

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Факультет Автоматизації і комп'ютерних систем

Кафедра Автоматизації та комп'ютерних технологій систем  
управління

«До захисту в ЕК»

Декан факультету

Андрій ФОРСЮК  
(підпис) (ім'я та прізвище)

«\_\_» лютий 2024 р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Ярослав СМІТЮХ  
(підпис) (ім'я та прізвище)

«\_\_» лютий 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані  
технології»  
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми «Інтелектуальні комп'ютерні системи  
керування»

на тему: Інтелектуальне керування котлоагрегатом ДКВр-10-13

Виконав: здобувач 2 курсу, групи АІ-2-1М

Стародуб Віталій Сергійович  
(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

(підпис)

Керівник Кишенько Василь Дмитрович  
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

(підпис)

Консультанти \_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище) (підпис)

\_\_\_\_\_ (ім'я та прізвище) (підпис)

\_\_\_\_\_ (ім'я та прізвище) (підпис)

Рецензент Андрій МОШЕНСЬКИЙ  
(ім'я та прізвище) (підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2024 р.

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Факультет Автоматизації і комп'ютерних систем

Кафедра Автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Інтелектуальні комп'ютерні системи керування»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Ярослав СМІТЮХ

«    »    2023 р.

## З А В Д А Н Н Я

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Стародуб Віталія Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Інтелектуальне керування котлоагрегатом ДКВр-10-13

керівник роботи к.т.н. проф. Кишенько Василь Дмитрович

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “19” грудня 2023 року №1006-КС

2. Строк подання здобувачем роботи “16” лютого 2024 року

3. Вихідні дані до роботи

Короткі відомості про об'єкт автоматизації, відомості про умови експлуатації об'єкта автоматизації та вимоги до системи автоматизації. Матеріали переддипломної практики.

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

Вступ. РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ. 1.1 Характеристика технологічного об'єкту управління. 1.2 Алгоритми керування паровим котлом ДКВр-10-13. 1.3 Несправності парових котлів. 1.4. Інтелектуальні системи керування. 1.5. Застосування інтелектуальних систем керування. 1.6 Фільтрація вхідних сигналів за допомогою фільтра Калмана. РОЗДІЛ 2 ЗАГАЛЬНОСИСТЕМНІ РІШЕННЯ. 2.1. Розробка підсистеми управління технологічним процесом. 2.1.1. Вимоги до системи автоматизації. 2.2. Опис функцій, що інтелектуалізуються. 2.3. Розробка вимог до ІСК (Requirements diagram). 2.4. Діаграма варіантів використання (Use Case diagram). 2.5. Розробка BDD технологічної, технічної та інформаційної складових системи. 2.6. Розробка алгоритмічного забезпечення ІСК. 2.6.1. Визначення життєвого циклу ІСК та її процесів (State Machine diagram, Activity diagram). 2.6.2. Вирішення проблеми синхронізації підсистем (Sequence diagram). РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОГО ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІСК. 3.1 Розробка ІСК на базі нечіткої логіки. 3.1.0. Опис

використаних контурів регулювання. 3.1.1 Структура експертної системи. 3.1.2. Лінгвістична апроксимація вхідних і вихідних параметрів. 3.1.3. Розробка бази правил для нечіткої системи. Аналіз результатів. 3.1.4. Побудова нечіткого регулятора. 3.1.5. Розробка інтелектуальних підсистем на основі нейро-нечітких мереж (ННМ). Висновки. Бібліографічний список

5. Перелік графічного матеріалу

Схема регулювання розрідження для котлів ДКВр-10-13, Схема барабанного котла, Технічна структура ІСППР, ФСА котла ДКВр-10-13, Requirements diagram, Use Case diagram, BDD, State Machine diagram, Sequence diagram.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача та затвердження завдання	Перед переддипломною практикою	
2	Розділ 1. Аналіз технології та існуючих АСК технологічним об'єктом.	Захист переддипломної практики	
3	Розділ 2. Загальносистемні рішення.	3 тиждень	
4	Розділ 2. Розробка діаграм на мові SysML функцій, що інтелектуалізуються	5 тиждень	
5	Розділ 3. Розробка інформаційного та програмного забезпечення ІСК	7 тиждень	
6	Розділ 3. Побудова інтелектуальної підсистеми підтримки прийняття рішень (ІСППР) котлоагрегата, нейро-нечіткого регулятора для регулювання потужності	11 тиждень	

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_ **Віталій СТАРОДУБ**

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_ **Василь КИШЕНЬКО**

## **Анотація**

Дана магістерська робота розроблена на тему: «Інтелектуальне керування котлоагрегатом ДКВр-10-13 ».

В роботі було проаналізовано основні алгоритми управління котлоагрегатом. Розроблена інтелектуальна система керування роботою парового котла ДКВр-10-13, система підтримки прийняття рішень на основі нечіткої логіки.

Розроблено базу знань експертної системи для нечіткої логіки, проведено лінгвістичну апроксимацію для вхідних та вихідних параметрів, створено функції належності вхідних та вихідних величин. Розроблено базу правил для нейро-нечіткої системи.

**Ключові слова:** інтелектуальне керування, паровий котел, Vira 200, підтримка прийняття рішень, нечітка логіка, проєкт.

## **Abstract**

This master's thesis was developed on the topic: "Intelligent control of the boiler unit DKVr-10-13".

The work analyzed the main boiler unit control algorithms. An intelligent system for controlling the operation of the DKVr-10-13 steam boiler, a decision support system based on fuzzy logic, was developed.

The knowledge base of the expert system for fuzzy logic was developed, the linguistic approximation for the input and output parameters was carried out, and the membership functions of the input and output values were created. A rule base for a neuro-fuzzy system has been developed.

**Keywords:** intelligent control, steam boiler, Vipa 200, decision support, fuzzy logic, project.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ .....	10
1.1 Характеристика технологічного об'єкту управління .....	10
1.2 Алгоритми керування паровим котлом ДКВр-10-13.....	13
1.3 Несправності парових котлів .....	19
1.4. Інтелектуальні системи керування.....	20
1.5. Застосування інтелектуальних систем керування .....	21
1.6 Фільтрація вхідних сигналів за допомогою фільтра Калмана.....	23
РОЗДІЛ 2 ЗАГАЛЬНОСИСТЕМНІ РІШЕННЯ.....	29
2.1. Розробка підсистеми управління технологічним процесом .....	29
2.1.1. Вимоги до системи автоматизації .....	31
2.2. Опис функцій, що інтелектуалізуються.....	32
2.3. Розробка вимог до ІСК (Requirements diagram) .....	35
2.4. Діаграма варіантів використання (Use Case diagram) .....	39
2.5. Розробка BDD технологічної, технічної та інформаційної складових системи .....	41
2.6. Розробка алгоритмічного забезпечення ІСК .....	43
2.6.1. Визначення життєвого циклу ІСК та її процесів (State Machine diagram, Activity diagram) .....	43
2.6.2. Вирішення проблеми синхронізації підсистем (Sequence diagram).....	46
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОГО ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІСК.....	48
3.1 Розробка ІСК на базі нечіткої логіки .....	48

3.1.0. Опис використаних контурів регулювання.....	48
3.1.1 Структура експертної системи.....	51
3.1.2. Лінгвістична апроксимація вхідних і вихідних параметрів .....	52
3.1.3. Розробка бази правил для нечіткої системи. Аналіз результатів.....	57
3.1.4. Побудова нечіткого регулятора.....	62
3.1.5. Розробка інтелектуальних підсистем на основі нейро-нечітких мереж (ННМ).....	79
Висновки .....	86
Бібліографічний список .....	87

## ВСТУП

Парові котли - це парогенератори, які використовуються в різних галузях промисловості та енергетики для задоволення потреб у парі різних технічних процесів або для виробництва електроенергії за допомогою турбін.

Основними компонентами парового котла є камера згоряння для спалювання палива і система труб для перетворення води в пару. У парових котлах паливо зазвичай підпалюється спеціальним пальником, який нагріває стінки камери згоряння. Гарячі гази, що утворюються при згорянні, проходять через трубки, оточені водою, яка передає їм свою теплову енергію. Ця енергія перетворює воду на пару, яка відводиться через спеціальні трубки до місця використання.

Парові котли можуть використовувати різні види палива, включаючи вугілля, нафту, газ і біопаливо. Крім того, існують різні рівні автоматизації та управління, залежно від призначення та застосування. У будь-якому випадку, парові котли є важливим елементом промислових процесів і виробництва електроенергії.

Параметри парових котлів, які можна і потрібно автоматизувати, залежать від типу котла, конструкції, застосування та вимог до рівня автоматизації. Однак основними параметрами парових котлів, які можна автоматизувати, є

**Температура:** температура води, пари, продуктів згоряння та інших матеріалів в системі може контролюватися і регулюватися за допомогою датчиків і автоматичних контролерів.

**Тиск:** тиск в системі можна вимірювати і регулювати за допомогою датчиків і автоматичних регуляторів для забезпечення оптимальних умов роботи котла.

**Рівень води:** рівень води в паровому котлі можна контролювати за допомогою датчиків і автоматичних регуляторів для забезпечення безпечної та ефективної роботи котла.

Потужність: потужність парового котла можна контролювати і регулювати за допомогою автоматичних пристроїв управління для забезпечення оптимальної енергоефективності.

Склад газів: склад газів, що виходять з котла, вимірюється і контролюється датчиками для забезпечення безпечної та екологічно чистої роботи котла.

Витрата води та пари: витрата води та пари в системі контролюється датчиками та автоматичними регуляторами для забезпечення стабільної та ефективної роботи котла.

Автоматизація цих параметрів не тільки забезпечує безпечну і ефективну роботу парового котла, але також знижує ризик людської помилки і покращує керованість роботи котла. Автоматичний контроль параметрів дозволяє швидко виявити і виправити будь-які проблеми в роботі котла, такі як надмірна температура або тиск, нестача води або перевищення допустимої потужності. Це запобігає нещасним випадкам та інцидентам і дозволяє більш ефективно використовувати паливо та енергію.

Загалом, автоматизація параметрів парових котлів має забезпечити безпечну та ефективну роботу, підвищити керованість та зменшити ризик людської помилки, а також забезпечити збір та аналіз даних для подальшого вдосконалення процесу.

## РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ

### 1.1 Характеристика технологічного об'єкту управління

Парові котли дуже поширені в промисловості, головним чином тому, що сила пари дуже корисна. Звичайне використання пари в промисловості включає виконання механічної роботи (наприклад, парова машина, що приводить в рух якусь машину), нагрівання, створення вакууму (через використання «парових ежекторів») і посилення хімічних процесів (наприклад, перетворення природного газу на водень і вуглекислий газ).

Процес перетворення води на пару досить простий: нагрійте воду до кипіння. Кожен, хто хоч раз кип'ятив каструлю з водою для приготування їжі, знає, як відбувається цей процес. Проте безперервне приготування пари трохи складніше. Важливою змінною для вимірювання та контролю в котлі безперервної дії є рівень води в «паровому барабані» (верхня ємність у водотрубному котлі). Щоб безпечно та ефективно виробляти безперервний потік пари, ми повинні переконатися, що в паровому барабані води ніколи не буде занадто мало або занадто багато. Якщо в барабані недостатньо води, водяні трубки можуть висохнути та прогоріти від тепла вогню. Якщо в барабані занадто багато води, рідка вода може переноситися разом із потоком пари, що спричинить проблеми вниз по течії.

Котел ДКВр-10-13 ГМ (ДКВр – двобарабанний котел водотрубний реконструйований, 10 – паропродуктивність, 13 – тиск пари, ГМ – газове або мазутне) використовується для отримання перегрітої пари промисловими підприємствами. Котел ДКВр-10-13 відноситься до двобарабанних, вертикально-водотрубним котлів з не примусовою циркуляцією води в системі. Циркуляція води в котлі здійснюється за рахунок різниці тиску пари в барабанах. Утворення пари проводиться у верхньому барабані. Котел ДКВр-10-13 має топку з газовим пальником, в якій відбувається процес згоряння палива і камеру

догорання, яка служить для кращої передачі теплової енергії, що підвищує ККД котла ДКВр-10-13 до 92%.

Котли ДКВр після монтажу в котельні на спеціальний майданчик обмуровуються вогнетривкою цеглою. У підсумку такі котли не піддаються зовнішнім кліматичних умовам, що подовжує термін їх експлуатації до 25 років при постійному обслуговуванні агрегату.

Даний паровий котел відрізняється простотою конструкції, що дозволяє переводити паровий котел водогрійний режим без великих змін у конструкції.

Таблиця 1.1 Основні технічні характеристики котла ДКВр-10-13

Показники	ДКВр-10-13
Номінальна паропроductивність, т/год	10
Температура пари, °С	194
Робочий тиск пари, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ), не більше	1,3 (13)
Паливо	Газ
Витрата газу, при номінальному навантаженні (м <sup>3</sup> /год), не більше	740
ККД, %, не менше	91
Вентилятор	ВДН-10 (1000)
Димотяг	ДН-9 (1000)
Довжина, мм, не більше	8850
Ширина, мм, не більше	5830
Висота, мм, не більше	7100
Маса котла, кг	15396

Таблиця 1.2 Основні технічні характеристики котла ДКВр-10-13

Основні характеристики	
Максимальна температура теплоносія	194 град.
Паропродуктивність	10 т/год
Тип промислового котла за видом теплоносія	Паровий
Тип парового котла	Промисловий
Тип промислового котла за типом палива	Газовий
Коефіцієнт корисної дії	91 %
Вид теплоносія	Перегрітий пар
Виробник	Теплолідер
Максимальний робочий тиск	13 бар
Тип промислового котла за конструктивними особливостями	Водотрубний
Гарантійний термін	24 міс
Країна виробник	Україна
Вага	15.396 т
Габаритні і приєднувальні розміри	
Ширина	5830 мм
Довжина	8850 мм
Висота	7100 мм
Види палива	
Види газового палива	Нафтовий, Зріджений, Природний, Інші неагресивні газы
Електричні параметри	
Частота струму	50 Гц

## 1.2 Алгоритми керування паровим котлом ДКВр-10-13.

### 1. Розрідження ASR в топці котла

У верхній частині топки існує невеликий постійний вакуум. Він необхідний за нормальних умов експлуатації топки. Це служить непрямим показником матеріального балансу між повітрям, що подається в піч, і відпрацьованими газами.

Об'єктом контролю розрідження є пічна камера, до якої підведений газохід з обертової камери..

Витрата відпрацьованих газів є вхідною регулюючою змінною в цьому розділі. До збурень відносяться зміни витрати повітря, зумовлені тепловим навантаженням системи, та внутрішні збурення.

До внутрішніх збурень відносяться порушення режиму «паливо-повітря». Регулювання розбавлення зазвичай здійснюється шляхом зміни кількості газу, що забирається димотягом.

Схема регулювання розрідження являє собою одноімпульсний ПІ-регулятор, що реалізує залежність (рис. 1.1).

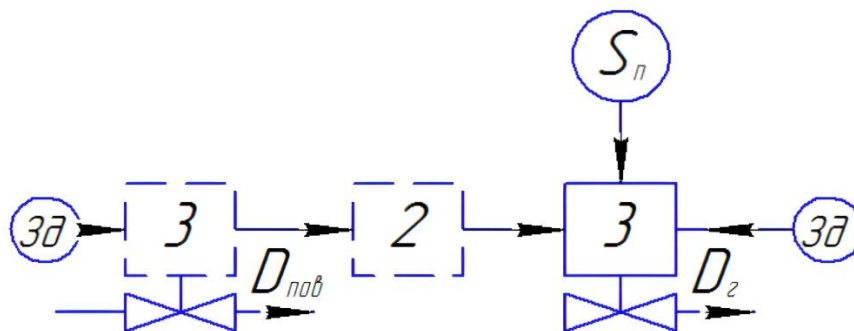


Рисунок 1.1 Схема регулювання розрідження для котлів ДКВр-10-13.

- 1 Регулятор розрідження
- 2 Пристрої динамічного зв'язку
- 3 Регулятор повітря

У цій схемі блок керування 1 отримує імпульс вакууму у верхній частині печі від датчика вакууму і сигнал від регулятора повітря 3 через пристрій динамічного зв'язку 2.

У цьому способі блок керування 1 отримує від датчика розрідження імпульс розрідження у верхній частині печі і сигнал від регулятора повітря 3 через пристрій динамічного зв'язку 2 і впливає на РО тяги через ВМ.

Система діє на Направляючий пристрій тяги - це димосос або шибер, встановлений в димоході. Для підвищення енергоефективності їх можна замінити на

Перетворювачі частоти регулюють швидкість димотяга і регулюють тягу.

Регулятор повітря одночасно впливає на ЦМ і змінює подачу повітря в топку.

## 2. оцінка ефективності процесу спалювання палива

Ефективність котла оцінюється за його коефіцієнтом корисної дії (ККД). Ефективність котла оцінюється за його коефіцієнтом корисної дії (ККД), кількістю тепла, отриманого при спалюванні всього палива. Однак.

Однак пряме регулювання ефективності за ККД або сумарними тепловими втратами не набуло широкого застосування, оскільки не існує надійного методу не має широкого застосування, оскільки немає надійних методів і засобів безперервного вимірювання оскільки немає надійних методів і засобів для їх безперервного вимірювання.

Одним з найбільш зручних непрямих методів оцінки ефективності процесів горіння є аналіз складу газів, що викидаються з топки. Коефіцієнт корисної дії та загальний вихід продуктів згоряння

Виходячи з того, що ККД і загальні втрати залежать від надлишку повітря, доцільно підтримувати певний коефіцієнт надлишку повітря (Рисунок 1.2).

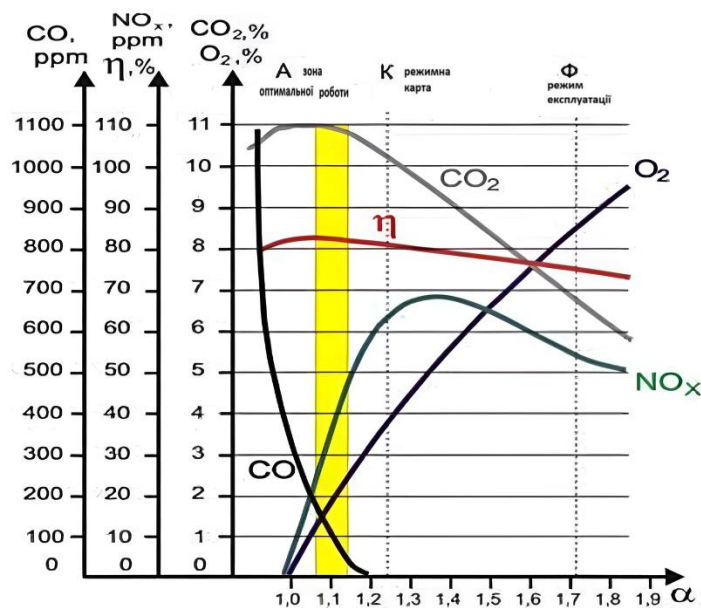


Рисунок 1.2 Вплив частки надлишку повітря на концентрацію основних компонентів відхідних газів та ККД при заданому тепловому навантаженні котла

З наведених вище кривих видно, що зменшення фракції надлишку повітря сприяє зменшенню вмісту кисню ( $O_2$ ), підвищенню ККД і, як наслідок, зниженню температури відпрацьованих газів і споживання електроенергії вентилятором і димососом.

В результаті знижується температура димових газів і споживання електроенергії вентиляторами і димососами. У той же час, шкідливі оксиди азоту ( $NO_x$ )

Викиди оксидів азоту ( $NO_x$ ) також зменшуються.

Основним методом регулювання надлишку повітря за водогрійним котлом є зміна об'єму повітря. Це означає зміну кількості повітря, що подається в котел.

Дугтєві вентилятори

Існує кілька варіантів методів автоматичного регулювання подача повітря за непрямими методами оцінки ефективності процесу.

Спалювання відповідно до різних співвідношень сигналів. Подача повітря автоматично регулюється, якщо якість палива, його витрата і кількість повітря, необхідного для забезпечення необхідного повного згоряння, є постійними.

Кількість повітря, необхідна для забезпечення необхідного повного згоряння палива, пов'язана прямою пропорційною залежністю. Вони пов'язані між собою пропорційною залежністю.

Вона встановлюється в результаті тестування. Якщо вимірювання витрати палива є достатньо точними можна підтримувати оптимальний надлишок повітря

(рис. 1.3). У випадку газоподібного палива

Для газоподібного палива співвідношення між необхідними об'ємами газу і повітря можна визначити, порівнюючи перепад тиску витратомірів.

Для газоподібного палива необхідне співвідношення між об'ємами газу та повітря можна визначити, просто порівнявши перепад тиску на витратомірах, шляхом порівняння перепаду тиску на витратомірі.

Співвідношення досягається шляхом порівняння перепаду тиску на витратомірі.

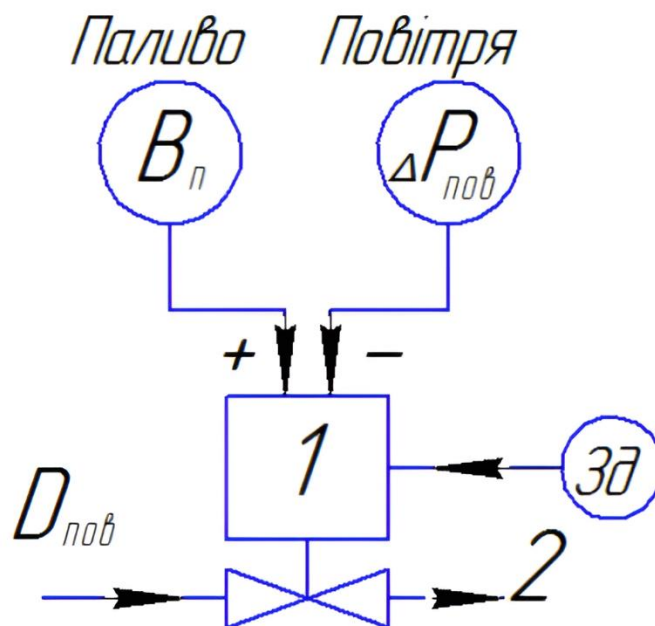


Рисунок 1.3 Контроль витрати палива за співвідношенням повітря-паливо

Співвідношення повітря-паливо

1 - Регулятор подачі повітря

2 - Регулятор

Витрата палива - Витрата палива

$\Delta P_d$  - перепад тиску

$Z_d$  - задане значення,  $D_{пов}$  - витрата повітря

Кількість повітря, необхідна на одиницю витрати палива, змінюється. На одиницю тепла, що виділяється при згорянні різних видів палива, потрібна однакова кількість повітря.

Різні види палива потребують різної кількості повітря. Тому теплову потужність печі розраховують за витратою повітря

Якщо теплова потужність топки оцінюється за витратою води, що проходить через котел, а подача повітря змінюється відповідно до зміни цієї витрати

Якщо подачу повітря змінювати відповідно до зміни цієї витрати, можна отримати оптимальну подачу повітря.

Подачу повітря можна регулювати. Принцип такого керування подачею повітря ґрунтується на схемі "вода-повітря" (рис. 1.4)

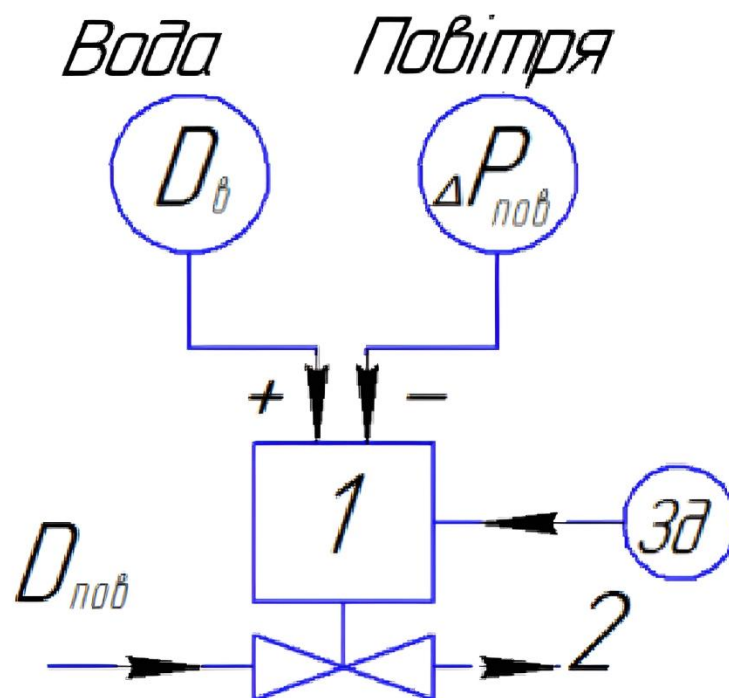


Рисунок 1.4 Регулювання ефективності співвідношення "вода-повітря"

У промислових умовах найпоширенішою схемою регулювання подачі повітря є не пряма, а така, що використовує коригувальний ефект  $O_2$ .

Найпоширенішою схемою регулювання подачі  $O_2$  є не пряма, а така, що використовує коригувальну дію  $O_2$ .

Регулятор подачі повітря 1 (рис. 1.5) змінює витрату відповідно до сигналу від основного або компенсаційного регулятора тиску.

Витрата повітря змінюється відповідно до сигналу від основного регулятора тиску або регулятора компенсуючого тиску 5.

автоматичне задане значення регулятора навантаження котла. Сигнал пропорційний витраті повітря.

Сигнал діє аналогічно до інших методів: по-перше, усуває турбулентність повітряного потоку, по-друге він слугує для стабілізації самого процесу керування подачею повітря, оскільки одночасно є сигналом жорсткого від'ємного зворотного зв'язку.

Введення додаткового сигналу корекції за вмістом  $O_2$  підвищує точність підтримання оптимальної подачі повітря в будь-якій системі.

Забезпечується контроль ефективності. Додатковий контролер корекції  $O_2$  в схемах управління подачею припливного повітря

Додатковий контролер компенсації  $O_2$  в схемі регулювання повітря навантаження 4 контролює подачу повітря під час збоїв в роботі печі, забезпечуючи прямий контроль подачі повітря і безпосередньо забезпечує підтримання заданого надлишку повітря в печі.

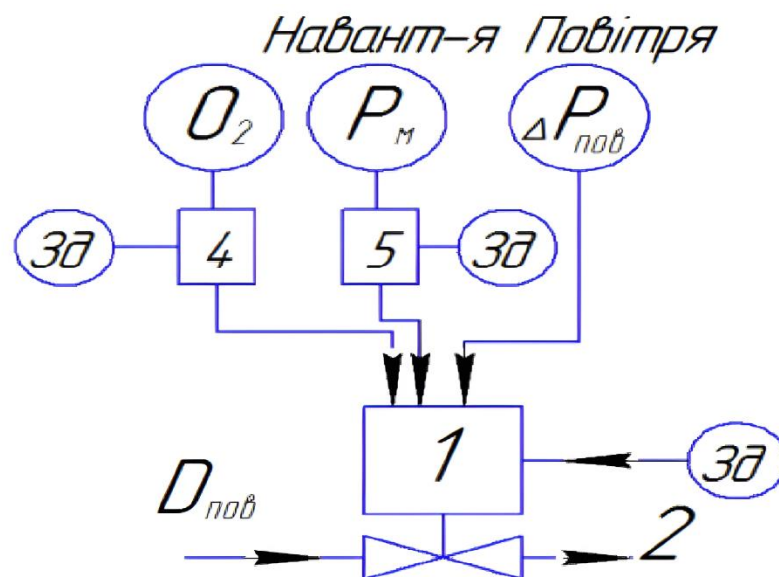


Рисунок 1.5 Регулювання економічності за співвідношенням «навантаження — повітря» з додатковим сигналом по вмісту  $O_2$  в димових газах.

### 3. Регулятор температури води на виході з котла.

Регулювання досягається зміною подачі палива в топку котла. Канал.

Канал регулювання "Зміна палива - зміна температури води" (рис. 1.6)

Водогрійні котли постійного струму характеризуються великою інерційністю.

Наприклад, постійна часу зміни температури котлової води в залежності від палива становить 17 хвилин. Через велику інерційність цього контуру було встановлено, спосіб забезпечення заданої точності підтримання температури води, а саме спосіб поетапного регулювання подачі палива шляхом відкриття або закриття заслонки подачі палива.

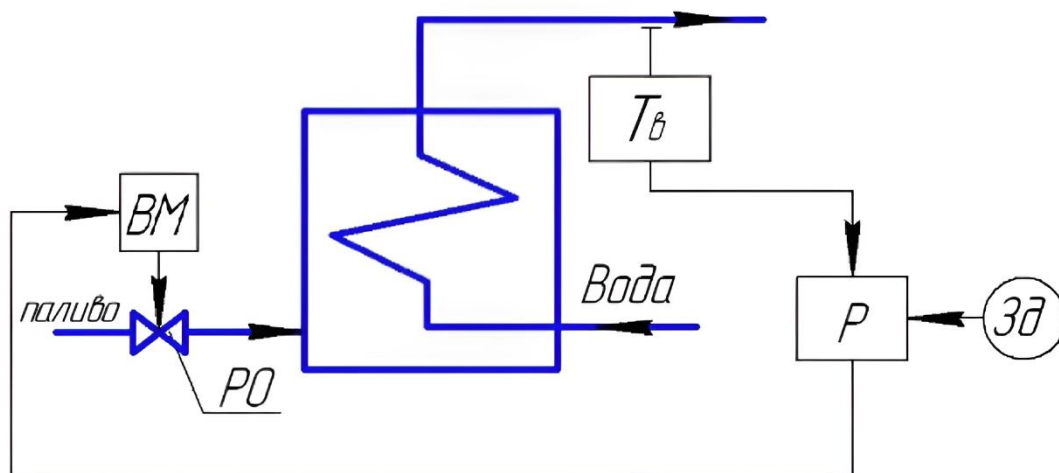


Рисунок 1.6 Регулювання економичності за співвідношенням «паливо – температура води на виході з котла»

### 1.3 Несправності парових котлів

Основні несправності парових котлів залежать від типу і конструкції котла, його віку і рівня технічного обслуговування. Однак найпоширенішими причинами виходу з ладу парових котлів є

Корозія: корозія стінок і труб котла може виникнути через пошкодження або неправильне функціонування пристроїв захисту від корозії.

Забруднення: погане технічне обслуговування може призвести до забруднення води і газів, що проходять через котел, засмічення труб і зниження ефективності парового котла.

Пошкодження компонентів: певні компоненти, такі як клапани, насоси та трубки, можуть бути пошкоджені через перевантаження, знос або неправильне використання.

Проблеми з автоматизацією: в автоматизованих системах керування котлами можуть виникати такі проблеми, як переривання зв'язку, помилки в програмному забезпеченні та несправності датчиків та виконавчих механізмів.

Витоки: негерметичні з'єднання, клапани та інші компоненти можуть призвести до витоку пари, води і газу, що загрожує працівникам і знижує ефективність котла.

Всі ці проблеми можна усунути або запобігти шляхом регулярного технічного обслуговування та моніторингу робочих параметрів парових котлів.

#### **1.4. Інтелектуальні системи керування**

Інтелектуальна система керування - це система керування, яка може "розуміти" і вивчати об'єкт керування, збурення, навколишнє середовище та умови експлуатації.

Основні відмінності між інтелектуальними системами та інтелектуальними системами керування полягають у наступному:

Наявність механізму систематичної обробки знань. Основною архітектурною особливістю, яка відрізняє інтелектуальні системи управління від звичайних, є механізм отримання, зберігання і обробки знань для реалізації функції управління.

Розробка інтелектуальних систем управління базується на двох узагальнених принципах:

- Управління на основі аналізу зовнішніх даних, ситуацій і подій (ситуаційне управління);
- Використання сучасних інформаційних технологій для обробки знань.

Існує декілька сучасних інформаційних технологій, які дозволяють будувати інтелектуальні системи управління:

- Експертні системи
- Штучні нейронні мережі
- Нечітка логіка
- Еволюційні методи та генетичні алгоритми.

Поняття інтелекту базується на:

- Здатності мати справу з формалізованими людськими знаннями (експертні системи, нечітка логіка);
- методах навчання і мислення людини (нейронні мережі, генетичні алгоритми).

Структурно інтелектуальні системи керування включають додаткові блоки, які виконують систематичну обробку знань на основі цих інформаційних технологій. Такі блоки можуть використовуватися як надбудови над звичайними контролерами, параметри яких можуть бути відповідним чином налаштовані, або безпосередньо інтегровані в контур керування.

### **1.5. Застосування інтелектуальних систем керування**

Найважливішими причинами широкого застосування інтелектуальних систем керування є

- Специфіка інтелектуальних систем керування, зокрема їх низька чутливість до зміни параметрів системи керування;
- Синтез інтелектуальних СК з використанням сучасного апаратно-програмного забезпечення часто є простішим, ніж звичайних.

У деяких випадках використання інтелектуальних СК є виправданим і дає кращі результати:

- Системи керування, в яких модель КК визначена лише якісно або не визначена взагалі;
- Як надбудова для надання звичайним системам адаптивних характеристик;
- Відтворення поведінки людини-оператора;
- Системи управління організацією на вищому (стратегічному і тактичному) рівні.

Щодо забезпечення якості, ефективний діапазон застосування традиційних ІС, нейромережових ІС та нечітких ІС показаний на рисунку 1.7. Межі між різними підходами, показаними на рисунку 1.7, є дуже умовними, оскільки гібридний підхід (поєднання традиційних методів контролю, нечіткої логіки та нейронних мереж) може бути використаний для створення ефективної системи керування у всіх ситуаціях. Тому межі різних підходів, показані на рисунку 1.7, є дуже умовними.

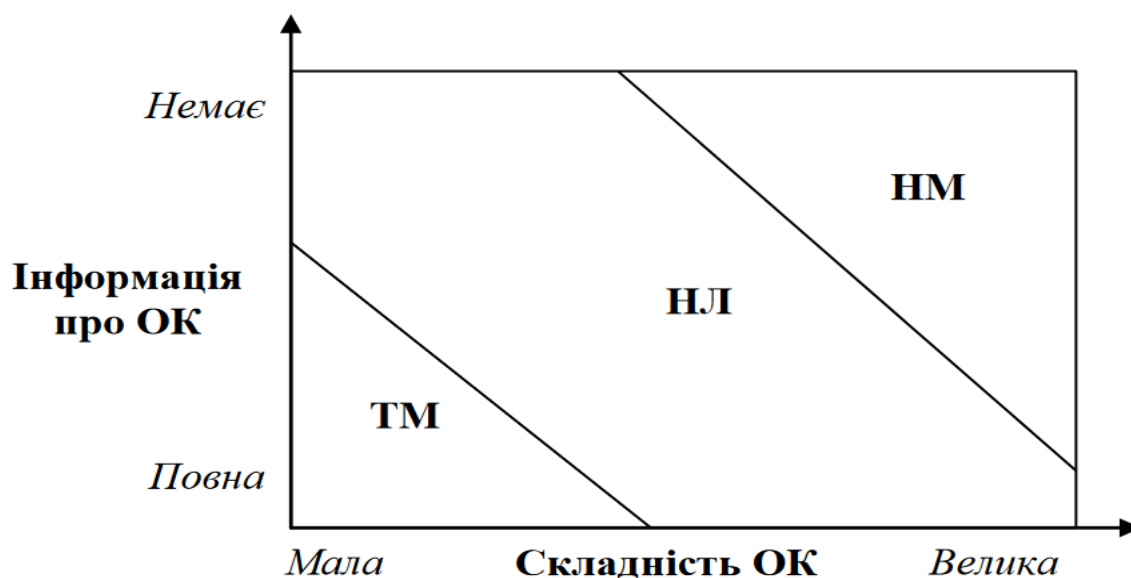


Рисунок 1.7 Ефективна сфера застосування різних систем управління:

ТМ - системи, що використовують традиційні методи управління;

НЛ - системи управління з використанням нечіткої логіки;

НМ - системи управління на основі нейронних мереж.

## **1.6 Фільтрація вхідних сигналів за допомогою фільтра Калмана.**

Фільтрація сигналів в системах автоматизованого управління відіграє важливу роль у забезпеченні надійності, стійкості і ефективності цих систем. А саме :

**Захист від шумів:** Сигнали, отримані в системах автоматизованого управління, часто піддаються впливу різних джерел шуму та перешкод. Фільтрація дозволяє відокремлювати сигнали від шумів, покращуючи якість отриманих даних та забезпечуючи точність роботи систем.

**Видалення збурень:** У деяких випадках сигнали можуть містити артефакти або збурення, які не є шумом, але можуть спотворити аналіз або контроль процесів. Фільтрація дозволяє виявляти та видаляти ці збурення, що підвищує надійність та точність системи.

**Стабілізація сигналів:** У деяких випадках сигнали можуть бути нестабільними або змінюватися з часом. Фільтрація дозволяє стабілізувати ці сигнали шляхом згладжування або прогнозування їх значень, що допомагає забезпечити плавну та стійку роботу системи.

**Покращення роботи алгоритмів управління:** Чисті, стабільні сигнали дозволяють алгоритмам управління працювати ефективніше та точніше. Фільтрація допомагає забезпечити адекватну інформацію для прийняття рішень, що покращує ефективність та продуктивність системи.

**Зниження витрат:** Використання фільтрації може допомогти знизити витрати на обробку та аналіз сигналів, оскільки вона дозволяє зосередитися на суттєвій інформації та уникнути обробки непотрібних даних.

Фільтр Калмана - найпоширеніший алгоритм фільтрації, який використовують у багатьох галузях науки і техніки. Завдяки своїй простоті та ефективності його використовують у gps-приймачах, процесорах оброблення даних датчиків і системах керування.

Інформація від будь-якого вимірювального пристрою є зашумленою, оскільки будь-який вимірювальний пристрій має певні похибки та може бути підданий багатьом зовнішнім і внутрішнім впливам. Що більше шумів у даних, то складніше їх обробляти.

Фільтри - це алгоритми обробки даних, які видаляють шум і небажану інформацію. Фільтри Калмана дають змогу задавати апріорну інформацію про характер системи та взаємозв'язки між змінними, на основі якої можна будувати точніші оцінки, але навіть у найпростішому випадку (без введення апріорної інформації) можна отримати чудові результати.

Фільтр Калмана використовує динамічну модель системи (наприклад, фізичні закони руху), відому поведінку системи управління і набір послідовних вимірювань для отримання оптимальної оцінки стану. Алгоритм складається з двох ітераційних фаз: передбачення і корекції.

На першому етапі обчислюється прогноз стану на наступний момент часу (для врахування неточностей вимірювань).

На другому етапі нова інформація від датчиків коригує передбачення (також з огляду на неточності та шуми в цій інформації). Початкове значення  $\hat{x}_{\bar{k}}$  та  $P_{\bar{k}}$ .  
Передбачення стану системи :

$$\hat{x}_{\bar{k}} = F\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (2)$$

де  $\hat{x}_{\bar{k}}$  – передбачення стану системи в поточний момент часу;

F – матриця переходу між станами;

$\hat{x}_{k-1}$  – стан системи в попередній момент часу;

B – матриця застосування керуючого впливу;

$u_{k-1}$  – керуючий вплив у попередній момент часу.

Прогнозування стану системи в поточний момент часу;

Прогнозування коваріаційної похибки:

$$P_{\bar{k}} = FP_{k-1}F^T + Q \quad (3)$$

де  $P_{\bar{k}}$  – передбачення похибки;

$P_{k-1}$  – похибка в попередній момент часу;

$Q$  – коваріація шуму процесу.

Обчислення підсилення Калмана :

$$K_k = P_{\bar{k}}H^T(HP_{\bar{k}}H^T + R)^{-1} \quad (4)$$

де  $K_k$  – підсилення Калмана;

$H$  – матриця вимірів, відображає відносність вимірювань та станів;

$R$  – коваріація шуму вимірювань.

Оновлення оцінки з урахуванням вимірювання  $z_k$ :

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{\bar{k}} + K_k(z_k - H\hat{X}_{\bar{k}}) \quad (5)$$

де  $z_k$  – вимірювання в поточний момент часу.

Оновлення похибки коваріації :

$$P_k = (I - K_kH)P_{\bar{k}} \quad (6)$$

де  $I$  – матриця ідентичності.

Основна ідея фільтра Калмана полягає у тому, щоб знайти коефіцієнт  $K$  такий, щоб відфільтрувати значення :

$$x_{k+1}^{opt} = K_{Z_{k+1}} + (1 - K)(x_k^{opt} + \mu_k). \quad (7)$$

У середньому, менше всього відрізняється значення координати  $x_{k+1}$ . Відфільтроване значення  $x_{k+1}^{opt}$  – лінійна функція від показань сенсора  $Z_{k+1}$ , та попереднього відфільтрованого значення  $x_k^{opt}$ . Попереднє відфільтроване значення  $x_k^{opt}$  є, в свою чергу, лінійною функцією від показань сенсора  $Z_k$  та попереднього відфільтрованого значення  $x_{k-1}^{opt}$ . І так далі, поки ціль повністю не розвернеться.

Тобто відфільтроване значення залежить від усіх попередніх інформаційних сигналів сенсору лінійно :

$$x_{k+1}^{opt} = \lambda + \lambda_{0z_0} + \lambda_{k+1}Z_{k+1}. \quad (8)$$

Саме тому фільтр Калмана називають лінійним фільтром. Середньоквадратична помилка фільтра Калмана також мінімальна.

На основі проаналізованого матеріалу було розроблено програмний код, який дає змогу фільтрувати сигнали за методом Калмана. Код подано в Додатку Б.

Фільтр Калмана заснований на динамічній моделі системи (напр. фізичні закони руху), відомій поведінці системи керування та наборі безперервних вимірювань, і використовує найкращу оцінку стану для отримання оптимальної оцінки стану. Алгоритм заснований на двох принципах "передбачення" і "корекція".

На першому етапі (передбачення) результати керуючих впливів відображаються в оптимальній оцінці стану (з урахуванням законів фізики) в наступну мить. Наступної миті результати коригуються (з урахуванням неточностей вимірювань). На другому етапі

Нова інформація від датчика змінює прогнози. (При цьому також враховується неточність інформації та шум).



Рисунок 1.9. Алгоритм роботи першої та другої фази фільтра Калмана  
Рівняння на рис. 1 подано в матричній формі. Їх подано в матричній формі при вимірюванні двох змінних

У разі вимірювання змінних матриця зводиться до скалярних значень. Підрядкові індекси такі:

$k$  - поточний момент часу, а  $(k-1)$  - попередній момент часу. вказує на те, що значення є передбачуваним проміжним значенням. Змінні проілюстровано на рисунках 1.9. і 1.10 нижче.

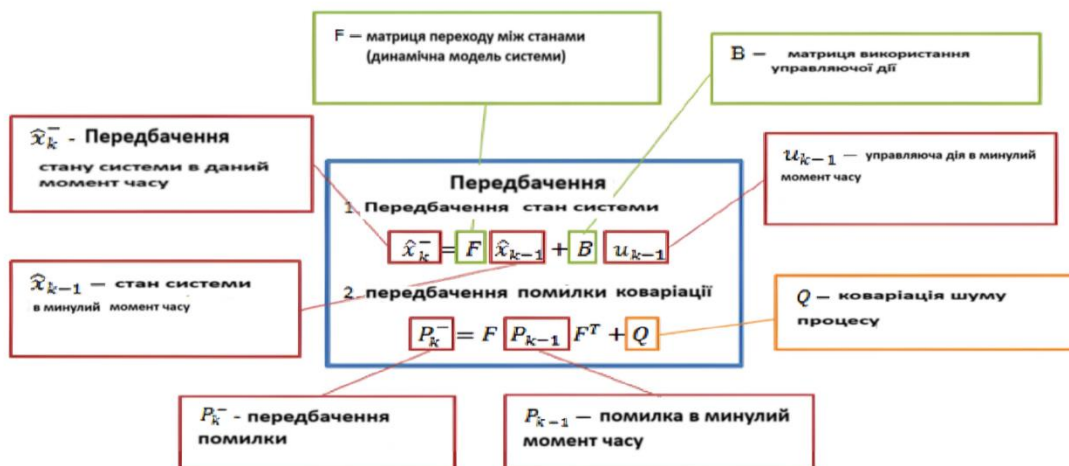


Рисунок 1.10. принцип роботи фільтра, перша частина.



Рисунок 1.11. принцип роботи фільтра, частина друга.

Нижче представлено датчик рівня води, оскільки стан системи показано однією змінною (обсяг води в баку), то матриці вироджуються у звичайні рівняння:

**Передбачення**

$$\hat{x}_k^- = F \hat{x}_{k-1} + B u_{k-1}$$

$$P_k^- = F P_{k-1} F + Q$$

**Корекція**

$$K_k = \frac{P_k^- H}{H P_k^- H + R}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \hat{x}_k^-)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^-$$

Рисунок 1.12. Приклад для датчика вимірювання рівня води в барабані котла.

## РОЗДІЛ 2 ЗАГАЛЬНОСИСТЕМНІ РІШЕННЯ

### 2.1. Розробка підсистеми управління технологічним процесом

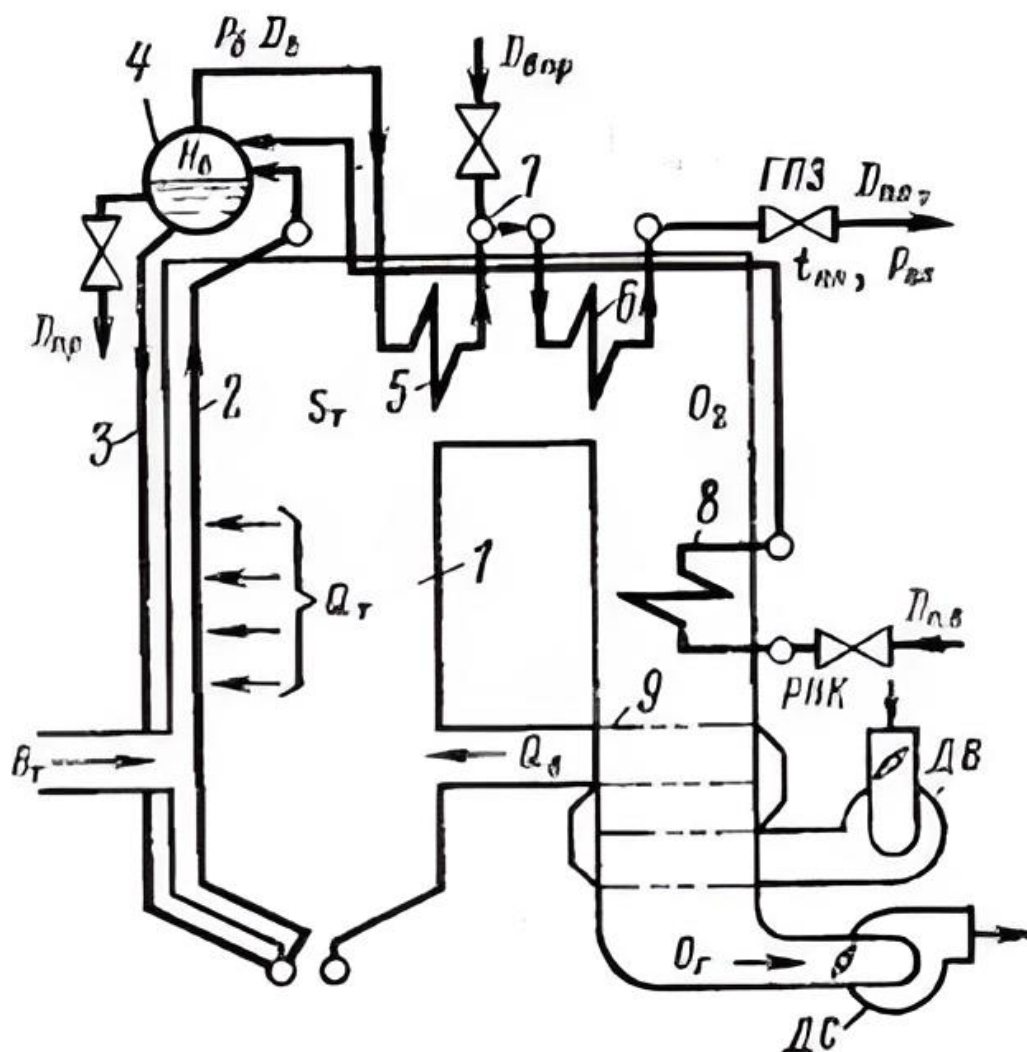


Рис 1.0.1. Схема барабанного котла ГПЗ - Головний паровий клапан; РВК - Регулювальний живильний клапан; 1 - Топка; 2 - Циркуляційний контур; 3 - Нижній грубий підігрівач; 4 - Барабан; 5,6 Пароперегрівач; 7 - Пароохолоджувач; 8 - Економайзер; 9 - Повітропідігрівач.

Принципову схему технічного процесу в барабанному паровому котлі наведено на малюнку 1. Паливо надходить у камеру згоряння 1 через систему спалювання і зазвичай спалюється у факельній системі. Для підтримання процесу горіння в

топку подається повітря в кількості  $Q_v$ . Повітря нагнітається вентилятором DV і попередньо нагрівається в повітропідігрівачі 9.

Димові гази  $Q_g$ , що утворюються в процесі горіння, відсмоктуються з топки димососом DS. По дорозі він проходить через поверхні нагріву пароперегрівачів 5 і 6, водяного економайзера 8 і повітропідігрівача 9 і викидається в атмосферу через димову трубу.

Процес пароутворення відбувається в надземній трубі циркуляційного контуру 2, яка екранує камерну топку і живиться водою зі спускної труби 3. Насичена пара з барабана 4 надходить у пароперегрівач, де нагрівається до заданої температури завдяки факельному випромінюванню і колективному нагріванню пічним газом. Одночасно температура перегрітої пари регулюється впорскуванням води  $G_{vpr}$  у пароохолоджувач 7.

Основними регульовальними параметрами котла є витрата перегрітої пари, тиск і температура. Витрата пари є змінною величиною, а її тиск і температура підтримуються на приблизно постійних значеннях у межах допустимих відхилень, зумовлених заданим режимом роботи турбіни або іншими вимогами споживачів теплової енергії.

Крім того, у межах допустимих відхилень повинні підтримуватися такі значення

- Рівень води в барабані.
- Вакуум у верхній частині топки .
- Оптимальний надлишок повітря за пароперегрівачем
- Концентрація оксидів азоту у газах, що відходять.
- Солоність води для живлення котла.

Солоність води для живлення котла змінюється під впливом правил і детермінованих або випадкових зовнішніх і внутрішніх збурень. Як зазначену робочу систему розглядають увесь котел, наприклад, з'єднання подачі палива і тиску пари.

### 2.1.1. Вимоги до системи автоматизації

№	Машина, агрегат, установка	Параметр, місце відбору сигналу	Припустиме значення параметра	Вид автоматизації	Характер контролю чи управління	Засоби управління та контролю, реалізації управляючої дії	Додаткові умови
1	Барабан котла	Рівень	90 % ± 2 %	Контроль	Відображення Реєстрація	АРМ оператора Щит управління АРМ оператора	
				Регулювання	Стабілізація	Вплив на витрату води	
				Регулювання в ручному режимі	Ручне управління рівнем	Вплив на витрату води	
		Тиск	0,2 МПа ± 0,05 МПа	Контроль	Відображення Реєстрація	АРМ оператора Щит управління АРМ оператора	
				Регулювання	Стабілізація	Вплив на витрату газу в топку	
				Регулювання	Стабілізація	Вплив на витрату води	
2	Топка котла	Наявність полум'я в топці	Логічний «0» або логічний «1»	Контроль	Відображення Реєстрація	АРМ оператора Щит управління АРМ оператора	Світлова і звукова сигналізація на щиті оператора
				Контроль	Сигналізація	АРМ оператора	
		Тиск	0,2 МПа ± 0,01 Па	Регулювання	Стабілізація	Вплив на частоту обертів валу двигуна	

№	Машина, агрегат, установка	Параметр, місце відбору сигналу	Припустиме значення параметра	Вид автоматизації	Характер контролю чи управління	Засоби управління та контролю, реалізації управляючої дії	Додаткові умови
						насосу відкачки топочних газів	
		Концентрація CO <sub>2</sub>	30% ± 2 %	Контроль	Сигналізація	АРМ оператора	Світло ва і звуков а на щиті операт ора
3	Трубопровід подачі повітря в топку	Витрата	120 м <sup>3</sup> /год ± 1 м <sup>3</sup> /год	Контроль	Сигналізація	АРМ оператора	
				Регулювання	Стабілізація	Вплив на ЧПР двигуна насосу подачі повітря	
4	Трубопровід подачі газу в топку	Витрата	15 м <sup>3</sup> /год ± 1 м <sup>3</sup> /год	Контроль	Сигналізація	АРМ оператора	
		Тиск	0,2 МПа ± 0,1 МПа	Контроль	Сигналізація	АРМ оператора	
5	Трубопровід подачі пари до споживачів	Тиск	0,3 МПа ± 0,01 МПа	Контроль	Сигналізація	АРМ оператора	

## 2.2. Опис функцій, що інтелектуалізуються

Інтегрована система керування (ІСК) є додатковим модулем до типової автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУ ТП) або системи управління виробництвом, заснованою на принципі "не руйнування нижнього рівня" відповідно до IPDI. Функції ІСК спрямовані на автоматизацію та інтелектуалізацію процесу прийняття рішень. Розробка функцій ІСК відбувається шляхом декомпозиції цілі створення системи, де кожна функція поділяється на задачі та підзадачі. Рекомендується спочатку розробляти функції для АСУ ТП, а потім переходити до функцій ІСК.

Основні функції ІСК включають:

1. Збільшення продуктивності творців рішень: ІСК надає засоби та можливості для створення якісних рішень протягом коротшого часу, що поліпшує продуктивність користувачів.

2. Розширення інструментального арсеналу: ІСК пропонує нові та продуктивніші засоби для збирання, формулювання та створення нових знань шляхом аналізу та розпізнавання проблем.

3. Спрощення етапів прийняття рішень: ІСК допомагає спростити процес збору інформації, проектування та відбору альтернатив, полегшуючи виконання цих етапів.

4. Упорядкування та полегшення аналізу шляхів розв'язання проблем: ІСК надає підтримку в аналізі можливих шляхів розв'язання проблем, що допомагає систематизувати та полегшити цей процес.

5. Підтримка при розв'язанні неструктурованих проблем: ІСК допомагає творцям рішень при вирішенні неструктурованих або напівструктурованих проблем, надаючи їм підтримку та інструменти.

Це загальні функції, які ІСК може виконувати. Розширений перелік функцій залежить від конкретної системи та її застосування.

У табл. 2.1 наведено функції АСУ ТП та ІСК парового котла ДКВр-10-13.

Таблиця 2.1 Перелік функцій та задач АСУ ТП

<i>Позначення</i>	<i>Найменування функції/задачі</i>	<i>Закон/алгоритм</i>	<i>Період</i>	
РС1	Тиск	PI	500 мс	
LC2	Рівень	Нечіткий алгоритм	500 мс	
ТС3	Температура	Нечіткий алгоритм	500 мс	
ТС4	Температура готової пари	контроль	1 с	
FC5	Вміст CO2	контроль	1 с	

Таблиця 2.2. Перелік функцій та задач АСУ виробництва та ІСК

<i>№ пор.</i>	<i>Найменування змінної</i>	<i>джерело</i>	<i>ІСК</i>			<i>Примітка</i>
			<i>У</i>	<i>I</i>	<i>С</i>	
1	Тиск	котельня	Філ(IN)	100с	PI	Для нечіткої моделі прогнозування продуктивності
2	Рівень	котельня	Філ(IN)	100с	Нечіткий алгоритм	
3	Температура	котельня	Філ(IN)	100с	Нечіткий алгоритм	
4	Витрата пари до споживача	котельня	Філ(IN)	100с		

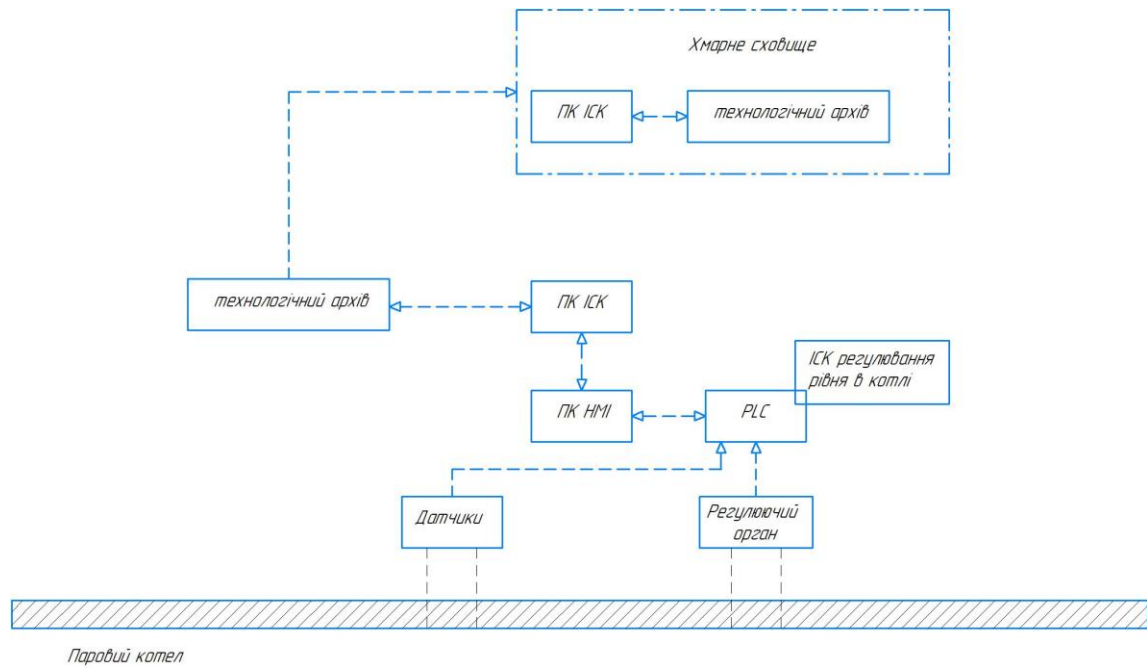


Рис.1.0.2. Технічна структура ІСППР

### 2.3. Розробка вимог до ІСК (Requirements diagram)

У системній інженерії та індустрії програмного забезпечення вимоги використовуються для опису та формалізації потреб різних зацікавлених сторін. Ці вимоги визначають функціональні можливості та обмеження, які повинна задовольняти розроблювана система. Одним з інструментів для визначення вимог є вимоги діаграми, які надають графічне представлення залежностей між різними вимогами та їх взаємозв'язків. Це допомагає зрозуміти взаємозв'язок між різними елементами системи та встановити чіткість та узгодженість вимог.

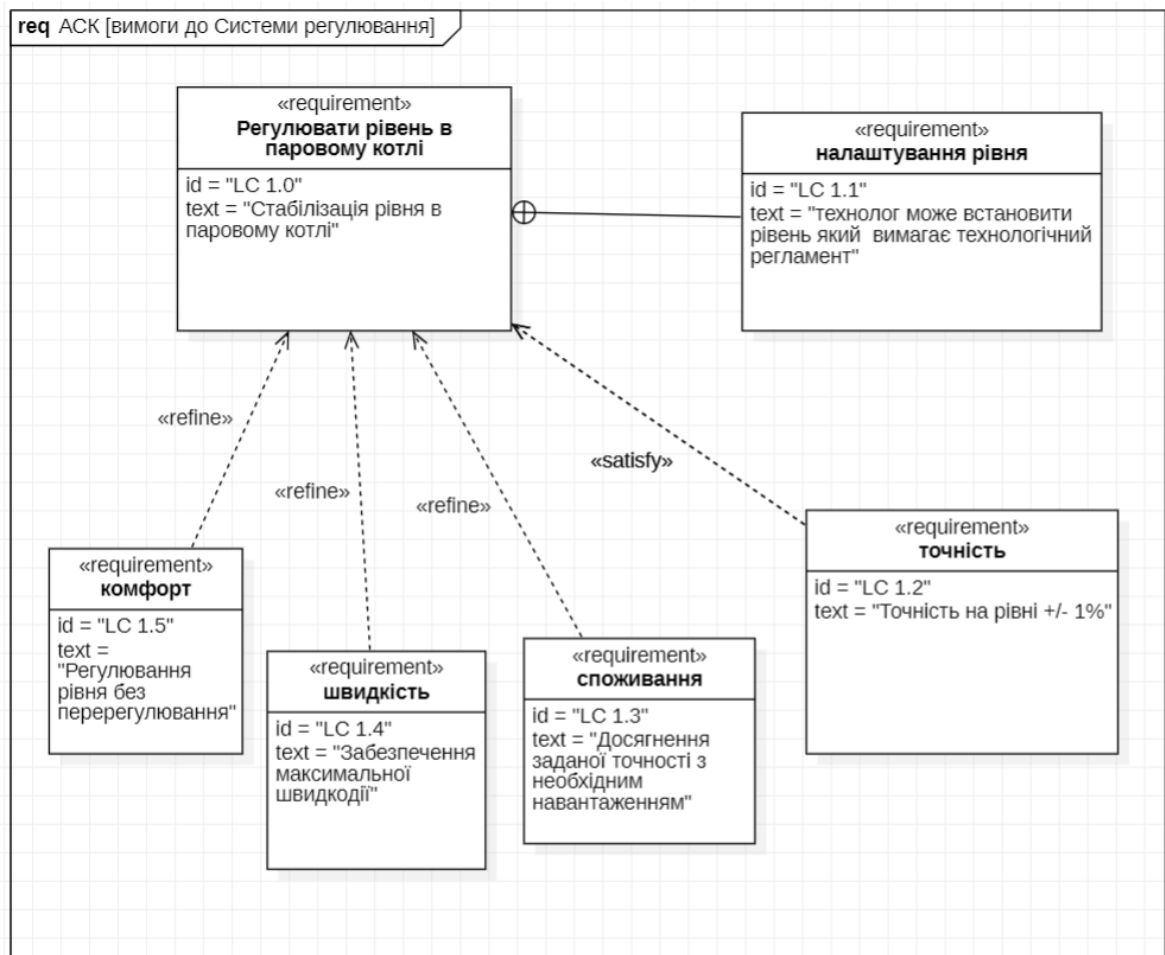


Рис. 1.1. Requirement Diagram

У Requirement Diagram (АСК[вимоги до системи регулювання]) головним блоком є "Регулювання рівня в паровому котлі", який відображає основну функцію системи. Підпорядковані блоки включають:

1. "Комфорт" - цей блок відповідає за забезпечення комфортних умов роботи парового котла. Він може включати функції, такі як контроль температури, оптимізація роботи системи для забезпечення максимального комфорту користувачів тощо.

2. "Швидкість" - цей блок відповідає за регулювання швидкості роботи парового котла. Він може включати функції, такі як налаштування швидкості нагріву, забезпечення оптимального рівня продуктивності тощо.

3. "Споживання" - цей блок відповідає за контроль споживання ресурсів паровим котлом. Він може включати функції, такі як моніторинг витрати палива, оптимізація енергоефективності системи тощо.

4. "Точність" - цей блок відповідає за досягнення точності в регулюванні рівня в паровому котлі. Він може включати функції, такі як датчики для вимірювання рівня, алгоритми контролю точності тощо.

5. "Налаштування рівня" - цей блок відповідає за налаштування рівня в паровому котлі залежно від вимог і потреб користувача. Він може включати функції, такі як ручне або автоматичне налаштування рівня, забезпечення гнучкості в налаштуванні параметрів системи тощо.

Ці підпорядковані блоки визначають конкретні аспекти регулювання рівня в паровому котлі і допомагають досягти заданих вимог щодо комфорту, швидкості, споживання, точності та налаштування рівня.

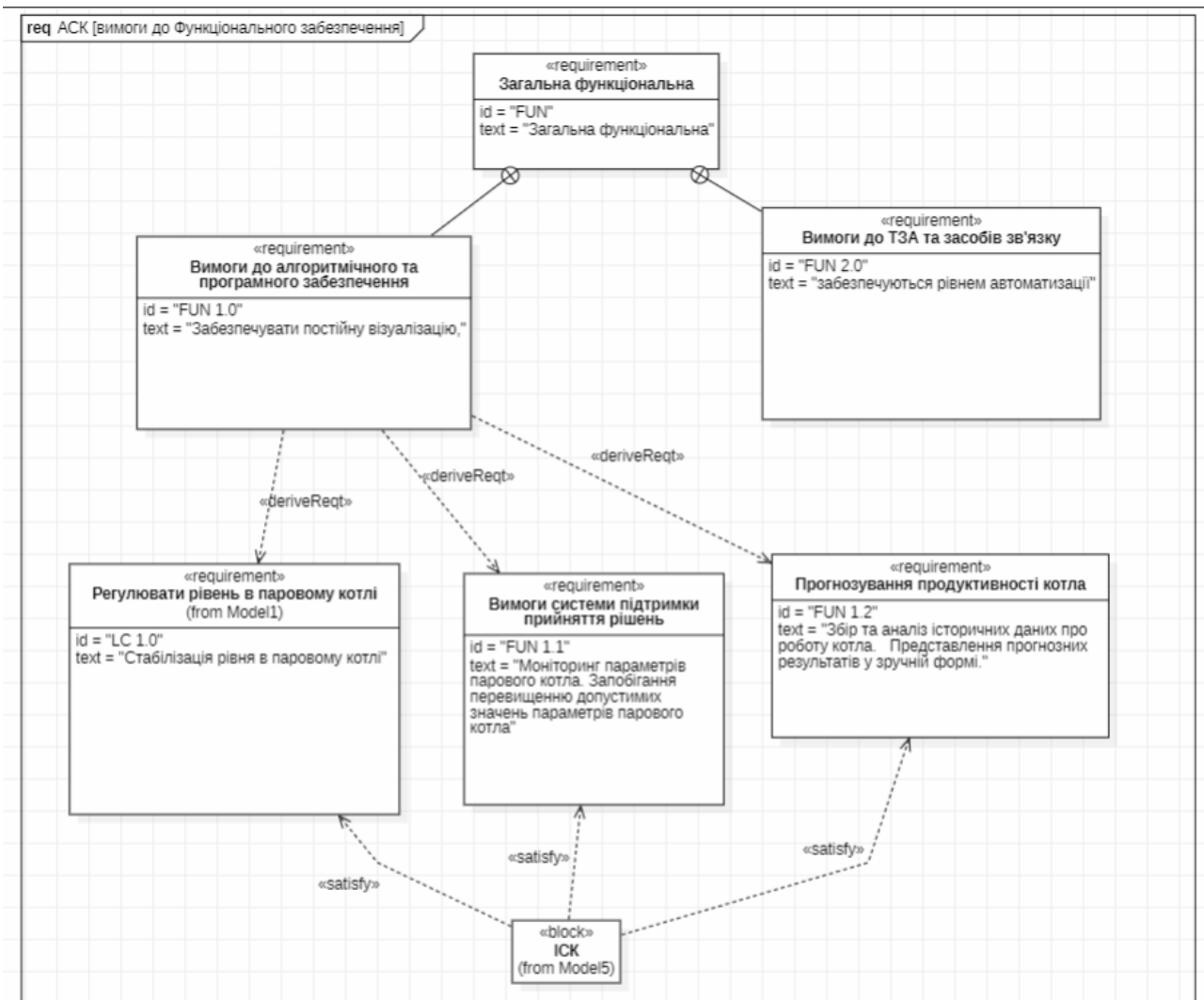


Рис. 1.2. Requirement Diagram

В Requirement Diagram (вимоги до Функціонального забезпечення) головним блоком є "Загально функціональна", який включає загальні функціональні вимоги системи. Підпорядковані блоки включають:

1. "Вимоги до алгоритмічного та програмного забезпечення" - цей блок визначає вимоги щодо розробки алгоритмів та програмного забезпечення системи. Вимоги включають постійну візуалізацію і забезпечення рівня автоматизації.

2. "Вимоги до ТЗА та засобів зв'язку" - цей блок визначає вимоги щодо телекомунікаційних засобів та засобів зв'язку системи. Вимоги гарантують високий рівень автоматизації взаємодії.

3. "Регулювання рівня в паровому котлі" - цей блок визначає вимоги щодо регулювання рівня в паровому котлі. Головна функція полягає в стабілізації рівня в паровому котлі.

4. "Вимоги системи підтримки прийняття рішень" - цей блок визначає вимоги до системи, яка підтримує процес прийняття рішень. Вимоги включають моніторинг параметрів парового котла і запобігання перевищенню допустимих значень.

5. "Прогнозування продуктивності котла" - цей блок визначає вимоги щодо прогнозування продуктивності котла. Вимоги включають збір та аналіз історичних даних про роботу котла та представлення прогнозних результатів у зручній формі.

6. Блок ІСК (Інтелектуальна система керування) відображається на ІВД (Block Definition Diagram) як центральний елемент системи, який включає в себе інформаційні та системні компоненти.

#### **2.4. Діаграма варіантів використання (Use Case diagram)**

В системній інженерії використовується для опису взаємодії системи з її користувачами або зовнішніми системами. Вона моделює очікувану поведінку системи, включаючи послідовності дій, які користувачі або системи здійснюють для досягнення певних результатів.

Діаграма варіантів використання дозволяє описати функції користувачів системи без уточнення їх реалізації. Вона допомагає забезпечити взаєморозуміння між розробниками, кінцевими користувачами і експертами з предметної області. Також ця діаграма використовується для перевірки правильності архітектурних рішень та контролю розробки системи.

Використання діаграм варіантів використання допомагає візуалізувати створену систему або її підсистеми, щоб користувачі могли зрозуміти, як взаємодіяти з системою, а розробники могли зрозуміти, як реалізувати ці функції.

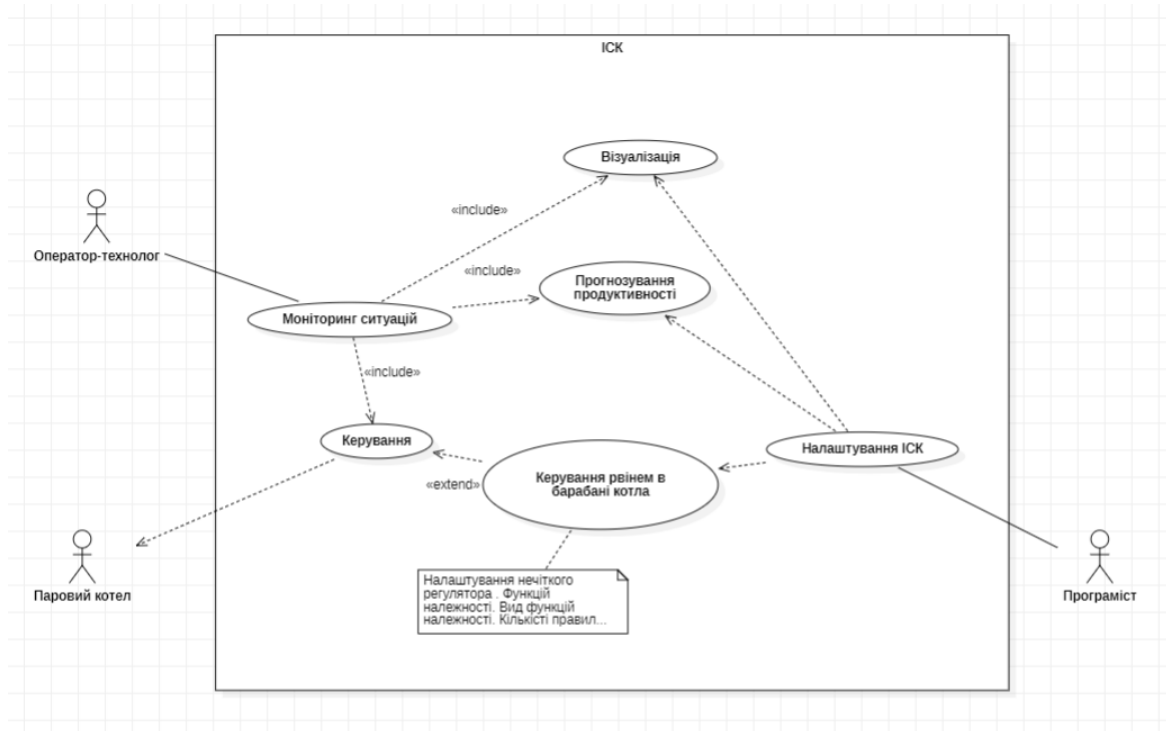


Рис. 1.3. Основні елементи Use Case diagram

На діаграмі Use Case для ІСК (Інтелектуальна система керування) було побудовано такі актори і блоки та їх взаємодію з системою:

1. **Оператор-технолог:** Цей актор взаємодіє з системою для моніторингу ситуацій і проведення необхідних дій для забезпечення правильної роботи системи.

2. **Паровий котел:** Цей актор представляє фізичний об'єкт - паровий котел, який взаємодіє з системою для передачі даних та отримання команд керування.

3. **Програміст:** Цей актор взаємодіє з системою для налаштування ІСК. Він здійснює налаштування параметрів системи, включаючи нечіткий регулятор, функції належності, вид функцій належності та кількість правил.

4. Візуалізація: Цей блок відображає взаємодію з системою для забезпечення постійної візуалізації даних, що стосуються парового котла та ІСК.

5. Прогнозування продуктивності: Цей блок взаємодіє з системою для проведення прогнозування продуктивності парового котла на основі зібраних та аналізованих даних.

6. Моніторинг ситуацій: Цей блок взаємодіє з системою для отримання даних про стан парового котла та ІСК. Виконання дій на основі отриманих даних, таких як спостереження за тенденціями, виявлення аномалій та прийняття відповідних рішень.

7. Керування рівнем в барабані котла: Цей блок взаємодіє з системою для передачі команд та керування рівнем в барабані парового котла. Налаштування нечіткого регулятора та функцій належності для ефективного керування. Виконання розрахунків та аналізу параметрів для прийняття оптимальних рішень щодо регулювання рівня.

На діаграмі Use Case було зображено основні взаємодії та сценарії, пов'язані з моніторингом ситуацій та керуванням рівнем в барабані котла. Кожен Use Case може мати свої взаємодії з відповідними акторами та деталізувати конкретні функції та дії, які виконуються в рамках цих процесів.

## **2.5. Розробка BDD технологічної, технічної та інформаційної складових системи**

Для проектування ІСК (інтегрованих систем контролю) рекомендується використовувати технологію BDD (Block Definition Diagram) для розробки трьох складових системи: технологічної, технічної і інформаційної.

BDD - це діаграма визначення блоків, яка надає блокове подання системи, включаючи головний блок і його складові блоки у вигляді ієрархії. BDD може включати блоки будь-якого типу, включаючи програмне забезпечення,

обладнання та інше. У відмінності від UML, де використовується схема класів, BDD використовує блоки і вводить поняття портів потоків. Розробка технологічної, технічної і інформаційної складових системи включає створення трьох окремих BDD. Технологічна складова описує процеси, методи та технології, що використовуються в системі. Технічна складова описує апаратне та програмне забезпечення, яке використовується для реалізації системи. Інформаційна складова описує дані та інформацію, які обробляються системою та передаються між її компонентами. Використання BDD допомагає уявити структуру системи, з'ясувати залежності між її компонентами і забезпечити чіткість і узгодженість при розробці ІСК.

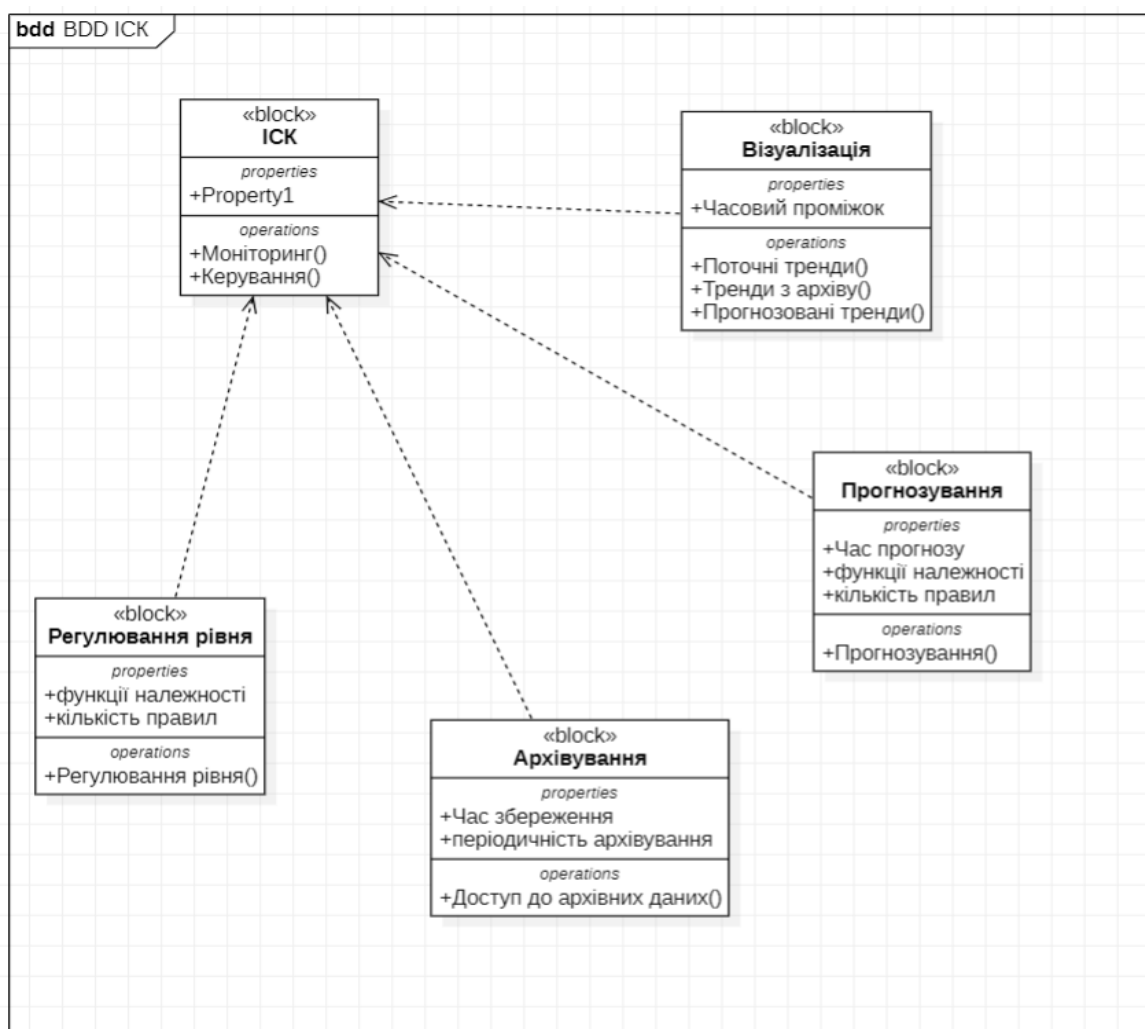


Рис. 1.4. Основні елементи блоку на BDD ІСК

Блок ІСК включає в себе різні підлеглі блоки, такі як блок візуалізації, блок прогнозування, блок архівування та блок регулювання рівня. Ці підлеглі блоки виконують певні функції та операції, пов'язані зі збиранням, аналізом, візуалізацією, прогнозуванням та регулюванням параметрів.

Блок візуалізації відображає поточні тренди, тренди з архіву та прогнозовані тренди параметрів протягом певного часового проміжку. Цей блок дозволяє користувачу отримувати візуальну інформацію про зміни параметрів в реальному часі.

Блок прогнозування використовує функції належності, кількість правил та операції прогнозування для прогнозування параметрів на певний часовий період. Цей блок дозволяє встановлювати майбутні тренди та передбачати значення параметрів на основі наявних даних.

Блок архівування забезпечує збереження архівних даних на протязі певного часу з заданою періодичністю. Цей блок надає можливість доступу до архівних даних для аналізу та перегляду історичних змін параметрів.

Блок регулювання рівня використовує функції належності та кількість правил для регулювання рівня параметрів. Цей блок дозволяє забезпечити стабільність та оптимальні значення параметрів шляхом виконання відповідних операцій регулювання.

Загальною метою цього ІСК є забезпечення моніторингу, прогнозування та керування параметрами з використанням різноманітних блоків і операцій для досягнення оптимального функціонування парового котла.

## **2.6. Розробка алгоритмічного забезпечення ІСК**

### **2.6.1. Визначення життєвого циклу ІСК та її процесів (State Machine diagram, Activity diagram)**

При розробці алгоритмічного забезпечення ІСК важливо визначити життєвий цикл системи та її процесів. Для цього використовуються дві типові діаграми: діаграма машинного стану (State Machine diagram) та діаграма

діяльності (Activity diagram). Діаграма машинного стану (State Machine diagram) визначає життєвий цикл блоків системи, їх можливі стани, події, умови та переходи між станами. Ця діаграма дозволяє моделювати поведінку системи, визначати послідовності та умови для координації роботи підсистем. Діаграма машинного стану дає зручні посилання на блоки, які володіють відповідною поведінкою. Цей тип діаграми особливо корисний для складних блоків або важливих компонентів системи, які мають багато можливих станів.

Діаграма діяльності (Activity diagram) використовується для моделювання послідовностей дій та процесів у системі. Вона дозволяє описати кроки, рішення та вибори, що відбуваються під час виконання певної діяльності. Діаграма діяльності допомагає уявити робочі процеси системи та забезпечити чітке розуміння послідовностей дій, що відбуваються.

Ці дві діаграми, діаграма машинного стану і діаграма діяльності, є потужними інструментами для моделювання поведінки системи і визначення її життєвого циклу та процесів. Вони допомагають зрозуміти взаємозв'язки між компонентами системи та забезпечують важливу інформацію для розробки алгоритмів та програмного забезпечення системи.

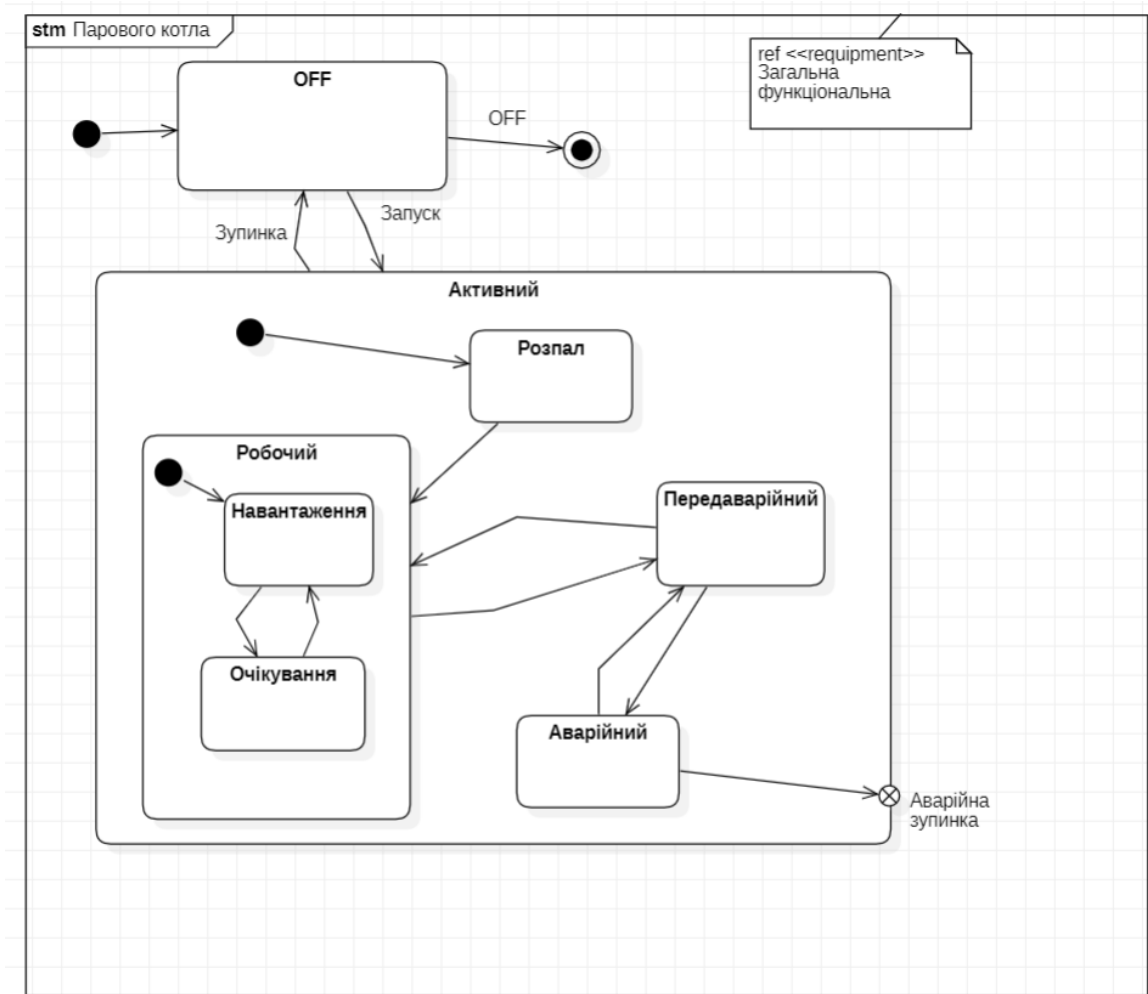


Рис. 1.5. State Machine diagram

Опис коротко кожного зі станів, що використовуються в State Machine діаграмі:

**OFF (Вимкнено):** Система перебуває в вимкненому стані, коли вона не активна і не функціонує. Це початковий стан системи.

**Запуск/Зупинка:** Цей стан описує перехід системи зі стану вимкненої в стан активний або навпаки. В цьому стані відбувається запуск або зупинка системи.

**Активний (Розпал):** Система перебуває в стані активності, коли вона розпалюється або підтримує певний рівень активності. В цьому стані відбувається процес розпалу.

**Робочий:** Цей стан описує нормальний робочий стан системи, коли вона функціонує у звичайному режимі без надзвичайних подій або проблем.

Навантаження/Очікування: Система перебуває в стані очікування або навантаження, коли вона не активна або очікує на певні умови або ресурси для продовження роботи.

Передаварійний: Цей стан описує ситуацію, коли система перебуває у стані передаварійної ситуації або можливої проблеми, яка потребує уваги та дій для запобігання аварії.

Аварійний: Система перебуває у стані аварії, коли сталася серйозна помилка, збій або небезпечна ситуація, яка вимагає негайної реакції та втручання.

Аварійна зупинка: Цей стан описує зупинку системи внаслідок аварії або небезпечної ситуації. Система перебуває у бездіяльності, поки не будуть вжиті заходи щодо виправлення проблеми або відновлення функціонування.

Ці стани відображають основні фази та умови, з якими система може зустрічатися під час своєї роботи.

### **2.6.2. Вирішення проблеми синхронізації підсистем (Sequence diagram)**

Для вирішення проблеми синхронізації підсистем використовується діаграма послідовності (Sequence diagram).

Діаграма послідовності надає інформацію про взаємодію блоків системи на часовій послідовності. Вона має два виміри: вертикальну вісь, що представляє час, і горизонтальну вісь, що представляє об'єкти-учасники взаємодії. На діаграмі можуть бути позначені часові мітки як текстові поля, що допомагають уявити послідовність подій.

Горизонтальне впорядкування об'єктів на діаграмі не має суттєвого значення для взаємодії і може бути змінено за потребою. Головне завдання діаграми послідовності полягає в тому, щоб показати послідовність виконання дій між об'єктами та спосіб взаємодії між ними.

Застосування діаграми послідовності дозволяє візуалізувати та розуміти взаємодію між компонентами системи, деталі синхронізації та послідовності виконання операцій. Це допомагає виявляти можливі проблеми з синхронізацією та вирішувати їх на ранніх етапах проектування системи.

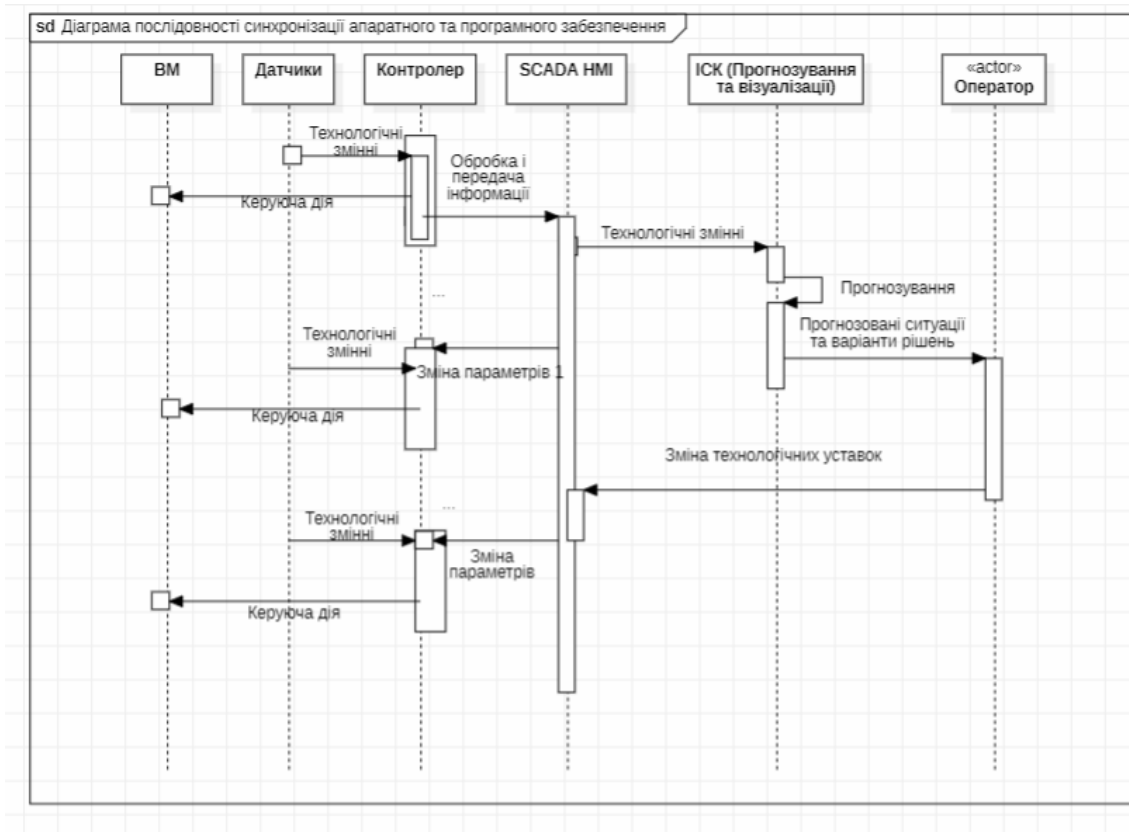


Рис. 1.6. Основні елементи Sequence diagram

# РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОГО ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІСК

## 3.1 Розробка ІСК на базі нечіткої логіки

### 3.1.0. Опис використаних контурів регулювання

Функціональні схеми автоматизації (ФСА) призначені для визначення основних контурів керування і регулювання основних технологічних параметрів. Схеми автоматизації котлоагрегатів містять ланцюги керування вимірюваннями, сигналізацією, витратою, тиском, температурою, рівнем і концентрацією.

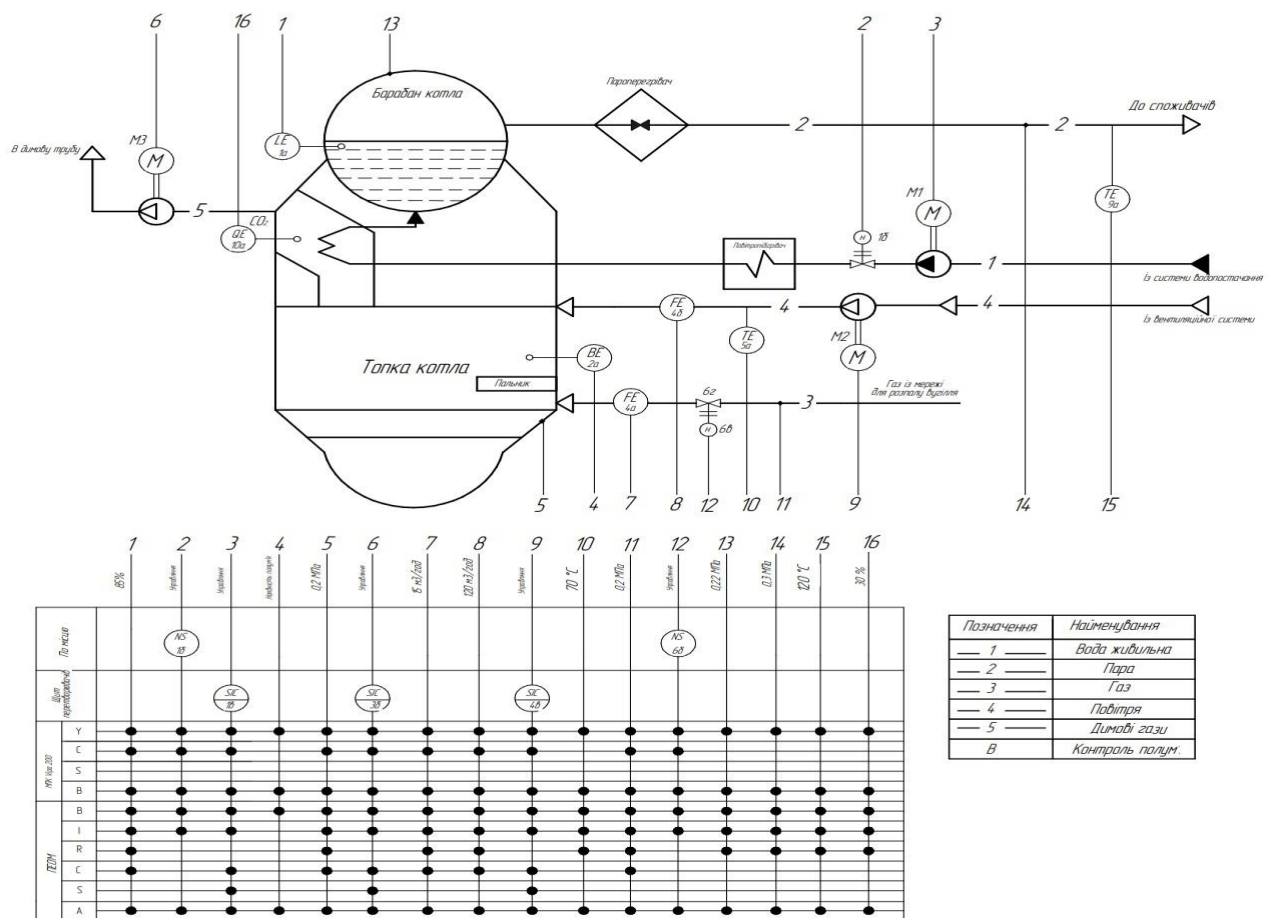


Рисунок 3.1 ФСА котла ДКВр-10-13.

### Контур вимірювання та регулювання витрати

Контур регулювання витрати повітряно-паливного співвідношення печі складається з

Контур контролю співвідношення повітря-паливо в печі складається з вихрових витратомірів Rosemount 8600 (4a, 4b).

Сигнал надходить на MPC, обробляється програмою і виявляє відхилення від заданого значення. Якщо на виході з МПК є розбіжність з уставкою, то сигнал 4-20 мА подається на частотний перетворювач двигуна Mitsubishi s500.

Сигнал подається на частотний перетворювач двигуна вентилятора Mitsubishi s500 (4 В) і відбувається зміна частоти обертання двигуна вентилятора подачі пічного повітря.

Зміна частоти обертання електродвигуна вентилятора подачі повітря в піч.

#### Контур вимірювання та регулювання тиску

Вимірюється тиск в газопроводі подачі газу до пальника, в корпусі котла і в котельні.

Вимірюється тиск в корпусі котла, в топці котла і в трубопроводі подачі пари до споживача.

Газ подається до споживача. Вимірювання тиску здійснюється за допомогою тензометричних датчиків.

Вихідний сигнал датчика тиску Danfoss MBS 3000 (3a, 6a, 7a, 8a) становить 4-20 мА вихідний сигнал надсилається в IPC і відображається на екрані оператора.

#### Контур регулювання тиску

Контроль тиску відбувається в топці котла. Якщо тиск надмірний (датчик тиску 3a), через частотний перетворювач Mitsubishi s500 вмикається двигун насоса відпрацьованих газів МЗ.

Через перетворювач Mitsubishi s500 (3b) вмикається двигун насоса відпрацьованих газів МЗ.

Для контролю тиску в трубі подачі газу використовуються наступні пристрої.

Використовується Danfoss MBS 3000 (6a), сигнали з якого надходять на контролер.

Сигнал надходить на блок ручного управління BRU-7 (6b).

На вхід BRU надходять сигнали від датчиків і від модуля.

аналоговий вихід, тобто канал керування відкриттям клапана подачі газу; вихід БРП підключений до клапана 6 В. В автоматичному режимі.

В автоматичному режимі керування відкриттям клапана здійснюється за алгоритмом ПІ-регулятора в програмі.

У програмі сигнал з модуля аналогового виходу подається на PDU.

В автоматичному режимі вихід PDU - це струмовий сигнал, який вручну встановлюється датчиком PDU.

Це значення встановлюється вручну датчиком PDU. На виході також буде сигнал, пропорційний 4-20 мА., який надсилається на клапан подачі газу в піч. Якщо пар потрібно отримати більш інтенсивно і швидко, програма регулювання тиску ігнорується, а на клапан 6с надсилається сигнал через ручний блок керування на клапан подачі газу.

Клапан 6с відкривається тільки до встановленого значення.

#### Контур вимірювання температури

Температура пари вимірюється за допомогою термометрів на лінії подачі пари і лінії подачі повітря в піч.

Контури вимірювання температури в лінії подачі пари і лінії подачі пічного повітря оснащені термопарами з вторинними перетворювачами Sitrans.

Значення температури відображаються на екрані оператора.

#### Контури вимірювання та контролю рівня

Контролюється рівень в барабані котла. Вимірювання здійснюється за допомогою датчика рівня радарного типу BARS 352I (1a), вихідний сигнал 4. Якщо рівень нижче заданого, сигнал на виході MPC подається на електромагнітний клапан Belimo NF24-SR (1b), а також включається частотний перетворювач Mitsubishi s500 (1c) і змінюється подача води в апарат.

#### Схема вимірювання концентрації вуглекислого газу в печі

Вимірювання концентрації вуглекислого газу в димоході здійснюється за допомогою наступних каналів

Датчик температури і концентрації CO<sub>2</sub> KTM-C02 (10a) в димоході, значення якого відображаються на екрані оператора.

### Контур виявлення полум'я в топці

Полум'я в топці виявляється ультрафіолетовим детектором полум'я UV-IRS (2a). Полум'я виявляється детектором полум'я UV-IRS (2a); вихідний сигнал 4-20 мА надсилається на ІРС і відображається на екрані оператора.

#### 3.1.1 Структура експертної системи

Завдання полягає в тому, щоб створити підсистему ухвалення рішень, яка має три входи і на основі отриманих оцінок генерує відповідні логічні рішення. На малюнку 1.2 представлено структуру системи логічних міркувань.

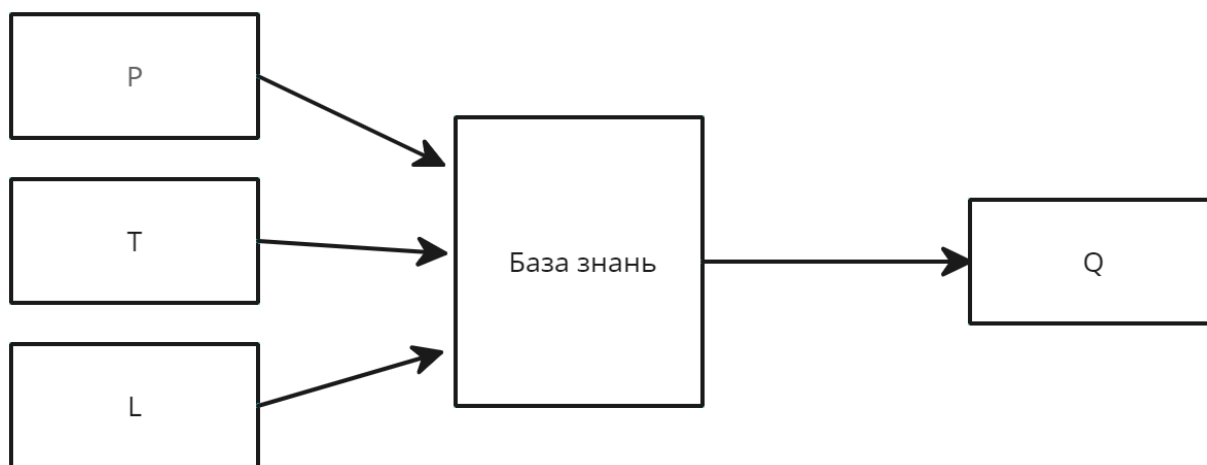


Рисунок 3.1.1: Структура експертної системи

Входи:

P - тиск води в котлі (0-350 КПа);

T - температура води в котлі (0-120);;

L - рівень води в котлі (70-80 %);

Потужність.

Q - виробництво пари (0-15 тонн/год); Q - виробництво пари (0-15 тонн/год).

#### 2. лінгвістична апроксимація вхідних і вихідних параметрів

Використовуйте програмне середовище MATLAB і вбудовану функціональність FIS Editor Fuzzy Logic Toolbox для створення прийнятних вхідних і вихідних змінних.

### 3.1.2. Лінгвістична апроксимація вхідних і вихідних параметрів

Для створення прийнятних вхідних і вихідних змінних використовується програмне середовище MATLAB і вбудована функціональність FIS Editor Fuzzy Logic Toolbox.

[Input1]

Name='тиск'

Range=[0 350]

NumMFs=3

MF1='low': 'trapmf', [0 40 50 70]

MF2='normal': 'trapmf', [50 70 110 150]

MF3='high': 'trapmf', [130 200 350 350]

[Input2]

Name='температура'

Range=[0 100]

NumMFs=3

MF1='low': 'trimf', [0 30 50]

MF2='normal': 'trimf', [40 50 80]

MF3='high': 'trimf', [70.2645502645503 80.2645502645503 100.26455026455]

[Input3]

Name='рівень\_води'

Range=[0 100]

NumMFs=3

MF1='low': 'trapmf', [0 15 20 25]

MF2='normal': 'trapmf', [20 35 65 80]

MF3='high': 'trapmf', [75 85 100 100]

[Output1]

Name='потужність'

Range=[0 15]

NumMFs=3

MF1='low': 'trapmf', [0 2 3 4]

MF2='medium': 'trapmf', [3 5 6 9]

MF3='high': 'trapmf', [8 11 13 15]

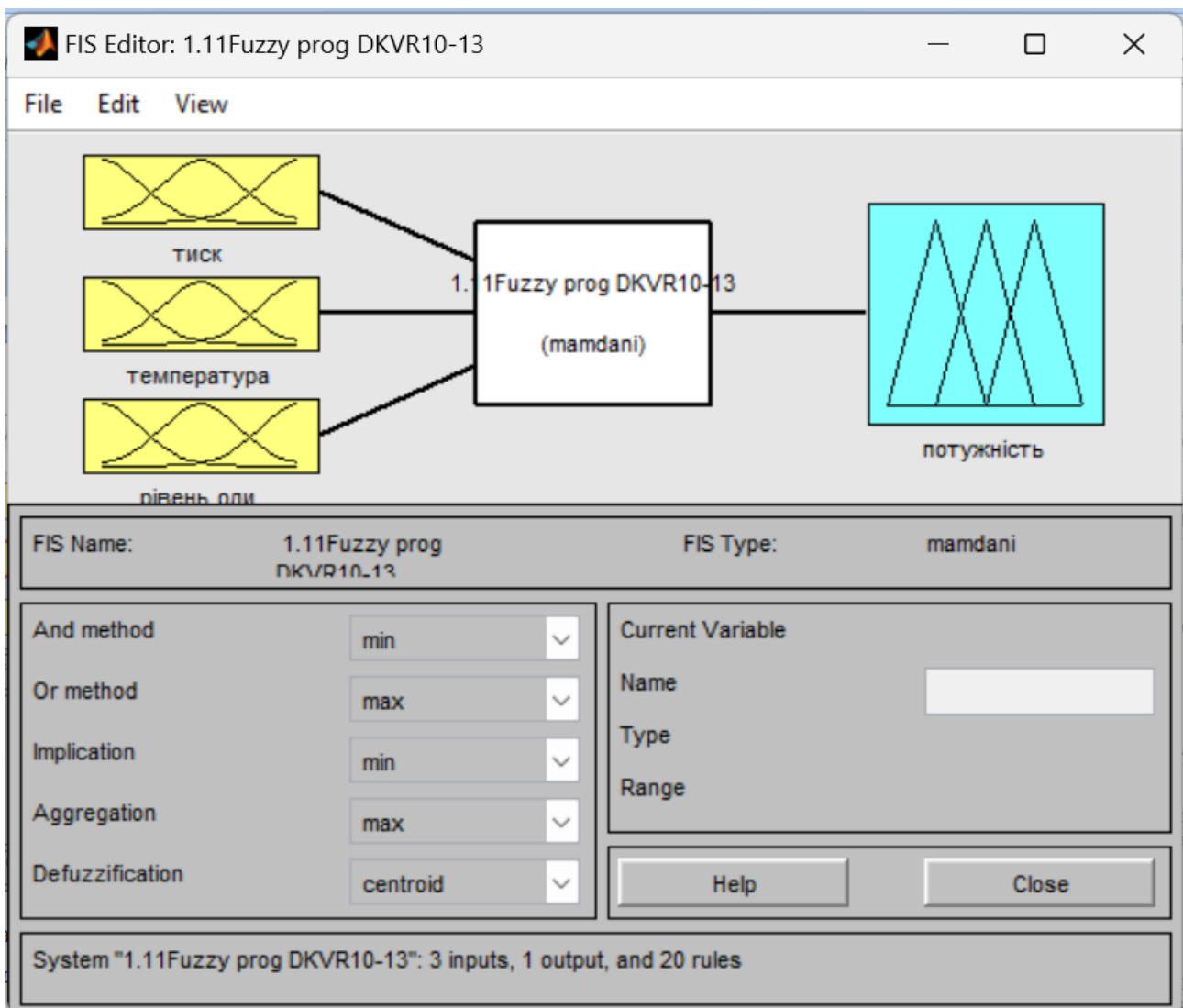


Рисунок 3.2.1 Вхідні та вихідні параметри у вікні FIS Editor.

Додайте п'ять функцій належності до кожної змінної. У меню Edit виберіть пункт Add Membership Functions (Add MFs) і додайте необхідний тип і кількість функцій належності.

У вікні редактора функцій належності налаштуйте параметри для кожної функції належності.

В області параметрів поточної змінної введіть діапазон змінної за допомогою параметрів Range і Display Range.

В області параметрів поточної функції належності можна змінити ім'я мовної змінної в полі Name, а тип і параметри функції належності в полі Params.

Ви можете змінити параметри.

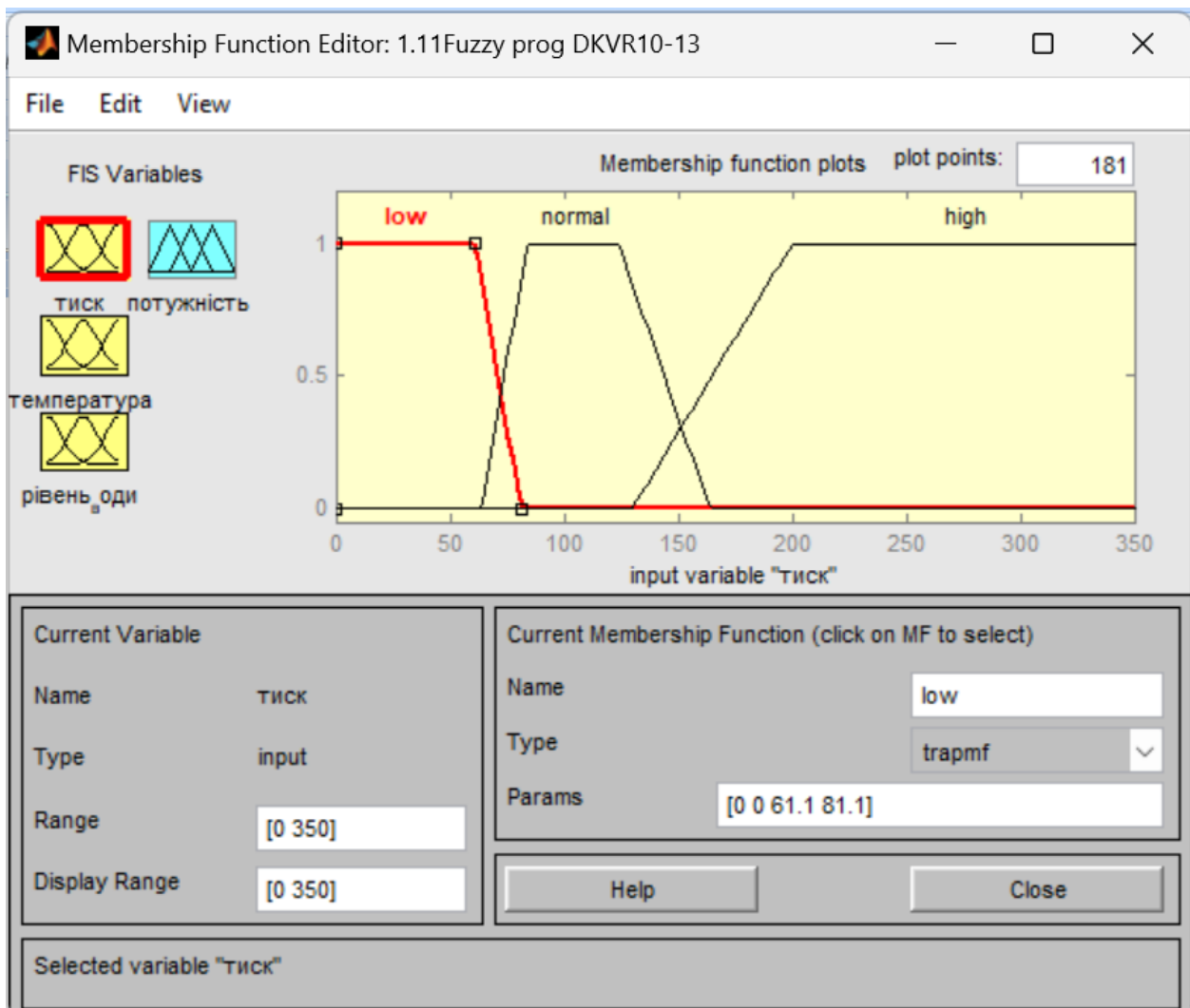


Рисунок 3.2.2: Функція належності для тиску пари

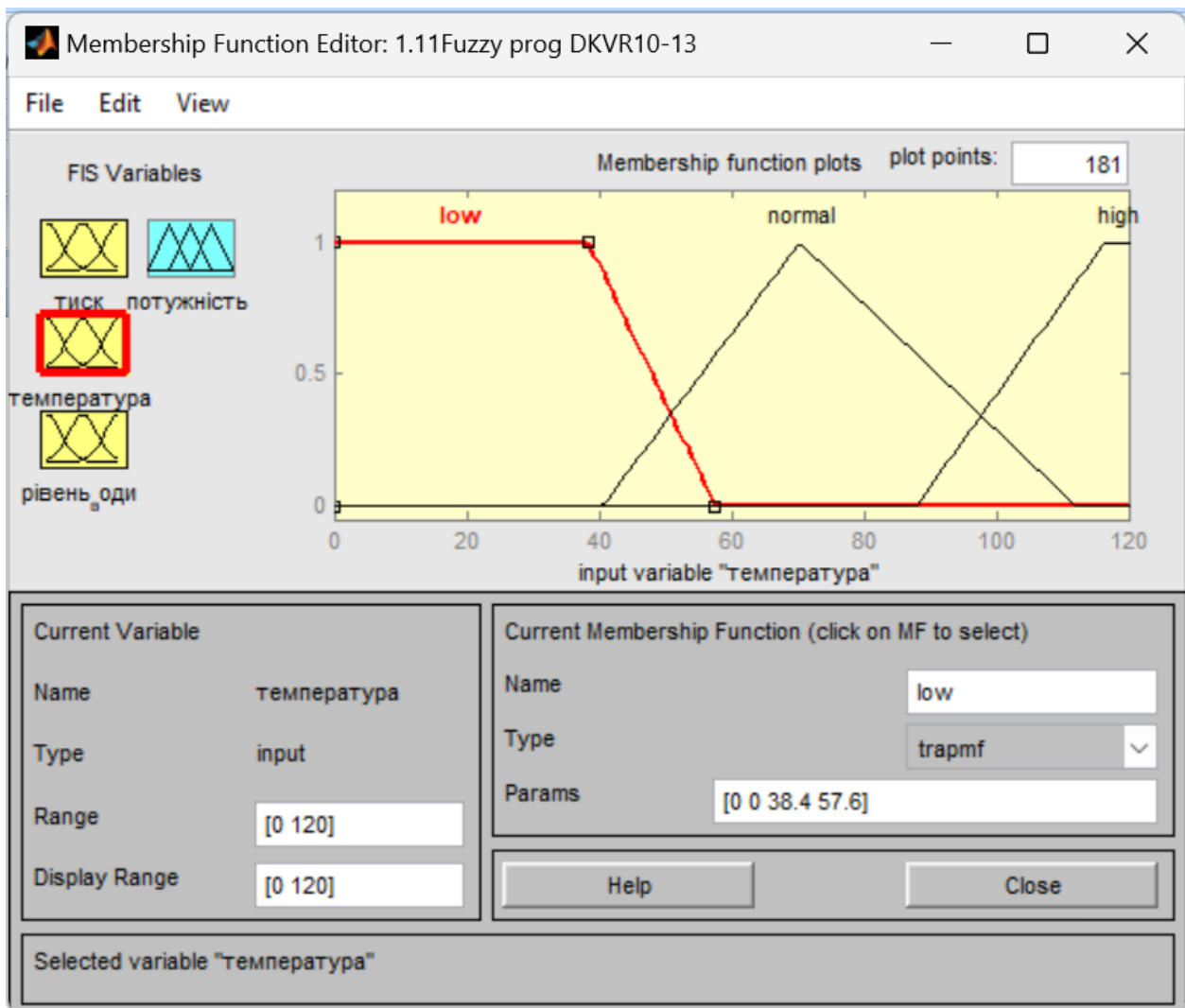


Рисунок 3.2.3: Функція належності для температури води

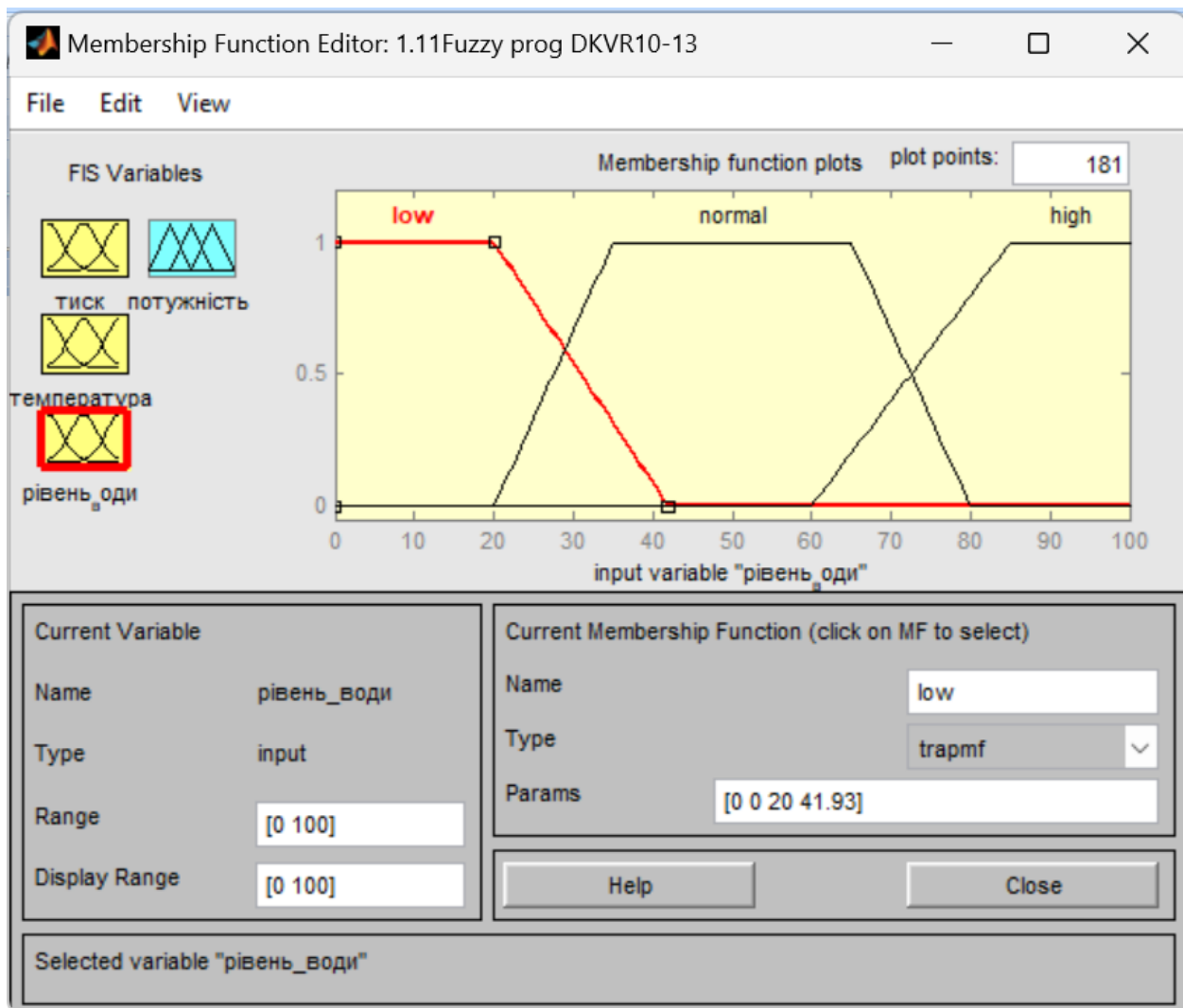


Рис. 3.2.4. Функції належності рівня води.

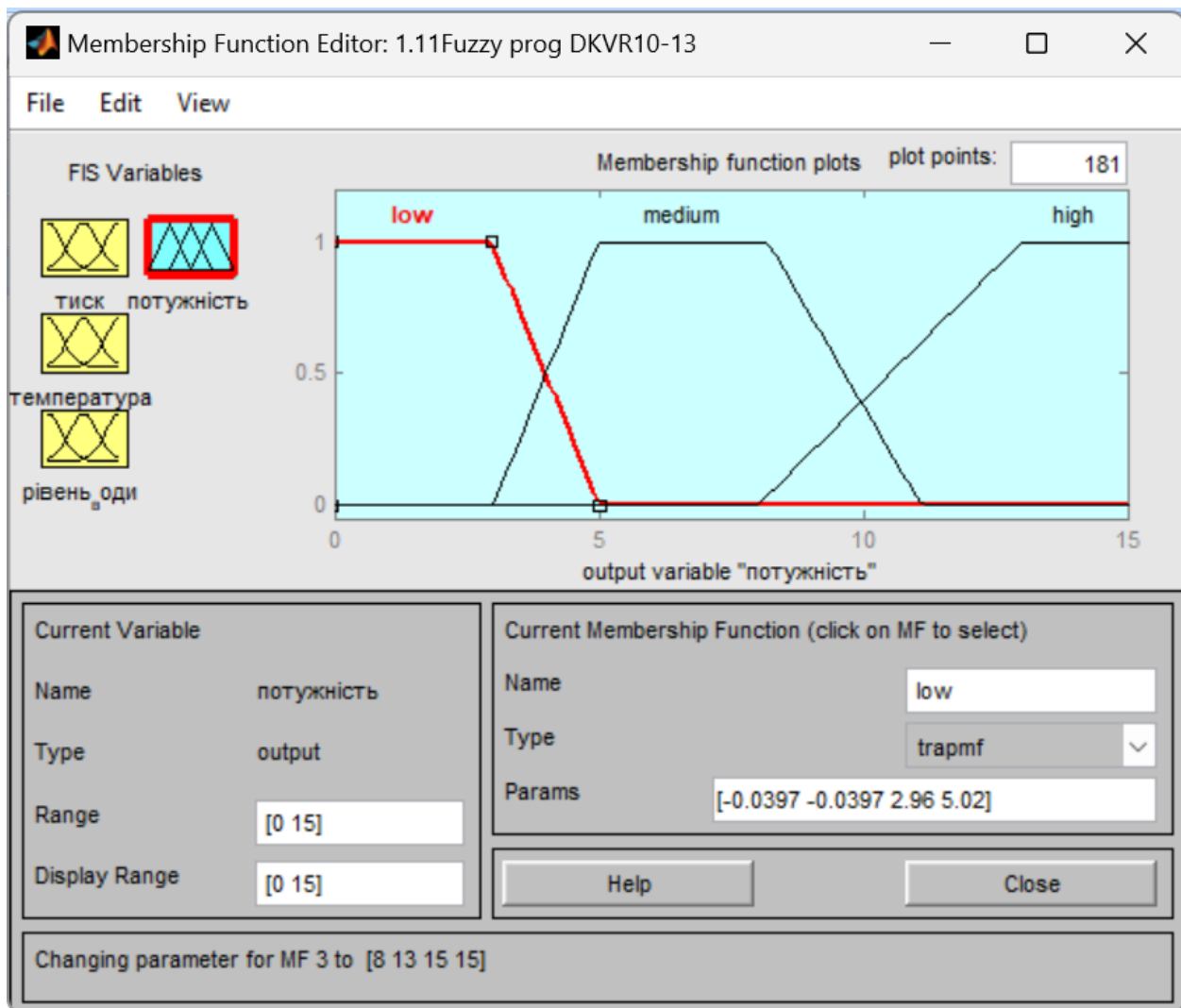


Рис.3.2.5. Функції належності потужності виробництва пари.

### 3.1.3. Розробка бази правил для нечіткої системи. Аналіз результатів

В головному вікні FIS Editor в меню Edit\Rules відкриваємо вікно Rule Editor. В даному вікні визначаються нечіткі правила поведінки системи.

Створюємо набір правил для утворювальної системи.

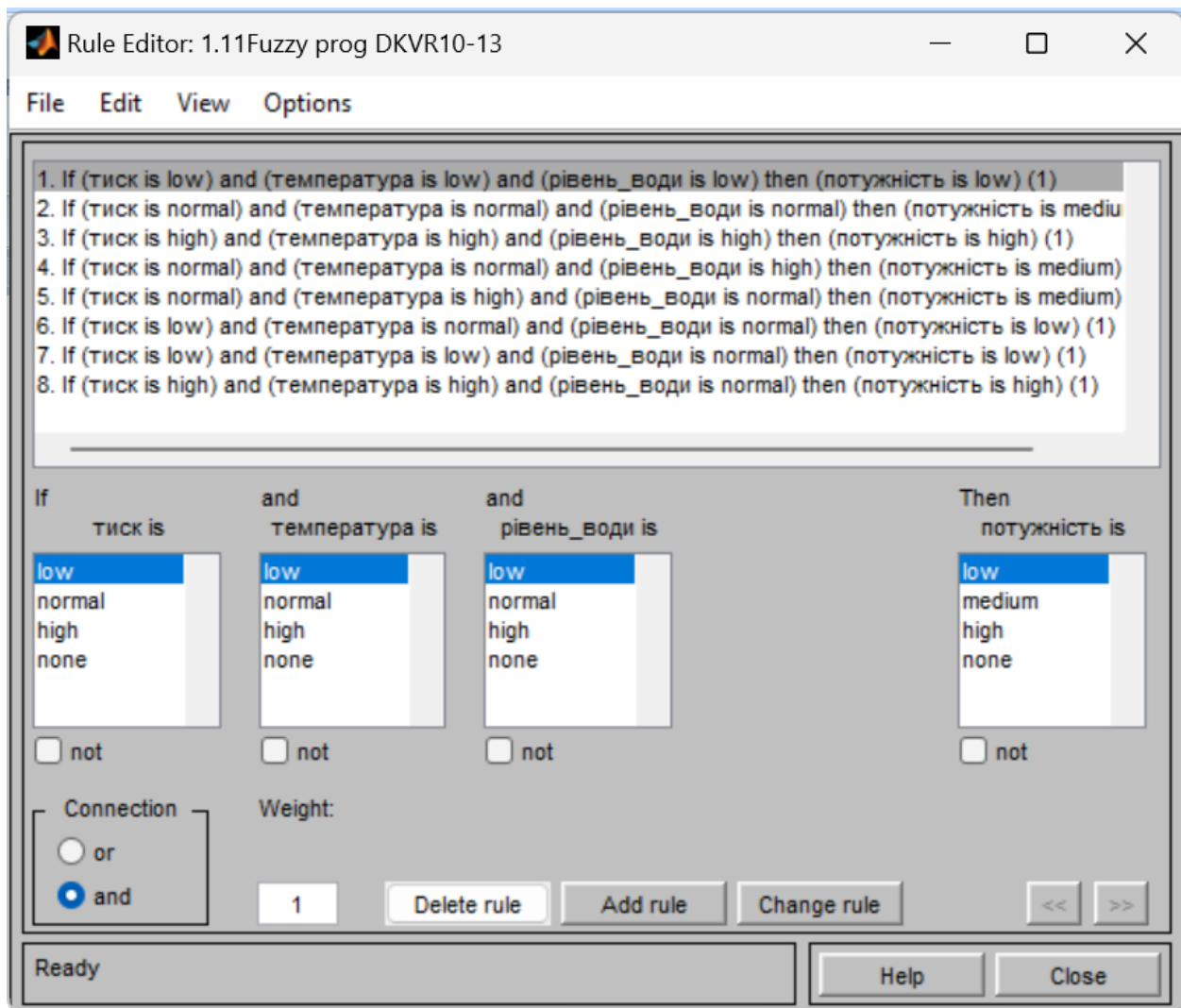


Рис. 3.1.4 Створені правила нечіткого висновку.

Щоб переглянути результати роботи нечіткої логічної системи в головному вікні редактора FIS Editor, виберіть команду Rules з меню View для графічного відображення алгоритму нечіткого виведення або команду Surface для відображення поверхонь відгуку.

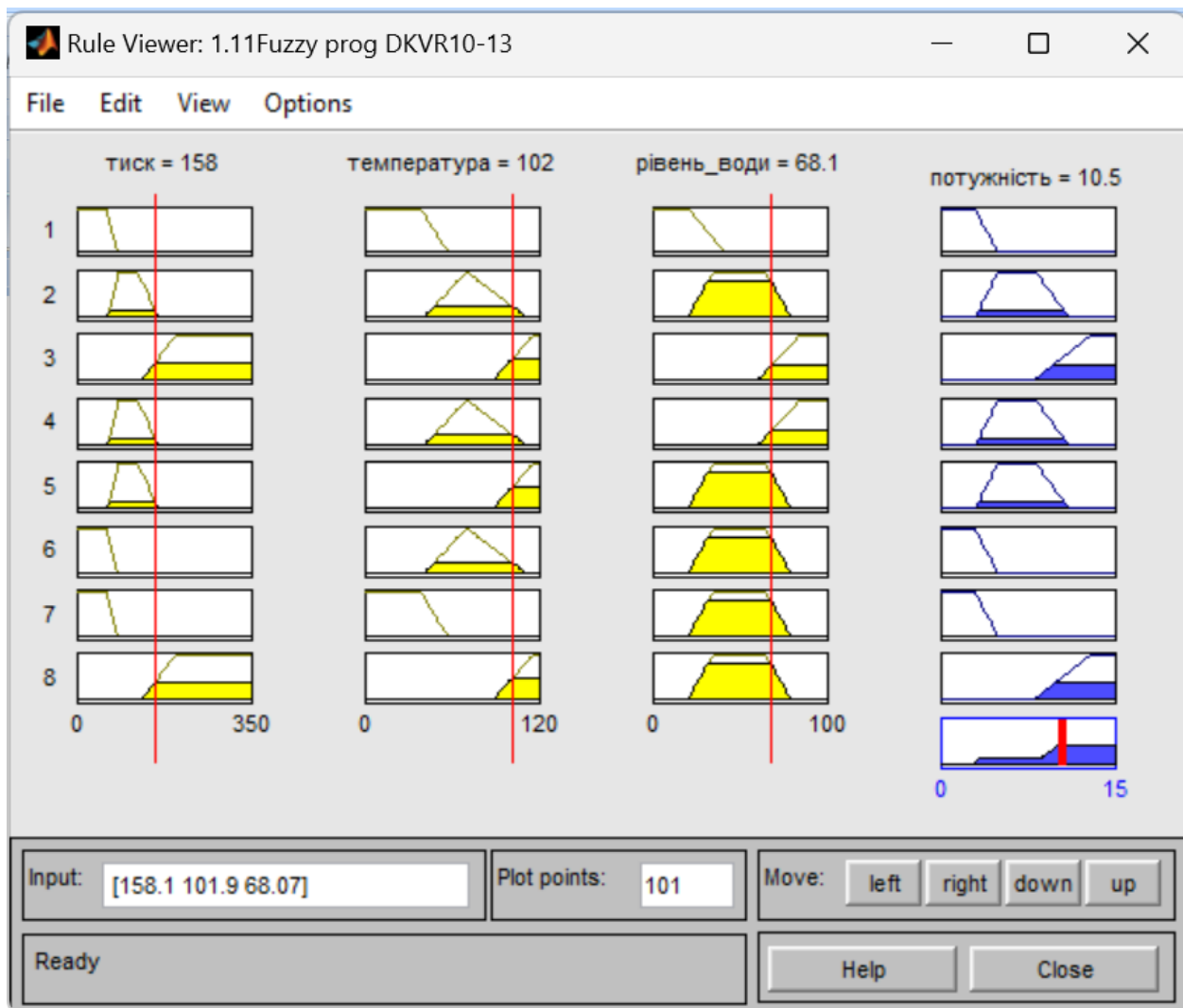


Рис 3.1.5. Вікно графічного відображення роботи алгоритму нечіткого висновку.

З малюнку видно рекомендовані оптимальні значення параметрів:

Вхідні:

P=158

T=102

L=68.1

Вихідні:

Q=10.5

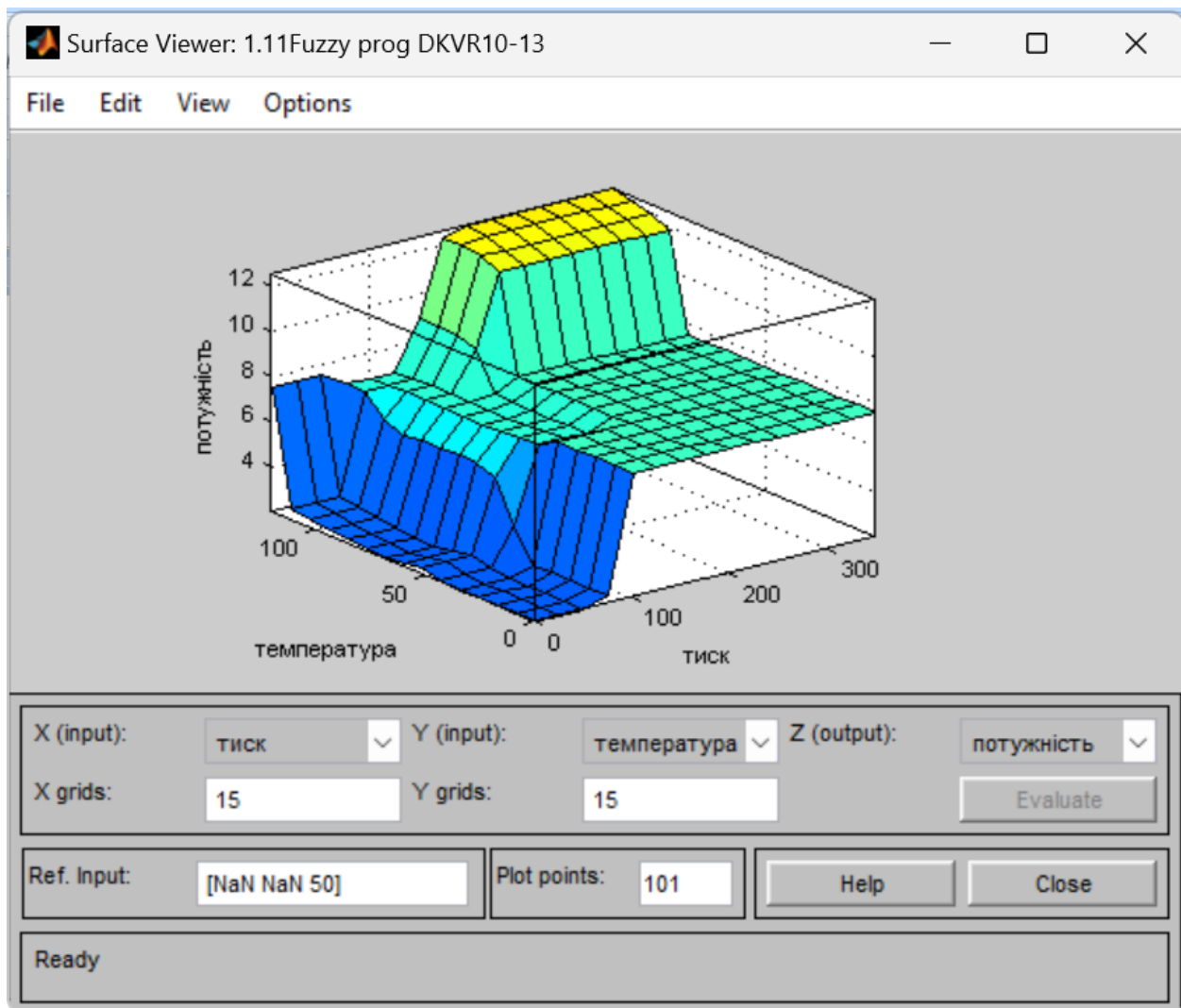


Рис. 3.1.6. Вікно залежності поверхні відгуку залежності температури та тиску до потужності.

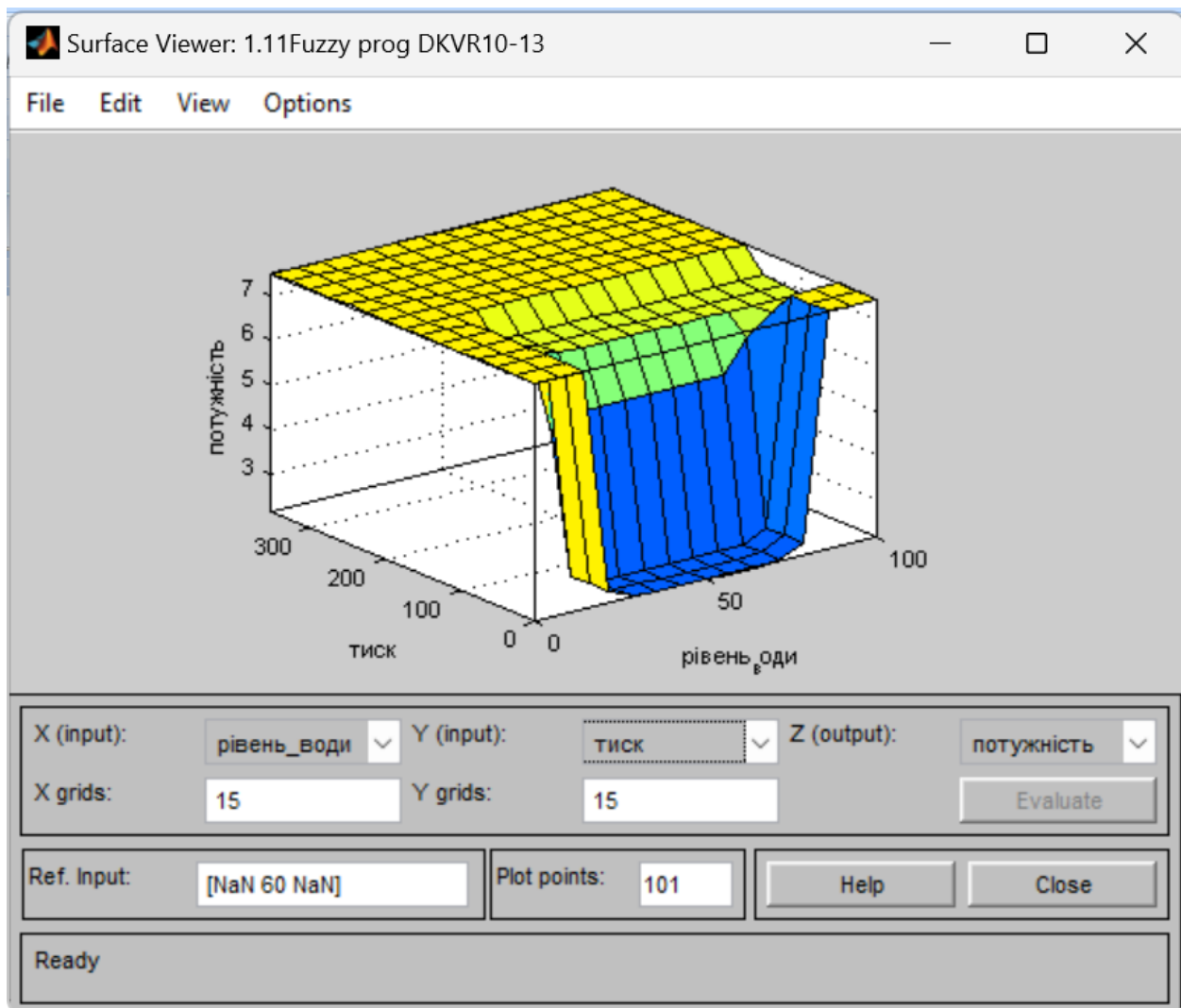


Рис. 3.1.7. Вікно залежності поверхні відгуку залежності рівня води та тиску до потужності.

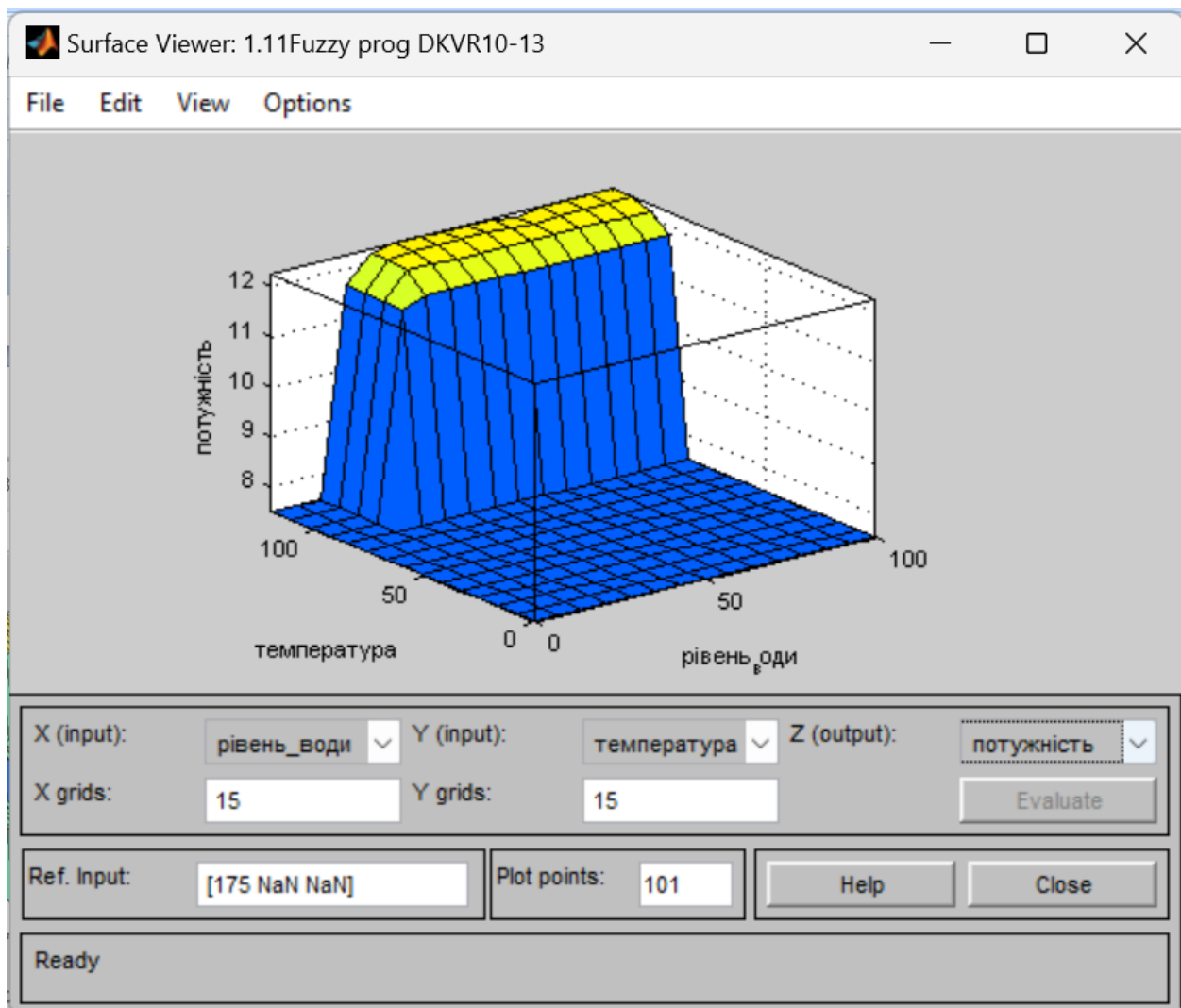


Рис. 3.1.8. Вікно залежності поверхні відгуку залежності рівня води та температури до потужності.

### 3.1.4. Побудова нечіткого регулятора

На кількість вироблюваної пари впливають температура в барабані котла, тиск води в барабані та рівень води в барабані. Щоб підтримувати необхідний об'єм пари, необхідно вибрати регулювальний пристрій, що враховує ці фактори. Швидкість зміни залежить від постійного діаметра трубопроводу, температури у випарнику і кількості доданої гарячої води. Система має значні нелінійні характеристики.

Входами контролера є температура в барабані котла, тиск води в барабані та рівень води в барабані, а виходом - кількість виробленої пари.

Математична модель об'єкта керування наведена нижче.

Математично модель можна записати таким чином:

$$M_{out}(t) = f(T_{drum}(t), P_{drum}(t), L_{drum}(t))$$

де  $M_{out}(t)$  - кількість пари, виробленої в момент часу  $t$ .  $T_{drum}(t)$  - температура в барабані котла в момент часу  $t$ .  $P_{drum}(t)$  - тиск води в барабані в момент часу  $t$ .  $L_{drum}(t)$  - рівень води в барабані в момент часу  $t$ .

Функція  $f$  відображає зв'язок між вхідним і вихідним сигналами. Ця функція може бути визначена на основі фізичних законів, що описують процеси в котлі.

Для цієї системи розроблено і порівнюють такі типи контролерів

1. пропорційні регулятори (P).
2. пропорційно-диференціальний регулятор (PD).
3. нечіткі контролери, які підкоряються таким правилам:

Якщо (рівень нормальний), (клапан не змінюється).

Якщо (рівень низький), (клапан швидко відкривається).

Якщо (рівень високий) (клапан швидко закривається) 4.

4. нечіткий контролер використовує правила:

Якщо (рівень нормальний), (клапан не змінюється)

Якщо (рівень низький) (клапан швидко відкривається)

Якщо (рівень високий), (клапан швидко закривається)

Якщо (рівень нормальний) і (швидкість позитивна), (клапан закривається повільно)

Якщо (рівень нормальний) і (швидкість негативна), (клапан відкривається повільно).

Схема установки була розроблена в програмному пакеті MATLAB Simulink на основі математичної моделі. Система являє собою замкнутий контур з негативним зворотним зв'язком. Для простоти вхідний сигнал приймається чисельно рівним бажаному рівню рідини в барабані котла.

Тому коефіцієнт вимірювача встановлено рівним 1 ( $K_p = 1$ )

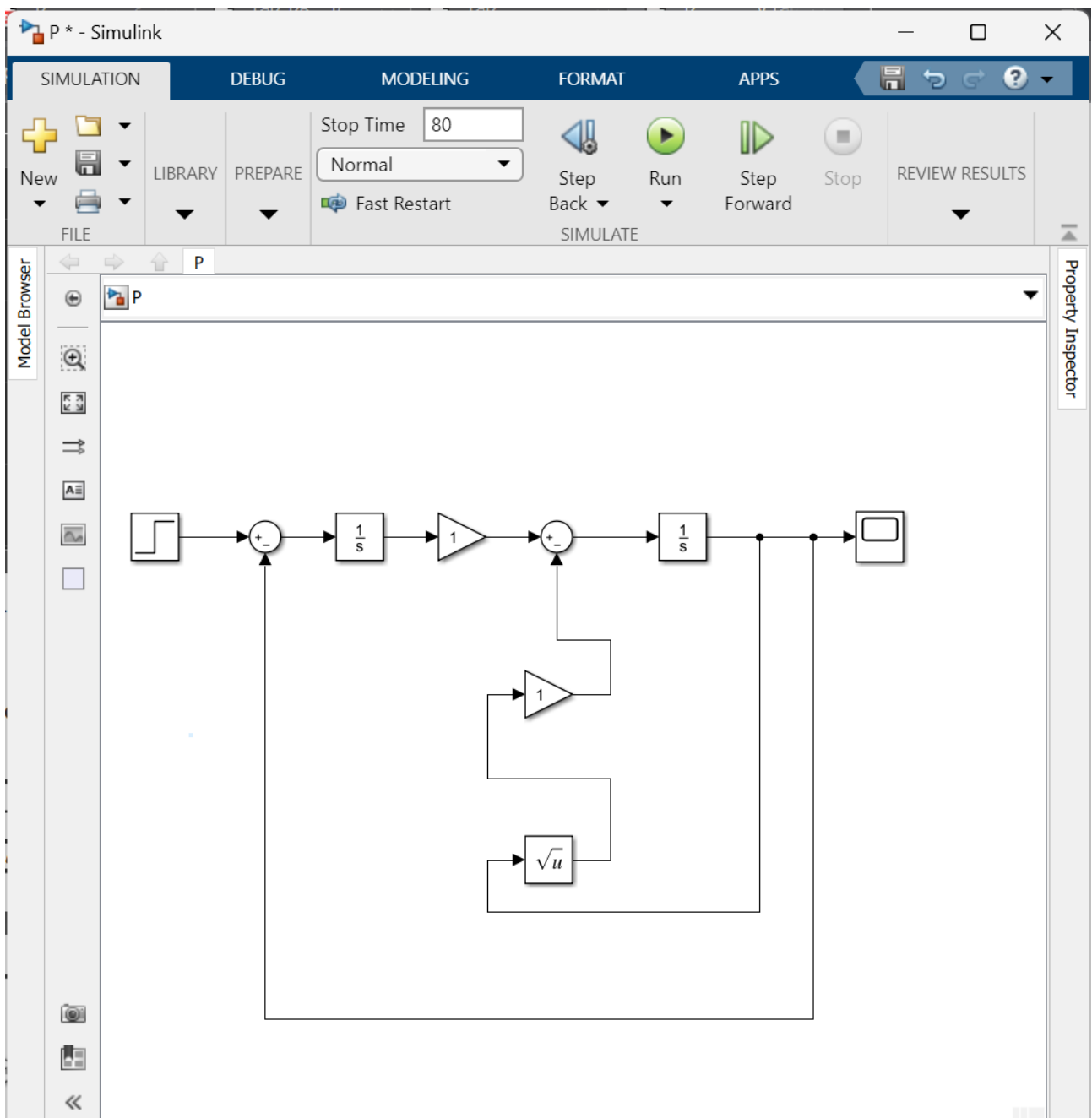


Рис. 4.1 Схема об'єкта управління при  $K_p = 1$

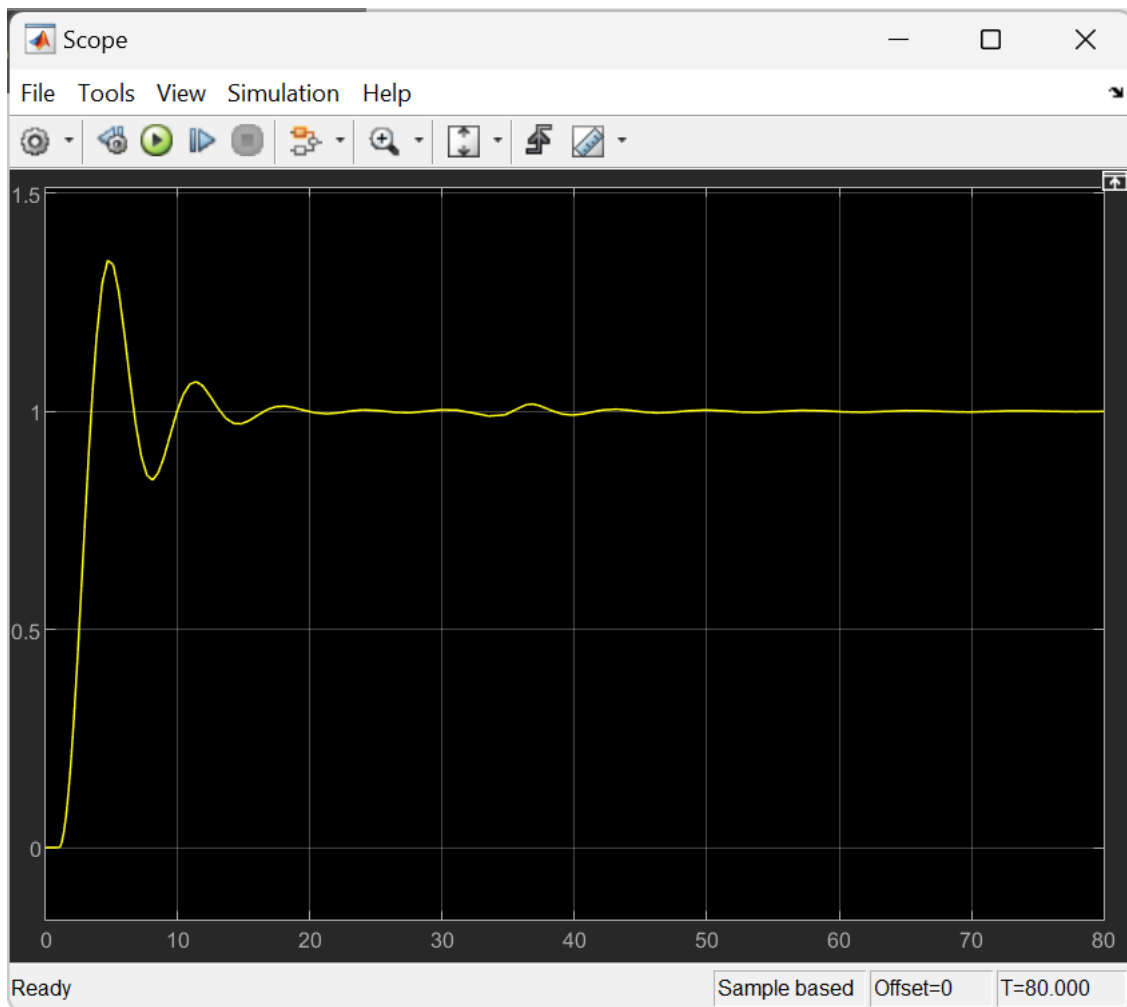


Рис. 4.2. Зміна концентрації рівня при  $K_p = 1$

Додамо до системи П-регулятор, який реалізує пропорційний закон управління.

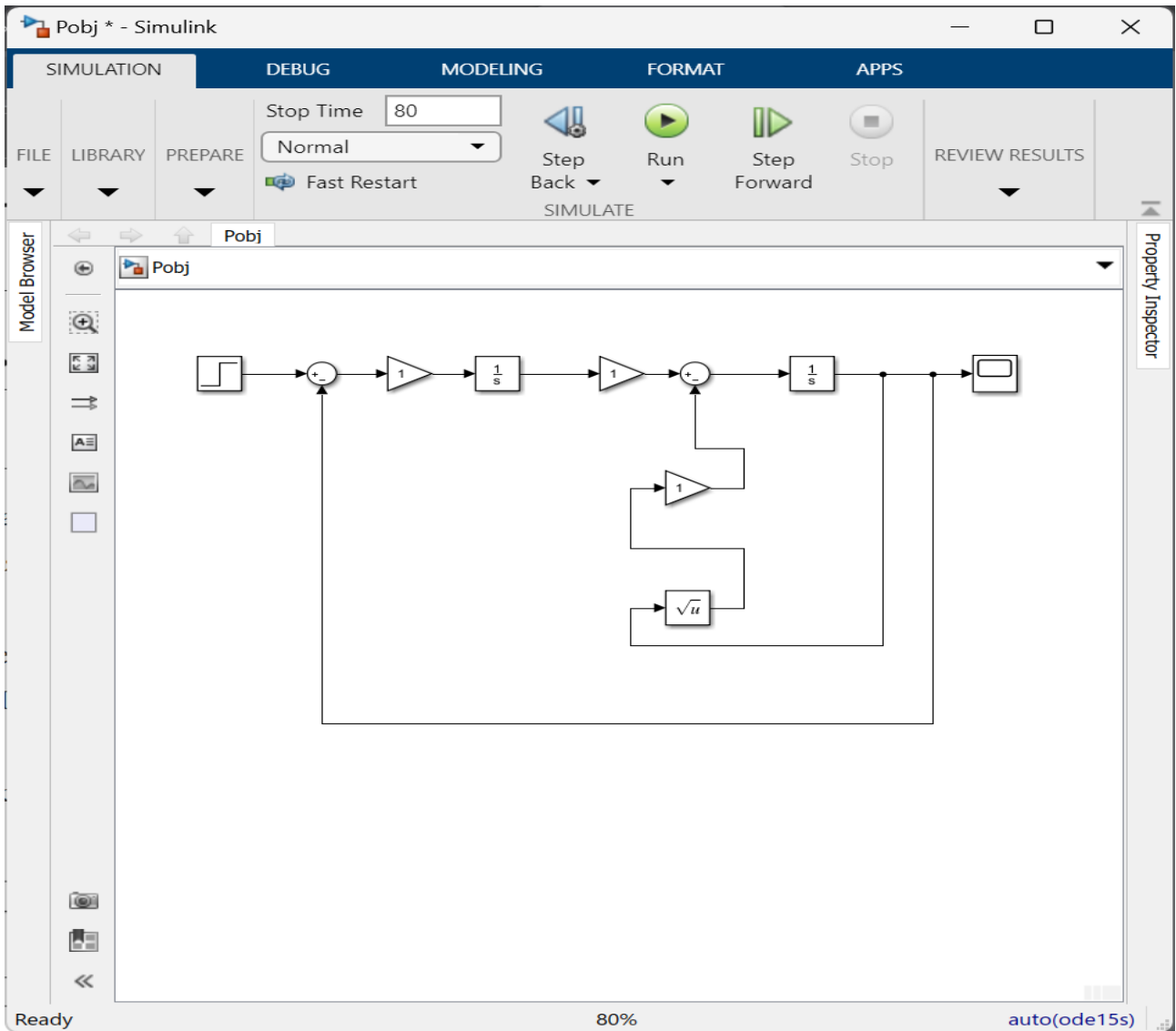


Рис. 4.3 Схема об'єкта управління з П- регулятором

Тому зміною коефіцієнта посилення можна змінити тільки швидкість, але не якість.

У даній постановці задачі можна змінити тільки швидкість процесу, але не динаміку; неможливо отримати необхідну якість перехідного процесу, використовуючи П-регулятор.

Тому створюється регулятор PD шляхом додавання диференціальної ланки до регулятора системи.

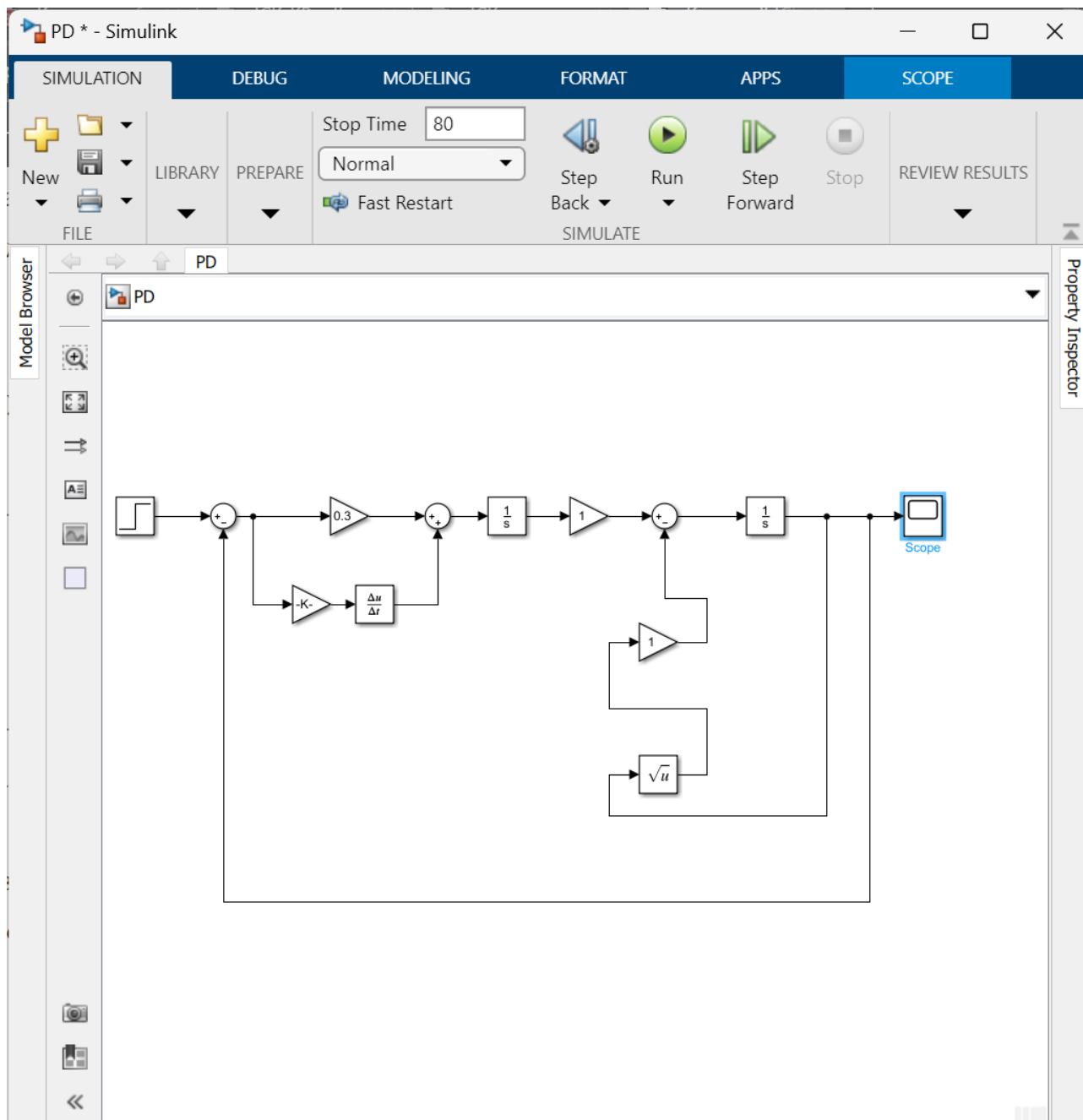


Рис. 4.4. Схема об'єкта управління з ПД- регулятором.

Тепер ми маємо два варійованих параметра для настройки регулятора. Перегляньмо їх вплив окремо.

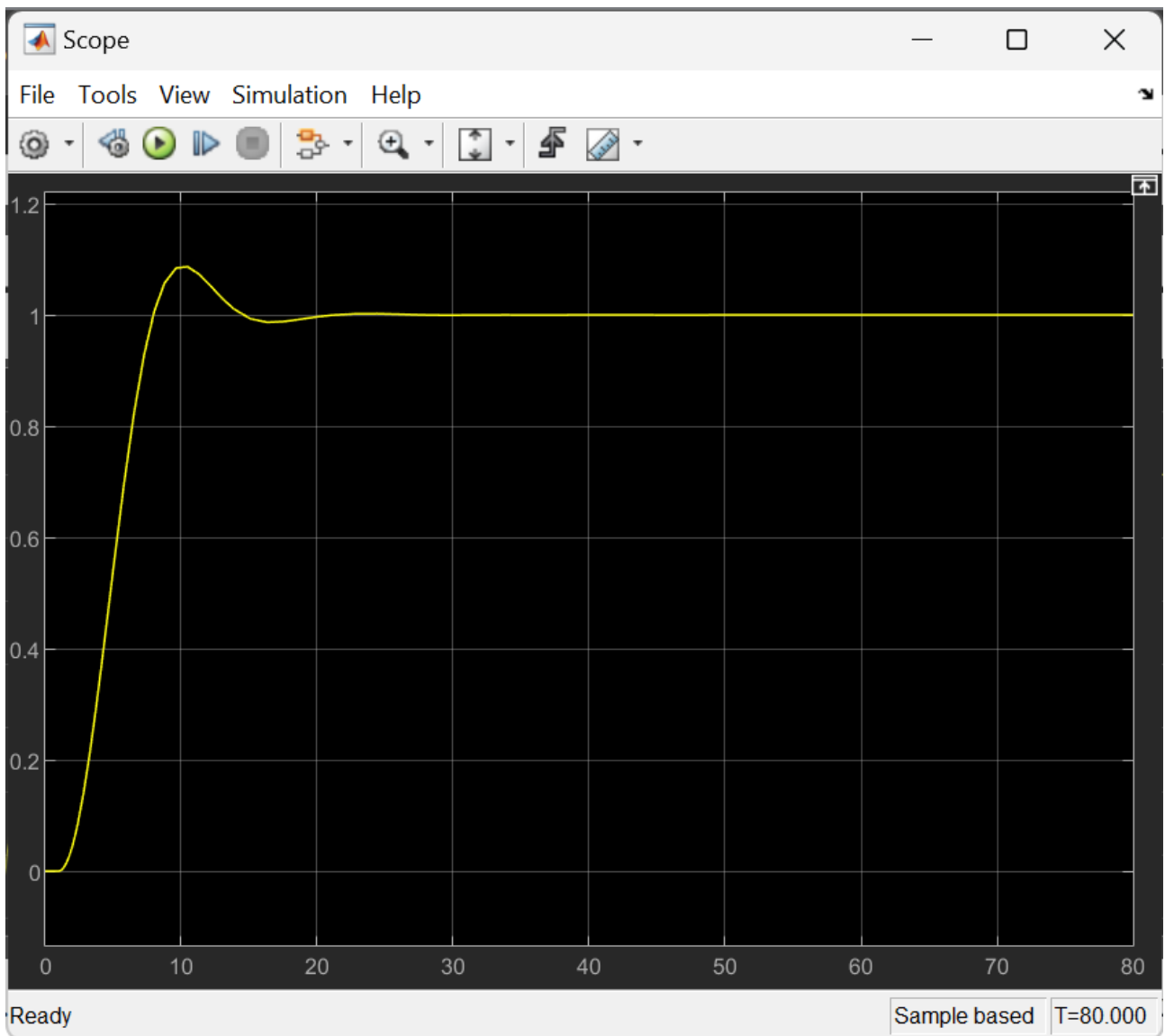


Рис.4.5. Перехідний процес температури води в барабані котла при різних значеннях коефіцієнтах пропорційності ПД-регулятора.

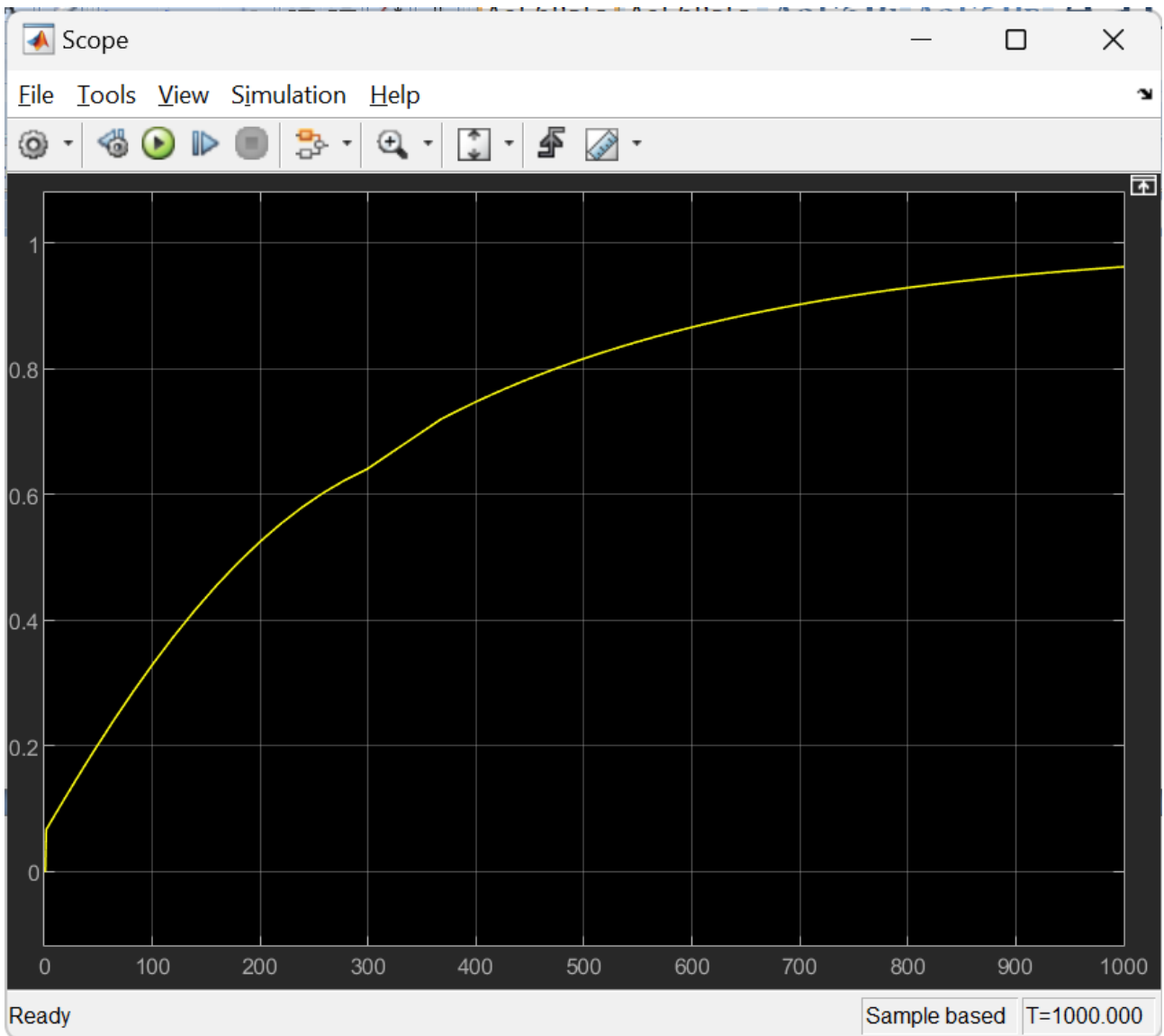


Рис.4.6. Зміна температури води в барабані котла при різних значеннях коефіцієнтах пропорційності ПД-регулятора

Із графіку видно, що диференціальний коефіцієнт змінює величину перерегулювання прямо пропорційно.

Давайте побудуємо нечіткий регулятор. Побудуємо нечіткий регулятор.

Його закон керування формується на основі таких трьох правил.

Розглянемо правило:

Якщо (рівень у нормі), (клапан не змінюється)

Якщо (рівень низький), (клапан швидко відкривається)

Якщо (рівень високий), (клапан швидко закривається)

Якщо рівень рідини "нормальний", клапан "не змінюється".

Якщо рівень рідини "низький", то клапан "без змін"; якщо рівень рідини "високий", то клапан відкривається "швидко"; якщо рівень рідини "високий", то клапан закривається "швидко".

Модель нечіткого контролера було створено за допомогою Fuzzy Logic Toolbox.

Нечіткі поняття, наведені вище, подано в моделі у вигляді лінгвістичних змінних, яким зіставлено функції належності.

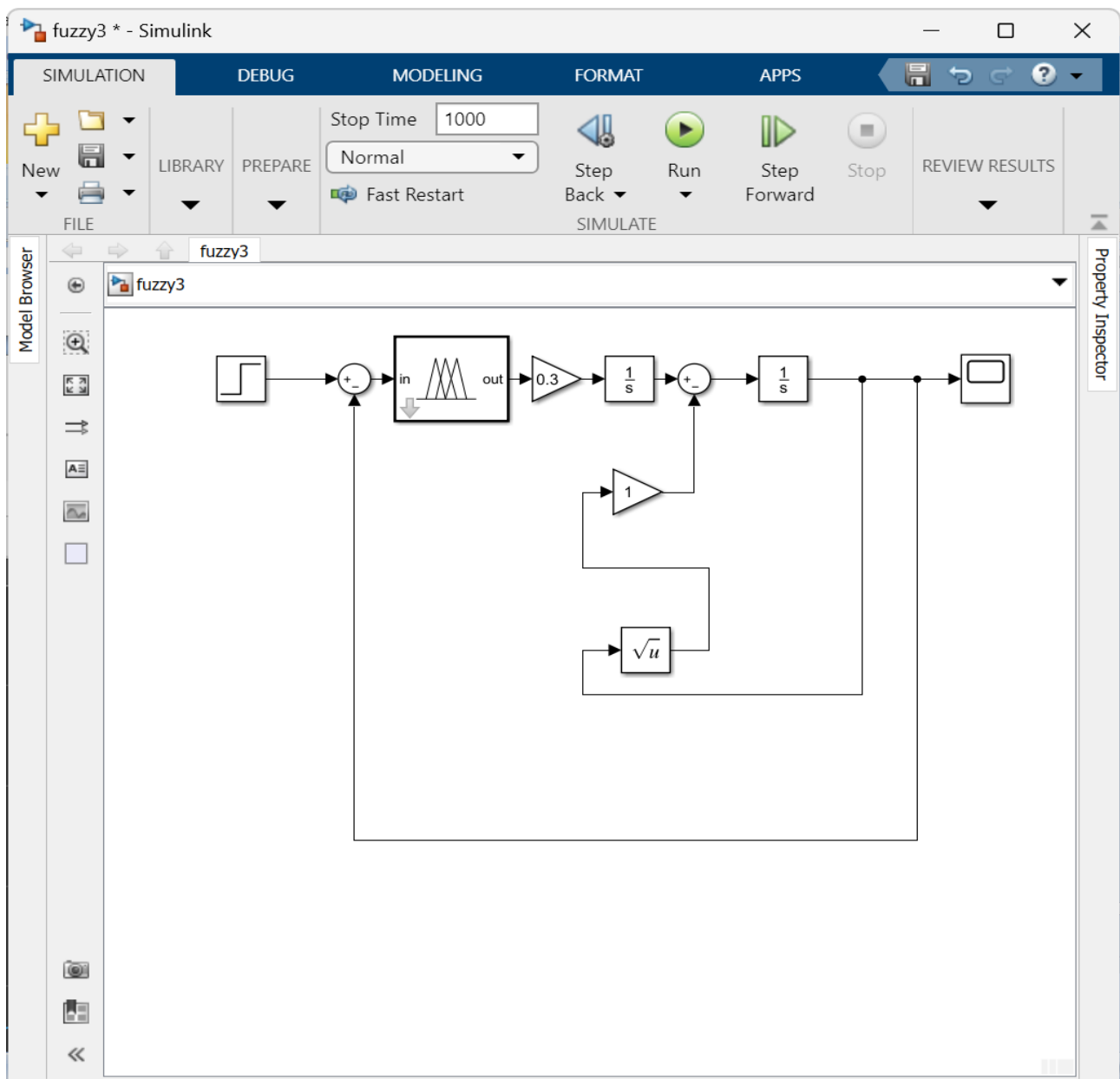


Рис. 4.7. Схема об'єкта з нечітким регулятором, три правила.

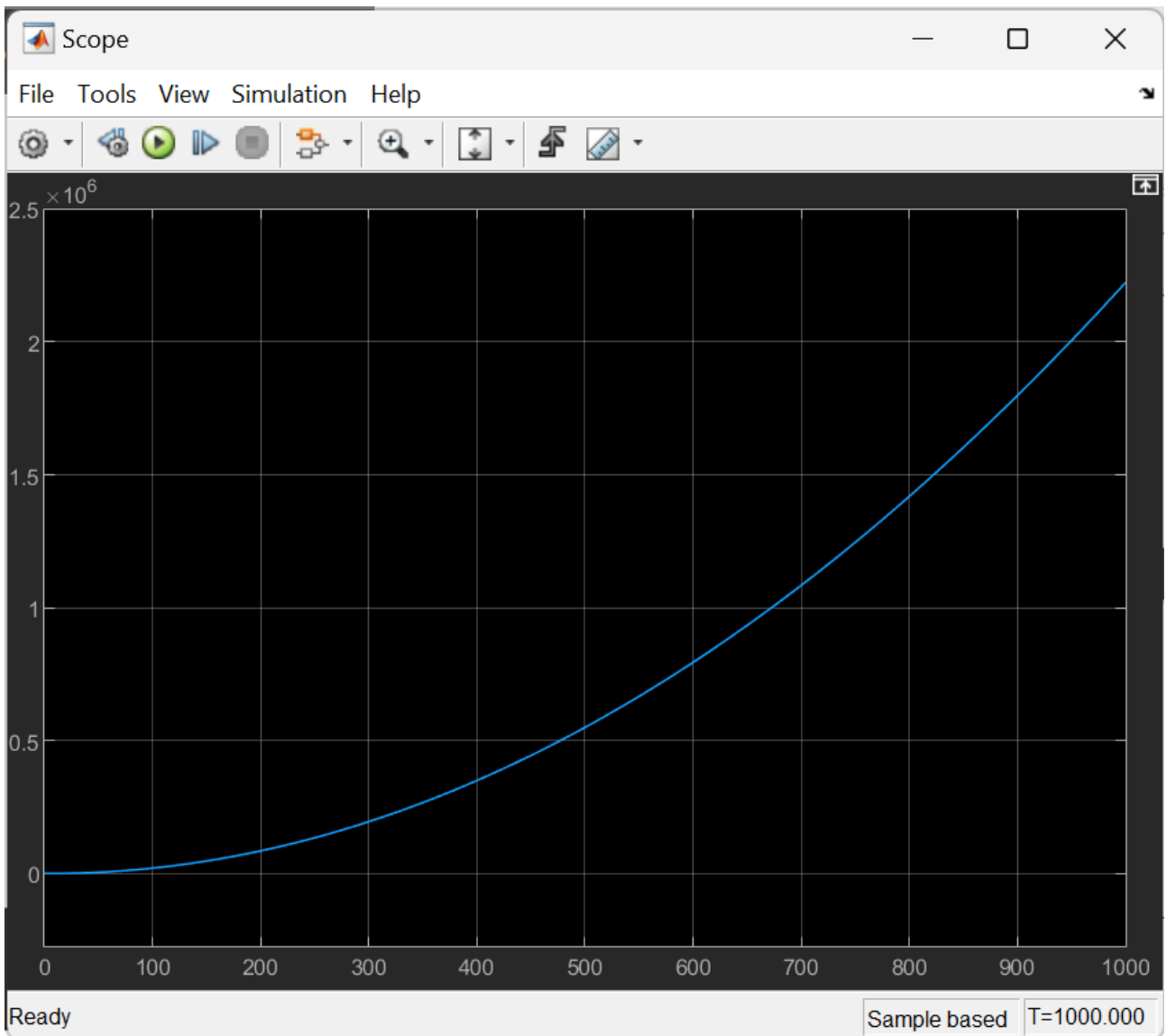


Рис 4.8. Зміна потужності системі з нечітким регулятором.

У цьому випадку було отримано неприйнятний за якістю перехідний процес. Вибір функції приналежності не дає змоги вибрати прийнятний процес, оскільки не враховується інформація про поведінку температури. Це враховують контролери з п'ятьма правилами.

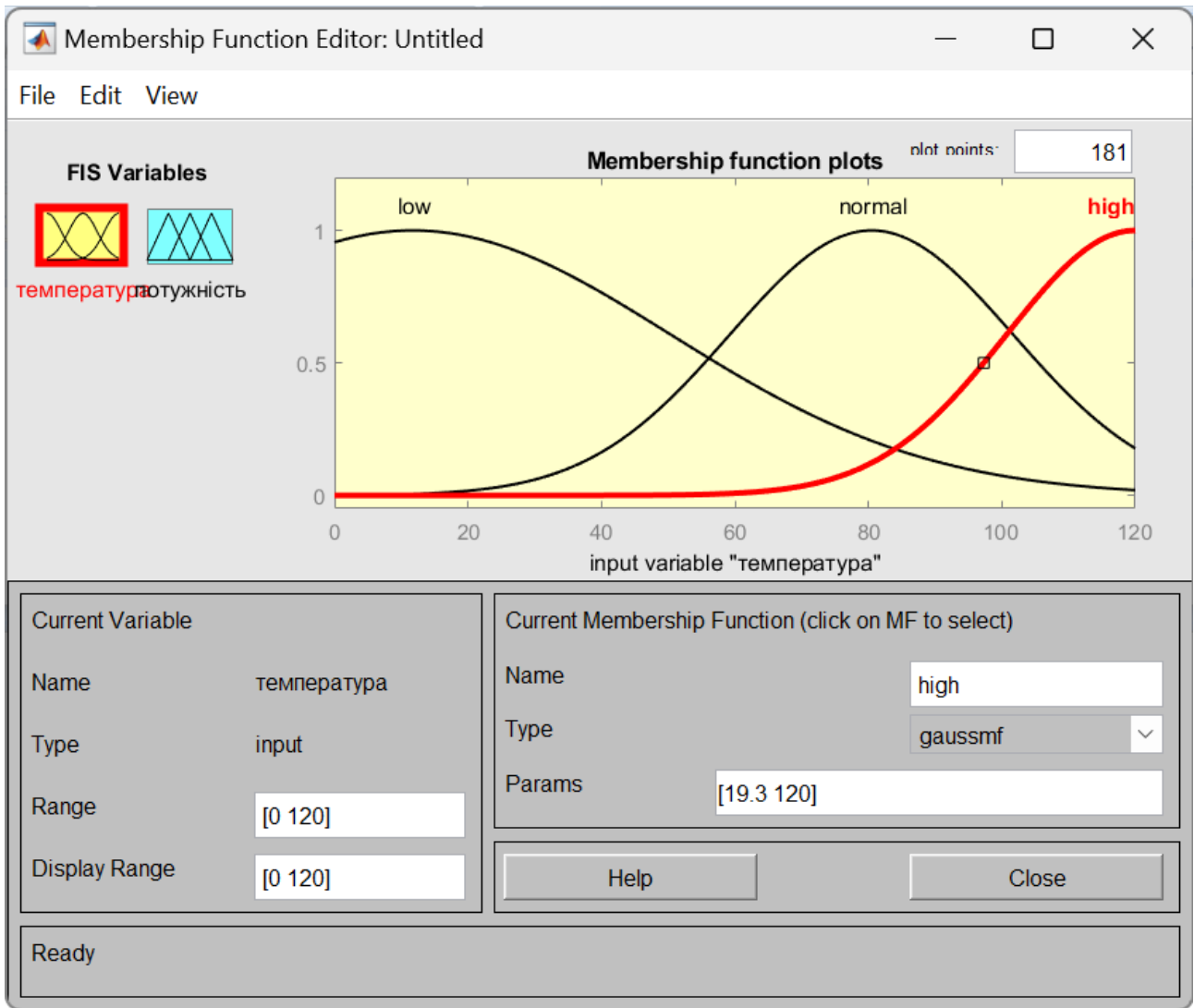


Рис 4.9. Функції належності для термів вхідної змінної температури

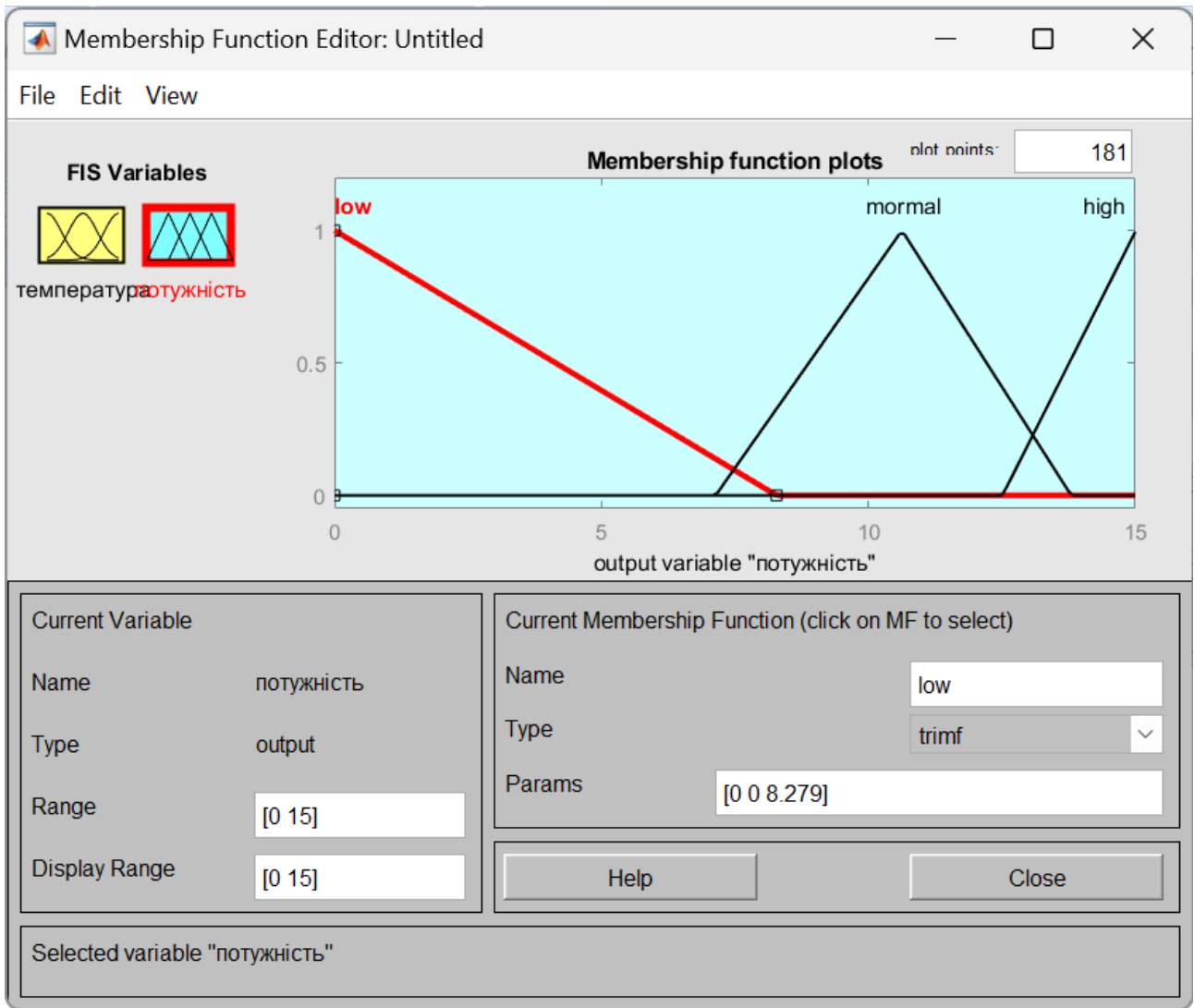


Рис 4.10. Функції належності для термів вихідної потужності.

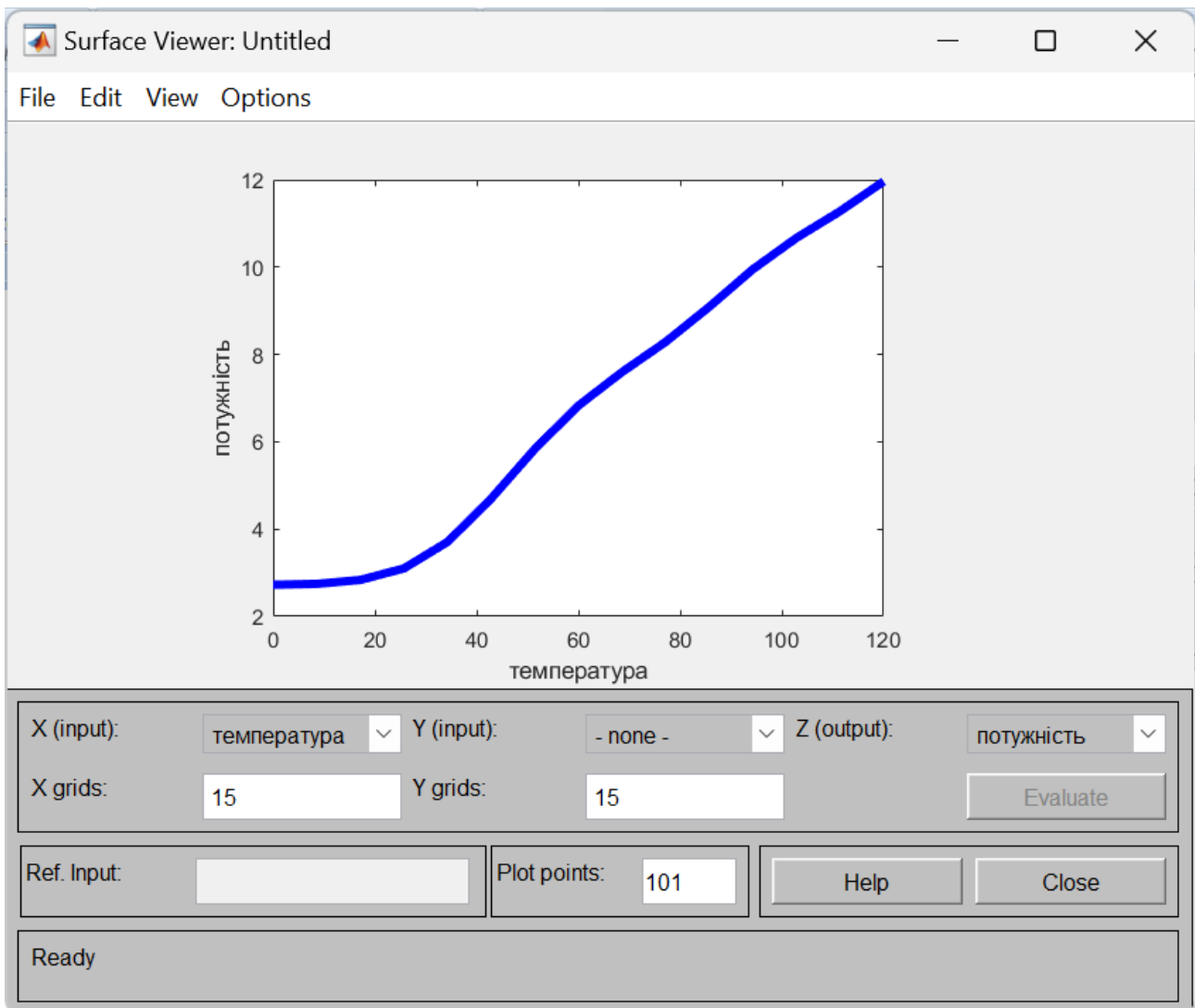


Рис 4.11 Поверхня відгуку для нечіткого регулятора, за трьох правил.

Оскільки правило управління контролером аналогічно правилу пропорційності, виходять ті самі залежності, що й вище.

Тепер побудуємо поліпшений нечіткий контролер на основі п'яти правил такого вигляду:

Якщо (рівень нормальний), то (клапан не змінюється)

Якщо (рівень низький), то (клапан швидко відкривається)

Якщо (рівень високий), то (клапан швидко закривається)

Якщо (рівень нормальний) і (швидкість позитивна), (клапан відкривається повільно)

Якщо (рівень нормальний) і (швидкість негативна), (клапан закривається повільно)

Тут ми додаємо ще два правила до трьох попередніх.

Додавши знак похідної, можна плавно відстежувати тенденцію зміни рівня рідини за "нормального" рівня.

Крім того, було вивчено модифіковану форму першого правила:

(рівень нормальний) і (швидкість нульова), (клапан без змін).

Ця модифікація трохи скоротила час моделювання, що видно на графіку нижче.

Нечіткий контролер має дві вхідні змінні: рівень рідини і температура.

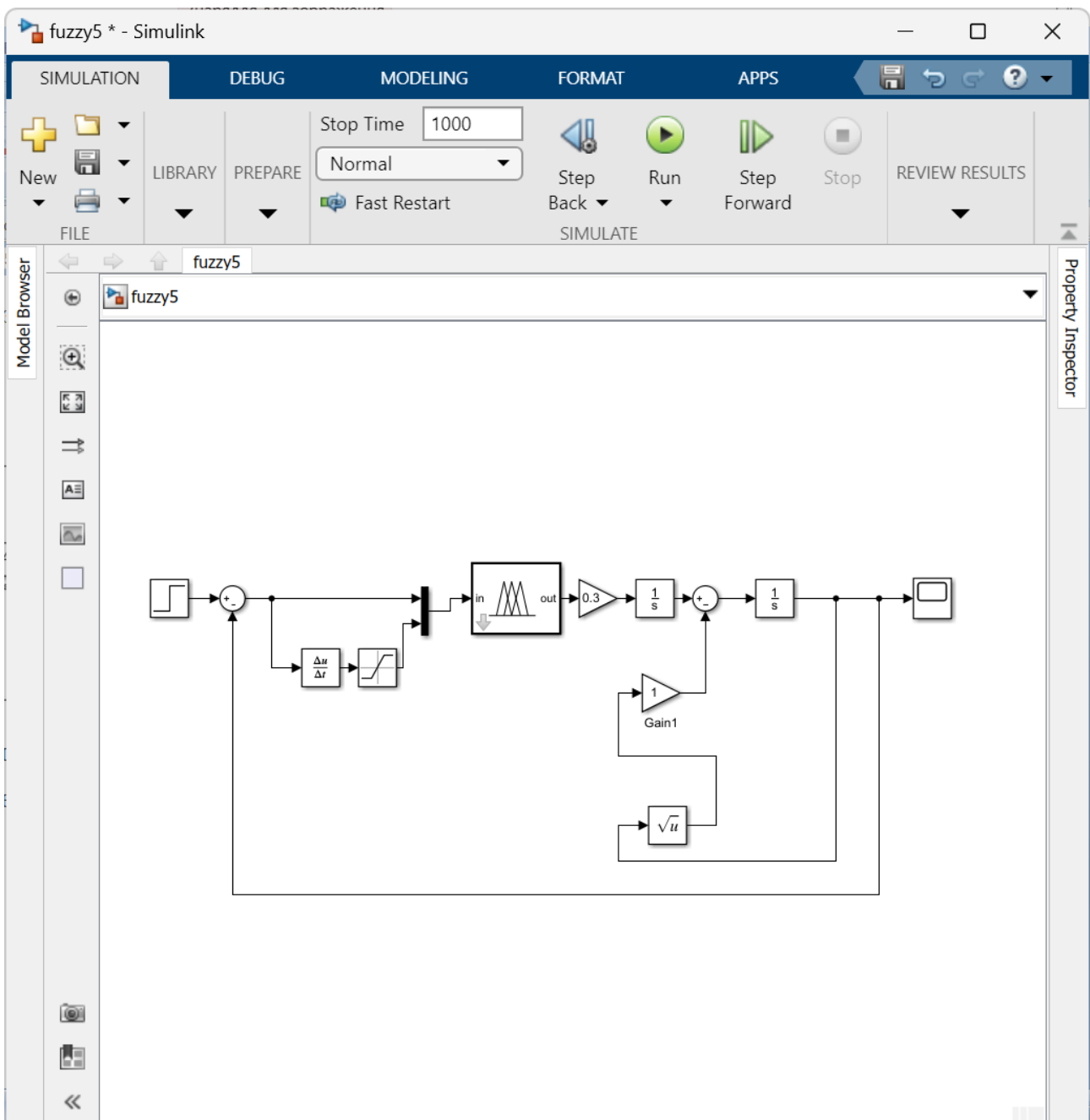


Рис 4.12 Схема об'єкта з нечітким регулятором, п'ять правил.

Під час моделювання було отримано наступні графіки зміни потужності.

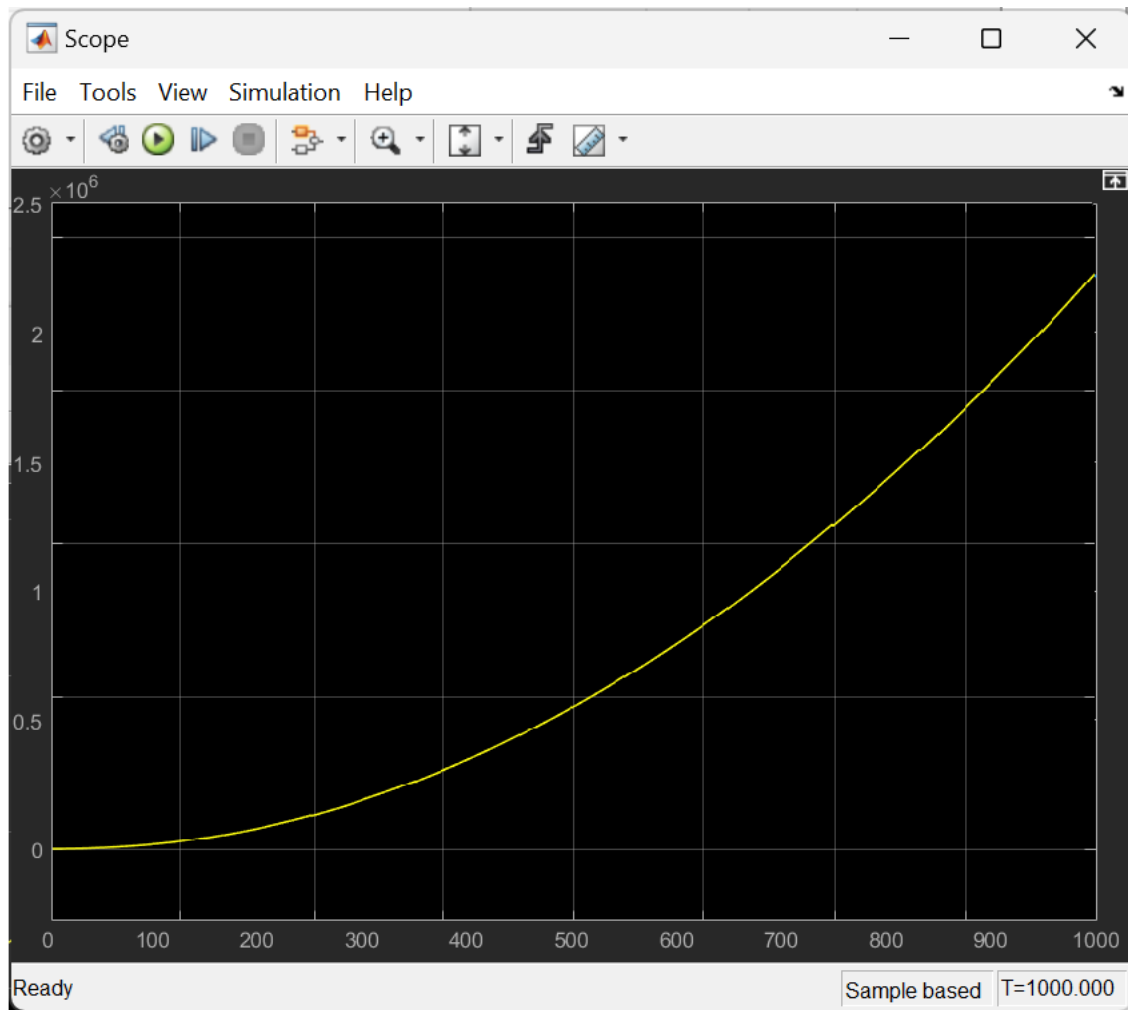


Рисунок 4.14 - Зміна температури в барабані котла в системі з нечітким регулятором (5 правил).

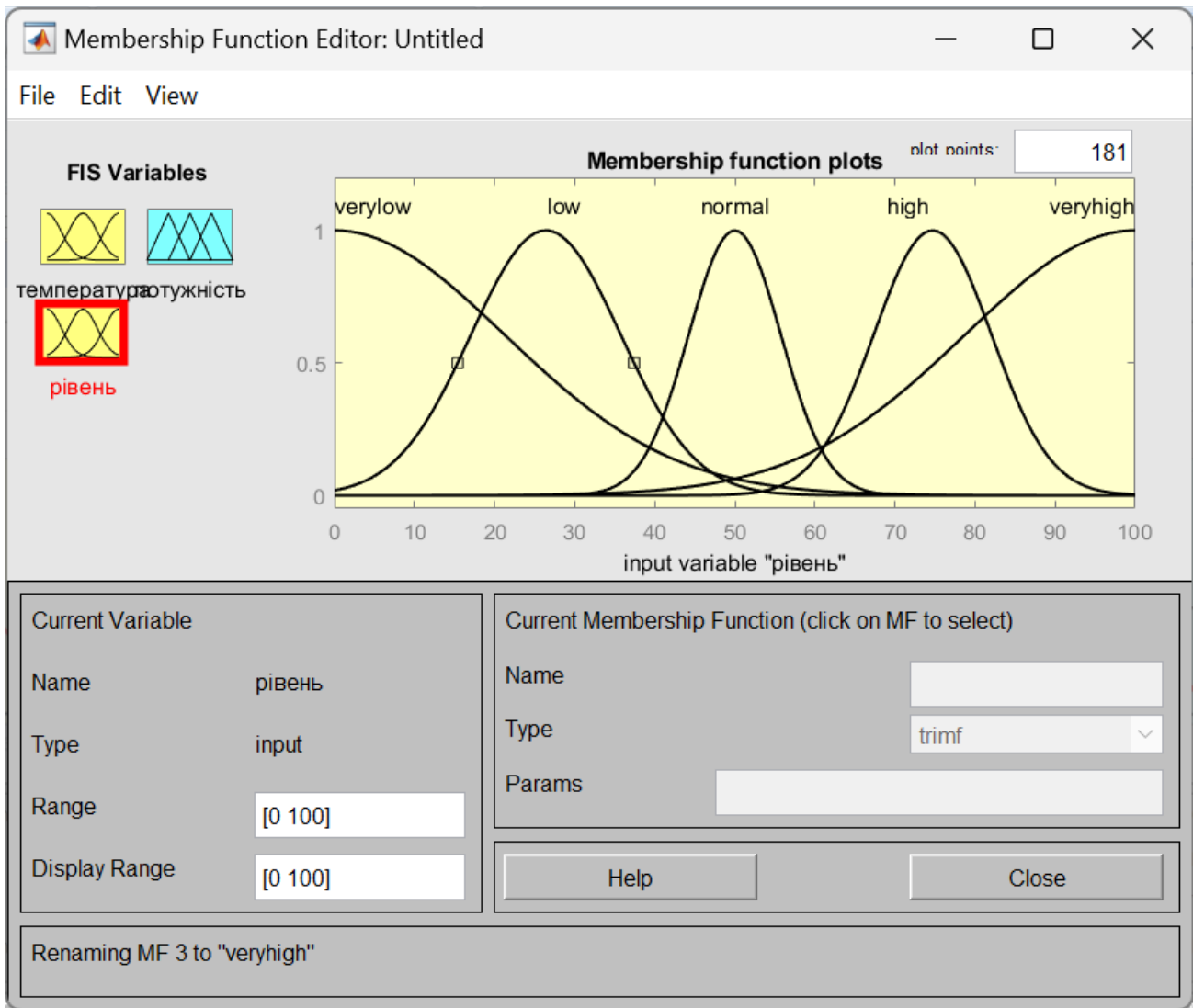


Рисунок 4.15 - Функції належності для термів вхідної змінної Рівень

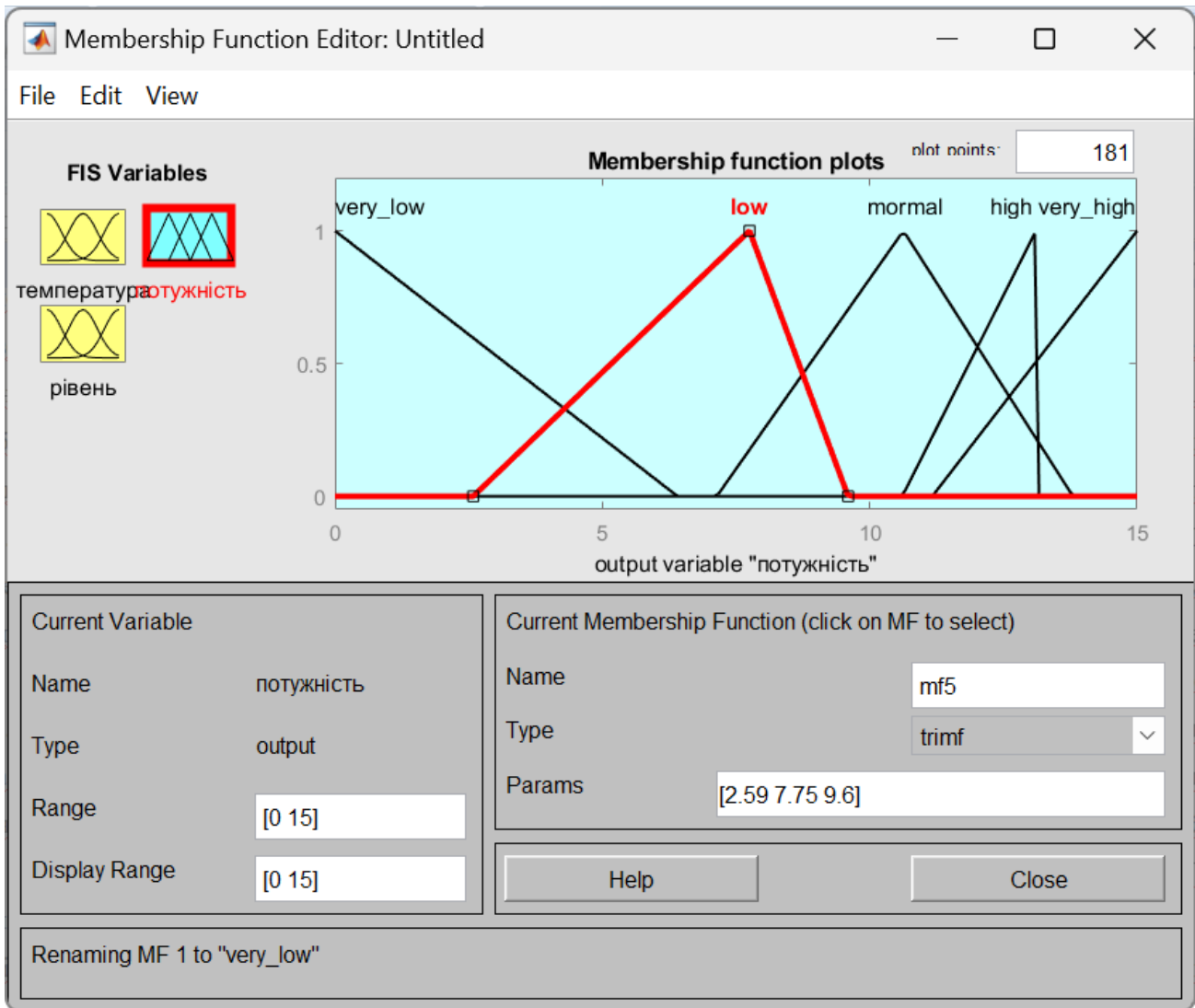


Рисунок 4.16 - Функції приналежності для термів вихідної змінної потужність.

З цього малюнка видно, що для вихідних змінних було додано дві функції належності, які відповідають меншим швидкостям відкриття і закриття клапана.

Функцію належності для вхідної змінної, температури, було значно змінено порівняно з контролером із трьома правилами.

Вибір типу і форми функції належності дав змогу домогтися як нормальних перехідних характеристик без великих перерегулювань, так і прийнятної точності..

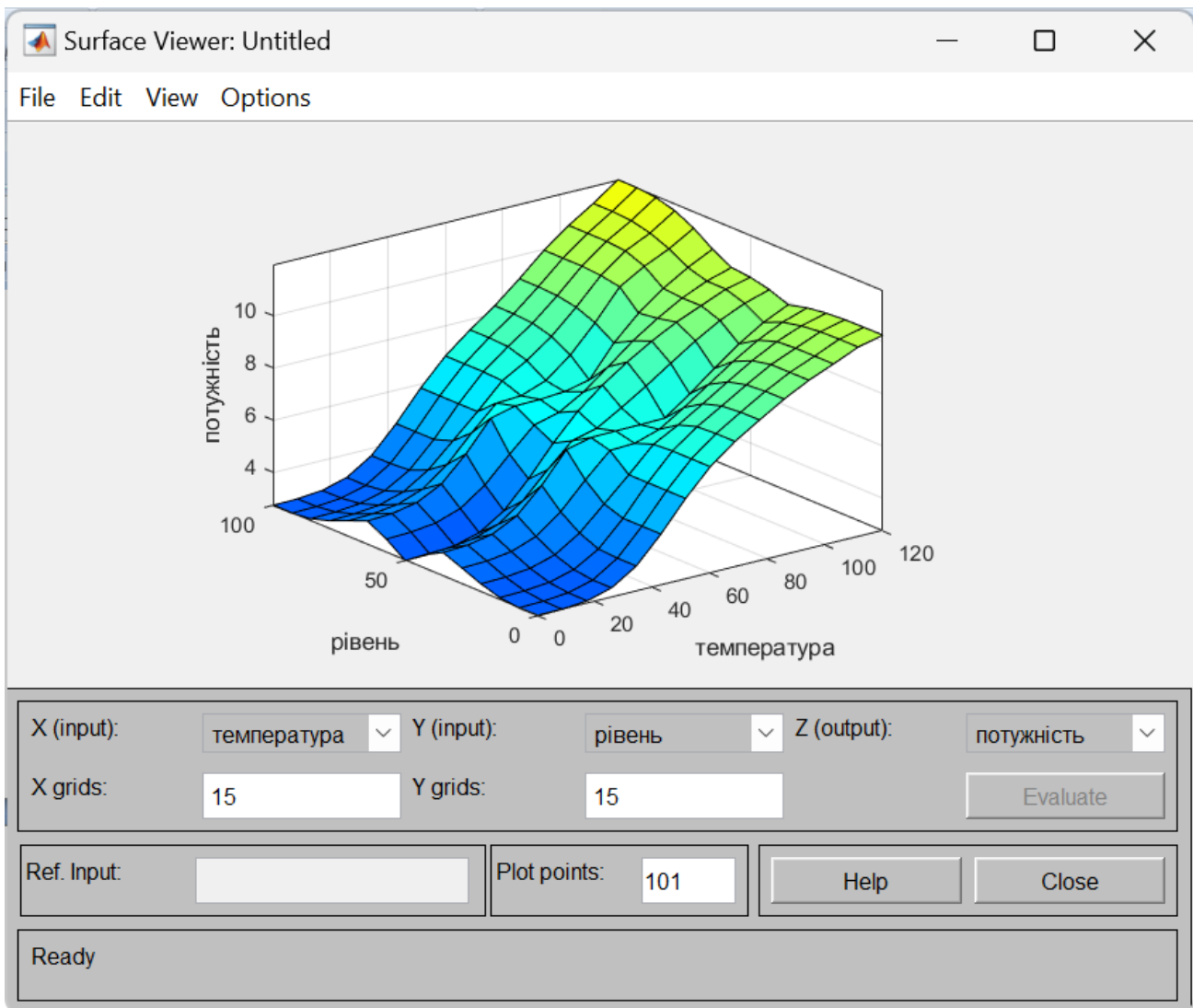


Рисунок 4.17 Поверхня відгуку для нечіткого регулятора (5 правил)

### 3.1.5. Розробка інтелектуальних підсистем на основі нейро-нечітких мереж (ННМ).

Нейро-нечіткі мережі дозволяють автоматизувати створення моделей знань. Іншими словами, база знань інтелектуальної системи може в подальшому виступати в якості бази знань для управління або для виявлення основних факторів впливу вхідних показників на вихідні показники (результати) технічного процесу. Вироблені правила, основними елементами яких є нечітка логіка та функції належності, є частиною інтелектуальної технології і можуть зручно описувати параметричний зв'язок між входами та виходами. Крім того, модель є адаптивною і аналітичні методи можуть бути використані для зміни

параметрів моделі (параметрів функції належності) з метою досягнення максимальної достовірності для досліджуваного процесу.

В якості ілюстрації такого підходу розглянемо наступний приклад:

$$Q = f(\text{Input1}, \text{Input2}, \text{Input3}, \text{Input4}, \text{Input5})$$

Де Q- температура пари на виході з котла.

Input1-ефективність навантаження.

Input2- витрата палива в м<sup>3</sup>/год

Input3- ККД

Input4-рівень води в барабані котла в %.

Input5- паропроодуктивність в т/год.

На основі статистичної вибірки експериментальних даних створюється нейро-нечітка мережева структура (рис. 4.18). Ця мережа має три входи та один вихід. Після навчання ШНМ на основі вбудованого методу та необхідної кількості циклів навчання отримуємо оптимізовану функцію належності, тобто параметри функції належності.

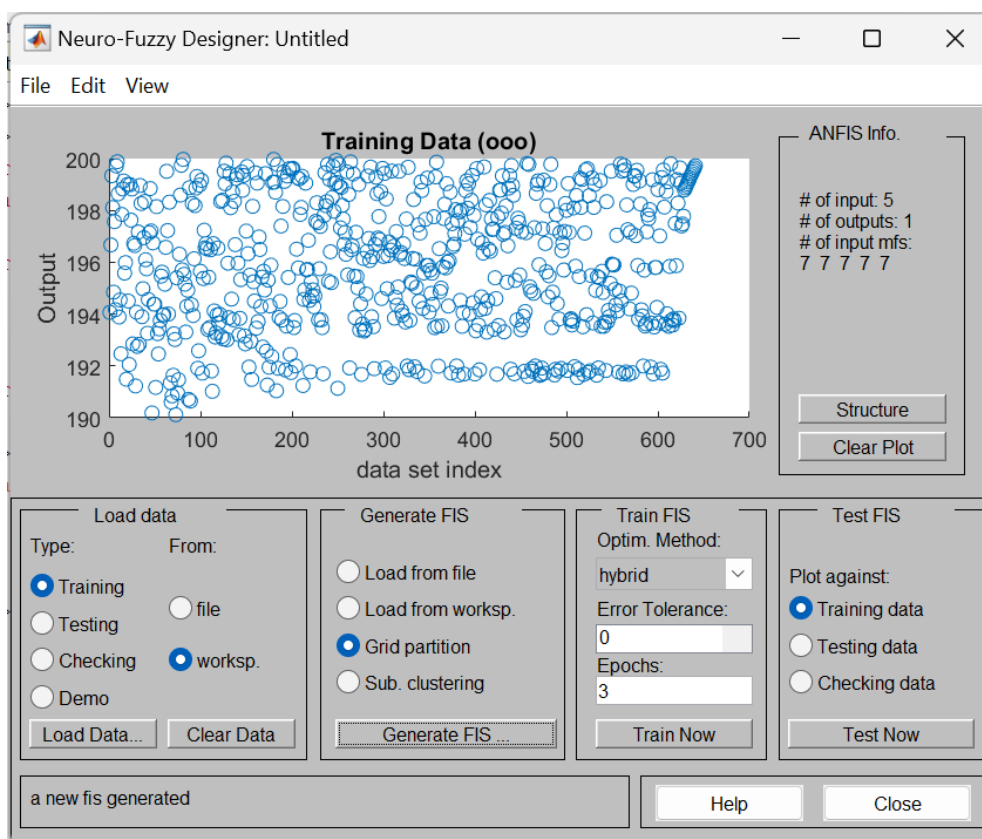


Рисунок 4.4.18: розкид даних до навчання нейро-нечіткої мережі.

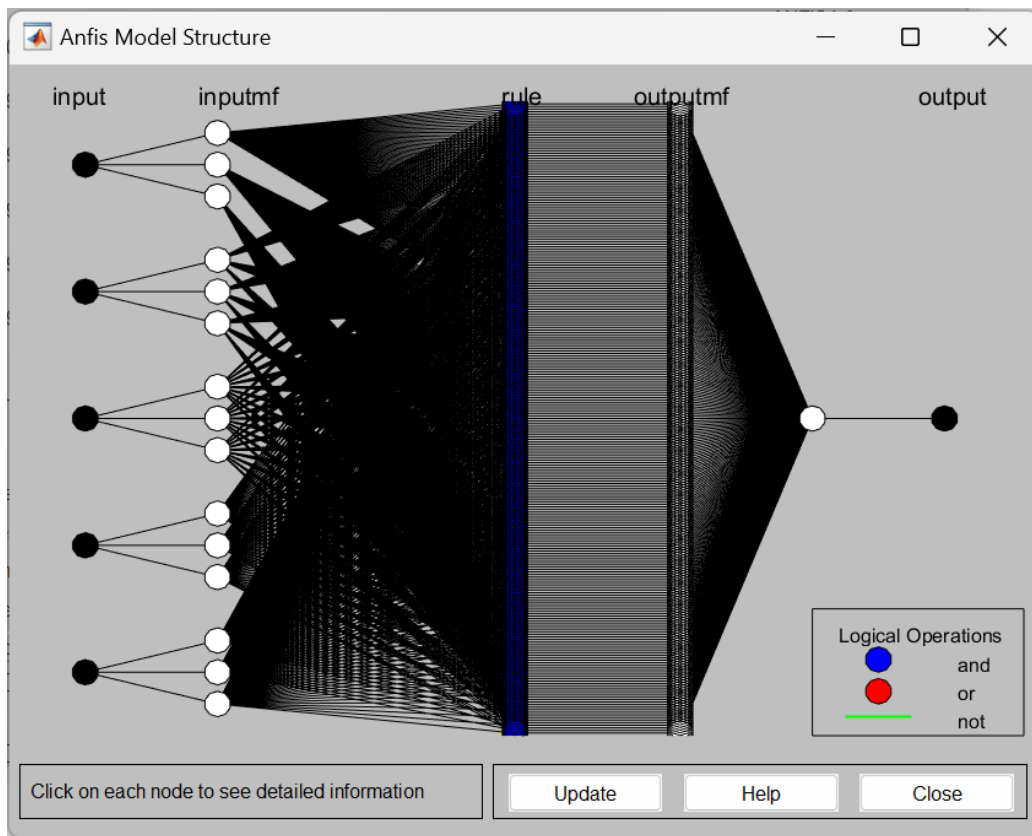


Рисунок 4.18: Структура нейро-нечіткої мережі.

На рисунку 4.19 показано параметричну схему створеної системи.

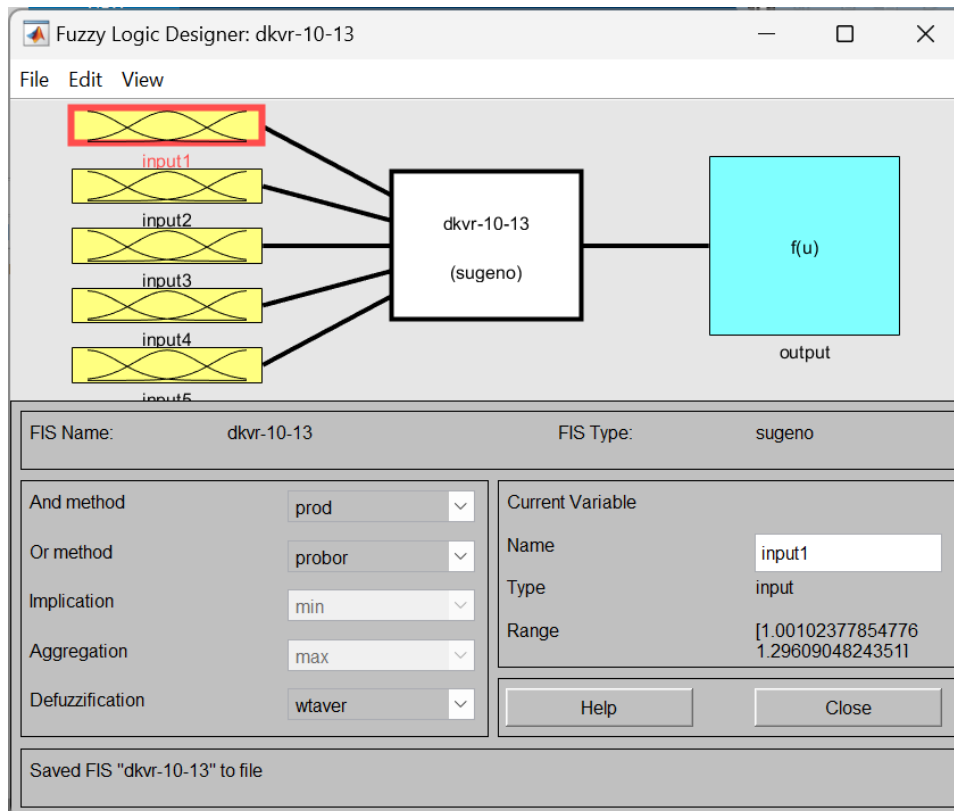


Рисунок 4.19. узагальнена архітектура нейро-нечіткої системи з підсистемами логічного висновку

На рисунку 4.20 показано зміну помилки навчання мережі.

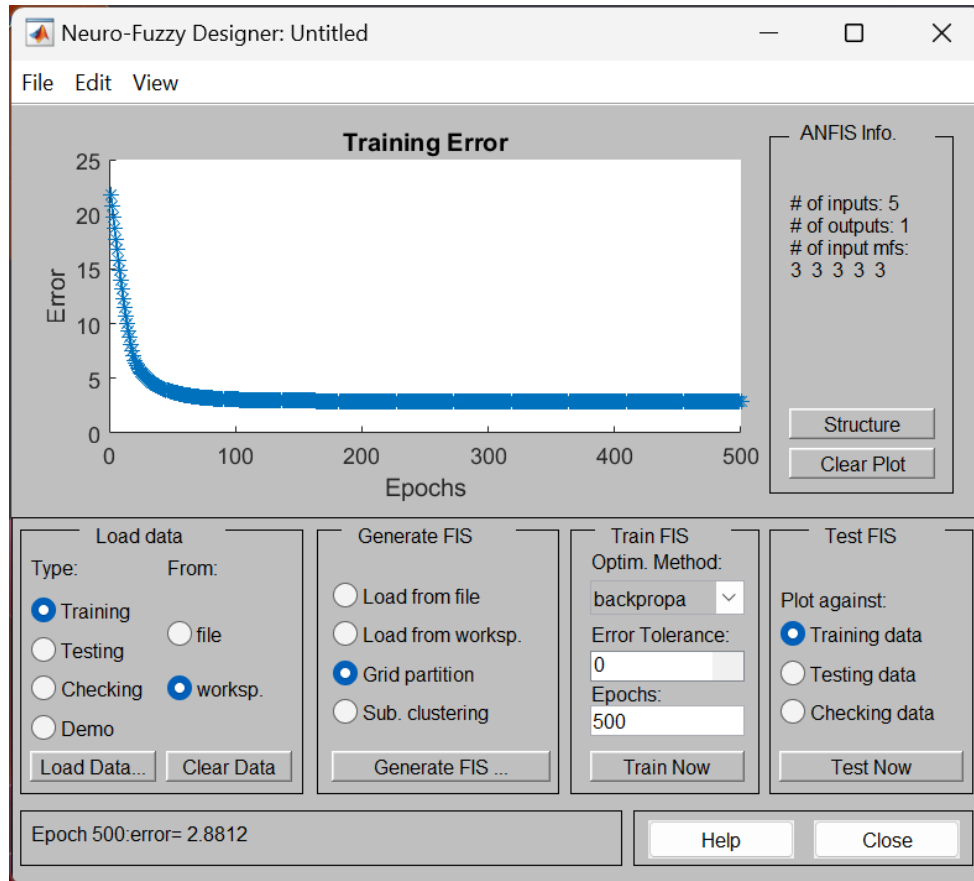


Рисунок 4.20: Зміна помилки навчання ННМ з тренувальними даними.

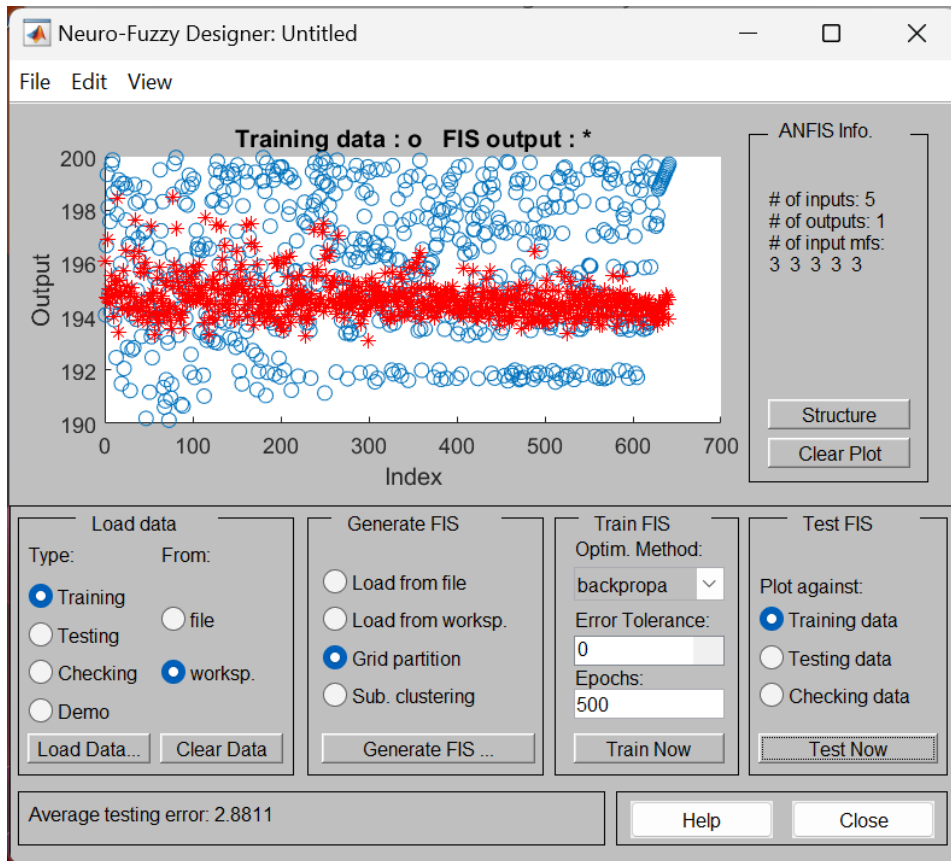


Рисунок 4.21.1 розкид даних після навчання нейро-нечіткої мережі на тренувальних даних.

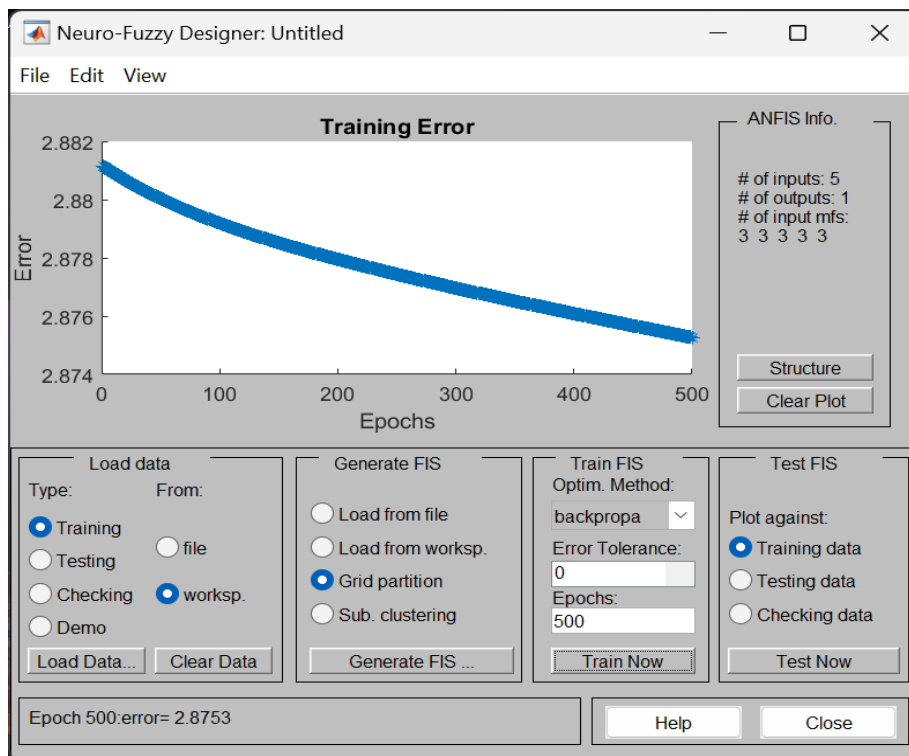


Рисунок 4.19.1 Зміна помилки навчання ННМ після навчання з тренувальними даними

Після навчання ННМ ми можемо графічно інтерпретувати відповіді бази знань. Наприклад, на рисунках 4.21 та 4.22 показано поверхню відгуку ННМ на послідовність виробництва спирту.

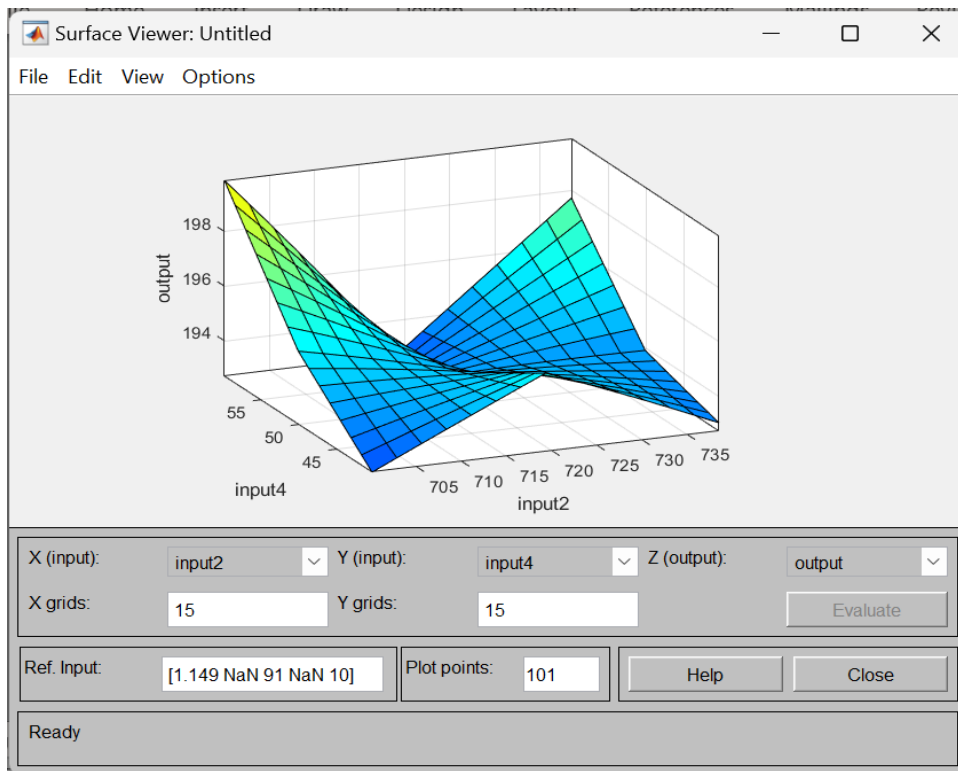


Рисунок 4.21: Залежність витрати палива до рівня води в барабані до температури пари на виході з котла.

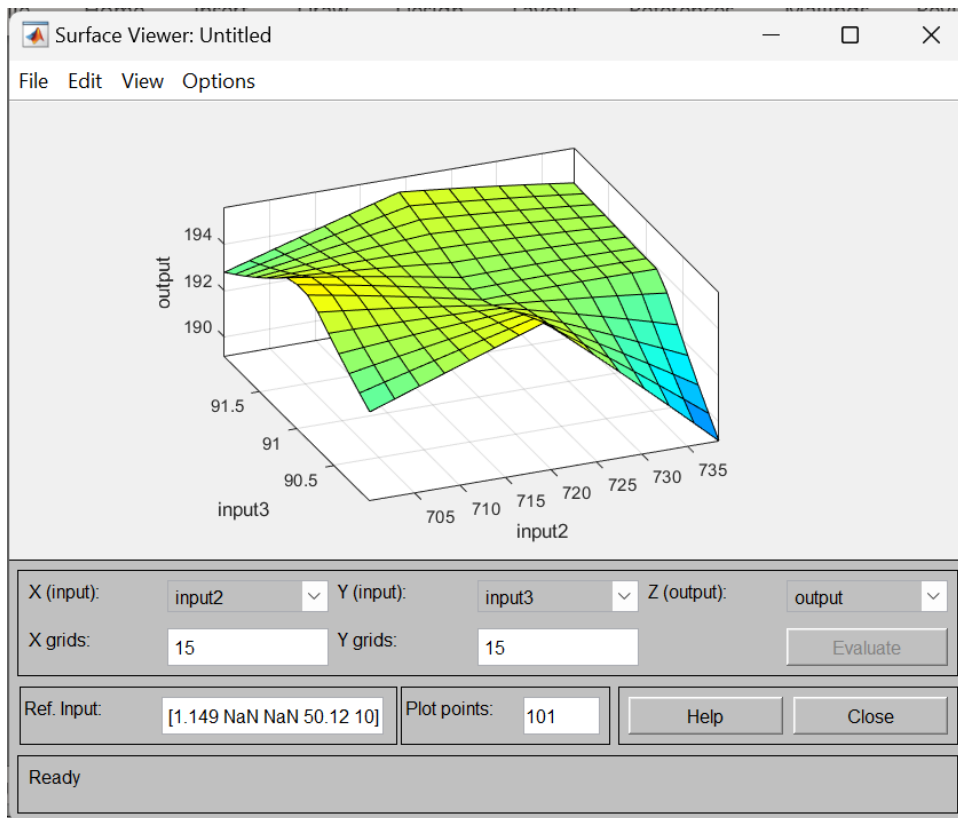


Рисунок 4.22: Залежність витрати палива до ккд на температуру пари на виході з котла.

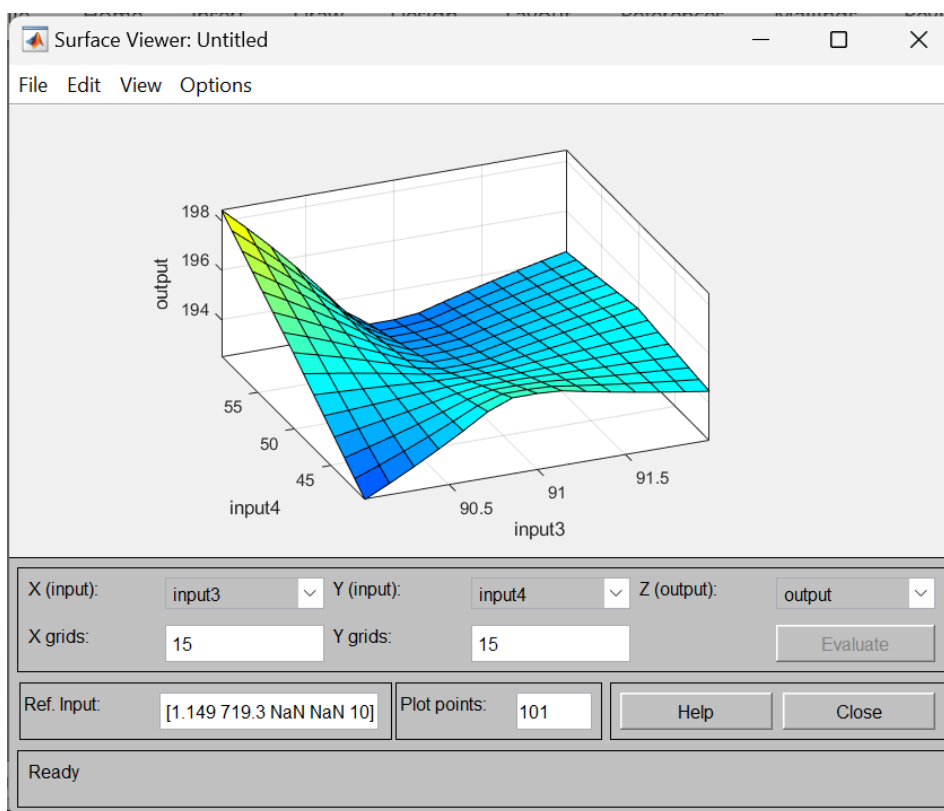


Рисунок 4.23: Залежність рівня води в барабані котла до ккд на температуру пари на виході.

## Висновки

В даній кваліфікаційній роботі було створено систему на базі нейро-нечіткого логічного висновку для управління паровим котлом ДКВр-10-13. Побудовано інтелектуальну систему керування паровим котлом ДКВр-10-13 на основі нейро-нечіткої логіки з підсистемою підтримки прийняття рішень. Під час аналізу та синтезу створено систему з трьома входами та одним виходом.

Функції належності показують імовірнісну оцінку експертної системи в певному діапазоні. Для вхідних і вихідних параметрів було використано «дуже\_низька», «низька», «норма», «висока», «дуже\_висока» назви для MFs.

В даній роботі було використано трикутну, трапецеїдну, та деякі інші функції належності на основі алгоритмів Мамдані та Суджено.

## Бібліографічний список

1. Бабіченко А.К. Промислові засоби автоматизації / А.К.Бабіченко. – Харків.: НТУ «ХП», 2001. – 470 с.
2. Дейнеко Л. В. Розвиток харчової промисловості України в умовах ринкових перетворень / Л. В. Дейнеко. – К. : Знання, 1999. – 331 с
3. Пупена О.М., Ельперін І.В., Луцька Н.М., Ладанюк А.П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах: Навчальний посібник. – К.:Вид.-во "Ліра-К", 2011. - 552 с.
4. Трегуб В. Г. Проектування, монтаж та експлуатація систем автоматизації: Навч. посібник – К.: НМК ВО, 1990. – 80 с.
5. Основи проектування систем автоматизації з елементами САПР: Метод. вказівки до практичних занять для студ. напряму 0925 "Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології" ден. та заоч. форм навч./ Уклад.: В.Г. Трегуб. – К.:НУХТ, 2008. – 67 с.
6. Основи проектування систем автоматизації з елементами САПР: Метод. вказівки до практичних занять для студ. напряму 0925 "Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології" ден. та заоч. форм навч./ Уклад.: В.Г. Трегуб. – К.:НУХТ, 2008. – 67 с.
7. Проектування комп'ютерно-інтегрованих систем: Метод. вказівки до викон. курс. проекту для студ. спец. 7.05020202 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва» ден. та заоч. форм навч./ Уклад.: О.М.Пупена К.: НУХТ, 2011. 45 с.
8. Людино-машинні інтерфейси: Метод. вказівки до виконан. курсової роботи для студ. напряму 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» ден. та заоч. форм навч. / Уклад.: В.М. Кушков. – К.: НУХТ, 2010. – 15 с.

9. Контролери та їх програмне забезпечення: Метод. вказівки до виконання курс. проекту для студ. спец. 6.092500 “Автоматизоване управління технологічними процесами” і “Комп’ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва” ден. та заоч. форм навчання /Уклад.: І.В. Ельперін, О.М. Пупена, М.Д. Місюра, С.М. Швед - К.: НУХТ, 2008.- 36 с.
10. Державний нормативний акт про охорону праці ДНАОП 1.8.10. - 1.13 – 97. “Правила безпеки при виробництві солоду, пива та безалкогольних напоїв”. К.: 1997.
11. Луцька Н.М. Сучасні технології проектування інтелектуальних систем керування [Електронний ресурс] конспект лекцій для здобувачів освітнього ступеня «Магістр» спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» освітньо-професійної програми «Інтелектуальні комп’ютерні системи керування» денної та заочної форм навчання / Н.М. Луцька, А.П. Ладанюк К.: НУХТ, 2019. – 117 с.
12. Методичні рекомендації до виконання випускної кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня «магістр» спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Комп’ютерні технології та програмування в автоматизованих системах управління» денної та заочної форм навчання / Уклад.: О.М.Пупена, І.В.Ельперін, В.Г. Трегуб.[Електронний ресурс]. – К. : НУХТ, 2019. – 37 с
13. Методичні рекомендації до виконання магістерської роботи зі спеціальностей 8.05020201 «Автоматизоване управління технологічними процесами» 8.05020202 «Комп’ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва» / Уклад.: А.П. Ладанюк, І.В. Ельперін, В.Д. Кишенько, В.М.

Сідлецький. – К.: НУХТ, 2011. – 15 с.

14. Проектування систем автоматизації галузі [Електронний ресурс]: Метод. рекомендації до викон. курс. проекту для студ. освітнього ступеня «магістр» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціалізації «Інтелектуальні комп'ютерні системи керування» ден. форм навч. / уклад.: Трегуб В.Г., Луцька Н.М., А.П. Ладанюк. – К.: НУХТ, 2017. – 48 с.
15. Про КРІ та ОЕЕ. Загальні розрахунки згідно ISO 22400-2. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://www.slideshare.net/pupenasan/kpi-oee>.
16. Пупена О.М. [Електронний ресурс]: Автоматизовані системи управління виробництвом (MES-рівень): курс лекцій для студ. освіт. ст. "магістр" спец. 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" спеціалізації "Інтегровані автоматизовані системи управління " денної та заочної форм навчання / О.М. Пупена, Р.М. Міркевич. – К.: НУХТ, 2016. – 135 с.
17. Трегуб В.Г. Автоматизація об'єктів періодичної дії: [підручник] / В.Г. Трегуб. – К.: Ліра-К, 2016. – 136 с.
18. A Practical Guide to SysML. The Systems Modeling Language. 2-d ed/ /Sanford Friedenthal, Alan Moore, Rick Steiner, Elsevier Inc. 2012.
19. S. Bhagwanrao, S. Madhukar, J. Lengare. Modeling and Optimizing Boiler Design using Neural Network and Firefly Algorithm. De Gruyter. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1515/jisys-2016-0113>

20. Morato M. M., Normey-Rico J. E., Sename O. Model predictive control design for linear parameter varying systems: A survey. *Annual Reviews in Control*. 2020. vol. 49, pp. 64-80. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2020.04.016.
21. Keadtipod P., Banjerdpongchai D. Design of Supervisory Cascade Model Predictive Control for Industrial Boilers: Proceedings of 2016 International Automatic Control Conference (CACCS), Taichung, Taiwan, 09 November – 11 November, 2016. P. 122–125.
22. Riccardo Satta, Stefano Cavallari, Eraldo Pomponi, Daniele Grasselli, Davide Picheo, Carlo Annis. A dissimilarity-based approach to predictive maintenance with application to HVAC systems. *CGnal Research Papers Series*. 2017. C.20.
23. Li-Hua Li, Chang-Yu Lai, Fu-Hsiang Kuo and Pei-Yu Chai. Predictive Maintenance of Vertical Lift Storage Motor Based on Machine Learning. *International Journal of Applied Science and Engineering* .2019. №13. C.109-118.
24. Gennaro Cardone. An overview on hypersonic flow research with infrared thermography. Présentations QIRT 2006-B URL: <http://dx.doi.org/10.21611/qirt.2006.b>
25. Using Node-RED to build the internet of things. Workshop – IBM, 2019 – 29 с.
26. Ravi Kishore Kodali, Arshiya Anjum. "IoT based home automation using node-red." 2018 Second International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT). Bangalore, India 16-18 Aug. 2018 IEEE 2019
27. Milica Lekić; Gordana Gardašević "IoT sensor integration to Node-RED platform." 2018 17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH). East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina 21-23 March 2018 IEEE, 2018.
28. Real-Time Boiler Control Optimization with Machine Learning [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.groundai.com/project/real-time-boiler-control-optimization-with-machine-learning/1>.

29. L. I. Díez, C. Cortés, and A. Campo. Modelling of pulverized coal boilers: review and validation of on-line simulation techniques. *Applied Thermal Engineering*, 25(10):1516–1533, 2005.
30. N. Gould and P. L. Toint. Preprocessing for quadratic programming. *Mathematical Programming*, 100(1):95–132, 2004.
31. A. Kusiak and Z. Song. Combustion efficiency optimization and virtual testing: A data-mining approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2(3):176–184, 2006.
32. Swain A. D., Guttman H.E. (1983, August) Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant application (Sandia National Laboratories, NUREG/CR-1278) Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
33. J. Christensen, D. Meister, P. Fowley and others (1987) Handbook of Human Factors. In 6 vols. T.1. Ergonomics is a comprehensive scientific and technical discipline. University of Birmingham, United Kingdom.
34. Dounis A.I. and Caraiscos C. Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 13(7), 2009. – 1246-1261 pp.
35. Barata F.A., Igreja J.M., Neves-Silva R. Model predictive control for thermal house comfort with limited energy resources. In: 10th Portuguese Conference on Automatic Control, Funchal, Portugal, 2012. – 146-151 pp.
36. Fatemeh A., Emma F., Maria K. Synchronization in Digital Twins for Industrial Control Systems. *Electrical Engineering and Systems Science*, 5 Jun 2020. [URI]: <https://arxiv.org/pdf/2006.03447.pdf>.
37. Derek Lowe "Cold Chain (And Colder Chain) Distribution". *Science Translational Medicine*. Update date: 31 August 2020. [blogs.sciencemag.org](https://blogs.sciencemag.org) – Режим

доступу до ресурсу: <https://blogs.sciencemag.org/pipeline/archives/2020/08/31/cold-chain-and-colder-chain-distribution> (retrieved 03 March 2021).

38. Meyers, T. "RFID Shelf-life Monitoring Helps Resolve Disputes". RFID Journal. Update date: June 2007. [www.rfidjournal.com](http://www.rfidjournal.com) – Режим доступу до ресурсу: <https://www.rfidjournal.com/iot-news-roundup-128> (retrieved 27 February 2021).

39. Yi-hua Chen "Intelligent algorithms for cold chain logistics distribution optimization based on big data cloud computing analysis". Journal of Cloud Computing. Archived from the original on July 2020. [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net) – Режим доступу до ресурсу: [https://www.researchgate.net/publication/342900285\\_Intelligent\\_algorithms\\_for\\_cold\\_chain\\_logistics\\_distribution\\_optimization\\_based\\_on\\_big\\_data\\_cloud\\_computing\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/342900285_Intelligent_algorithms_for_cold_chain_logistics_distribution_optimization_based_on_big_data_cloud_computing_analysis) (retrieved 9 March 2021).

40. EcoStruxure™ Augmented Operator Advisor [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://www.se.com/ww/en/product-range-presentation/64507-ecostruxure%E2%84%A2-augmented-operator-advisor/#tabs-top>

41. Onsite Augmented Reality Service Platform [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://librestream.com/products/onsight-connect/>

42. М. Паоланті, Л. Ромео, А. Фелікетті, А. Манчіні, Е. Фронтоні та Дж. Лончарський, "Підхід машинного навчання для інтелектуального технічного обслуговування в промисловості 4.0", у 2018 році 14-а Міжнародна конференція IEEE / ASME з мехатронних та вбудованих систем та додатків (MESA), липень 2018, с. 1–6.

43. В. Гурузамі, С. Каннан та К. Нандхіні, "Переваги та обмеження системи обробки великих даних у режимі реального часу", Міжнародний журнал комп'ютерних наук та техніки, вип. 5, № 12, с. 305–312, грудень 2017.

44. М. Антунес, Дж. П. Баррака, Д. Гомес, П. Олівейра та Р. Л. Агіар, "Розумна хмара речей: еволюціонувала платформа IoT для провайдерів послуг зв'язку",

Journal of Ambient Wireless Communications and Smart Environment (AMBIENTCOM), вип. 1, №1, с. 1–24, 2016.

45. І.Т.Стрепко,О.В.Тимченко, Б.В.Дурняк. Проектування систем керування на однокристальних мікро-ЕОМ. “Фенікс”,Київ,1998.-285с

46. В. М. Локазюк. Мікропроцесори та мікроЕОМ у виробничих системах. Видавн.центр “Академік”, Київ 2002. -234с.

47. Aidan O'Dwyer "Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules" Imperial College Press, London,2nd Edition ,2006 -- p.80.

48. Степанов, Д. В. Котельні установки промислових підприємств : навчальний посібник / Д. В. Степанов, Є. С. Корженко, Л. А. Боднар. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 120 с.

49. Ткаченко, С. Й. Котельні установки : навчальний посібник / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов, Л. А. Боднар. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 185 с.

50. Апостолюк В. О. Інтелектуальні системи керування: конспект лекцій [Текст] / В. О. Апостолюк, О. С. Апостолюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 88 с. –  
Бібліогр.: с. 84 –85. – 50 пр.

51. Conway D., Myles J.W., Machine Learning for Hackers. US, O’Reilly Media Inc., 2012. 324 p.

52. Monitoring Service #[Електроннийресурс] //Режим доступу:  
<https://iot.app.initialstate.com/>

53. Raspberry Pi #[Електроннийресурс] //Режим доступу:  
[https://uk.wikipedia.org/wiki/Raspberry\\_Pi](https://uk.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi)

54. Overfitting vs Underfitting in Neural Network #[Електроннийресурс] //Режим доступу: <https://towardsdatascience.com/overfitting-vs-underfitting->

ddc80c2fc00d

55. Preventing Deep Neural Network from Overfitting #[Електроннийресурс]  
//Режим доступу: <https://towardsdatascience.com/preventing-deep-neural-network-from-overfitting-953458db800a>
56. Ященко К.І., студ.; Федюн Р.В., доц., к.т.н., Автоматичне керування міською котельною з водогрійними котлами. ТИПА КВГ, ДНТУ, м. Донецьк
57. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules (2nd Edition)/Aidan O'Dwyer; Dublin Institute of Technology, Ireland, 2006 – 545с.;
58. А.О. Бобух. Автоматизовані системи керування технологічними процесами: Навч. посібник. – Харків: ХНАМГ, 2006. - 185 с.
59. Бобух А.О. Автоматзація інженерних систем: Навч. посібник. - Харків: ХНАМГ, 2005. - 212с.
60. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. -2-ге вид., перероб. і доп. К.: Либідь, 2007. 656 с.
61. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» у випускних роботах ОКР «бакалавр» усіх форм навчання / Упоряд.: Б.В.Дзюндзюк, В.А.Айвазов, Т.Є.Стищенко. – Харків: ХНУРЕ, 2012. – 28 с.
62. I. Skog and P. Handel , “Calibration of a MEMS Inertial Measurement Unit”, XVII IMEKO WORLD CONGRESS, Brazil, Sept. 2006.
63. Hou H. Inertial sensors errors modeling using Allan variance / H. Hou, N. El-Sheimy. ION GPS/GNSS 2003 Proceeding. Portland, 2003. P. 28602867.
64. Kordić V. (ed.) Kalman Filter. InTech, 2010. — 400 p.

65. Freitag, K.P., 2004, "Two–Axis Force Feedback Deflection Compensation of Miniature Ball End Mills," Mechanical Engineering Department, North Carolina State University.
66. Ghosh, N., Ravi, Y.B., Patra, A., Mukhopadhyay, S., Paul, S., Mohanty, A.R., and Chattopadhyay, A.B., 2007, "Estimation of Tool Wear during CNC Milling Using Neural Network Based Sensor Fusion," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, pp. 466–479.
67. Liang, M., Yeap, T., Rahmati, S., and Han, Z., 2002, "Fuzzy Control of Spindle Power in End Milling Processes," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, pp. 1487–1496.
68. Liou, F.W., Slattery, K., Kinsella, M., Newkirk, J., Chou, J–N., and Landers, R.G., 2007, "Applications of a Hybrid Manufacturing Process for Fabrication of Metallic Structures," Journal of Rapid Prototyping, Vol. 13, No. 4, pp. 236–244.
69. Mishra, R.S. and Ma, Z.Y., 2005, "Friction Stir Welding and Processing," Materials Science and Engineering: R, Vol. 50, No. 1–2, pp. 1–78.
70. Hou H. Inertial sensors errors modeling using Allan variance / H. Hou, N. EI-Sheimy. ION GPS/GNSS 2003 Proceeding. Portland, 2003. P. 28602867.
71. R. E. Kalman A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems/ Research Institute for Advanced Study/ [Электронный ресурс] Балтимор – 1960.