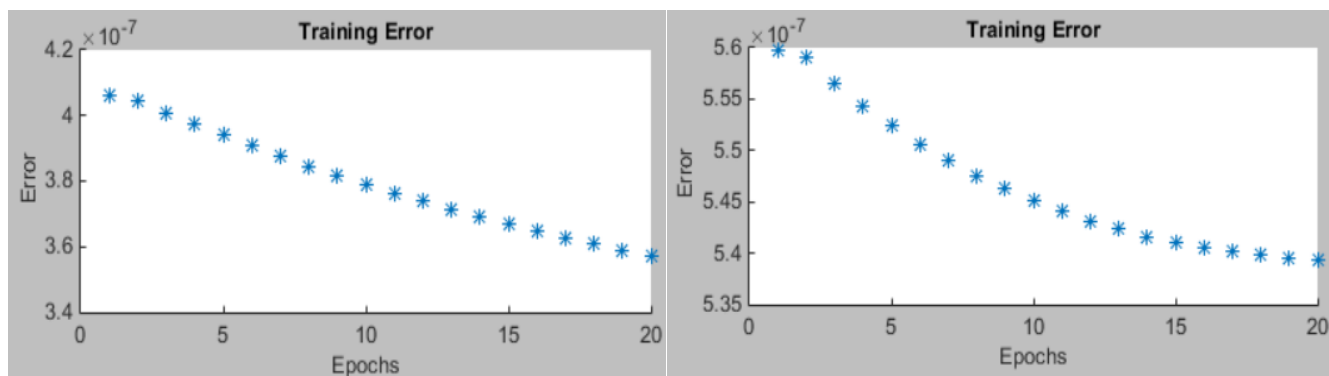


Рис. 6.16. Графічний інтерфейс редактора після завдання параметрів навчання гібридної мережі (осадження)

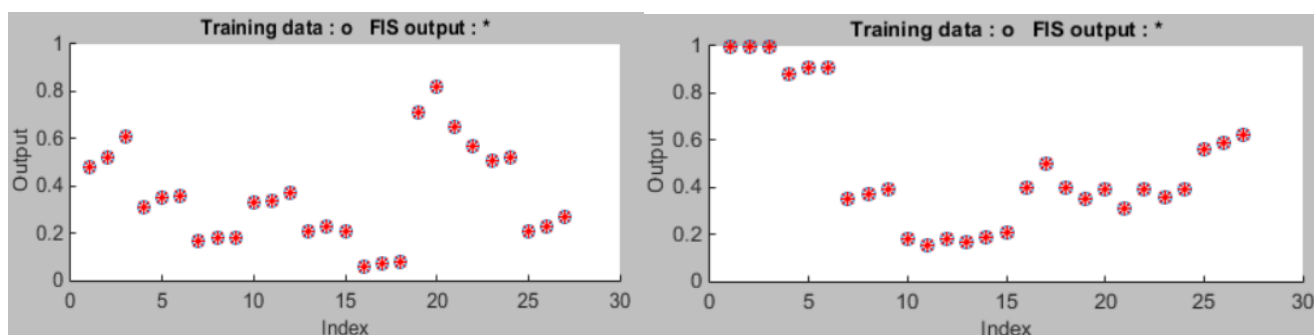


Рис. 6.17. Нейро-нечітка мережа для процесу осадження навчена



Рис. 6.18. Нейро-нечітка модель управління для процесу осадження

Під час навчання мережі застосовувалися різноманітні методи успішного навчання.

Для оцінки виконаної роботи необхідно дослідити модель на адекватність. Надалі дослідження нейро-нечіткої моделі на адекватність, однозначність, чутливість та стійкість показують її ефективність та можливість застосування на практиці.

Висновки до розділу 6

У цьому розділі було успішно виконано синтез нейро-нечітких (гібридних) моделей управління для трьох ключових технологічних процесів: спалювання, охолодження та осадження. Головною метою було створення гібридних систем, які поєднують сильні сторони нейронних мереж (здатність до навчання) та нечіткої логіки (зручність оперування лінгвістичними правилами).

Для реалізації цих моделей використовувався спеціалізований інструмент ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), доступний у програмному середовищі MATLAB, який дозволяє створювати, навчати, візуалізувати та налаштовувати такі системи.

Процес синтезу для кожного з трьох процесів розпочинався із запуску редактора ANFIS та завантаження відповідних навчальних даних. Далі задавалася структура системи нечіткого виведення та здійснювався перегляд архітектури гібридної мережі.

На наступному етапі вибиралися параметри навчання, включаючи метод оптимізації, кількість епох та допустиму помилку, після чого проводилося власне навчання мережі.

Після успішного завершення навчання (наприклад, для процесу спалювання, рис. 6.5) навчені моделі готові до тестування. Їх можна перевірити за допомогою контрольних даних або ж візуально проаналізувати в редакторі RuleViewer для перегляду навченої структури правил, що відповідає правильному та адекватному навчання.

Створені нейро-нечіткі моделі визначені як моделі управління верхнього або середнього рівня ієрархії АСУТП, які можуть бути використані для точного розрахунку вихідних змінних при зміні вхідних параметрів.

РОЗДІЛ 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ОТРИМАНИХ МОДЕЛЕЙ НА АДЕКВАТНІСТЬ

7.1. Оцінка адекватності моделей управління процесами спалювання, охолодження та осадження

У випадку під адекватністю розуміють ступінь відповідності моделі тому реальному явищу чи об'єкту, для опису якого вона будується. Створювана модель спрямовано вивчення певного підмножини властивостей цього об'єкта. Тому вважатимуться, що адекватність моделі визначається ступенем її відповідності й не так реальному об'єкту, скільки цілям дослідження. Найбільшою мірою це твердження справедливе щодо моделей проєктованих систем (тобто у ситуаціях, коли реальної системи взагалі немає). Тим не менш, у багатьох випадках корисно мати формальне підтвердження (або обґрунтування) адекватності розробленої моделі. Один із найпоширеніших способів такого обґрунтування – використання методів математичної статистики. Суть цих методів полягає у перевірці висунутої гіпотези (у даному випадку про адекватність моделі) на основі деяких статистичних критеріїв. У цьому слід зазначити, що з перевірці гіпотез методами математичної статистики необхідно пам'ятати, що статистичні критерії що неспроможні довести жодної гіпотези – вони можуть лише зазначити відсутність спростування. Процедура оцінки заснована на порівнянні вимірювань на реальній системі та результатів експериментів на моделі і може проводитись різними способами.

Найбільш поширені з них: за середніми значеннями відгуків моделі та системи; за дисперсіями відхилень відгуків моделі від середнього значення відгуків системи; – за максимальним значенням відносних відхилень відгуків моделі від відгуків системи; за середньою абсолютною помилкою.

7.2 Оцінка моделей управління на адекватність процесам спалювання

У зв'язку з тим, що метод планування експерименту показав недоцільно високе значення абсолютної помилки – понад 14%, ми не будемо проводити його подальші дослідження. Проведемо порівняльний аналіз на адекватність інтелектуальних. Результати досліджень інтелектуальних моделей управління наведено у таблиці 7.1.

Результати моделювання інтелектуальних моделей

№ експерименту	Нечітка логіка	Нейронна мережа	Нейро-нечітка мережа	Правильна відповідь Y
1	0,74	0,733	0,75	0,76
2	0,525	0,522	0,552	0,53
3	0,001	0,003	0	0
4	0,7177	0,7089	0,719	0,72
5	0,4964	0,4816	0,49	0,49
6	0,017	0,013	0,02	0
7	0,8099	0,80	0,81	0,81
8	0,578	0,543	0,589	0,58
9	0,037	0,042	0,049	0,046
10	0,823	0,8234	0,81	0,81
11	0,57	0,5953	0,58	0,58
12	0,0234	0,0345	0,043	0,046
13	0,7498	0,745	0,76	0,76
14	0,54	0,5689	0,531	0,53
15	0,01	0,022	0,01	0
16	0,85	0,812	0,86	0,86
17	0,6156	0,6123	0,6234	0,63
18	0,087	0,082	0,094	0,092
19	0,859	0,834	0,86	0,87
20	0,643	0,642	0,66	0,66
21	0,12	0,11	0,1	0,1
22	0,85	0,8588	0,83	0,81
23	0,6158	0,5782	0,6008	0,6
24	0,064	0,063	0,068	0,07
25	0,87	0,84	0,9	0,9
26	0,7190	0,7145	0,7199	0,72
27	0,1466	0,1398	0,1484	0,15
28	0,8012	0,8017	0,8093	0,81
29	0,6028	0,6056	0,6065	0,61
30	0,09	0,011	0,08	0,07
31	0,7913	0,7926	0,795	0,8
32	0,5756	0,5716	0,58	0,58
33	0,027	0,023	0,045	0,046
34	0,85	0,8571	0,8602	0,87
35	0,6476	0,6312	0,6398	0,64
36	0,078	0,083	0,09	0,09
37	0,8523	0,8567	0,8419	0,84
38	0,6238	0,6221	0,63	0,64

Продовження таблиці 7.1

39	0,13	0,1345	0,128	0,12
40	0,8217	0,8239	0,8256	0,84
41	0,56	0,61	0,6	0,6
42	0,028	0,0219	0,034	0,046
43	0,85	0,83	0,9	0,9
44	0,68	0,7228	0,69	0,69
45	0,1476	0,1399	0,1417	0,15
46	0,8662	0,8643	0,8679	0,87
47	0,6713	0,6744	0,6818	0,69
48	0,003	0,01	0	0
49	0,7892	0,7913	0,796	0,8
50	0,6347	0,6324	0,6398	0,64
51	0,067	0,065	0,068	0,07
52	0,99	0,9914	0,999	1
53	0,7567	0,7612	0,7601	0,76
54	0,197	0,2305	0,2	0,2
55	0,7062	0,7104	0,7222	0,72
56	0,58	0,5803	0,69	0,6
57	0,029	0,023	0,037	0,046
59	0,4782	0,4407	0,48	0,49
60	0,0019	0,0013	0	0
61	0,759	0,7553	0,7596	0,76
62	0,5861	0,5899	0,573	0,58
63	0,07	0,06	0,02	0,03
65	0,5273	0,5489	0,5308	0,53
66	0,006	0,004	0,001	0
67	0,736	0,7405	0,7215	0,72
68	0,49	0,4862	0,49	0,49
69	0,01	0,03	0,01	0
70	0,8059	0,8015	0,81	0,81
71	0,5741	0,5813	0,5784	0,58
72	0,7825	0,7845	0,8002	0,8
73	0,76	0,7519	0,7608	0,76
74	0,5603	0,5599	0,56	0,56
75	0,008	0,01	0	0
76	0,742	0,7378	0,75	0,75
77	0,5689	0,6	0,6	0,6
78	0,023	0,039	0,038	0,04
79	0,7741	0,7826	0,7897	0,78
80	0,63	0,6229	0,6304	0,63
81	0,05	0,09	0,068	0,07

Результати моделювання та величини помилок різних моделей були зведені до таблиці 7.2. При цьому величина абсолютної помилки розраховувалася за формулою 1.2.

Таблиця 7.2

Порівняльна оцінка абсолютної помилки для різних методів

Метод моделювання	Розмір абсолютної помилки %
	Y
1. Нечіткі алгоритми	1,3
2. Нейромережні алгоритми	2,4
3. Нейро-нечіткі мережі	0,6

Аналіз таблиці 7.2 показав, що інтелектуальні моделі показали свою перевагу: від 0,6% до 2,4%, при цьому найкращим виявився метод нейронечітких мереж (0,6%).

Таким чином, проведені дослідження показали високу ефективність алгоритмів керування, отриманих за допомогою методів штучного інтелекту. Порівняно з класичними методами побудови аналітико-статистичних моделей методи, що ґрунтуються на знаннях, досвіді інтуїції людей-експертів дозволяють створювати системи оптимального управління складними технологічними процесами значно легше, швидше та ефективніше. У цьому оцінка адекватності інтелектуальних моделей значно вище, ніж із традиційному моделюванні.

На рисунку 7.1 показано зміну температури після витрати рециркуляційних газів (X1), витрати стисненого повітря (X2), витрати технічного кисню (X3) та витрати жовтого фосфору з дозатора (X4). Кожна крива було отримано за значення інших вхідних змінних, рівними по 0,5 – тобто. за номінальних значень. Значення точок на кривих малюнка 7.1 були взяті з матриці планування ПФЕ, сформовані експертами – операторами.

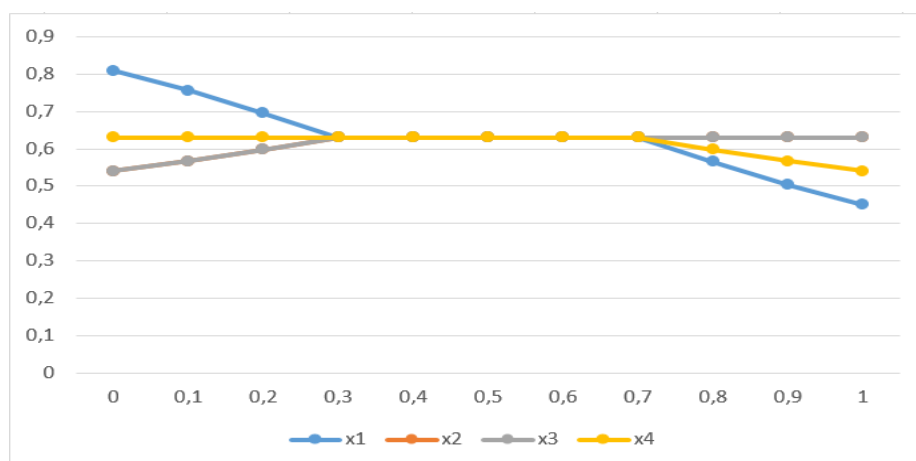


Рис. 7.1 – Криві, отримані за матрицею планування ПФЕ

Результати моделювання трьома типами моделей наведено на рисунках 7.2 – 7.3.

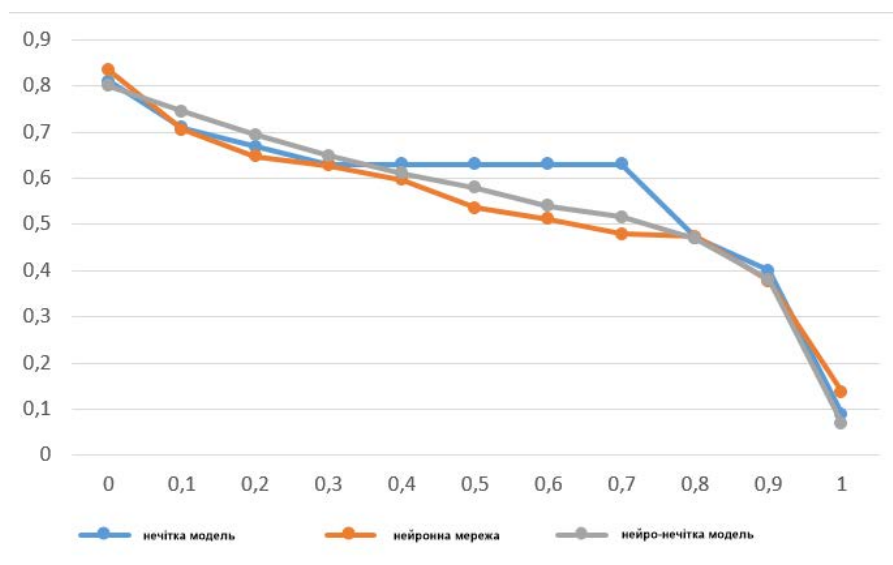


Рис. 7.2. Результати моделювання трьома типами моделей при зміні X_2 та при номінальних значеннях $X_{1,3,4}=0,5$

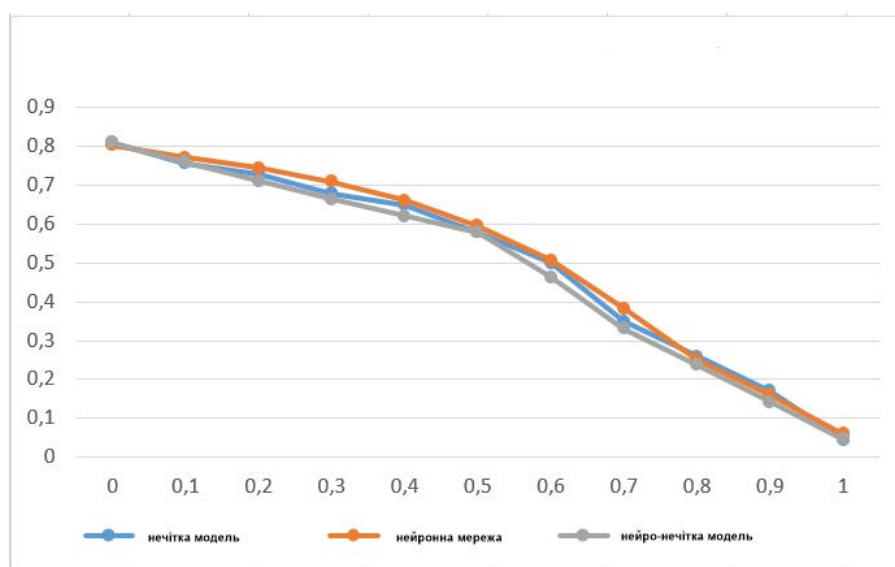


Рис. 7.3. Результати моделювання трьома типами моделей при зміні X_1 та при номінальних значеннях $X_{2,3,4}=0,5$

7.3 Оцінка моделей управління на адекватність процесам охолодження

Результати оцінки інтелектуальної моделі управління процесу охолодження для змінної u_2 наведено у таблиці 7.3.

Таблиця 7.3

**Результати оцінки інтелектуальної моделі управління процесу
охолодження для змінної у₂**

№ експерименту	Нечітка логіка	Нейронна мережа	Нейро-нечітка мережа	Правильна відповідь Y ₂
1	0,6823	0,6827	0,6813	0,68
2	0,6746	0,6783	0,6807	0,68
3	0,6753	0,6812	0,68	0,68
4	0,3347	0,3341	0,33	0,33
5	0,33	0,3331	0,33	0,33
6	0,3242	0,3234	0,3288	0,33
7	0,1632	0,1665	0,16	0,16
8	0,1625	0,1643	0,1602	0,16
9	0,1607	0,1621	0,1604	0,16
10	0,3166	0,3145	0,3179	0,32
11	0,3187	0,3165	0,3199	0,32
12	0,3162	0,3104	0,32	0,32
13	0,2132	0,21	0,2	0,2
14	0,1909	0,1892	0,198	0,2
15	0,2023	0,2043	0,2	0,2
16	0,07	0,07	0,058	0,05
17	0,047	0,043	0,0497	0,05
18	0,04	0,039	0,05	0,05
19	0,6088	0,6025	0,6	0,6
20	0,614	0,623	0,6078	0,6
21	0,6087	0,6073	0,601	0,6
22	0,5127	0,5111	0,5173	0,52
23	0,4938	0,4921	0,5001	0,52
24	0,5217	0,5235	0,522	0,52
25	0,2026	0,2043	0,2	0,2
26	0,2032	0,21	0,2	0,2
27	0,1969	0,1942	0,1987	0,2

Таблиця 7.4

**Результати оцінки інтелектуальної моделі управління процесу
охолодження для змінної у₃**

№ експерименту	Нечітка логіка	Нейронна мережа	Нейро-нечітка мережа	Правильна відповідь Y ₃
1	0,9916	0,9954	0,9989	1
2	0,9812	0,9803	0,9907	1
3	0,98	0,9872	0,99	1
4	0,9046	0,9083	0,9007	0,9
5	0,89	0,8922	0,8978	0,9
6	0,8938	0,8921	0,9001	0,9

7	0,3687	0,3735	0,3679	0,37
8	0,367	0,3634	0,3702	0,37
9	0,3642	0,3643	0,3704	0,37
10	0,1607	0,1621	0,1604	0,16
11	0,1632	0,1665	0,16	0,16
12	0,1632	0,1665	0,16	0,16
13	0,1783	0,1797	0,1806	0,18
14	0,1809	0,1792	0,18	0,18
15	0,1742	0,1734	0,1788	0,18
16	0,3017	0,3019	0,3002	0,3
17	0,2906	0,2945	0,2967	0,3
18	0,29	0,2922	0,2978	0,3
19	0,3262	0,3204	0,33	0,33
20	0,3287	0,3265	0,3299	0,33
21	0,3266	0,3245	0,3279	0,33
22	0,3447	0,3441	0,35	0,35
23	0,3576	0,3554	0,3516	0,35
24	0,35	0,3478	0,35	0,35
25	0,6087	0,6073	0,601	0,6
26	0,614	0,623	0,6078	0,6
27	0,6088	0,6025	0,6	0,6

Результати моделювання та величини помилок різних моделей були зведені до таблиці 7.5. Розмір абсолютної помилки була розрахована за формулою 1.2.

Таблиця 7.5

Порівняльна оцінка абсолютної помилки для різних методів

Метод моделювання	Розмір абсолютної помилки %
	Y
1. Нечіткі алгоритми	1,1
2. Нейромережні алгоритми	2,5
3. Нейро-нечіткі мережі	0,5

Аналіз таблиці 6.5 показав, що інтелектуальні моделі показали свою перевагу: від 0,5% до 2,5%, при цьому найкращим виявився метод нейронечітких мереж (0,5%).

Таким чином, проведені дослідження показали високу ефективність алгоритмів керування, отриманих за допомогою методів штучного інтелекту. У порівнянні з класичними методами побудови аналітико-статистичних моделей методи, що базуються на знаннях, досвіді інтуїції людей-експертів дозволяють створювати системи.

оптимального управління складними технологічними процесами значно легше, швидше та ефективніше. У цьому оцінка адекватності інтелектуальних моделей значно вище, ніж із традиційному моделюванні.

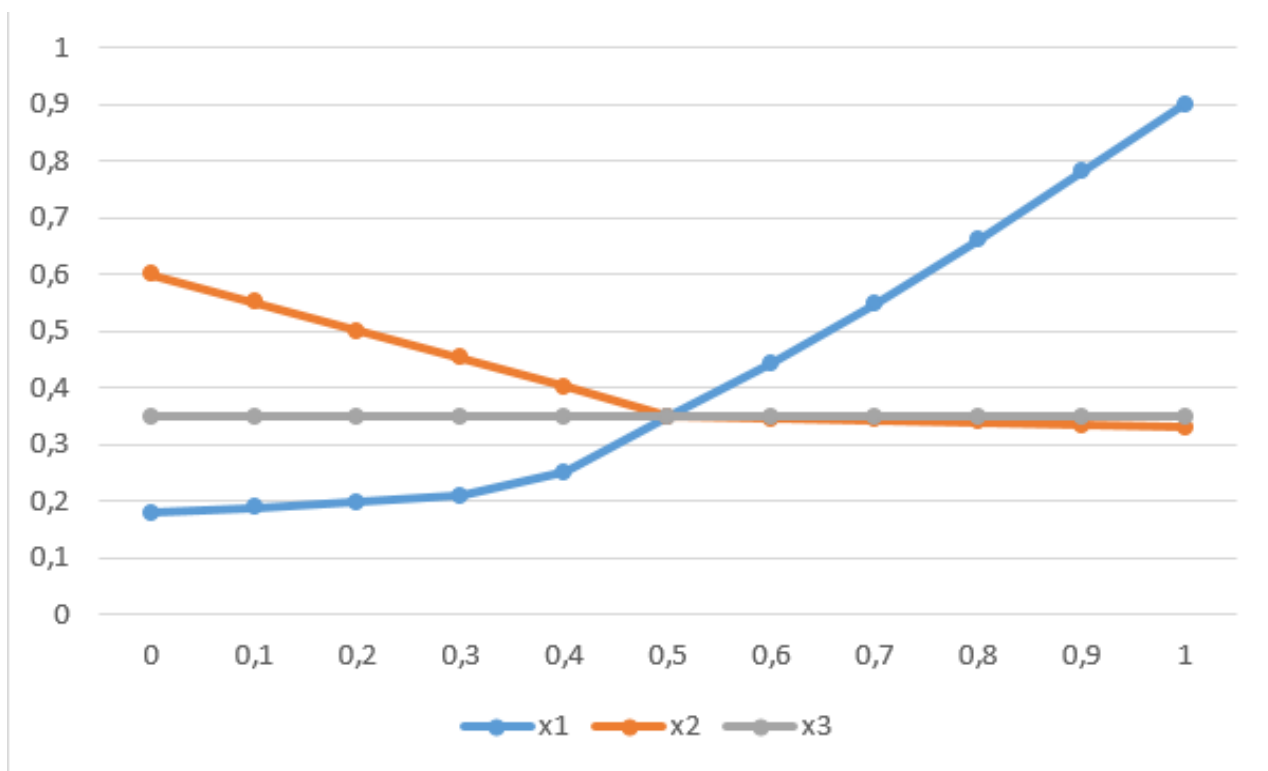


Рис. 7.4. Криві, отримані за матрицею планування ПФЕ для змінної u_4

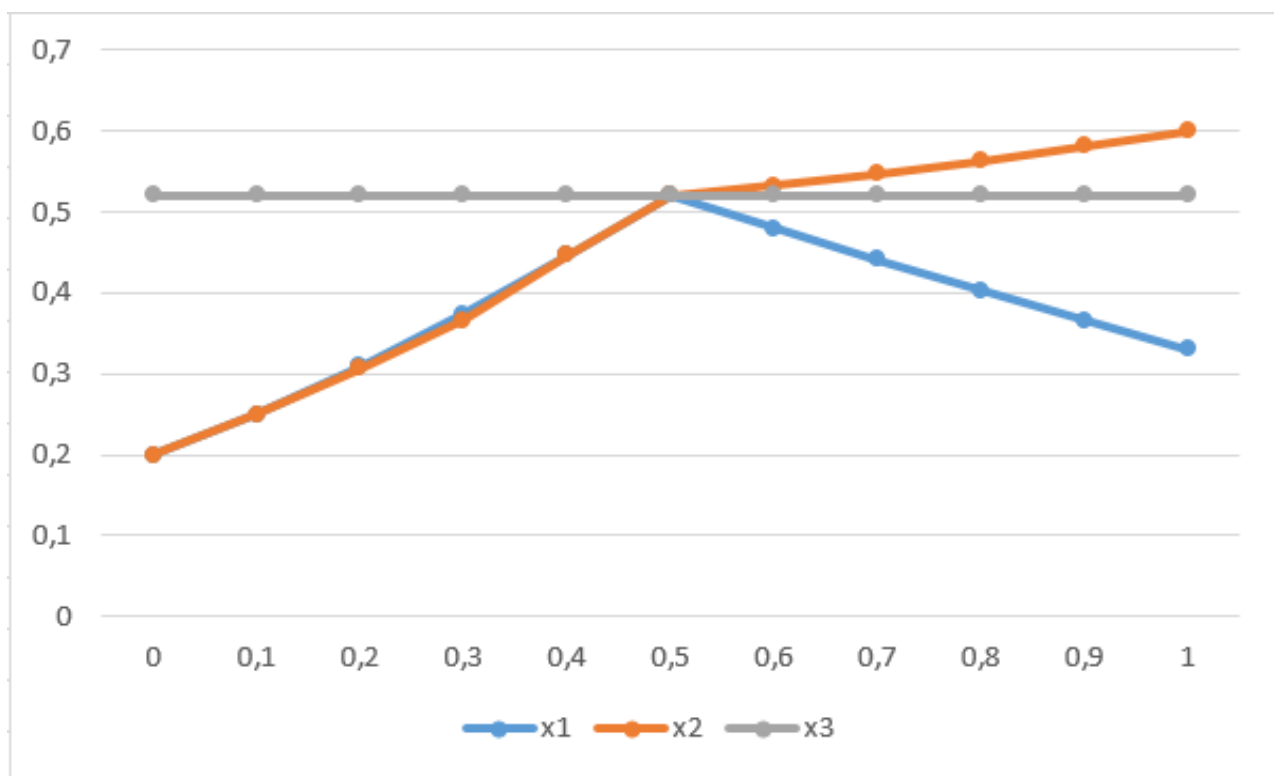


Рис. 7.5. Криві, отримані за матрицею планування ПФЕ для змінної u_5

Результати моделювання трьома типами моделей наведено на рис. 7.6 – 7.7.

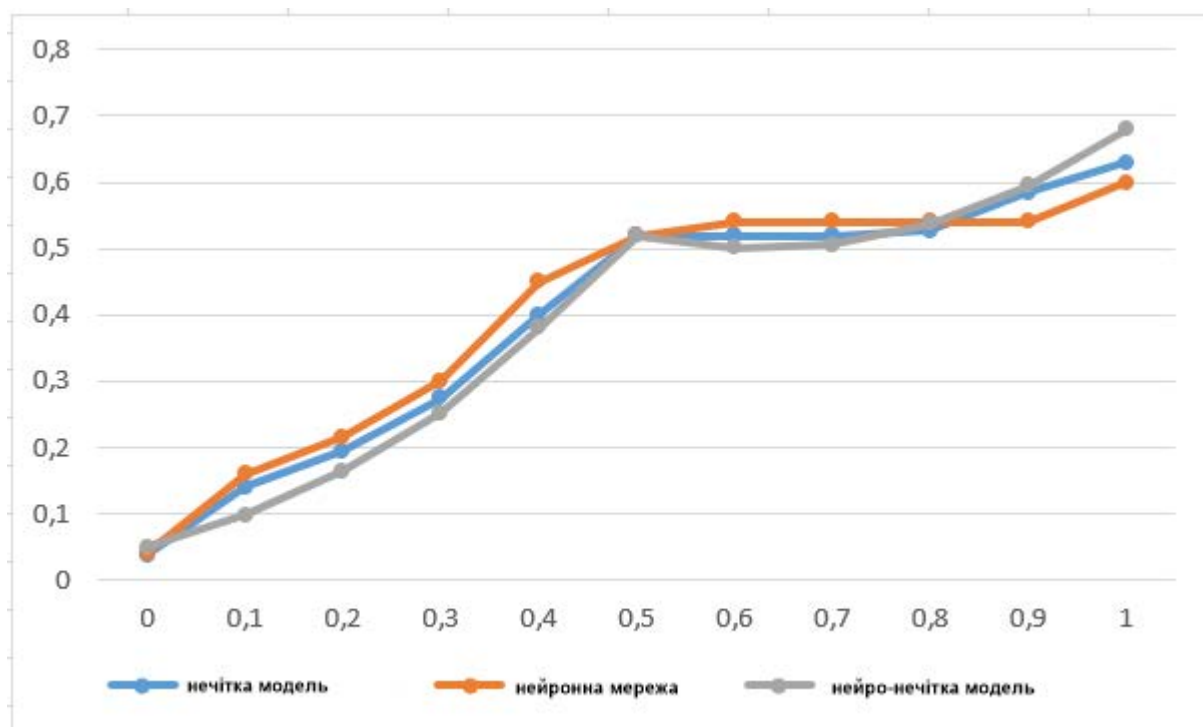


Рис. 7.6. Результати моделювання різними типами моделей для змінної u_4

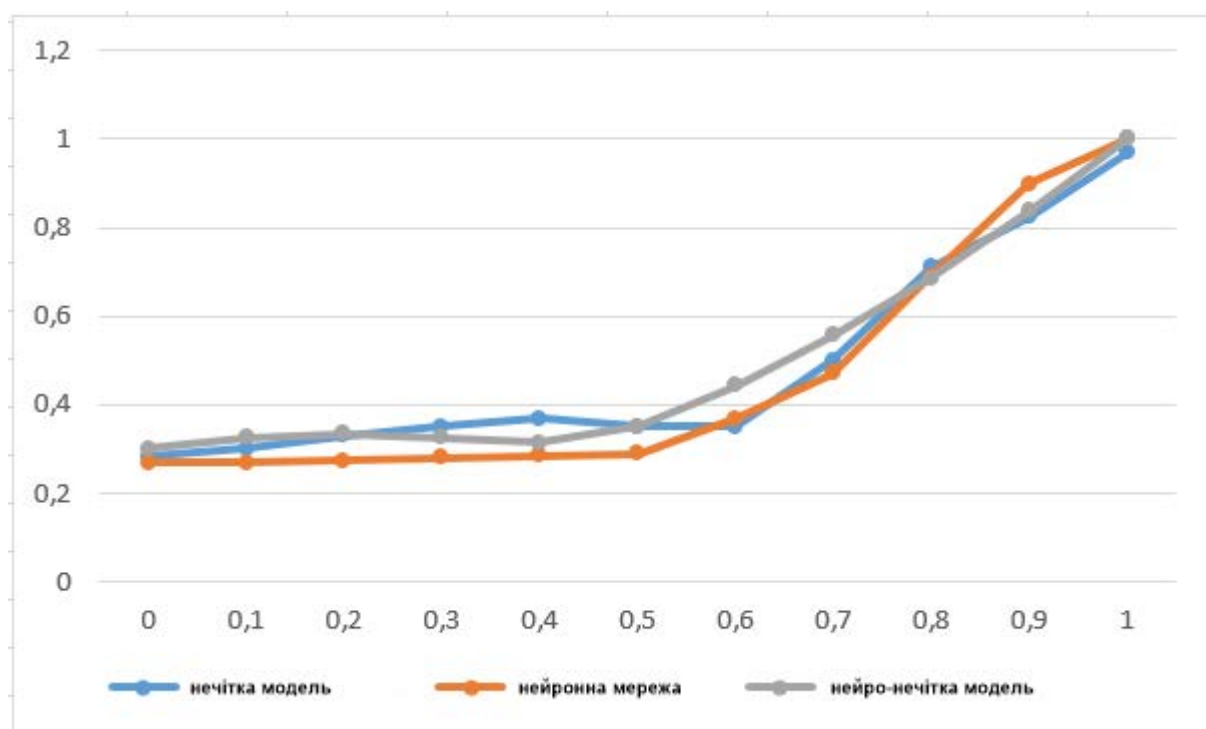


Рис. 7.7. Результати моделювання різними типами моделей для змінної u_5

7.2. Оцінка моделей управління адекватністю процесом осадження

Підсумки оцінки інтелектуальної моделі управління процесу осадження для змінної Y4 наведено у таблиці 7.6. У таблиці вказано кожен з моделей управління, досліджену різними методами.

Таблиця 7.6

Оцінки моделей управління процесом осадження для Y4

№ експерименту	Нечітка логіка	Нейронна мережа	Нейро-нечітка мережа	Правильна відповідь Y4
1	0,472	0,468	0,479	0,48
2	0,5127	0,5111	0,5173	0,52
3	0,6088	0,6025	0,61	0,61
4	0,3117	0,3119	0,3102	0,31
5	0,35	0,3478	0,35	0,35
6	0,3562	0,3604	0,36	0,36
7	0,167	0,1634	0,1702	0,17
8	0,1783	0,1797	0,1806	0,18
9	0,1809	0,1792	0,18	0,18
10	0,3206	0,3245	0,3267	0,33
11	0,3476	0,3454	0,3416	0,34
12	0,3687	0,3735	0,3679	0,37
13	0,2056	0,2054	0,2078	0,21
14	0,2387	0,2366	0,23	0,23
15	0,2132	0,22	0,21	0,21
16	0,07	0,07	0,068	0,06
17	0,09	0,011	0,07	0,07
18	0,1	0,1	0,09	0,08
19	0,714	0,723	0,7078	0,71
20	0,8245	0,8267	0,8212	0,82
21	0,6483	0,6437	0,6488	0,65
22	0,5621	0,5645	0,5632	0,57
23	0,5167	0,5174	0,5092	0,51
24	0,5187	0,5172	0,52	0,52
25	0,2023	0,2043	0,21	0,21
26	0,2367	0,2286	0,2301	0,23
27	0,2642	0,2643	0,2704	0,27

Результати оцінки інтелектуальної моделі управління процесу осадження для змінної Y5 наведено у таблиці 7.7.

Таблиця 7.7

Оцінки моделей управління процесом осадження Y5

№ експерименту	Нечітка логіка	Нейронна мережа	Нейро-нечітка мережа	Правильна відповідь Y ₅
1	0,98	0,9872	0,99	1
2	0,9812	0,9803	0,9907	1
3	0,9916	0,9954	0,9989	1
4	0,8721	0,8713	0,878	0,88
5	0,9146	0,9183	0,9107	0,91
6	0,9112	0,9123	0,9102	0,91
7	0,3447	0,3441	0,35	0,35
8	0,3703	0,623	0,3709	0,37
9	0,39	0,3831	0,39	0,39
10	0,1742	0,1734	0,1788	0,18
11	0,1532	0,1465	0,15	0,15
12	0,1807	0,1821	0,1804	0,18
13	0,1725	0,1743	0,1702	0,17
14	0,1853	0,1857	0,1823	0,19
15	0,21	0,2056	0,21	0,21
16	0,39	0,3922	0,3978	0,4
17	0,4938	0,4921	0,5001	0,5
18	0,3909	0,3895	0,3967	0,4
19	0,3478	0,3487	0,3489	0,35
20	0,3967	0,3912	0,39	0,39
21	0,3154	0,3157	0,3107	0,31
22	0,3895	0,39	0,39	0,39
23	0,3623	0,3589	0,36	0,36
24	0,3828	0,3852	0,3903	0,39
25	0,56	0,5702	0,56	0,56
26	0,5933	0,5924	0,59	0,59
27	0,6217	0,6235	0,622	0,62

Результати моделювання та величини помилок різних моделей були зведені до таблиці 7.8. Щоб обчислити величину абсолютної помилки, була використана формула 1.2.

Таблиця 7.8

Порівняльна оцінка абсолютної помилки для різних методів

Метод моделювання	Величина абсолютної похибки %
	Y
1. Нечіткі алгоритми	0,9
2. Нейромережні алгоритми	2,1
3. Нейро-нечіткі мережі	0,4

Аналіз таблиці 7.8 показує, що інтелектуальні моделі виявили свою перевагу: від 0,4% до 2,1%, при цьому найкращим виявився метод нейронечітких мереж (0,4%).

Отже, проведені дослідження показали високу ефективність алгоритмів управління, отриманих методами штучного інтелекту. На відміну від класичних методів побудови аналітико-статистичних моделей методи, що ґрунтуються на знаннях, досвіді інтуїції людей-експертів дають створювати системи оптимального управління складними технологічними процесами значно легше, швидше та ефективніше. У цих моделей оцінка адекватності інтелектуальних моделей набагато вище, ніж за традиційному моделюванні.

На рисунку 7.8 показано зміну витрати газів, що відходять з котла-утилізатора (X8), температури на вході в економайзер (X9) і витрати тиску охолоджуючої економайзером води (X10).

Значення точок на кривих рисунка 7.8 було взято з матриці планування ПФЕ, сформовані експертами – технологами.

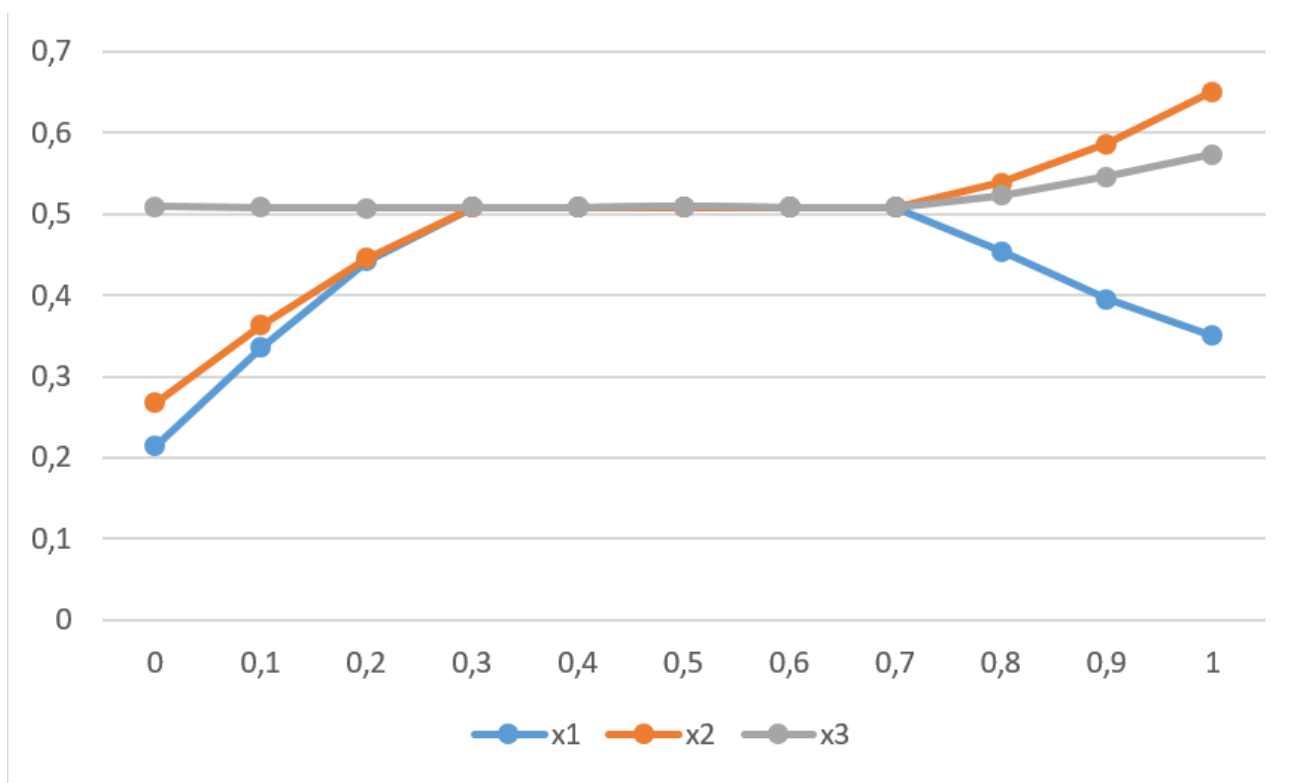


Рис. 7.8. Криві, отримані за матрицею планування ПФЕ для змінної Y4

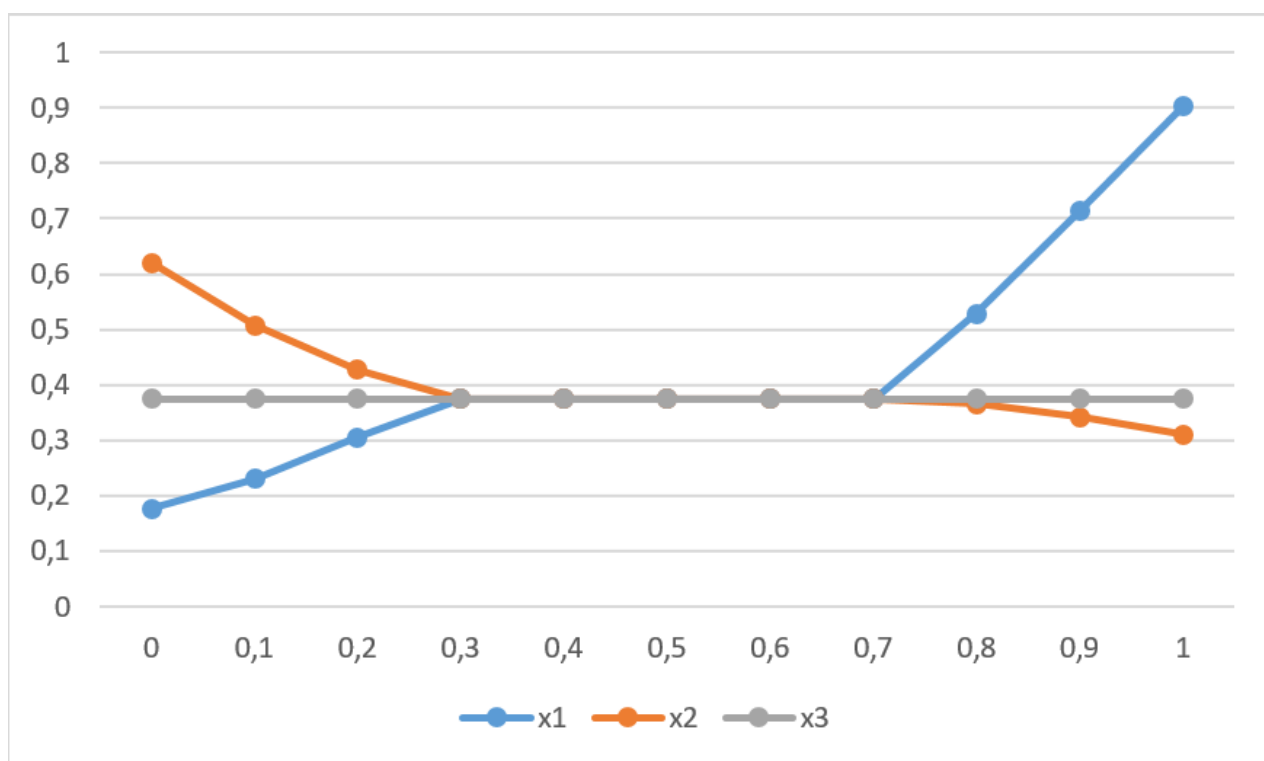


Рис. 7.9. Криві, отримані за матрицею планування ПФЕ для змінної Y_5

Результати моделювання трьома типами моделей наведено на рисунках 7.10 – 7.11.

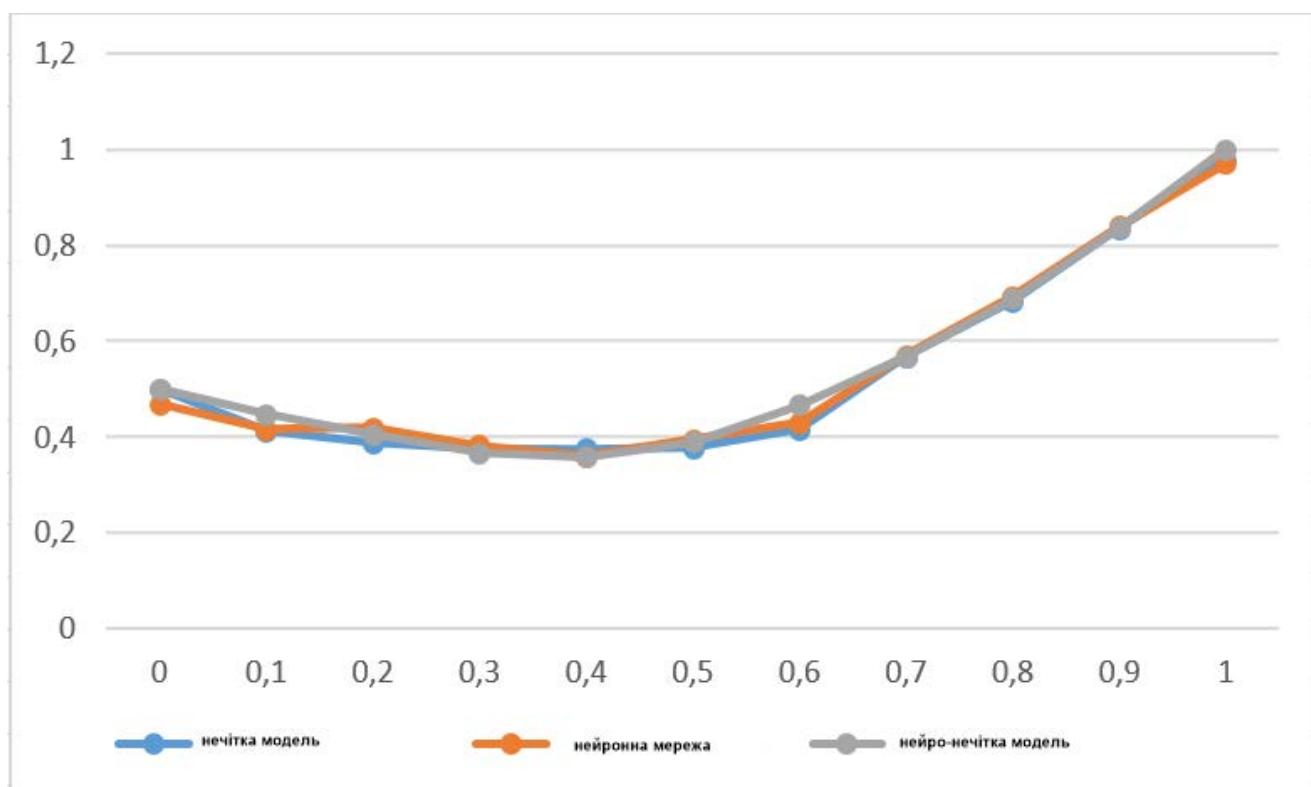


Рис. 7.10. Результати моделювання трьома типами моделей для змінної u_4

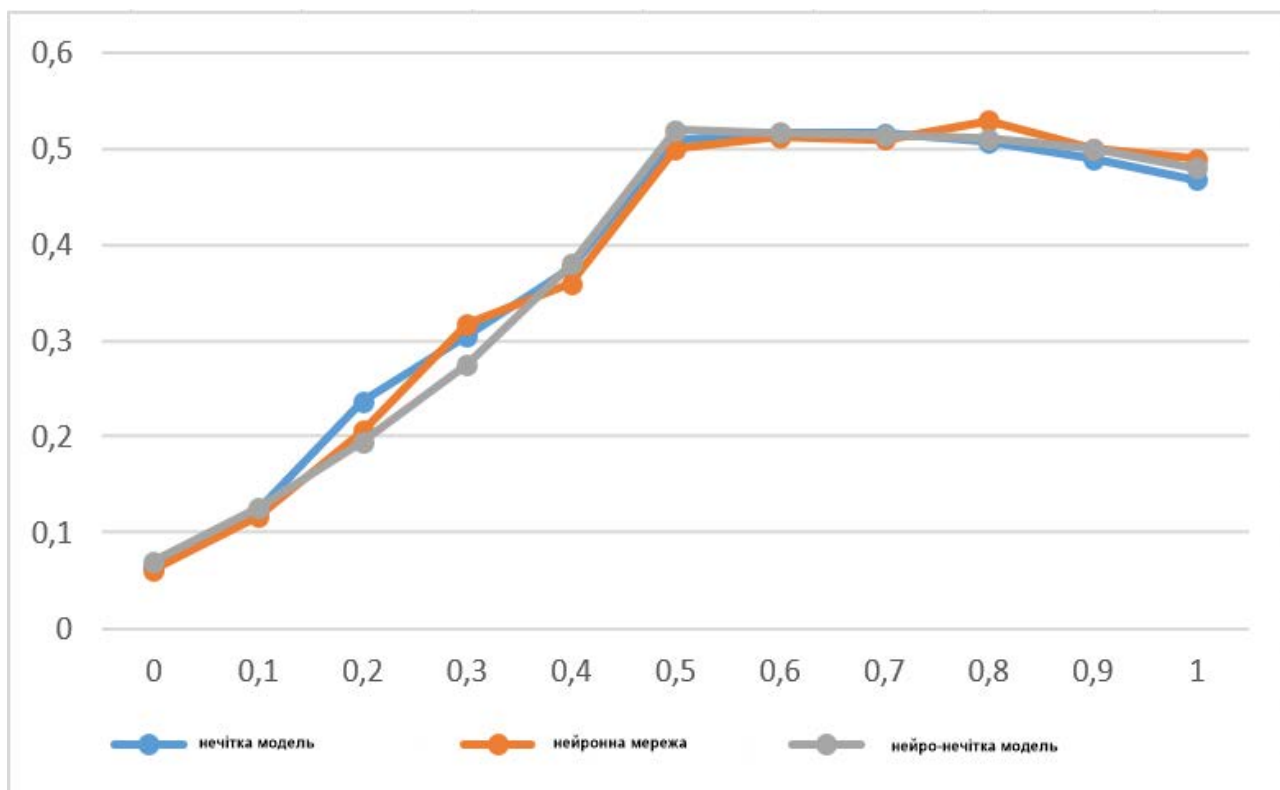


Рис. 7.11. Результати моделювання трьома типами моделей для змінної u_5

Проведені імітаційні дослідження трьох інтелектуальних моделей із отриманням відповідних кривих не суперечать фізико-хімічним закономірностям процесів. Найкращий результат отримано з використанням нейро-нечітких алгоритмів. Також результати показали, що інтелектуальні моделі досить чутливі і добре реагують на невеликі зміни вхідних змінних. Усі результати однозначні та стійкі, незалежно від кількості розрахунків.

Висновки до розділу 7

У цьому розділі було проведено всебічний аналіз та дослідження синтезованих нейро-нечітких моделей управління для трьох технологічних процесів: спалювання, охолодження та осадження. Головною метою була оцінка їхньої адекватності, чутливості та стійкості, що є критично важливим для практичного застосування.

Таким чином, усі розроблені нейро-нечіткі моделі були успішно досліджені та визнані адекватними та стійкими до змін вхідних параметрів, що свідчить про їхню ефективність та повну придатність до впровадження в системи автоматизованого управління технологічними процесами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було успішно вирішено актуальну науково-прикладну проблему синтезу та дослідження інтелектуальної системи оптимального управління складним, багатостадійним технологічним процесом виробництва сухого фосфорного ангідриду (P_2O_5). Досягнення поставленої мети було реалізовано шляхом застосування нового методологічного підходу, що ґрунтується на використанні інтелектуальних технологій (ІТ) та експертних знань. Ключова новизна полягає у розробці та теоретичному обґрунтуванні підходу, що дозволяє синтезувати модель процесу управління безпосередньо, минаючи необхідність створення складної аналітичної математичної моделі самого технологічного процесу.

Ця методологія включала формалізацію знань досвідчених технологів через інструмент матриці планування повного факторного експерименту (ПФЕ), яка стала основою знань для інтелектуальної системи. У рамках роботи було реалізовано триетапну процедуру, що включала синтез керуючих алгоритмів із використанням різних методів ІТ. Було розроблено та досліджено моделі на основі нечіткої логіки, нейро-мережеві моделі (багатошаровий перцептрон, навчений за алгоритмом Левенберга-Маркардта) та, як фінальний результат, гібридні нейро-нечіткі моделі (ANFIS) для управління ключовими стадіями процесу: спалюванням, охолодженням та осадженням.

Ці моделі ефективно поєднали здатність нейронних мереж до навчання та прозорість нечіткої логіки. Усі синтезовані нейро-нечіткі моделі були успішно досліджені та верифіковані. Аналіз підтвердив їхню адекватність (висока збіжність розрахункових значень із експертними даними) та стійкість до відхилень вхідних параметрів, що свідчить про їхню надійність та ефективність.

Практична значущість дослідження полягає у створенні діючої інтелектуальної системи, яка гарантує ведення технологічного процесу в оптимальних режимах. Впровадження цієї системи дозволить усунути вплив "людського фактора", забезпечити підвищення якості кінцевого продукту та досягти значного економічного ефекту, зокрема, прогнозованої економії енергоресурсів до 50%. Крім того, розроблена методологічна основа та інструментальні засоби для інтеграції моделей із MatLab у промислові контролери забезпечують практичну реалізованість результатів на діючих виробничих майданчиках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Іванов С. М. Нейро-нечітка система управління недетермінованим об'єктом / С. М. Іванов // Економіка та менеджмент. – 2021. – № 2. – С. 45–52.
2. Лавров В. В. Нейро-нечітка система ANFIS для оцінювання ризиків в умовах невизначеності / В. В. Лавров // Кібербезпека та інформаційні технології. – 2025. – № 1. – С. 63–71.
3. Канюк Г. І. Технології нейронних мереж і нечіткого моделювання в системах управління : навч.-метод. посіб. / Г. І. Канюк, Т. Ю. Василець, О. О. Варфоломійєв. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2025. – 176 с.
4. Решетило О. М. Інтелектуальні системи керування технологічними комплексами : метод. вказівки / О. М. Решетило. – Луцьк : ЛНТУ, 2023. – 98 с.
5. Інтелектуальні методи діагностики та управління промисловими об'єктами // Матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій». – Тернопіль : ТНТУ, 2025. – С. 112–118.
6. Зайченко Ю. П. Нейронні мережі та нечіткі системи в задачах автоматичного управління / Ю. П. Зайченко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія : Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – 2019. – № 68. – С. 5–15.
7. Інтелектуальні системи та технології в автоматизації виробничих процесів // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2020. – № 3. – С. 21–30.
8. Методи штучного інтелекту в системах оптимального управління // Комп'ютерні системи та мережі. – 2018. – № 2. – С. 37–44.
9. Інтелектуальні системи керування складними технологічними процесами // Вісник Національного університету харчових технологій. – 2021. – Т. 27, № 4. – С. 89–97.