

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»

«До захисту допущено»

Декан факультету

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Андрій ФОРСЮК  
(підпис) (прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ Ярослав СМІТЮХ  
(підпис) (прізвище та ініціали)

«\_\_» лютого 2023 р.

«\_\_» лютого 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

з спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
(шифр та назва напряму підготовки (спеціальності))

освітньо-

професійної програми: «Інтелектуалні комп'ютерні системи керування»

на тему: Інтелектуальне керування технологічними процесами  
брагоректифікації

Виконав: здобувач 2 курсу, групи AI-2-1M

\_\_\_\_\_ Скрипник Дмитро Іванович  
(підпис) (прізвище, ім'я та по батькові повністю)

Керівник Кишенько Василь Дмитрович

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультанти

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент

Мошенський А.О.

(прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що в цій кваліфікаційній  
роботі немає запозичень із праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) Автоматизації і комп'ютерних систем

Кафедра Інтегрованих автоматизованих систем управління

Освітній ступінь Магістр

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

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

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри Ярослав СМІТЮХ**

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ року

## **З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА**

Скрипник Дмитро Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Інтелектуальне керування технологічними процесами брагоректифікації

керівник роботи: професор, кандидат технічних наук Кишенько Василь Дмитрович

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «16» листопада 2022р. №820-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 14 лютого 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Апаратурно-технологічна схема брагоректифікаційного відділення спиртового заводу. Організаційна, технічна та інформаційна структура існуючих ІАСУ та АСУТП спиртового виробництва. Вимоги до системи автоматизації, що проєктується.

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

Титульний аркуш. Завдання на проєктування. Анотація (державною та англійською мовами). Зміст. Вступ. Розділ 1 – Характеристика об'єкта дослідження, аналітичний огляд літератури та постановка задач дослідження.

1.1 Коротка характеристика підприємства. 1.2 Опис технологічної та машино-апаратурної схеми відділення, алгоритм його функціонування. 1.3

Статичні та динамічні характеристики об'єкта. 1.4 Системний аналіз

об'єкта. 1.5 Вимоги до системи автоматизації. 1.6. Дослідження особливостей застосування нелінійних моделей керування. 1.6.1 Аналіз

нелінійних регуляторів та особливостей їх налаштування. 1.6.2 Вибір

типу автоматичного регулятора. 1.6.3 Визначення налаштувань

автоматичного регулятора. 1.6.4 Експериментальний метод визначення

параметрів налаштування регулятора (метод Циглера - Нікольса). 1.6.5

Формульний метод визначення налаштувань регулятора 1.6.6 Оптимальне налаштування регуляторів за номограмами 1.7.7 Розрахунок налаштувань за частотними характеристиками об'єкта (забезпечення заданого запасу стійкості в системі) 1.6.8 Аналіз нелінійних регуляторів. 1.6.9 Нейро-нечіткі регулятори в системах автоматизації технологічних процесів . 1.6.10 Роль нейронних мереж в системах керування. 1.6.11 Переваги нейромережевого регулятора. 1.6.12. Розробка структури нейрорегулятора та методи його навчання. **Розділ 2 – Загальносистемні рішення** 2.1. Розробка підсистеми управління технологічним процесом (комплексом) 2.2. Опис функцій, що інтелектуалізуються 2.3. Розробка вимог до ІСК (Requirements diagram) 2.4. Визначення функцій користувачів (Use Case diagram) 2.5. Розробка BDD технологічної, технічної та інформаційної складових системи. 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 Вибір програмного забезпечення для всіх компонентів системи. **Висновки** 3.2. Дослідна перевірка підвищення ефективності. 3.2.1. Оцінка точності часткових розв'язків задачі керування нейромережевим регулятором. 3.2.2 Оцінка єдності розв'язків за змінюваних параметрів регулятора. 3.4.1. Лінгвістична апроксимація вхідних та вихідних змінних. 3.4.2 Розробка бази правил для нечіткої системи. Аналіз результатів роботи системи. **Висновок. Список використаної літератури**

5. Дата видачі завдання 18 листопада 2022

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|-------------------------------|----------|
| 1 | Характеристика об'єкта дослідження            |                               |          |
| 2 | ЗАГАЛЬНОСИСТЕМНІ РІШЕННЯ                      |                               |          |
| 3 | РОЗРОБКА ІСК                                  |                               |          |
|   |   |                               |          |

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Скрипник Д.І. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Кишенько В.Д. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)



## Анотація

Дана магістерська робота розроблена на тему: Розробка проекту інтелектуальної системи керування процесом брагоректифікації з підсистемою оперативної діагностики технічних засобів автоматизації”.

В роботі було проаналізовано основні способи діагностики ТЗА, та обраний метод контрольних карт Шухарта для оперативної діагностики та прогнозування. Розроблена інтелектуальна система управління процесом брагоректифікації, система підтримки прийняття рішень на основі нечіткої логіки.

Розроблена база знань нечіткої логіки, проведена лінгвістична апроксимація вхідних та вихідних змінних, створені функції належності вхідних та вихідних величин. Розроблена база правил для нечіткої системи.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 5    |

## Annotation

This master's thesis was developed on the topic: Development of a project of an intelligent control system for the bragorectification process with a subsystem of operational diagnostics of technical automation equipment.

In the work, the main methods of diagnosis of TZA were analyzed, and the Shuhart control chart method was chosen for operative diagnosis and forecasting. An intelligent system for managing the bragorectification process, a decision support system based on fuzzy logic, has been developed.

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

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              | 6    |

## Зміст

|  |    |
|--|----|
| Вступ.....   | 9  |
| Розділ 1 – Характеристика об’єкта дослідження, аналітичний огляд літератури та постановка задач дослідження .....            | 10 |
| 1.1 Коротка характеристика підприємства .....  | 13 |
| 1.2 Опис технологічної та машино-апаратурної схеми відділення, алгоритм його функціонування .....                            | 16 |
| 1.3 Статичні та динамічні характеристики об’єкта .....   | 18 |
| 1.4 Системний аналіз об’єкта.....  | 30 |
| 1.5 Вимоги до системи автоматизації .....  | 31 |
| 1.6. Дослідження особливостей застосування нелінійних моделей керування ..   | 33 |
| 1.6.1 Аналіз нелінійних регуляторів та особливостей їх налаштування .....  | 33 |
| 1.6.2 Вибір типу автоматичного регулятора.....   | 34 |
| 1.6.3 Визначення налаштувань автоматичного регулятора .....  | 36 |
| 1.6.4 Експериментальний метод визначення параметрів налаштування регулятора (метод Циглера - Нікольса) .....                 | 36 |
| 1.6.5 Формульний метод визначення налаштувань регулятора .....   | 37 |
| 1.6.6 Оптимальне налаштування регуляторів за номограмами .....   | 38 |
| 1.7.7 Розрахунок налаштувань за частотними характеристиками об’єкта (забезпечення заданого запасу стійкості в системі) ..... | 38 |
| 1.6.8 Аналіз нелінійних регуляторів.....   | 39 |
| 1.6.9 Нейро-нечіткі регулятори в системах автоматизації технологічних процесів .....   | 43 |
| 1.6.10 Роль нейронних мереж в системах керування .....   | 44 |
| 1.6.11 Переваги нейромережевого регулятора .....   | 51 |
| 1.6.12. Розробка структури нейрорегулятора та методи його навчання .....   | 52 |
| Розділ 2 – Загальносистемні рішення.....   | 60 |

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              | 7    |

|  |     |
|--|-----|
| 2.1. Розробка підсистеми управління технологічним процесом (комплексом)..                            | 60  |
| 2.2. Опис функцій, що інтелектуалізуються.....   | 66  |
| 2.3. Розробка вимог до ІСК (Requirements diagram) .....  | 68  |
| 2.4. Визначення функцій користувачів (Use Case diagram) .....  | 73  |
| 2.5. Розробка BDD технологічної, технічної та інформаційної складових системи. ....                  | 75  |
| 2.6.1. Визначення життєвого циклу ІСК та її процесів (State Machine diagram, Activity diagram) ..... | 76  |
| 2.6.2. Вирішення проблеми синхронізації підсистем (Sequence diagram).....                            | 78  |
| Розділ 3 – Розробка інформаційного та програмного забезпечення ІСК.....                              | 80  |
| 3.1 Вибір програмного забезпечення для всіх компонентів системи.....                                 | 80  |
| Висновки .....   | 88  |
| 3.2. Дослідна перевірка підвищення ефективності.....   | 88  |
| 3.2.1. Оцінка точності часткових розв’язків задачі керування нейромережевим регулятором.....         | 88  |
| 3.2.2 Оцінка єдності розв’язків за змінюваних параметрів регулятора.....                             | 93  |
| 3.4.1. Лінгвістична апроксимація вхідних та вихідних змінних .....                                   | 100 |
| 3.4.2 Розробка бази правил для нечіткої системи. Аналіз результатів роботи системи .....             | 107 |
| Висновок.....  | 111 |
| Список використаної літератури .....   | 112 |

## Вступ

Проектування — процес створення проекту, прототипу, праобразу майбутнього об'єкта, стану та способів його виготовлення. У проектуванні застосовують системний підхід, який полягає у встановленні структури системи, типу зв'язків, визначенні атрибутів, аналізованні впливів зовнішнього середовища.

Проектування — це комплекс робіт який складається з пошуку, досліджень, розрахунків та розрахування з метою отримання опису достатнього для створення нового об'єкту або виробу, його реконструкції, модернізації, що відповідає заданим вимогам.

у техніці — розробка проектної, конструкторської та іншої технічної документації, призначеної для забезпечення будівництва, створення нових видів та зразків.

В процесі проектування виконуються технічні та економічні розрахунки, схеми, графіки, пояснювальні записки, кошториси, калькуляції та описи.

Під автоматизацією проектування розуміється такий спосіб виконання процесу розробки проекту, коли проектні процедури й операції здійснюються розроблювачем виробу при тісній взаємодії з ЕОМ. Автоматизація проектування припускає систематичне використання засобів обчислювальної техніки при раціональному розподілі функцій між проектувальником і ЕОМ і обґрунтованому виборі методів машинного рішення задач.

Для одержання харчового ректифікованого спирту безпосередньо з бражки використовують брагоректифікаційні установки. Основним завданням БРУ є максимальне виділення спирту з бражки, звільнення його від супровідних домішок і одержання спирту стандартної концентрації і відповідної якості.

Автоматизація процесів управління БРУ сприяє більш швидкому реагуванню на зміни параметрів процесу і являє собою більш ефективну форму управління установкою

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 9    |

## Розділ 1 – Характеристика об'єкта дослідження, аналітичний огляд літератури та постановка задач дослідження

Підвищення якості продукції у харчовій промисловості тісно пов'язане з впровадженням в виробництво новітніх технологій, автоматизацією виробництва.

Ефективність виробництва залежить від таких факторів, як раціональне формування і використання виробничих фондів, продуктивність праці, співвідношення темпів зростання продуктивності проці до фонду оплати праці, вибір форм організації виробництва.

Загальними передумовами вдосконалення роботи харчової промисловості є прискорення науково-технічного прогресу, реформація економічного механізму господарювання, підвищення ефективності виробництва, поліпшення якості праці, динамічний та пропорційний розвиток, забезпеченість сільськогосподарською сировиною.

Однією з найважливіших проблем розвитку харчової промисловості є переоснащення її на новій технологічній основі. Оновлення матеріально-технічної бази галузі можна досягти лише за рахунок використання прогресивних, ресурсозберігаючих технологій, розробки і розвитку гнучких виробництв, що дають змогу швидко переналагодити виробництво на випуск нової продукції. Масове використання мікропроцесорної техніки, мікроелектроніки створює умови для впровадження комплексно програмних виробничих процесів.

|                     |             |                       |               |             |  |                     |             |                |
|---------------------|-------------|-----------------------|---------------|-------------|--|---------------------|-------------|----------------|
|                     |             |                       |               |             | <i>Кваліфікаційна робота</i>   |                     |             |                |
| <i>Змн.</i>         | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i>       | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |  |                     |             |                |
| <i>Студент</i>      |             | <i>Скриник Д.І.</i>   |               |             | <i>Інтелектуальне керування технологічними процесами<br/>брагоректифікації</i> | <i>Літ.</i>         | <i>Арк.</i> | <i>Акрушів</i> |
| <i>Керівник</i>     |             | <i>Кишенько В.Д.</i>  |               |             |  |                     |             |                |
| <i>Зав.кафедри.</i> |             | <i>Смітюх Я.В.</i>    |               |             |  | <i>НУХТ АІ-2-1М</i> |             |                |
| <i>Секретар ДЕК</i> |             | <i>Проскурка Є.С.</i> |               |             |  |                     |             |                |
|                     |             |                       |               |             |  |                     |             | 10             |

Засоби комплексної автоматизації, системи машин і апаратів безперервного циклу повинні замінити одиниці агрегатів періодичної дії, що використовуються нині. Характер технологічного процесу окремих галузей харчової промисловості дає можливість вже найближчим часом перевести виробництво в автоматизований режим. У перспективах у таких галузях як цукрова, олійна, макаронна, хлібопекарна, маслосироробна і молочна будуть споруджені заводи-автомати, окремі цехи з автоматичним виробництвом на основі застосування мікропроцесорів, робототехніки, роторних та роторно-конвеєрних ліній.

У спиртовій промисловості особливо актуальними є проблеми підвищення потужності та технічного рівня основного устаткування, поліпшення якості спирту, зниження витрат ресурсів на виробництво продукції. Це можливо за рахунок додержання оптимального режиму роботи із збереженням основних технологічних параметрів (Н, Т, Р, F ) в межах норми. Але в сучасних умовах перехід до цілком нових виробництв, заміни старих апаратів на нові неможливий у зв'язку з нестачею у підприємств великих обігових коштів. Найкращий вихід в запровадженні автоматизованих систем управління, які дають змогу зменшити відхилення параметрів процесу від ідеальних, підвищити якість продукції, зменшити втрати сировини, палива, ресурсів, як матеріальних так і людських.

БРУ - основна ланка теплового господарства спиртового заводу та найбільший споживач пари. Тут пара більш високого потенціалу перетворюється в пару зі знизеними тиском та температурою, яка далі йде на нагрівання різних проміжних продуктів. За важливістю виконуваних функцій БРУ займає центральне місце у технологічній та тепловій схемі спиртового заводу. Від її продуктивності залежить продуктивність підприємства, витрата палива, втрати та якість спирту.

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 11   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

Використання розподіленої системи управління на базі мікропроцесорного контролера "Premium" та персонального комп'ютера з програмним забезпеченням "Monitor Pro" забезпечує вирішення таких завдань :

- збирання , первинне оброблення й накопичення інформації про параметри технологічного процесу й стан устаткування від промислових контролерів та інших цифрових пристроїв , безпосередньо зв'язаних з технологічною апаратурою ;

- відображення інформації про поточні значення технологічних параметрів технологічного процесу на екрані ПЕОМ у вигляді графічних мнемосхем , динамічна частина яких складається із набору вбудованих в систему елементів візуалізації ;

- відображення графіків поточних значень технологічних параметрів в реальному часі за заданий інтервал ;

- виявлення критичних ( аварійних ) ситуацій ;

- виведення на екран ПЕОМ технологічних і аварійних повідомлень , їх реєстрацію в файлі повідомлень, з фільтруванням повідомлень по категоріях ;

- контроль дій оператора шляхом їх реєстрації в файлі повідомлень ;

- дистанційне управління технологічним процесом з клавіатури ПЕОМ або з допомогою маніпулятора типу "миша" , включаючи : введення завдань (установок) параметрів технологічного процесу з контролем достовірності введених значень ;

- переключення режимів роботи контурів регулювання ( ручний , автоматичний ) ; управління положенням виконавчих механізмів у ручному режимі , групове управління тощо .

За рахунок впровадження автоматизації БРУ ми очікуємо наступні зміни таких техніко-економічних показників:

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 12   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

1. Зменшення витрат пари на 3,3 % до маси перероблених буряків за рахунок додержання оптимального режиму роботи із збереженням основних технологічних параметрів в межах норми .

2. Збільшення виходу спирту за рахунок зменшення його втрат в технологічному процесі на 0,04 % від маси бражки . Це досягається завдяки точному регулюванню рівнів у корпусах апаратів. Вивільнення одного робітника 3 розряду з тарифною ставкою 1,16 грн. за годину .

### 1.1 Коротка характеристика підприємства

Нині майже всі спиртові підприємства працюють в таких умовах господарювання, коли вони самостійно встановлюють показники своєї діяльності:обсяг реалізованої продукції, основна номенклатура продукції, обсяг капіталовкладень, завдання по впровадженню нової техніки і технологій. При цьому показники фінансового стану є досить важливими показниками, що характеризують усі сторони діяльності підприємства.

На сьогоднішній день косарський спиртзавод відноситься до міністерства агропромислового комплексу України і є одним із спиртових заводів державного концерну “укрспирт”. З 1 січня 1997 року підприємство підпорядковується безпосередньо обласному об’єднанню спиртової та лікеро-горілчаної промисловості “черкаспирт”. Форма власності підприємства – державна.

Косарський спиртовий завод виробляє спирт етиловий – ректифікат із меляси вищої очистки за ГОСТ 5962-67, спирт етиловий ректифікований високоякісний за ГОСТ 3099-95 та горілки особливі за ГОСТ 12712-80. Виробничі потужності станом на 01.01.2000р.дозволяють виробити 1320 тис. Дал спирту вищої очистки та 620 тис. Дал горілочаних виробів. Продуктивність спиртового цеху становить 4500 декалітрів спирту вищої очистки на добу. Технологічний цикл виробництва складає 280-310 днів. Висока культура виробництва забезпечує найвищу якість косарського спирту і добре відома споживачам як в Україні так і за її межами. Здійснена реконструкція

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 13   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

підприємства на виробництво спирту із зерна потужністю 3100 дал на добу, також буде збережено і схему виробництва спирту з меляси.

Господарська діяльність ефективна, якщо підприємство: раціонально використовує активи, своєчасно погашає зобов'язання, рентабельне. Використовуючи статті фінансової звітності ф.1 та ф.2, проведемо аналіз ефективності господарської діяльності підприємства. Мета аналізу проста і точна оцінка динаміки розвитку підприємства, його фінансового стану.

Розглянуто такі методи аналізу: горизонтальний, вертикальний, з застосуванням коефіцієнтів.

Суть горизонтального аналізу полягає в порівнянні показників звітності попереднього та поточного року. При цьому здійснюється постатейне зіставлення звітів і визначається абсолютна і відносна зміна статей.

На відміну від горизонтального, що показує динаміку статей фінансової звітності за ряд років, вертикальний є аналізом внутрішньої структури звітності. При проведенні такого аналізу ціла частина прирівнюється до 100% і обчислюється питома вага кожної її складової.

Метод коефіцієнтів полягає в тому, що оцінку фінансового стану проводять за допомогою коефіцієнтів, розрахованих на підставі показників балансу і звіту про фінансові результати. Цим способом вивчаються такі показники як ліквідність, довгострокова платоспроможність та рентабельність.

В спиртовій промисловості, а зокрема і на Косарському заводі використовується попередільний метод обліку, а оскільки технологія виробництва безперервна, то переділи не виділяють і використовують однопредільний метод. Застосуванню нормативного методу сприяють специфіка виробництва (вироблення в масових масштабах нескладної і однорідної продукції, відсутність напівфабрикатів); наявність норм затрат на виробництво продукції (розроблено нормативи затрат на 1-цю продукції, рецептуру), на технологічне паливо, електроенергію, на заробітну плату виробничих робітників; порівняно постійна технологія і організація

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 14   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

виробництва і праці, можливість організації оперативного і бухгалтерського обліку змін норм та відхилень від норми.

Планування собівартості продукції для підприємства являє собою систему техніко-економічних розрахунків, які відображають величину затрат, які включаються до складу собівартості продукції. Ціллю собівартості є економічно обгрунтоване визначення величини затрат, необхідних в плановому періоді для виробництва кожного виду і всієї промислової продукції.

Як правило, на підприємстві спочатку складається план виробництва за видами продукції або виробнича програма. Ціль виробничої програми це забезпечення об'єму виробництва, достатнього для задоволення попиту споживачів, та створення економічно обгрунтованого рівня запасів.

Для аналізу виконання виробничої програми використовуються дані статистичної звітності "Квартальний звіт підприємства по продукції"

Для населення – як головного споживача готової продукції спиртового заводу важливим є не лише виконання плану з випуску продукції в цілому, а й у асортиментному виразі, в 2003 році Косарським спиртовим заводом завдання за структурою виробництва продукції виконано.

На косарському спиртовому заводі постійно в центрі уваги знаходиться якість продукції і, як результат, з перевірок якості в 2002 році контролюючими органами (агростандартом, черкаською обласною, санепідемстанціями) не було виявлено жодних порушень – перевірена продукція відповідала вимогам діючої нормативної документації встановлених рецептур. За останні кілька років на косарському спиртовому заводі проведено цілий ряд організаційно-технічних заходів, спрямованих на підвищення якості продукції, її асортименту, культури виробництва, механізації і автоматизації та економії паливно-енергетичних ресурсів. Якість продукції, що випускається заводом, була визнана як на рівні України, так і на міжнародному рівні. Так, у 1997 році підприємство отримало міжнародну нагороду за найвищу якість продукції "арка Європи" у столиці Іспанії Мадриді. У 1998 році одержало міжнародний приз "за якість" в місті

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 15   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

парижі та приз “за технологію та за якість” в берліні. У 2001 році підприємство отримало вітчизняну винагороду за якість продукції під торговою маркою “холодний яр” – “вища проба”.

## **1.2 Опис технологічної та машино-апаратурної схеми відділення, алгоритм його функціонування**

Стадія виділення спирту з культуральної рідини (бражки) і очищення його від домішок є заключною у технологічному процесі виробництва спирту і відбувається у брагоректифікаційних установках (БРУ). Існує декілька варіантів технологічних схем БРУ, але принципи дії у них схожі, тому, як приклад, розглянемо триколонну установку скісної дії.

Бражка з бродильного відділення подається у підігрівач бражки, де підігрівається парами спирту та води, потім поступає у верхню частину бражної колони і по тарілках стікає донизу. Назустріч потоку рідини піднімаються пари води та спирту, що утворюються за рахунок теплоти гріючої пари, яка подається у кип'ятильник бражної колони. В результаті тепломасообміну концентрація спирту у потоці пари зростає, а у рідині зменшується. Бражка, з якої відігнаний спирт, називається бардою і відводиться з нижньої частини колони. Барда є основним відходом спиртового виробництва і використовується або як корм для тварин, або для виготовлення дріжджів. Пари спирту та супутніх йому домішок виходять з верхньої частини колони, охолоджуються у теплообміннику потоком бражки та остаточно конденсуються у дефлегматорі БК, куди подається охолодна вода.

Очищення спирту-сирцю відбувається у епюраційній колоні, куди на перегонку поступає конденсат спирту-сирцю з дефлегматора БК. Обігрів колони відбувається парою, яка поступає у кип'ятильник колони.

Температурний режим у колоні розрахований на розподіл спирту-сирцю, який є тут висококиплячим компонентом суміші, та легколетючих домішок

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 16   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

(ефірів, альдегідів, метанолу та ін.), які і концентруються у верхній частині колони і виходять з неї у вигляді ефіроальдегідної фракції (ЕАФ).

Очищений спирт з концентрацією 20-30% (епюрат) виводиться з нижньої частини епюраційної колони і подається у ректифікаційну колону для остаточного очищення та концентрування. У ній легколетучим компонентом є спирт, а основним висококиплячим - вода, тому концентрація спирту збільшується по висоті колони. Обігрівання цієї колони, як і двох інших, відбувається парою, яка подається у кип'ятильник.

Спирт-ректифкат концентрацією 96% відбирається з 10-15-й тарілок у верхній частині колони і проходить через холодильник, де охолоджується водою. Пари спирту виходять через верхній отвір і після конденсації у дефлегматорі РК повертаються у колону як флегма. З нижньої частини колони відбираються сивушні масла, а ще нижче відводиться вода з домішками спирту.

Брагоректифікаційне відділення є вибухонебезпечним приміщенням, тому у ньому необхідно використовувати прилади та засоби автоматизації у вибухобезпечному виконанні. В системі автоматизації БРУ використані переважно прилади пневматичні" вітки ДСП, в тому числі - вторинні прилади з пневмоприводом діаграми.

Важливим технологічним параметром, який визначає режим роботи кожної з колон БРУ, є тиск у її нижній частині, який залежить від витрати гріючої пари у кип'ятильнику.

Основним параметром, який характеризує стан процесу у кожній колоні, є концентрація спирту. Через відсутність серійних датчиків для автоматичного вимірювання цього параметра його безпосереднє регулювання неможливе. Однак, при постійному тиску у колоні між концентрацією та температурою кипіння рідини на контрольній тарілці існує однозначна залежність, яку можна використати для посереднього регулювання концентрації.

У бражній колоні температура на контрольній тарілці регулюється за допомогою двоконтурної (каскадної) АСР.

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 17   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

Особливо високі вимоги пред'являються до якості регулювання концентрації спирту, який відбирається з ректифікаційної колони, оскільки він є кінцевим продуктом виробництва. Для цього використовується двоконтурна (каскадна) АСР, яка регулює витрату спирту-ректифікату з корекцією по температурі на контрольній тарілці.

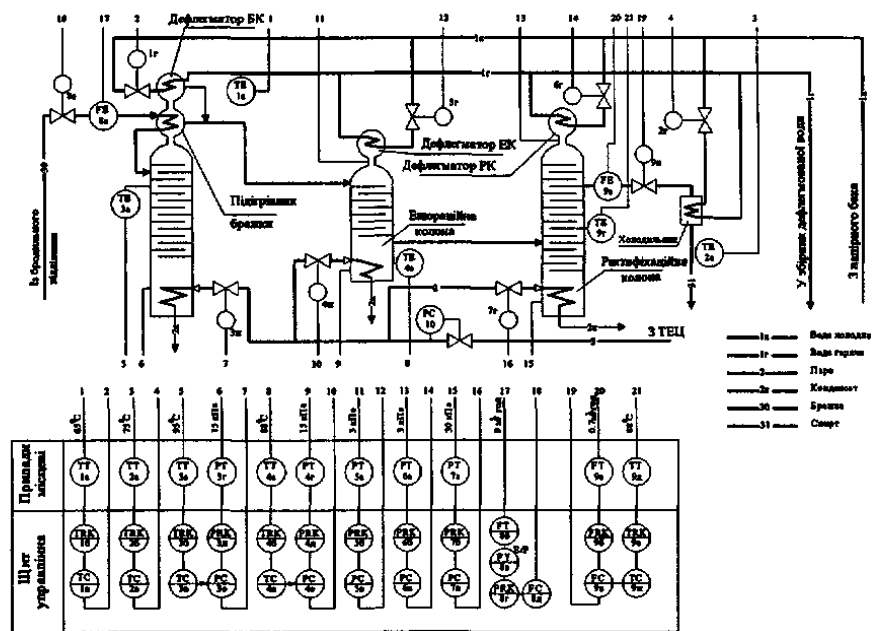


Рис. 6.8 Схема автоматизації брагоректифікаційної установки

203

Рис..1 Схема автоматизації БРУ

### 1.3 Статичні та динамічні характеристики об'єкта

Моделювання – це процес пізнання об'єкта досліджень (оригінала), а також процес відтворення деяких характеристик оригінала і дослідження його на ЕОМ. Моделювання проводиться з метою розробки моделі об'єкта досліджень, проведення експериментів на цих моделях для визначення та аналізу характеристик об'єкта або оцінки різних управлінь.

Модель може бути матеріально реалізованою системою або уявно відображати об'єкт, таким чином, вона здатна замінювати його на певному

етапі досліджень. Оригінал також може бути реальним та уявним (на стадії проектування).

Потреба в моделюванні виникає тоді, коли безпосереднє дослідження на об'єкті неможливе (неможливо створювати критичні та позакритичні ситуації без загрози аварії) або дослідження потребує значних затрат.

Процес побудови математичної моделі включає такі етапи:

- складання математичного опису об'єкта досліджень (вивчення процесів, явищ, елементів об'єкта та встановлення зв'язків між ними, запис рівняння або системи рівнянь для кожного елемента об'єкту чи явища);
- вибір методу розв'язку системи рівнянь математичного опису і реалізація його у формі моделюючої програми (вибір найбільш ефективного методу рішення з існуючих та реалізація його спочатку у формі алгоритму, а потім у вигляді програми для розрахунку на ЕОМ);
- перевірка адекватності математичної моделі (порівняння результатів вимірювання на об'єкті в процесі його роботи з результатами моделювання за однакових умов);
- перенесення результатів моделювання на об'єкт досліджень.

Математичні моделі використовуються для вирішення задач аналізу та синтезу, розробки систем управління. Використання ЕОМ в САР (система автоматичного регулювання) дозволило використовувати математичні моделі безпосередньо в контурі управління. Така математична модель використовується для вирішення задачі оптимального управління.

Об'єктом досліджень в даному дипломному проєкті є частина випарної установки, зокрема перший корпус. Моделювання проводимо з метою розробки математичної моделі даного об'єкта, проведення експериментів на цій моделі для визначення та аналізу характеристик об'єкта та оцінки різних управлінь необхідних для забезпечення оптимального функціонування об'єкту.

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 19   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

На основі технологічної схеми, розробимо повну параметричну схему (рис.2.1)

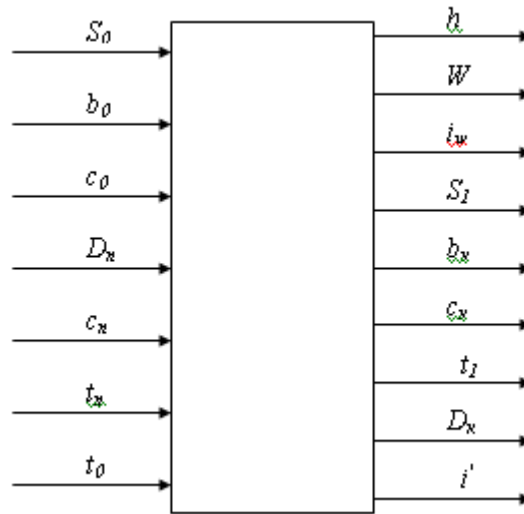


Рис.2.1 Повна параметрична схема

$S_0$  – витрата бражки на вході в бражну колону, м<sup>3</sup>/год;

$S_1$  – витрата бражки на виході з бражної колони, м<sup>3</sup>/год;

$b_0, b_k$  – відповідно концентрація на вході і виході бражної колони, м<sup>3</sup>/год;

$c_0, c_n, c_k$  – відповідно теплоємність бражки, гріючої пари та конденсату, кДж/кг·°С;

$D_n, D_k$  – відповідно витрата гріючої пари і конденсату, м<sup>3</sup>/год;

$t_n$  – температура гріючої пари, °С;

$t_0, t_1$  – відповідно температура соку на вході і виході з бражної колони, °С;

$h$  – рівень соку в бражній колоні, м;

$W$  – витрата вторинної пари, м<sup>3</sup>/год;

$i_w, i'$  – відповідно ентальпія вторинної пари і конденсату, кДж/кг.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 20   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

В кожному апараті можна умовно виділити такі основні елементи: гріючу камеру, поверхню нагрівання та парорідинний простір.

Розробку математичної моделі проводимо аналітичним методом. Гріючу камеру, в якій конденсується пара можна розглядати у вигляді ряду взаємозв'язаних “ємкостей” – пара у камері, плівка конденсату на поверхні нагріву, конденсат, метал корпусу, ізоляція та несконденсовані пари.

Концентрація газів, що не сконденсувалися, при нормальному відводі складає менше 1%, тому масою цих газів можна знехтувати, маса конденсату, що накопичується на дні гріючої камери також практично рівна нулю. При цих допущеннях рівняння матеріального балансу гріючої камери має вигляд

$$d(G_1+G_2)/dt=D_1-D_k-D_1', \quad (2.1)$$

де  $G_1$  – маса пари в гріючій камері, кг;

$G_2$  – маса плівки конденсату на поверхні нагрівання, кг;

$D_1, D_k, D_1'$  – відповідно витрата гріючої пари, конденсату та втрати пари при відводі несконденсованих газів (останні приймаємо рівними нулю), кг/год;

Рівняння енергетичного балансу для гріючої камери отримаємо на основі закону збереження енергії для відкритої термодинамічної системи:

$$dU=(Q+\sum D_i i_i - L_v)dt, \quad (2.2)$$

де  $Q$  – сумарний тепловий потік через теплопередаючу і обмежуючу поверхні;

$D_i$  – витрата маси, кг/год;

$i_i$  – ентальпія потоку, кДж/кг;

$L_v$  – термодинамічна рівновага;

$U$  – внутрішня енергія системи, кДж

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 21   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

Для грійучої камери випарного апарату  $L_v=0$ , тому на основі (2.2) отримаємо:

$$dU/d\tau=\Delta Q, \quad (2.3)$$

$$\text{де } \Delta Q=Q+\Sigma D_i i_i=D_i i_0-D_k i'-D_l i_n-Q_l-Q_l', \quad (2.4)$$

$i_0, i_n, i'$  – відповідно грійучої пари, пари у камері і конденсату, кДж/кг;

$Q_l$  – кількість тепла, що передається поверхні нагрівання, кДж/кг.

Внутрішня енергія системи дорівнює:

$$U=G_l U_n+G_2 c' t_k+c_m G_m t_m+c_u G_u t_u \quad (2.5)$$

де  $U_n$  – внутрішня енергія пари в грійучій камері, кДж;

$c', t_k$  – відповідно теплоємність [кДж/кг·°C] і температура конденсату, °C;

$c_m, G_m, t_m$  – відповідно теплоємність [кДж/кг·°C], маса [кг] та температура корпусу грійучої камери, °C;

$c_u, G_u, t_u$  – відповідно теплоємність [кДж/кг·°C], маса [кг] та температура ізоляції, °C;

Підставимо (2.4) і (2.5) рівняння (2.3) за умови, що теплоємність металу та ізоляції не залежить від температури, а ентальпія пари, що надходить в грійучу камеру дорівнює ентальпії пари, яка знаходиться в камері отримаємо:

$$\begin{aligned} & d(G_l U_n)/d\tau+d(G_2 c' t_k)/d\tau+ c_m G_m(dt_m/d\tau)+ c_u G_u(dt_u/d\tau)= \\ & =(D_l-D_l')i_0- D_k i'-Q_l-Q_l', \end{aligned} \quad (2.6)$$

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 22   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

Розглянувши рівняння матеріального і теплового балансу (2.1) і (2.6) разом та виключивши  $D_k$ , отримаємо:

$$G_1(dU_n/d\tau) + (U_n - i')dG_1/d\tau + (c't_k - i')dG_2/d\tau + G_2 \cdot d(c't_k)/d\tau + c_m G_m(dt_m/d\tau) + c_u G_u(dt_u/d\tau) = (D_1 - D_1')(i_0 - i') - Q_1 - Q_1', \quad (2.7)$$

Маса пари в гріючій камері дорівнює:

$$G_1 = V_1 g'' = (V_3 - V_2) g'', \quad (2.8)$$

де  $V_1$  – об'єм пари в гріючій камері, м<sup>3</sup>;

$g''$  – густина пари, кг/м<sup>3</sup>;

$V_3, V_2$  – відповідно об'єм гріючої камери та плівки конденсату, м<sup>3</sup>;

Маса плівки конденсату дорівнює:

$$G_2 = V_2 g', \quad (2.9)$$

де  $g'$  – густина конденсату, кг/м<sup>3</sup>;

Прийmemo слiдуючі припущення:

- 1)  $i_k = c't_k$ ;
- 2) об'єм пари в гріючій камері  $V_1$  і об'єм гріючої камери  $V_3$  рівні між собою (так як  $V_2 \leq V_3$ );
- 3) температура пари і плівки конденсату змінюється з однаковою швидкістю.

Підставивши вирази (2.8) і (2.9) у вираз (2.7), з урахуванням вище зазначених припущень, отримаємо:

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 23   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

$$a_1^*(dt_n/d\tau) + c_m G_m (dt_m/d\tau) + c_u G_u (dt_u/d\tau) = (D_1 - D_1')(i_0 - i') - Q_1 - Q_1', \quad (2.10)$$

Значення  $a_1^*$  знайдемо з виразу:

$$a_1^* = V_1 [g''(dU_n/dt_n) + (U_n - i')(dg''/dt_n)] + V_2 g' [c' + t_{\kappa}(dc'/dt_n)], \quad (2.11)$$

Можна зробити припущення, що при перехідному процесі швидкість зміни температури пари і середньої температури металу корпуса рівні:

$$dt_m/d\tau = dt_n/d\tau, \quad (2.12)$$

Приймаємо, що:  $t_m = (t_m + t_n)/2$ , де:  $t_n$  – температура навколишнього середовища.

Враховуючи вираз (2.12), отримаємо:

$$c_m G_m (dt_m/d\tau) + c_u G_u (dt_u/d\tau) = (c_m G_m + 0,5 c_u G_u) dt_n/d\tau, \quad (2.13)$$

Підставимо (2.13) в (2.10) і отримаємо:

$$a_1 (dt_n/d\tau) = (D_1 - D_1')(i_0 - i') - Q_1 - Q_1', \quad (2.14)$$

$$\text{де: } a_1 = a_1^* + c_m G_m + 0,5 c_u G_u, \quad (2.15)$$

Визначимо кількість тепла  $t_1$ , що передається поверхні нагрівання:

$$t_1 = [F_1' / (1/\alpha_1 + \delta_c / 2\lambda_c)] / (t_n - t_c), \quad (2.16)$$

де:  $F_1$  – площа поверхні конденсації, м<sup>2</sup>;

$\alpha_1$  – коефіцієнт тепловіддачі від гріючої пари до стінки труби, кДж/кг·°С;

$\delta_c$  – товщина поверхні нагрівання, м;

$\lambda_c$  – коефіцієнт теплопровідності металу поверхні нагрівання, кДж/м<sup>0</sup>С;

$t_c$  – температура поверхні нагрівання, °С;

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 24   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

Підставивши (2.16) в (2.14) отримаємо:

$$a_1(dt_n/d\tau) = -a_2t_n + a_3t_c + a_4(D_1 - D_1'), \quad (2.17)$$

$$\text{де: } a_2 = a_3 = F_1' / (1/\alpha_1 + \delta_c/2\lambda_c), \quad (2.18)$$

$$a_4 = i_0 - i'$$

Рівняння (2.17) є наближеним диференціальним рівнянням гріючої камери, записане відносно температури пари.

Рівняння (2.17) в правій частині містить значення температури поверхні нагрівання, для визначення якої необхідно отримати відповідні диференціальні рівняння.

Прийmemo слiдуючі припущення:

- 1) труби випарювача мають одні і ті ж геометричні розміри і виконанні з матеріалу з однаковими теплофізичними властивостями;
- 2) тепловий потік вздовж осі труби відсутній;
- 3) всі труби випарювача сприймають однакову кількість тепла;

Запишемо рівняння теплового балансу для кип'ятильних труб:

$$G_M G_3 (dt_c/d\tau) = Q_1 - Q_2, \quad (2.19)$$

де:  $G_3$  – маса металу труб, кг;

$Q_1$  – кількість тепла, що передається трубам від гріючої пари, кДж/кг;  $Q_2$  – кількість тепла, що передається трубами киплячій рідині, кДж/кг;

$$Q_2 = [F_1'' / (1/\alpha_2 + \delta_c/2\lambda_c + \delta_n/2\lambda_n)] (t_c - t_1), \quad (2.20)$$

де:  $F_1''$  – площа поверхні нагрівання зі сторони киплячої рідини, м<sup>2</sup>;

$\delta_n, \lambda_n$  – відповідно товщина шару та коефіцієнт теплопровідності шару накипу

Розглядаючи (2.19), (2.16) і (2.20) і врахувавши, що  $dt_c/d\tau = dt_n/d\tau$ , отримаємо:

$$c_1 (dt_c/d\tau) = -c_2 t_c + c_3 t_n + c_4 t_1, \quad (2.21)$$

де:  $c_1 = c_M G_3$ ;  $c_2 = c_3 + c_4$ ;

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 25   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

$$c_3 = F_1' / (1/\alpha_1 + \delta_c/2\lambda_c), \quad c_4 = F_1'' / (1/\alpha_2 + \delta_c/2\lambda_c + \delta_n/2\lambda_n), \quad (2.22)$$

Парорідинний простір випарного апарату можна розглядати як чотири взаємозв'язані ємності з зосередженими параметрами: кипляча рідина, пара під дзеркалом випарювання, простір вторинної пари, а також метал корпусу.

Для математичного описання перехідних процесів в парорідинному просторі розглянемо разом рівняння матеріального і теплового балансу для кожної ємності.

Рівняння матеріального балансу для рідини:

$$dG_{ж} / d\tau = S_0 - S_1 - W', \quad (2.23)$$

де:  $G_{ж}$  – маса рідини в апараті, кг;

$S_0, S_1$  – відповідно витрата рідини на вході в апарат та на виході з апарату, кг/с;

$W'$  – витрата утвореної пари, кг/с

Рівняння матеріального балансу для пари під дзеркалом випаровування:

$$dG_n' / d\tau = W' - W'', \quad (2.24)$$

Рівняння матеріального балансу для простору вторинної пари:

$$dG_n'' / d\tau = W'' - W, \quad (2.25)$$

де:  $G_n', G_n''$  – відповідно маса пари під і над дзеркалом випарювання, кг;

$W''$ , – витрата пари, що виділяється із дзеркала випарювання, кг/с

Підсумувавши (2.23), (2.24) та (2.25) отримаємо:

$$d(G_{ж} + G_n' + G_n'') / d\tau = S_0 - S_1 - W, \quad (2.26)$$

Повна рівновага теплового режиму парорідинного простору досягається лише за умови, коли  $S_0 - S_1 - W = 0$  і  $\Delta Q = 0$ .

При розгляді перехідних процесів, що проходять у випарному апараті знехтуємо впливом підведення чи відведення тепла на зміну кількості рідини в

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 26   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

апараті та впливом збільшення чи зменшення маси на температуру кипіння рідини.

Враховуючи, що маса парорідинного простору значно менша маси рідини в апараті, температура вторинної пари дорівнює температурі кипіння рідини, а об'єм визначається п'єзометричним методом, отримаємо:

$$V_{жк} = V_{жк.0} + Sh, \quad (2.27)$$

де:  $S$  – площа поперечного перерізу апарату,  $m^2$ ;

$h$  – рівень рідини в апараті,  $m$ ;

$V_{жк.0}$  – об'єм рідини обмежений площиною, від якої відраховується рівень,  $m^3$

Провівши ряд алгебраїчних перетворень отримаємо диференціальні рівняння, що описує зміну температури киплячої рідини і рівня в апараті:

$$d_1(dt_1/d\tau) = -d_2t_1 + d_3t_c - d_4W, \quad (2.28)$$

$$e_1(dh/d\tau) = S_0 - S_1 - W, \quad (2.29)$$

$$\text{де: } d_2 = c_4 + S_1c'''; d_3 = c_4; d_4 = i'; e_1 = (g''' - g'')S, \quad (2.30)$$

Оскільки  $g''' \geq g''$ , тоді  $e_1 = g'''S$ ;  $d_1 = c'''g'''V_{жк} + c_M G_3$

Для першого корпусу випарної станції система диференціальних рівнянь матиме вигляд:

$$\begin{cases} a_1 \frac{dt_n}{d\tau} = -a_2t_n + a_3t_c + a_4(D_1 - D_1'), \\ c_1 \frac{dt_c}{d\tau} = -c_2t_c + c_3t_n + c_4t_1, \\ d_1 \frac{dt_1}{d\tau} = -d_2t_1 + d_3t_c - d_4W, \\ e_1 \frac{dh}{d\tau} = S_0 - S_1 - W \end{cases} \quad (2.31)$$

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 27   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

Систему рівнянь (2.31) можна привести до вигляду:

$$\begin{cases} T_1 \frac{dt_n}{d\tau} + t_n = \kappa_1 t_c + \kappa_2 (D_1 - D_1^i), \\ T_2 \frac{dt_c}{d\tau} + t_c = \kappa_3 t_n + \kappa_4 t_1, \\ T_3 \frac{dt_1}{d\tau} + t_1 = \kappa_5 t_c - \kappa_6 W, \\ \frac{dh}{d\tau} = \kappa_7 S_0 - \kappa_8 S_1 - \kappa_9 W \end{cases} \quad (2.32)$$

де:  $T_1 = a_1/a_2$ ;  $T_2 = c_1/c_2$ ;  $T_3 = d_1/d_2$ ;  $\kappa_1 = a_3/a_2$ ;  $\kappa_2 = a_4/a_2$ ;  $\kappa_3 = c_3/c_2$ ;  $\kappa_4 = c_4/c_2$ ;  $\kappa_5 = d_3/d_2$ ;  $\kappa_6 = d_4/d_2$

Величини  $a_1$ ,  $c_1$ ,  $d_1$ ,  $e_1$  характеризують інерційність випарного апарату по температурі пари в гріючій камері, температурі поверхні нагрівання, температурі киплячої рідини і рівню. Інші коефіцієнти характеризують статичні характеристики апарату.

На основі системи диференціальних рівнянь (2.32) можна зобразити розгорнуту параметричну схему об'єкта моделювання (рис.2.2)

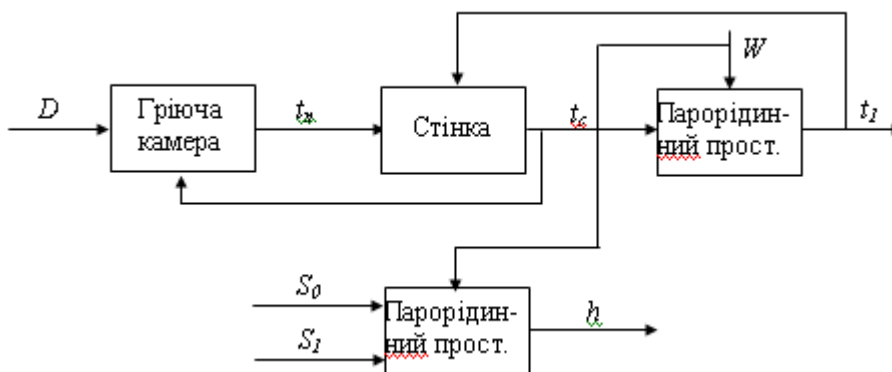


Рис. 2.2 Розгорнута параметрична схема об'єкту

Коефіцієнт  $a_1$  знаходимо графічним методом. У джерелі [7] на сторінці 38 наведено графік залежності коефіцієнту  $a_1$  від температури (див. рис.3)  $a_1 = 2100 \text{кДж}^0\text{С}$ .

Коефіцієнти  $a_2$ ,  $a_3$  та  $a_4$  розраховуємо за формулами (2.18)

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 28   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

$$a_2 = a_3 = \frac{65}{1/7000 + 0,0015/2 \cdot 16 \cdot 10^{-3}} = 1382,46 \text{ кДж/}^0\text{С};$$

$$a_4 = 2110 - 422 = 1678 \text{ кДж/кг.}$$

Коефіцієнти  $c_2$ ,  $c_3$  та  $c_4$  розраховуємо за формулами (2.22)

$$c_1 = 0,502 \cdot 5078 = 2549,16 \text{ кДж/}^0\text{С};$$

$$c_3 = a_2 = a_3 = 1382,46 \text{ кДж/}^0\text{С};$$

$$c_4 = \frac{62}{1/3500 + 0,0015/2 \cdot 16 \cdot 10^{-3} + 0,005/0,47 \cdot 10^{-3}} = 55,80 \text{ кДж/}^0\text{С};$$

$$c_2 = c_3 + c_4 = 1382,46 + 55,8 = 1438,26 \text{ кДж/}^0\text{С.}$$

Коефіцієнти  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ,  $d_4$  та  $e_1$  розраховуємо за формулами (2.30)

$$d_1 = 1170 \cdot 3650 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 + 0,502 \cdot 5078 = 5111,46 \text{ кДж/}^0\text{С};$$

$$d_2 = 55,8 + 0,76 \cdot 3650 \cdot 10^{-3} = 58,57 \text{ кДж/}^0\text{С};$$

$$d_3 = c_4 = 55,80 \text{ кДж/}^0\text{С};$$

$$d_4 = i' = 422 \text{ кДж/кг};$$

$$e_1 = 1170 \cdot 3,04 = 3556,80 \text{ кг/м.}$$

Оскільки відомі числові значення коефіцієнтів, то можна розрахувати числові значення сталих часу  $T_i$  і коефіцієнтів  $\kappa_i$ :

$$T_1 = 2100/1382,46 = 1,52 \text{ с};$$

$$T_2 = 2549,16/1438,26 = 1,77 \text{ с};$$

$$T_3 = 5111,46/58,57 = 87,27 \text{ с};$$

$$\kappa_1 = 1382,46/1382,46 = 1;$$

$$\kappa_2 = 1678/1382,46 = 1,21;$$

$$\kappa_3 = 1382,46/1438,26 = 0,95;$$

$$\kappa_4 = 55,80/1438,26 = 0,039;$$

$$\kappa_5 = 55,80/58,57 = 0,95;$$

$$\kappa_6 = 422/58,57 = 7,2;$$

$$\kappa_7 = \kappa_8 = \kappa_9 = 1/3556,80 = 0,00028$$

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 29   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

Отже, остатична система диференційних рівнянь динаміки випарного апарату з числовими значеннями коефіцієнтів має вигляд:

$$\begin{cases} 1,52 \frac{d\Delta t_n}{d\tau} + \Delta t_n = \Delta t_c + 1,21\Delta D_1, \\ 1,77 \frac{d\Delta t_c}{d\tau} + \Delta t_c = 0,95\Delta t_n + 0,039\Delta t_1, \\ 87,27 \frac{d\Delta t_1}{d\tau} + \Delta t_1 = 0,95\Delta t_c - 7,2\Delta W, \\ \frac{dh}{d\tau} = 0,00028\Delta S_0 - 0,00028\Delta S_1 - 0,00028\Delta W. \end{cases} \quad (2.33)$$

#### 1.4 Системний аналіз об'єкта

Головною ознакою складної системи є її структурна організація у вигляді елементів чи підсистем, які цілеспрямовано функціонують та взаємодіють з навколишнім середовищем. Кожна із систем може входити в склад більш складної системи. В свою чергу кожна підсистема, крім елементарних, може представлятися як система молодшого рангу. Взаємодія системи із зовнішнім середовищем проявляється цілісно, а самі зв'язки мають різну фізичну природу.

Процес функціонування будь-якої системи завжди пов'язаний з перетворенням існуючих ресурсів, а при правильній його організації приводить до отримання нового продукту.

Технологічний комплекс БРУ являє собою складну систему, що складається з таких підсистем:

- збірник бражки;
- колектор пари;
- бражан, епюраційна, ректифікаційна колони;
- конденсатор із збірником барометричної води;
- збірники конденсату;
- дефлегматори та підігрівники.

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 30   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

На вхід установки надходить бражка із вмістом спирту 14-16%. Основна ціль випарювання досягти вмісту спирту 70-80%. У БРУ багато взаємозв'язків. Тут застосовується багаторазове використання пари, бражка перетікає із апарату в апарат самотоком за рахунок різниці тисків. Тиск знижується по ходу технологічного процесу, починаючи з I корпусу, концентратор працює під розрідженням.

Спосіб функціонування неперервний, процес багатфункціональний. Елементи випарної станції з'єднані послідовно. Установка включає дві накопичувальні ємкості (на вході та на виході).

Випарний апарат, як підсистема, складається також із підсистем, це :

1. збірник бражки;
2. підігрівник бражки;
3. бражна колона;
4. дефлегматор бражної колони;
5. епюраційна колона;
6. дефлегматор епюраційної колони;
7. спиртова колона;
8. дефлегматор спиртової колони;
9. комунікація відводу пари;
10. комунікація відводу конденсату;
11. комунікація відводу спирту.

### 1.5 Вимоги до системи автоматизації

| № п/п | Параметри контролю і сигналізації                | Оптимальне значення параметра | Допустиме технологічне відхилення параметра, % | Аварійне відхилення параметра | Сигналізація                 |            |
|-------|--|-------------------------------|--|-------------------------------|------------------------------|------------|
|       |  |                               |  |                               | Звукова                      | світлова   |
| 1     | Температура водно-спиртових парів на контрольній | 95                            | ± 2  | ± 4                           | +                            | +          |
|       |  |                               |  |                               | <i>Кваліфікаційна робота</i> |            |
|       |  |                               |  |                               |                              | Арк.<br>31 |
| Змн.  | Арк.   | № докум.                      | Підпис   | Дата                          |                              |            |

|    |  |     |        |       |   |   |
|----|--|-----|--------|-------|---|---|
|    | тарілці бражної колони, °С                                       |     |        |       |   |   |
| 2  | Температура спирту на виході з ректифікаційної колони, °С        | 75  | ± 4    | ± 8   | + | + |
| 3  | Температура дефлегмованої води, °С                               | 65  | ± 4    | ± 8   | + | + |
| 4  | Тиск внизу бражної колони, КПА                                   | 15  | ± 1    | ± 3   | + | + |
| 5  | Температура в епюраційній колоні, °С                             | 88  | ± 4    | ± 8   | + | + |
| 6  | Тиск внизу епюраційної колони, КПА                               | 15  | ± 1    | ± 3   | + | + |
| 7  | Тиск на вході в дефлегматор епюраційної колони, КПА              | 3   | ± 0,5  | ± 1   | + | + |
| 8  | Температура в ректифікаційній колоні, °С                         | 88  | ± 4    | ± 8   | + | + |
| 9  | Тиск на вході в дефлегматор ректифікаційної колони, КПА          | 3   | ± 0,5  | ± 1   | + | + |
| 10 | Тиск внизу ректифікаційної колони, КПА                           | 30  | ± 1    | ± 3   | + | + |
| 11 | Витрата бражки на вході в бражну колону, мЗ/год                  | 9   | ± 1    | ± 2   | + | + |
| 12 | Витрата бражки спирту на виході з ректифікаційної колони, мЗ/год | 0,7 | ± 0,05 | ± 0,1 | + | + |

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 32   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

## 1.6. Дослідження особливостей застосування нелінійних моделей керування

### 1.6.1 Аналіз нелінійних регуляторів та особливостей їх налаштування

Перед установкою на об'єкті керування та в процесі експлуатації системи автоматичного регулювання необхідно проводити розрахунок оптимальних параметрів налаштування регуляторів, при яких система, будучи в достатній мірі стійкою, задовольняє прийнятими показниками якості перехідного процесу. Від якості настроювання регулятора залежить ефективність функціонування САР. Вибір оптимальних параметрів настроювання регуляторів є одним з найбільш важливих і складних етапів налагодження САР. Незважаючи на те, що в практику комплексної автоматизації виробничих процесів впроваджується обчислювальна техніка, вимоги до точності і якості оптимальних налаштувань регуляторів не тільки не знижуються, але ще більше підвищуються через ускладнення всього комплексу управління. Оптимальні параметри регуляторів підвищують якісні та економічні показники роботи основного і допоміжного устаткування, а також надійність їх експлуатації. Динамічні властивості САР залежать від характеристик об'єкта і регулятора. Всі параметри САР можна розділити на три групи: - задані параметри, які не можна змінювати (наприклад, статичні і динамічні параметри об'єкта); - параметри, які можуть бути обрані конструктором при розробці регулятора, але не можуть бути змінені при налаштуванні; - параметри, які можна змінити при налаштуванні (настроювальні). Розробка САР на основі промислового регулятора передбачає рішення задачі визначення та встановлення настроювальних параметрів регулятора за 11 заданими параметрами об'єкта. Розв'язання цієї задачі здійснюється у наступному порядку: - на підставі відомостей про регульований об'єкт, характер збурень, керуючі впливи та ін. вибирається досить простий типовий закон регулювання; - проводиться розрахунок оптимального налаштування регулятора; - проводиться аналіз якості роботи системи при знайдених оптимальних налаштуваннях регулятора; - якщо система не

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 33   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

задовольняє поставленому завданню, обирають більш складний закон регулювання; - якщо і цей захід не дає задовільних результатів, то ускладнюють структуру САР (вводять додаткові контури регулювання, уточнюють характер впливу збурень і т.д.).

### 1.6.2 Вибір типу автоматичного регулятора

Завдання проектувальника полягає у виборі такого типу регулятора, який при мінімальній вартості і максимальній надійності забезпечував би задану якість регулювання. Для того, щоб вибрати тип регулятора і визначити його налаштування, необхідно знати: 1. Статичні і динамічні характеристики об'єкта керування. 2. Вимоги до якості процесу регулювання. 3. Показники якості регулювання для серійних регуляторів. 4. Характер збурень, діючих на процес регулювання. Вибір типу регулятора зазвичай починається з найпростіших двопозиційних регуляторів і може закінчуватися самоналагоджуваними мікропроцесорними регуляторами. В якості серійних передбачаються безперервні автоматичні регулятори, які реалізують закони управління П (пропорційний), І (інтегральний), ІІ (пропорційний та інтегральний одночасно) і ПІД (пропорційний, інтегральний і диференціальний одночасно). З ускладненням закону регулювання якість роботи системи поліпшується, але й вартість системи регулювання при цьому суттєво збільшується. Тип регулювання вибирається з урахуванням властивостей об'єкта і заданих параметрів перехідного процесу. До параметрів перехідного процесу можуть висуватися різні вимоги. В одних випадках оптимальним є процес з мінімальним значенням динамічної помилки, в інших - з мінімальним значенням часу регулювання і т.д. Зазвичай вибирають один з трьох типових перехідних процесів: граничний аперіодичний, з 20% перерегулюванням, з мінімальною квадратичною площею відхилення. Граничний аперіодичний процес характеризується відсутністю перерегулювання, мінімальним загальним часом регулювання і найменшим впливом регулятора на об'єкт (що викликає найбільше відхилення регульованої величини від заданого значення). Такий

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 34   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

перехідний процес використовується в якості оптимального при значній дії регулюючого впливу на інші технологічні величини об'єкта, щоб звести їх відхилення до мінімуму. Процес з 20% перерегулюванням характерний більшою величиною впливу регулятора і меншим відхиленням регульованої величини від заданого значення, і при цьому час регулювання дещо зростає. Цей процес вибирають в якості оптимального, коли допустимо невелике перерегулювання. Процес з мінімальною квадратичною площею відхилення має значне перерегулювання (до 40%), великий час регулювання і найменшу величину динамічної помилки. Орієнтовно характер дії регулятора визначається за відношенням часу запізнювання  $\tau$  до постійної часу об'єкту  $T$ .

При  $\frac{\tau}{T} < 0,2$  обирається позиційне регулювання.

При  $0,2 < \frac{\tau}{T} < 1,0$  обирається безперервне регулювання, або імпульсне.

При  $\frac{\tau}{T} > 1,0$  застосовують багатоконтурні системи регулювання та вживають заходи щодо компенсації впливу запізнювання. При цьому, слід пам'ятати про наступні особливості роботи безперервних автоматичних регуляторів. П-регулятор можна застосувати для роботи як на стійких, так і на нейтральних об'єктах, якщо допустима статична помилка регулювання. При роботі з об'єктами 1-го порядку П-регулятор формує аперіодичний перехідний процес, а при роботі з об'єктами 2-го порядку - або аперіодичний, або коливальний перехідний процес. Уведення І-складової до закону регулювання ускладнює динаміку перехідних процесів та підвищує порядок рівняння динаміки системи. При цьому можлива поява аперіодичних і коливальних процесів. Наявність І-складової гарантує відсутність статичної помилки регулювання. Регулятори цього типу застосовують для роботи тільки на стійких об'єктах, коли припустимі великі значення динамічної помилки і часу регулювання. ПІ-регулятори широко використовуються для роботи на стійких і нейтральних об'єктах, коли статична помилка регулювання має дорівнювати нулю.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 35   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

Показники якості перехідного процесу покращують, збільшуючи коефіцієнт підсилення регулятора  $k_p$ . Уведення Д-складової значно зменшує швидкість відхилення регульованої величини від заданого значення; якщо мається І-складова, це сприяє швидкому протіканню перехідного процесу при невеликому динамічному відхиленні. Алгоритм вибору автоматичного регулятора як для стійких, так і для нейтральних об'єктів наведено у додатку 3. Більш докладно питання вибору типу регулятора розглянуто в [3,5,6, 19], де наведені необхідні алгоритми і таблиці.

### 1.6.3 Визначення налаштувань автоматичного регулятора

Параметри налаштування регуляторів повинні бути обрані такими, щоб у замкненій системі автоматичного регулювання був забезпечений заданий запас стійкості; при цьому обраний показник якості регулювання повинен відповідати необхідному (або повинен мати екстремальне значення). Оскільки в теорії автоматичного регулювання запас стійкості може бути оцінений по-різному, а також використовуються різні показники якості регулювання, в інженерних розрахунках застосовуються декілька методів визначення оптимальних параметрів налаштування регуляторів.

### 1.6.4 Експериментальний метод визначення параметрів налаштування регулятора (метод Циглера - Нікольса)

Метод Циглера - Нікольса відноситься до емпіричних і базується на використанні даних, отриманих експериментально на реальному об'єкті. Експериментальний метод налаштування регуляторів не вимагає знання математичної моделі об'єкта. Однак передбачається, що система змонтована і може бути запущена в роботу. При цьому, також існує можливість зміни налаштування регулятора. Набули поширення два методи налаштування – метод незатухаючих коливань і метод загасаючих коливань. Метод незатухаючих коливань У працюючій системі вимикаються інтегральна і диференціальна складові регулятора ( $T_i = \infty$ ,  $T_d = 0$ ), тобто система переводиться у режим регулювання із П-законом регулювання. Шляхом

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 36   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

послідовного збільшення  $K_p$  з одночасною подачею невеликого стрибкоподібного сигналу завдання досягають виникнення в системі незатухаючих коливань з періодом  $T_{кр}$ . Це відповідає виведенню системи на межу коливальної стійкості. При виникненні даного режиму роботи фіксуються значення критичного коефіцієнта підсилення регулятора  $15 K_{кр}$  і періоду критичних коливань в системі  $T_{кр}$ . Також слід враховувати те, що при появі критичних коливань жодна змінна системи не повинна виходити на рівень обмеження.

### 1.6.5 Формульний метод визначення налаштувань регулятора

У практиці налагоджувальних робіт широко використовують наближені формули для визначення оптимальних параметрів налаштування регуляторів. Метод використовується для швидкої, наближеної оцінки 17 значень параметрів налаштування регулятора для трьох видів оптимальних типових процесів регулювання. Метод застосовують як для статичних об'єктів з самовирівнюванням (таблиця 1), так і для об'єктів без самовирівнювання (таблиця 2). Таблиця 3.1 - Формульний метод визначення налаштувань регулятора для статичних об'єктів з самовирівнюванням.

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 37   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

| Регулятор | Типовий процес регулювання  |  |  |
|-----------|---|--|--|
|           | Аперіодичний  | з 20%<br>перерегулюванням  | 3<br>мінімальною<br>квадратичною<br>площею<br>відхилення $J_{\min}$    |
| I         | $K_p = \frac{1}{4.5K_{oy}\tau}$   | $K_p = \frac{1}{1.7K_{oy}\tau}$                                      | $K_p = \frac{1}{1.7K_{oy}\tau}$  |
| II        | $K_p = \frac{0.3}{K_{oy}\tau/T}$  | $K_p = \frac{0.7}{K_{oy}\tau/T}$                                     | $K_p = \frac{0.9}{K_{oy}\tau/T}$                                       |
| III       | $K_p = \frac{0.6}{K_{oy}\tau/T}$<br>$T_u = 0.6T$                        | $K_p = \frac{0.7}{K_{oy}\tau/T}$<br>$T_u = 0.7T$                     | $K_p = \frac{1}{K_{oy}\tau/T}$<br>$T_u = T$                            |
| ПД        | $K_p = \frac{0.95}{K_{oy}\tau/T}$<br>$T_u = 2.4\tau$<br>$T_o = 0.4\tau$ | $K_p = \frac{1.2}{K_{oy}\tau/T}$<br>$T_u = 2\tau$<br>$T_o = 0.4\tau$ | $K_p = \frac{1.4}{K_{oy}\tau/T}$<br>$T_u = 1.3\tau$<br>$T_o = 0.5\tau$ |

### 1.6.6 Оптимальне налаштування регуляторів за номограмами

На відміну від формульного методу, метод розрахунку за номограмами дозволяє більш точно визначити налаштування регулятора, тому що враховує наявність нелінійної залежності між параметрами настроювання регулятора і величиною відношення  $T$ . Існують номограми для розрахунку налаштувань III- і ПД-регуляторів для об'єктів першого та другого порядків з запізненням/

### 1.7.7 Розрахунок налаштувань за частотними характеристиками об'єкта (забезпечення заданого запасу стійкості в системі)

Амплітудно-фазову характеристику (АФХ) об'єкта керування можна використовувати для розрахунку налаштувань регуляторів, де головним критерієм є забезпечення заданого запасу стійкості в системі. Розрахунок налаштувань регуляторів можна виконувати з використанням звичайних частотних характеристик об'єкту і регулятора або розширених частотних характеристик, коли необхідно задовольнити вимоги до заданого ступеня

затухання перехідного процесу. Як наголошувалося раніше, система автоматичного регулювання повинна мати достатній запас стійкості, і в межах запасу стійкості не менше заданого, якість регулювання повинна бути якнайкращою в сформульованому сенсі. Відповідно до цього розрахунок оптимального налаштування регулятора складається з наступних етапів: - визначення області в просторі параметрів налаштувань, в якій система має необхідний запас стійкості; - знаходження в цій області точки, що забезпечує якнайкращу якість регулювання. Запас стійкості системи може бути оцінений величиною  $m$  (ступінь коливальності системи) або величиною  $M$  (показник коливальності), які характеризують затухання коливальної складової перехідного процесу і зв'язані залежністю із ступенем затухання  $\Psi$ .

### 1.6.8 Аналіз нелінійних регуляторів

Нелінійні системи – це системи автоматичного керування, рух яких описується нелінійними диференціальними рівняннями. Нелінійність частіше за все зумовлена характеристиками елементів, що входять до складу системи, які за своєю фізичною природою є нелінійними. Наприклад, релейні елементи, в яких вихідна величина змінюється стрибками при неперервній зміні вхідної величини; обмеження напруги в усіх електронних підсилювачах, що визначається напругою живлення; зона нечутливості двигунів постійного струму, що визначається моментом тертя і т.п. Теоретичний аналіз нелінійних систем є більш складним через відсутність єдиних методів розв'язку нелінійних диференціальних рівнянь. Теорія автоматичного керування має кілька методів аналізу і синтезу нелінійних систем, як точних, так і приблизних. Із точних методів найбільше розповсюдження дістав метод фазового простору для систем першого, другого, а інколи й третього порядків. Із приблизних методів найбільш ефективним інженерним методом є метод гармонійної лінеаризації.

Фазовим простором називають простір, по осях координат якого відкладені змінні, що характеризують стан динамічної системи. Якщо рух системи описується диференціальним рівнянням  $n$ -го порядку, то стан фазового простору,

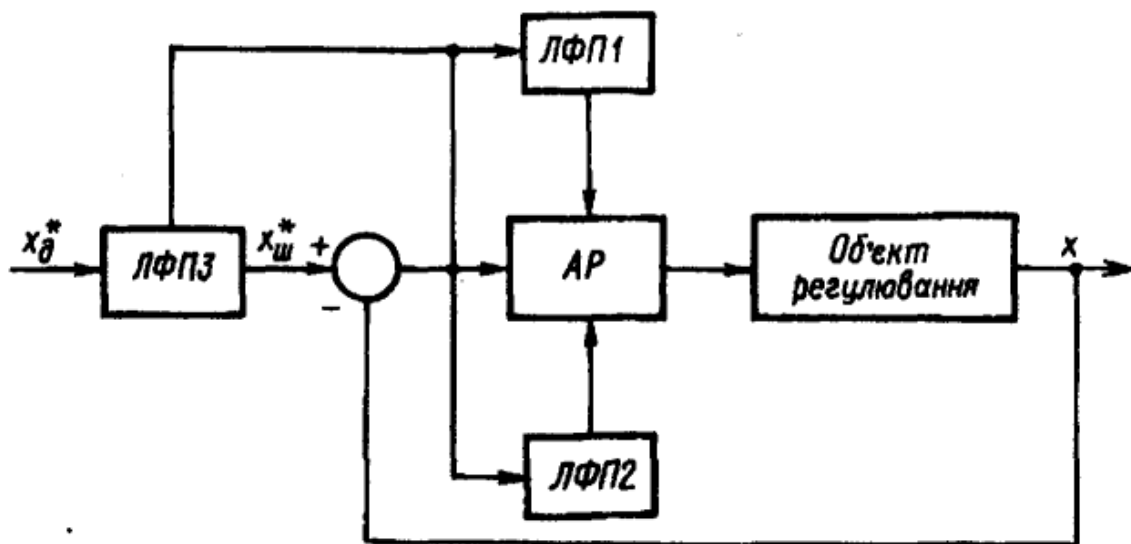
|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 39   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

по осях якого відкладені одна з координат системи і  $n-1$  її похідних. Точка, що характеризує стан системи, називається зображуючою точкою. При русі її координати змінюються і зображуюча точка буде описувати фазову траєкторію. Якщо рух системи описується диференціальним рівнянням другого порядку, то фазовий простір називають двомірним, тобто перетворюється у фазову площину.

Відомо [1], що до нелінійних регуляторів належать ті, в яких регулювальна дія на об'єкт є нелінійною функцією відхилення регульованої величини, причому ці регулятори можуть мати як статичні, так і динамічні нелінійності. Найбільш поширеними є логічні нелінійні регулятори (ЛНР), в яких нелінійні закони регулювання реалізуються за допомогою логічних функцій. Застосування ЛНР є ефективним алгоритмічним способом поліпшення якості функціонування АСР на об'єктах з несприятливими динамічними властивостями. У мікропроцесорних системах автоматизації (МСА) цей спосіб має суттєві переваги перед інформаційними способами, що домінують в апаратних системах автоматизації і пов'язані з використанням багатоконтурних АСР. По-перше, алгоритмічний спосіб є економічнішим, тому що не потребує додаткових інформаційних каналів. По-друге, він досить просто реалізується в МСА програмним шляхом.

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 40   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

Зауважимо також, що при застосуванні тільки стандартних законів регулювання в МСА фактично не використовуються можливості, які надають мікропроцесорні контролери (МПК) для поліпшення якості перехідних процесів. Загальний вигляд структурної схеми АСР з ЛНР наведено на рис. 1. У такій системі використовується один або кілька логічно-функціональних пристроїв (ЛФП), які залежно від розузгодження  $\Delta x$  або його похідної вмикають чи вимикають складові закону регулювання (ЛФП1), змінюють параметри настроювання регулятора (ЛФП2) або штучно формують розузгодження на деяких ділянках перехідного процесу (ЛФП3).



1. Структурна схема автоматичної системи регулювання з логічним нелінійним регулятором

де  $u$  — регульовальна дія;  $k_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  — параметри настроювання регулятора (ПНР): відповідно коефіцієнт передачі, час ізодрому та час випередження;  $\epsilon$  — логічна функція розузгодження ( $\epsilon=1$ , якщо  $|\Delta x| < \delta$ ;  $\epsilon=0$ , якщо  $|\Delta x| \geq \delta$ , Прикладом ЛНР з ЛФП2 є ПІ-регулятор фірми “Ассигау” (СІЛА) зі зміною параметра ка ПІ-складової:

$$u = k_n \Delta x + k_i \int \Delta x dt, \quad (2)$$

де  $k_n = a_1 \Delta x$ , якщо  $\Delta x_2 \leq \Delta x \leq \Delta x_1$ ,  $k_n = a_0$ , якщо  $\Delta x_2 > \Delta x > \Delta x_1$ ;  $k_i$  — параметр І-складової;

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 41   |

Модифікацією такого ЛНР є НР з подвійною П-складовою (П2ІД):

$$u = k_p \left( |\Delta x| \Delta x + \frac{1}{T_u} \int \Delta x dt + T_d \frac{d(\Delta x)}{dt} \right). \quad (3)$$

Для зменшення впливу Д-складової на перехідний процес її можна обчислити не за значенням розузгодження  $\Delta x$ , а безпосередньо за значенням регульованої величини  $x$ . І нарешті, прикладом ЛНР з ЛФПЗ є застосування штучного завдання, яке змінюється за таким алгоритмом [2]:

$$\begin{aligned} x_m^* &= x_a^*, \text{ якщо } \Delta x \frac{d(\Delta x)}{dt} > 0; \\ x_m^* &= x, \text{ якщо } \Delta x \frac{d(\Delta x)}{dt} = 0; \end{aligned} \quad (4)$$

$$x_m^* = x_m e^{-\lambda t}, \text{ якщо } \Delta x \frac{d(\Delta x)}{dt} < 0,$$

де  $x_m^*$ ,  $x_a^*$  — відповідно штучне та дійсне значення завдання;

$\Delta x = x_a^* - x$ ;  $x_m$  — значення змінної в момент відсікання дійсного завдання, тобто

$$\frac{d(\Delta x)}{dt} = 0;$$

при

Подальшим розвитком ЛНР є застосування нечітких регуляторів [3], які оперують з лінгвістичними значеннями змінних і основним елементом яких є база знань, що складається з множин “ситуація—дія”. Використовуючи ЛНР у МСА, слід розв’язати дві задачі: розробити програмно-конфігураційну схему (ПКС) реалізації такого регулятора та визначити його оптимальні ПНР.

Розглянемо можливості реалізації деяких ЛНР за допомогою найпоширеніших МПК — реміконтів малої канал ьності. На рис. 2 наведено ПКС реалізації ППІД- та П2Щ-регуляторів при використанні алгоритму аналогового

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 42   |

регулювання РАН. У разі застосування алгоритму імпульсного регулювання РІМ схеми реалізації ЛНР такі самі за винятком закону П2ІД, де треба враховувати наявність у передавальній функції часу повного переміщення виконавчого механізму.

### 1.6.9 Нейро-нечіткі регулятори в системах автоматизації технологічних процесів

Актуальність нейро-нечітких регуляторів збільшується з причин ускладнення і урізноманітнення задач, що розв'язуються, а саме об'єкти дослідження знаходяться в умовах невизначеності, нелінійності, зв'язності між змінними, які неможливо розглянути детально, наявності великих стохастичних збурень. Зазначимо наявні переваги нейро-нечітких регуляторів: ефективність при малому об'ємі інформації про об'єкт, спрощуваний математичний апарат, використання експертного досвіду, можливість корекції як моделі, так і її параметрів.

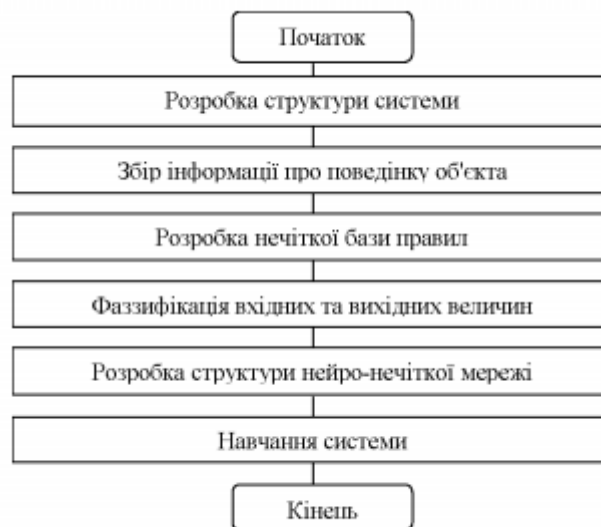


Рис.1. Блок-схема алгоритму побудови нейро-нечіткого регулятора

Включення в НМ нелінійної функції активації забезпечує реалізацію принципів управління об'єктів з нелійнностями, нейронні мережі ефективно використовуються в умовах невизначеності. Використовуваний в нейронних мережах математичний апарат є складним для використання на виробництві, тож об'єднання нейрорегуляторів, нечітких множин та знання експертів з

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 43   |

налагодження САУ, що забезпечують простоту, гнучкість та нелінійність дозволяють отримати доступний адаптивний метод для управління складними технологічними процесами. Зокрема, накопичені експертом знання про об'єкт управління можуть бути реалізовані за допомогою нечіткої логіки, але наявність лише апарату нечіткої логіки не може пам'ятати масив знань попередніх дій системи. Але це дозволяє використати нейронну мережу, що базується на даних про поведінку об'єкта, тому нейро чи нейро-нечітку мережу можна використовувати для пусконалагоджувальних робіт, ПІ-Д, адаптивних та інших регуляторів. З розглянутих робіт за цією темою були проаналізовані найпоширеніші моделі нечіткого логічного виводу такі як: Мамдані, Сугено, Ларсена, Цукамото, та наведені висновки перевірки побудови й специфіки систем різного типу: - методи, що застосовуються в нечіткій логіці для обробки й представлення знань забезпечують простоту формування, розуміння, відлагодження та модифікування створених моделей; - перетворення в нечітких регуляторах мають "лише" нелінійний характер; - характер нелінійних перетворень, напряму залежить від структури, параметрів налаштувань, кількості вхідних та вихідних сигналів, а також форми та відносного розташування функцій належності; - модель Сугено дуже ефективна для систем з апіорно відомими даними або ймовірнісним характером нелінійних перетворень між вхідними та вихідними сигналами; - моделі Мамдані, Ларсена і Цукамото ефективні в ситуаціях формування нелінійних перетворень між вхідними та вихідними сигналами системи на основі бажаних законів її функціонування у вигляді правил поведінки у всьому діапазоні можливих ситуацій.

#### **1.6.10 Роль нейронних мереж в системах керування**

Використання НМ має свою специфіку, що створює відповідні вимоги до архітектури НМ та алгоритму її навчання. У більшості випадків для розглянутих робіт НМ виступають в одному із наступних елементів:

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              | 44   |

1. Регуляторі [Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден.].
2. Моделі об'єкта керування [Ошибка! Источник ссылки не найден.].
3. Оптимальному фільтрі об'єкта керування [Ошибка! Источник ссылки не найден.].
4. Регуляторі сумісному з регулятором іншого типу: лінійному [Ошибка! Источник ссылки не найден.] і побудованому із використанням елементів нечіткої логіки [Ошибка! Источник ссылки не найден.].
5. Оптимізаторі регулятора іншого типу [Ошибка! Источник ссылки не найден.].
6. Класифікаторі або системі для розпізнавання образів [Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден.].

**Наслідуване нейрокерування.** Назва «наслідуване нейрокерування» (*Neurocontrol learning based on mimic, Controller Modeling, Supervised Learning Using an Existing Controller*) [Ошибка! Источник ссылки не найден.] охоплює системи нейрокерування, в яких нейроконтролер навчається на прикладах динаміки контролера, наприклад: ПД-регулятора. Після навчання НМ з точністю відтворює функції вхідного контролера. Наслідуване нейрокерування застосовується для первинного навчання НМ із використанням інших методів для наступного донавчання нейроконтролера.

**Інверсне нейрокерування.** У роботі [Ошибка! Источник ссылки не найден.] показані деякі приклади застосування схеми керування на основі інверсної моделі для лінійних систем з використанням НМ. При такому підході формування інверсної моделі ОК здійснюємо шляхом навчання НМ.

При узагальненому інверсному нейрокеруванні [Ошибка! Источник ссылки не найден.] передбачено навчання НМ в режимі *off-line*, на основі записаних траєкторій поведінки динамічного об'єкта. Для отримання таких

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 45   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

траєкторій на об'єкт керування в якості керуючого сигналу подаються деякі випадкові процеси. Значення керуючих сигналів та відповідних реакцій об'єкта записуються і на їх основі формуємо навчальну послідовність. У ході навчання НМ повинна відслідкувати та запам'ятати залежність керуючого сигналу  $u(k-1)$  від наступного значення реакції об'єкта керування  $y(k)$ , який знаходився перед цим у стані  $S(k-1)$ . Для навчання доцільне використання методу зворотного поширення похибки. Таку НМ назвемо «інверсним нейрорегулятором».

При керуванні об'єктом інверсний нейрорегулятор підключається як контролер, при чому розрізняються два способи: замкнутий і розімкнутий.

При замкнутому підключенні на вхід контролера подаємо поточне встановлене значення і вектор стану об'єкта керування, переданий через коло зворотного зв'язку:

$$x(k) = [r(k+1)S(k)]^T, \quad (0.1)$$

Завдяки стабілізуючому впливу зворотного зв'язку досягається достатньо висока якість керування. Відомі варіації загального інверсного керування, в яких, замість біжучого значення цільового значення, подається цільова траєкторія на  $L$  тактів вперед:  $[r(k+1)r(k+2)\dots r(k+L)]$ .

Перевагою узагальненого інверсного нейрокерування є навчання нейроконтролера в режимі *off-line* за відсутності точної математичної моделі об'єкта керування.

**Спеціалізоване інверсне нейрокерування [Ошибка! Источник ссылки не найден].** Цей вид нейрокерування дозволяє навчати інверсний нейроконтролер в режимі *on-line*, використовуючи похибку відхилення від встановленого значення  $e = r - y$ . НМ генерує керуючий сигнал  $u(k)$ , який

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 46   |

надає ОК положення  $y^{(k+1)}$ . Даліше визначаємо похибку роботи нейроконтролера. При цьому корекцію вагових коефіцієнтів НМ виконуємо за методом найшвидшого спуску. Перевагою такого підходу є висока якість керування у порівнянні з узагальненим методом інверсного нейрокерування. Суттєвим недоліком є необхідність знання точної математичної моделі об'єкта керування, яка необхідна для навчання нейроконтролера.

### **Метод зворотного пропускання похибки через прямий нейроемулятор.**

Такий підхід використовує дві НМ [Ошибка! Источник ссылки не найден.], одна з яких виконує функцію контролера, а друга – прямого нейроемулятора, що навчений моделювати динаміку керованого об'єкта. А під час навчання прямого нейроемулятора на виході об'єкта керування подається випадковий керуючий сигнал  $u$ , що змінює положення об'єкта керування  $y$ , та на основі таких значень створюємо навчальну вибірку. Навчання прямого нейроемулятора проводять у режимі *off-line*. Механізм зворотного поширення через прямий нейроемулятор реалізує локальну інверсну модель стану об'єкта керування в поточному просторі. Пройшовши через нейроемулятор, похибка поширюється через нейроконтролер, однак тепер її проходження супроводжується корекцією вагових коефіцієнтів нейроконтролера. Нейроемулятор при цьому виконує функції додаткових шарів НМ нейроконтролера, в яких ваги зв'язків не коректуються.

**Прогнозоване нейрокерування.** В роботі [Ошибка! Источник ссылки не найден.] розглянутий НМ регулятор контуру швидкості з прогнозуванням *NN Predictive Controller*. Метод навчання нейроконтролерів, при яких мінімізується відхилення поточного положення об'єкта керування від заданого для кожного такту, не завжди забезпечує найкращу інтегральну якість керування [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Якість роботи залежатиме від реалізації та вибору алгоритму мінімізації для прогнозування відповідного сигналу, отриманого від моделі ОК [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 47   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

Відомі прогноуючі моделі нейрокерування [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**], що мінімізують функціонал інтегральної похибки:

$$Q(k) = \sum_{i=L_1}^{L_2} e(k+i)^2 + \rho \sum_{i=0}^{L_2} (u(k+i) - u(k+i-1))^2, \quad (0.2)$$

де  $e$  - похибка виходу системи;

$\rho$  - вклад зміни керуючого сигналу в загальний функціонал  $Q$ .

Для прогнозування майбутньої поведінки системи та визначення похибки використаємо прямий нейроемулятор, який навчений так само як і у випадку зворотного поширення похибки через прямий нейроемулятор. Особливістю такого методу є відсутність навчаючого контролера. Його місце займає оптимізаційний модуль, що здатний працювати в режимі реального часу [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Недоліком системи прогноуючого модельного нейрокерування є обмежене використання його в системах із швидко змінюю динамікою, оскільки оптимальний алгоритм, що працює в режимі реального часу, протягом одного такту не зможе знайти найкращу стратегію керування.

**Методи нейрокерування на основі адаптивної критики, [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]** подібно до системи прогнозованого модельного керування, вибирають керуючий сигнал на основі оцінок майбутньої поведінки системи керування. Така система містить два нейронних модулі: нейроконтролер та модуль критики. Модуль критики використовує апроксимацію значення функції передачі. Популярність систем адаптивної критики пояснюється наявністю розвинутої теоретичної бази у вигляді теорії динамічного програмування Бельмана, а також властивістю подібності до оптимального або близького до оптимального керування.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 48   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

**Багатомодульне нейрокерування** характеризується структурою типу комітетів експертів [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Для багатомодульного підходу вихідна задача розділяється на окремі підзадачі, вирішення яких покладено на окремі модулі. Системи багатомодульного нейрокерування на основі локальних інверсних моделей складаються зі значної кількості лінійних нейроконтролерів і керуючого модуля. Кожний із лінійних контролерів є НМ прямого поширення сигналу, яка навчена керувати в межах локальної ділянки простору станів об'єкта.

Для формування нейроконтролера можна використовувати різні методи [Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

- узагальнене інверсне нейрокерування,
- спеціалізоване інверсне нейрокерування,
- метод зворотного пропускання похибки через нейроеммулятор.

Недоліком такого методу для проведення навчання нейроконтролера є потреба великого об'єму навчальних прикладів, розподілених по простору станів керуючого об'єкта.

Метод багатомодульного нейрокерування на основі пар прямих та інверсних моделей [Ошибка! Источник ссылки не найден.], відрізняється від методу нейрокерування на основі локальних інверсних моделей, в яких поведінка системи формується при навчанні й під час керування не коректується. Такий метод передбачає коректування поведінки нейронних модулів на кожному такті нейрокерування. Істотним недоліком системи багатомодульного нейрокерування є непрозора процедура розділення навчальної вибірки на вибірки для навчання прямих та інверсних нейроеммуляторів різних модулів.

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              | 49   |

**Гібридне нейрокерування** ґрунтується на використанні сумісної роботи НМ із звичайними контролерами, ПІД-регуляторами або іншими типами контролерів. Гібридне нейро-ПІД керування [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] дозволяє проводити самоналаштування ПІД-регулятора в режимі *on-line* із використанням НМ. Керування із використання ПІД-контролера полягає у мінімізації помилки зворотного зв'язку. Сигнал керування, що виробляється контролером, являє собою суму пропорційної, інтегральної та диференціальної складових.

Недоліком є проблематичне оцінювання стійкості отриманого нелінійного контролера. Для такого способу є необхідність у аналітичній математичній моделі об'єкта керування.

**Методи гібридного паралельного нейрокерування.** У роботі [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] передбачається паралельне використання нейроконтролерів зі звичайним контролером для керування динамічними об'єктами. При цьому нейроконтролер та звичайний контролер, в ролі якого виступає, наприклад, ПІД-контролер, отримують однакові значення установки.

Гібридне паралельне нейрокерування є компромісним рішенням для впровадження нейрокерування та переходу від звичайних контролерів до НМ.

**Допоміжне нейрокерування** актуальне, коли необхідно вирішити додаткові задачі, що виникають в процесі керування динамічними об'єктами. Якість керування контролера можна підвищити і зробити траєкторію руху об'єкта більш гладкою при використанні фільтрування зовнішніх збурень [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Спочатку така схема була запропонована Б. Видроу для використання сумісно з нейроконтролерами, що навчені за принципом загального нейрокерування. Цей підхід застосований до об'єкту керування зі зворотною динамікою при наявності адекватної

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 50   |

математичної або імітаційної моделі об'єкта керування для навчання прямого та інверсного нейроемулятора.

**Нейрокерування з еталонною моделлю [Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден.]** – варіант нейрокерування згідно методу зворотного поширення помилки через прямий нейроемулятор з додатковим введенням у схему еталонної моделі. Для зменшення невизначеності у процесі керування між об'єктом та нейроконтролером вводиться еталонна модель, як правило, лінійна динамічна система невисокого порядку, яку можна легко перевірити аналітичними методами на стійкість [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Еталонна модель підбирається таким чином, щоб генерована нею опорна траєкторія на кожному такті була досяжна для об'єкта керування. К. Кришнакумаром та ін. [Ошибка! Источник ссылки не найден.] запропоновано оригінальну модифікацію нейрокерування з адаптивною еталонною моделлю для створення аварійно-стійкої системи керування літальним апаратом. Еталонна модель донавчається в режимі *off-line* шляхом мінімізації середньоквадратичної похибки відхиленням траєкторії руху об'єкта керування від цільової траєкторії. Таку адаптивну систему можна розглядати як звичайний нейроконтролер типу адаптивної критики, що керує об'єднаною динамічною системою «ПД-контролер + об'єкт керування».

### 1.6.11 Переваги нейромережевого регулятора

В даний час проблема проектування адаптивних систем автоматичного управління динамічними об'єктами характеризується переходом від класичних парадигм до парадигм інтелектуального управління, зокрема використання нейромережевих структур. Застосування нейромережевих структур для реалізації адаптивних систем управління складними динамічними об'єктами має ряд переваг, зокрема: нейронні мережі є ідеальним засобом моделювання будь-яких нелінійних об'єктів управління; внутрішня адаптивність завдяки можливості самонавчання; високу швидкість та паралельну обробку інформації, що є природним при побудові багатомірних систем керування. Є

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 51   |

два принципово відмінних підходи до побудови адаптивних нейромережових систем управління, а саме: пряме використання нейромережевої структури в якості регулятора (інверсна модель) та непряме, де нейромережа використовується в якості моделі об'єкта (пряма модель) як засіб адаптації [1]. Другий підхід можна вважати класичним і він є більш трудомістким та потребує більше часу на процедури адаптації по відношенню до першого. Перший підхід є більш перспективним по швидкодії, але потребує для цього відповідних програмних та технічних засобів.

Основною перевагою використання нейроконтролерів для управління є те, що для синтезу структури та параметрів нейроконтролера не потрібні кількісні оцінки параметрів об'єкта, достатньо оперувати координатами, які характеризують стан об'єкта. Основний напрямок дослідження який визначився у останні роки це ідентифікація та управління електроприводом за характеристиками таких координат як напруга, ток та частоти живлення. Цю складну задачу можна вирішити тільки із використанням нейронних мереж.

### 1.6.12. Розробка структури нейрорегулятора та методи його навчання

#### Основні елементи

Нейронна мережа являє собою структуру взаємопов'язаних клітинних автоматів, що складається з наступних основних елементів:

Нейрон - елемент, що перетворює вхідний сигнал по функції:

$$f(x) = \frac{x}{c + |x|} + c_{ж}$$

де  $x$  - вхідний сигнал,  $c$  - параметр, що визначає крутизну графіка порогової функції, а  $c_{ж}$  - параметр спонтанної активності нейрона.

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              | 52   |

Суматор - элемент, який здійснює підсумовування сигналів надходять на його вхід:

$$f = \sum_{i=1}^N x_i$$

Синапс - элемент, який здійснює лінійну передачу сигналу:

$$f(x) = w \cdot x$$

де  $w$  - «вага» відповідного синапсу.

### Структура нейронної мережі

Мережа складається з нейронів, з'єднаних синапсами через суматори за наступною схемою:

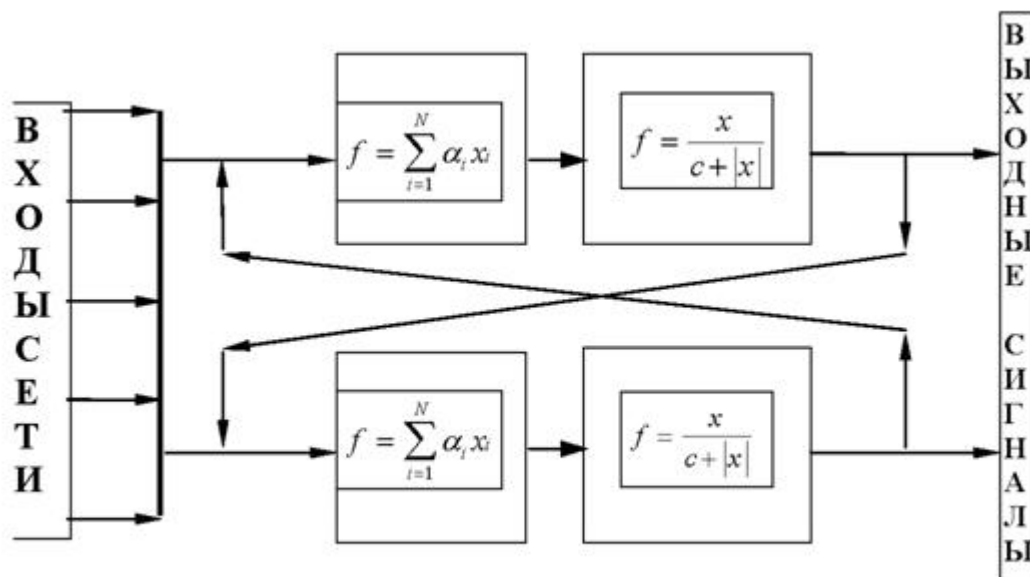


Рис.1 Структура нейронной сети

## Структура нейронної мережі

### Пряме функціонування мережі

Мережа функціонує дискретно за часом (тактами). Тоді синапси можна розділити на «синапси зв'язку», які передають сигнали в даному такті, і на «синапси пам'яті», які передають сигнал з виходу нейрона на його вхід на наступному такті функціонування. Сигнали, що виникають в процесі роботи мережі поділяються на прямі (використовувані при видачі результату мережею) і подвійні (використовуються при навчанні) і можуть бути задані наступними формулами:

Для і-го нейрона на такті часу T:

$$A_{i1} = m_{i0} + x_{i1}$$

$$A_{iT} = a_{Mi} \cdot A_{iT-1} + \sum_j a_{ji} \cdot f_{jT-1}$$

$$f_{iT} = \frac{A_{iT}}{a_{i1} + |A_{iT}|} + a_{i2}$$

$$f_{iT, A} = \frac{a_{i1}}{\left( a_{i1} + |A_{iT}| \right)^2}$$

де  $m_{i0}$  - параметр ініціації мережі,  $x_{i1}$  - вхідні сигнали мережі, що надходять на даний нейрон,  $f_{iT}$  - вихідний сигнал нейрона на такті часу T,  $A_{i1}$  - вхідний параметр і-го нейрона на першому такті функціонування мережі,  $A_{iT}$  - вхідний сигнал і-го нейрона на такті часу T,  $a_{ji}$  - вага синапсу від j-го нейрона до і-му,  $a_{Mi}$  - вага синапу пам'яті і-го нейрона,  $a_{i1}$  - параметр нейрона і  $a_{i2}$  - параметр спонтанної активності нейрона,  $A_{iT-1}$  - вхідний сигнал і-го нейрона на такті T-1,  $f_{jT-1}$  - вихідний сигнал j-го нейрона на такті T-1 і  $f_{iT, A}$  - похідна і-го нейрона по його вхідного сигналу.

Для синапсу зв'язку від і-го нейрона до j-му:

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 54   |

$$\sigma_{jT} = f_{iT}$$

$$s_{jT} = \alpha_{ij} \cdot f_{iT}$$

де  $s_{jT}$  - вхідний сигнал синапсу від  $i$ -го нейрона до  $j$ -му,  $f_{iT}$  - вихідний сигнал  $i$ -го нейрона,  $\alpha_{ij}$  - вага даного синапсу,  $s_{ijT}$  - вихідний сигнал синапсу на такті часу  $T$ .

Для синапсу пам'яті  $i$ -го нейрона:

$$m_{iT} = \alpha_{mi} \cdot A_{iT}$$

### Навчання мережі

У цьому завданню навчання відбуватиметься по «коннекціоністской» моделі, тобто за рахунок підстроювання ваг синапсів.

Суть навчання полягає в мінімізації функції помилки  $H(W)$ , де  $W$ - карта ваг синапсів. Для вирішення завдання мінімізації необхідно обчислення градієнта функції по підстроюваним параметрам:

$$\overline{grad(H)} = \frac{\partial H}{\partial w}$$

### Зворотне функціонування

Розрахунок градієнта ведеться при зворотному відліку тактів часу за такими формулами:

Для синапсу зв'язку:

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 55   |

$$\mu_{sj}^{\ominus} = 0$$

$$\mu_{jt} = \mu_{jt+1} \cdot f_{jt+1, A} + \mu_{jt+1} \cdot \alpha_{jm}(T=\ominus-1, \ominus-2, \dots)$$

Для синапсу пам'яті:

$$\mu_{m\ominus} = 0$$

$$\mu_{mt} = \mu_{mt+1} \cdot f_{it+1, A} + \mu_{mt+1} \cdot \alpha_{m\ominus}(T=\ominus-1, \ominus-2, \dots)$$

Остаточно після проходження  $q$  тактів часу приватні похідні по вагах синапсів матимуть вигляд для синапсів пам'яті і для синапсів зв'язку відповідно:

$$\frac{\partial H}{\partial \alpha_{mj}} = \sum_{T=\ominus-1}^1 \mu_{mjT} \cdot A_{iT}$$

$$\frac{\partial H}{\partial \alpha_{ij}} = \sum_{T=\ominus-1}^1 \mu_{ijT} \cdot f_{iT}$$

Нейронні мережі, як і нечітка логіка, використовуються в ПД регуляторах двома шляхами: для побудови самого регулятора і для побудови блоку настройки його коефіцієнтів. Особливістю нейронної мережі є здатність до «навчання», що дозволяє передати нейронній мережі досвід експерта. Регулятор з нейронною мережею схожий на регулятор з табличним управлінням, однак відрізняється спеціальними методами настройки («навчання»), розробленими для нейронних мереж, і методами інтерполяції даних.

На відміну від нечіткого регулятора, де експерт повинен сформулювати правила настройки в лінгвістичних змінних, при використанні нейронної мережі від експерта не потрібно формулювання правил - досить, щоб він кілька разів сам налаштував регулятор в процесі «навчання» нейронної мережі.

Нейронні мережі були запропоновані в 1943 році МакКаллоком і Питтсом як результат вивчення нервової діяльності і біологічних нейронів. Штучний

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 56   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

нейрон являє собою функціональний блок з одним виходом  $y$  і  $n$  входами  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , який реалізує в загальному випадку нелінійне перетворення де  $w_i$  - вагові коефіцієнти (параметри) при вхідних змінних  $x_i$ ;  $b$  - постійний зсув;  $F(\bullet)$  - функція активації нейрона. Функція активації може мати, наприклад, такий вигляд:  $F(z) = 1 / (1 + \exp(-az))$  - сигмоїдальна функція з деяким параметром  $a$ . Нейронна мережа (рис. 32) складається з безлічі пов'язаних між собою нейронів, кількість зв'язків може становити тисячі. Завдяки нелінійності функцій активації і великій кількості параметрів, що коефіцієнтів (в роботі [21] використано 35 нейронів у вхідному шарі і 25 - в вихідному, при цьому кількість коефіцієнтів склало 1850) нейронна мережа може виконувати досить точно нелінійне відображення множини вхідних сигналів під безліч вихідних.

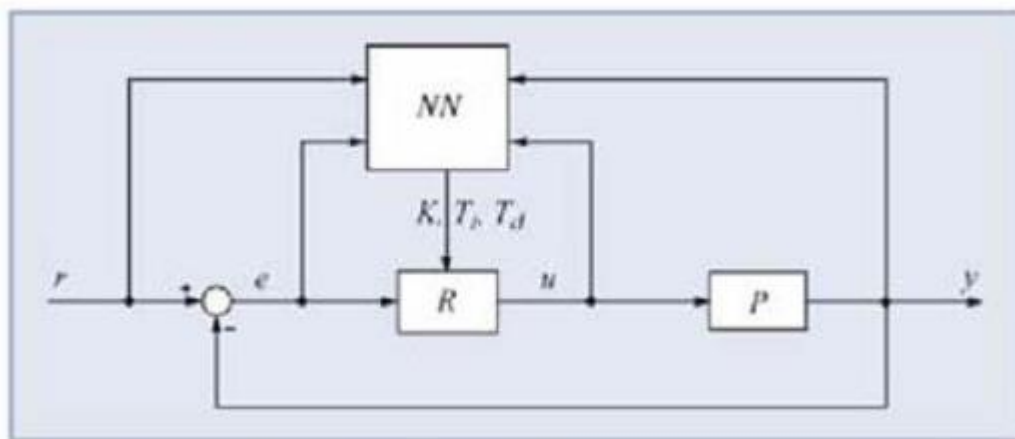


Рис. 33 Структура ПІД-регулятора на основі нейронної мережі.

Типова структура системи автоматичного регулювання з ПІД регулятором і нейронною мережею в якості блоку автонастройки показана на рис. 33 [21, 22]. Нейронна мережа  $NN$  в даній структурі відіграє роль функціонального перетворювача, який для кожного набору сигналів  $r, e, u, y$  виробляє коефіцієнти ПІД регулятора  $K, T_i, T_d$ .

Найскладнішою частиною в проектуванні регуляторів з нейронною мережею є процедура «навчання» мережі.

«Навчання» полягає в ідентифікації невідомих параметрів нейронів  $w_i$ ,  $b$  і  $a$ . Для «навчання» нейронної мережі зазвичай використовують методи градієнтного пошуку мінімуму критеріальної функції  $\varepsilon = (u^* - u)^2$ , що залежить від параметрів нейронів. Процес пошуку є ітераційним, на кожній ітерації знаходять всі коефіцієнти мережі, спочатку для вихідного шару нейронів, потім попереднього і так до першого шару (метод зворотного поширення помилки) [17]. Використовуються також інші методи пошуку мінімуму, в тому числі генетичні алгоритми, метод моделювання відпалу, метод найменших квадратів.

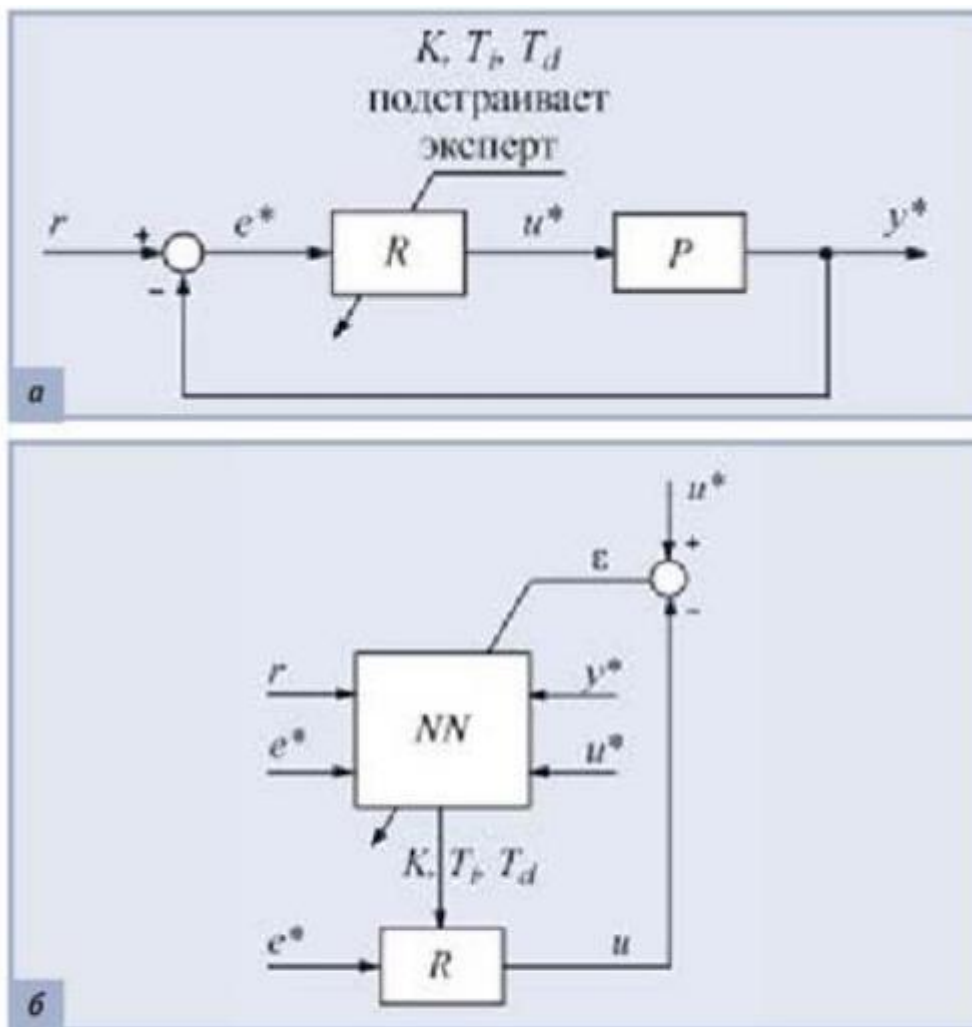


Рис. 34. Схема «обучения» нейронной сети в блоке автонастройки:  
**а** — система управления, подстраиваемая экспертом; **б** — нейронная сеть, «обучаемая» с помощью сигналов, которые получены в представленной на рис. 34 а системе

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

Процес «навчання» нейронної мережі виглядає наступним чином (рис. 34). Експертів надають можливість підлаштовувати параметри регулятора  $K$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  в замкнутій системі автоматичного регулювання при різних вхідних впливах  $r(t)$ . Передбачається, що експерт вміє це робити з достатньою для практики якістю. Тимчасові діаграми (осцилограми) змінних  $r^*$ ,  $e^*$ ,  $u^*$ ,  $y^*$ , отримані в подстрайваної експертом системі (рис. 34 а), записуються в архів і потім подаються на нейронну мережу, підключену до ПІД регулятора (рис. 34 б) .

Нейронна мережа налаштовується таким чином, щоб мінімізувати похибку

$\varepsilon = (u^* - u)^2$  між сигналом  $u^*$ , отриманим за участю експерта, і сигналом  $u$ , отриманим в процесі «навчання» нейронної мережі. Після виконання процедури «навчання» параметри нейронної мережі заносяться в блок автонастройки. Відповідно до теорії нейронних мереж «навчена» нейронна мережа повинна вести себе так само, як і експерт, причому навіть при тих вхідних впливах, які не були включені в набір сигналів, використаних при «навчанні».

Тривалість процесу «навчання» є основною перешкодою на шляху широкого використання методів нейронних мереж в ПІД регуляторах [16]. Іншими недоліками нейронних мереж є неможливість передбачення похибки регулювання для впливів, які не входили в набір навчальних сигналів, а також відсутність критеріїв вибору кількості нейронів в мережі, тривалості «навчання», діапазону і кількості навчальних впливів. Ні в одній з публікацій не досліджували робастної або запас стійкості регулятора.

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 59   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

## Розділ 2 – Загальносистемні рішення

### 2.1. Розробка підсистеми управління технологічним процесом (комплексом)

#### Схема автоматизації

Схема автоматизації — основний технічний документ, схема, що визначає структуру (ієрархію) пунктів контролю та керування, функції систем контролю і керування об'єкта, що автоматизується, оснащення систем автоматизації технічними засобами: приладами та засобами автоматизації, щитами, пультами, обчислювальною технікою тощо.

Схеми автоматизації розробляють на всіх стадіях проектування. Вони використовуються для обґрунтування основних проектних рішень при експертизі і затвердженні проекту (робочого проекту), для підготовки та виконання робіт з монтажу та налагодження систем автоматизації, навчання операторів-технологів роботі на автоматизованій установці.

Схеми автоматизації розробляються після вивчення технології виробництва (або технології інженерної системи), особливостей його функціонування, дій виробничого персоналу по запуску, зупинці технологічного процесу, підтримці необхідного режиму та роботи в аварійних ситуаціях, правил безпечної експлуатації та охорони праці конкретного виробництва (устаткування); завдання на автоматизацію об'єкта, досвіду експлуатації систем автоматизації на аналогічних діючих об'єктах

Функціональна схема автоматизації є основним проектним документом, який визначає структуру і рівень автоматизації технологічного процесу об'єкта.

|              |      |                |        |      | Кваліфікаційна робота   |              |      |         |
|--------------|------|----------------|--------|------|---|--------------|------|---------|
| Змн.         | Арк. | № докум.       | Підпис | Дата |   |              |      |         |
| Студент      |      | Скриник Д.І.   |        |      | Інтелектуальне керування технологічними процесами брагоректифікації | Літ.         | Арк. | Акрушів |
| Керівник     |      | Кишенько В.Д.  |        |      |   |              |      |         |
| Зав.кафедри. |      | Смітюх Я.В.    |        |      |   | НУХТ АІ-2-1М |      |         |
| Секретар ДЕК |      | Проскурка Є.С. |        |      |   |              |      |         |
|              |      |                |        |      | 60  |              |      |         |

На функціональній схемі за допомогою умовних графічних позначень вказують технологічне обладнання, комунікації, органи керування, прилади і засоби автоматизації та ін. із зазначенням зв'язків між ними, таблиці умовних позначень і необхідних пояснень.

Функціональна схема автоматизації графічно поділяється на дві зони. У верхній частині креслення зображується технологічна схема, а в нижній креслять умовні графічні позначення, які умовно зображують: встановлення місцевих приладів, щитів, пультів, пунктів контролю та

керування, керуючих машини тощо Графічні умовні зображення приладів і засобів автоматизації, їх розміри і буквені позначення повинні відповідати стандарту ГОСТ 21.404-85.

Розроблена в даному дипломному проекті система автоматизації повинна забезпечити в автоматичному режимі контроль і сигналізацію основних параметрів технологічного процесу випічки хліба.

Для реалізації поставленої мети система автоматизації базується на використанні мікропроцесорного контролера Modicon M340 який являє собою проектно-компонований виріб, для якого кількість та склад модулів вибирається залежно від поставленої задачі керування і необхідних характеристик вхідних і вихідних сигналів. Цей МПК має достатньо велику швидкодію та надійність. Його застосування дає змогу реалізовувати досить складні алгоритми логічно-програмного регулювання, вести оперативний контроль та записувати історію процесу. Наявність контролера в системі автоматизації дозволяє перейти до створення розподіленої структури управління, яка має ряд переваг перед АСУТП першого покоління. У порівнянні з останніми, розподілені системи дозволяють реалізувати великий діапазон функцій, мають високі показники надійності та живучості, зручні у використанні, експлуатації, нарощуванні та модернізації.

Для одержання харчового ректифікованого спирту безпосередньо з бражки використовують брагоректифікаційні установки. Основним завданням БРУ є

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              | 61   |

максимальне виділення спирту з бражки, звільнення його від супровідних домішок і одержання спирту стандартної концентрації і відповідної якості.

Автоматизація процесів управління БРУ сприяє більш швидкому реагуванню на зміни параметрів процесу і являє собою більш ефективну форму управління установкою. Згідно регламенту під час виробництва здійснюють регулювання і контроль таких параметрів: температура, тиск, витрата та рівень.

### Температура

В БРУ відбувається регулювання температури підігрітої води після дефлегматора. Даний контур складається з термометра опору Pt100, який передає сигнал на нормуючий перетворювач Siemens Sitrans ТК-Н (1а), вихідний сигнал якого 4..20 мА поступає на МПК, на виході з МПК сигнал поступає на електро-пневмо перетворювач ЕП-1211 (1б), а з нього пневматичний сигнал на пневмоклапан Метран 8560 (1в) який регулює подачу холодної води в дефлегматор для конденсації парів спирту

Аналогічний контур регулювання температури спирту на виході з охолоджувача (2а-2в).

Також проводиться вимірювання температури у всіх колонах термометрами (3а,4а,9а). Це значення іде як поправочний коефіцієнт для регулювання витратою пари, щоб підтримувати задану міцність парів спирту.

### Тиск

Перетворювачі сигналу тиску Siemens Sitrans P DS ZD (3б,4б, 5а,6а,7а) вимірюють тиск в нижній та верхній частині колон, вихідний сигнал якого 4..20 мА поступає на МПК, на виході з МПК сигнал поступає на електро-пневмо перетворювач ЕП-1211 (3в,4в,5б-7б), а з нього пневматичний сигнал на пневмоклапан Метран 8560 (3г,4г,5в-7в), який відповідає за подачу пари в колону. Аналогічні контури регулювання тиску в нижній частині епіюраційної та спиртової колони. Тиск контролюється в трубопроводі подачі пари і

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 62   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

складається з наступних пристроїв: перетворювач сигналу тиску Siemens Sitrans P DSIII(8a) вимірюють тиск в трубопроводі подачі пари, вихідний сигнал якого 4..20 мА поступає на МПК та ЕОМ.

### Витрата

У схемі автоматизації задля економічної звітності введені контури контролю витрати, у якості первинного перетворювача в якому обраний Siemens Sitrans FM MAGG 2100 (8a,10a), сигнал з якого надходить на вторинний перетворювач Sitrans FM MAG 6000 (8б,10б) і далі сигнал 4-20мА надходить на МПК і ЕОМ, де архівується у відповідному порядку.

Витрата регулюється в наступних місцях: контур регулювання витрати бражки в бражну колону, контур подачі спирту на охолоджувач після ректифікаційної колони. Сигнал із МПК через модуль аналогових виходів поступає на електро-пневно перетворювач ЕП-1211 (8в,10в), а з нього пневматичний сигнал на пневмоклапан Метран 8560 (8г,10г), який змінює подачу компоненту.

### Специфікація приладів та засобів автоматизації

| По з.                      | Найменування та технічна характеристика засобу  | Тип, марка, позначення документа, листа опитування | Код обладнання, виробу, матеріалу | Завод-виготовлювач/виробник | Дин іця вим іру | Ільк ість | М аса одини ці, кг |
|----------------------------|---|--|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------|--------------------|
| 1                          | 2   | 3  | 4                                 | 5                           | 6               | 7         | 8                  |
| 1а,<br>2а,<br>3а,4а.<br>9а | Вимірювальний перетворювач температури із ПВП у вигляді термопари<br><br>Вихідний сигнал: 4...20 мА<br><br>Діапазон вимірювання - | SITRANS TK/TK-H                                    | -                                 | Siemens, Німеччина          | т.              |           | -                  |

|   |   |                        |   |                       |    |  |   |
|---|---|------------------------|---|-----------------------|----|--|---|
|   | 50...180 °С,<br><br>Клас точності-0,25.   |                        |   |                       |    |  |   |
| 3б,<br>4б,<br>5а,6а,7а                              | Тензометричний<br>перетворювач тиску<br><br>Клас точності – 0,1.<br><br>Вихідний сигнал(мА; В):<br>4-20 мА<br><br>Діапазон вимірювання 5<br>КПа...6 МПа,  | Sitrans P<br>ZD        | - | Siemens,<br>Німеччина | т. |  | - |
| 8а,<br>10а  | ПВП вимірювання<br>витрати індукційного<br>витратоміра<br><br>Температура середовища<br>-40 .. 180 ° С<br><br>Тиск до 40 бар<br><br>Клас точності - 0,5   | Sitrans FM<br>MAG 2110 | - | Siemens,<br>Німеччина | т. |  | - |
| 8б,<br>10б  | Індукційний витратомір<br><br>Діаметр Ду 15 .. 2000 мм<br><br>Температура середовища<br>-40 .. 180 ° С<br><br>Тиск до 40 бар<br><br>Вихідний сигнал, мА –<br>4...20;<br><br>Клас точності - 0,5 | Sitrans FM<br>MAG 6000 | - | Siemens,<br>Німеччина | т. |  | - |
| 1б,<br>2б,<br>3в,4в,<br>5б,<br>6б,<br>7б,<br>8в,10в | Елект.-пневмат.<br>перетворювач.<br><br>Вх.сиг. 4-20 мА<br><br>Вих. сиг. 20-100 кПа.<br><br>Номінальний тиск<br>повітря живлення: 140 КПа   | ЭП-1211                | - | «Промп<br>рибор       | т. |  | - |

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              | 64   |

|   |  |                 |   |                       |    |   |
|---|--|-----------------|---|-----------------------|----|---|
| 1в,<br>2в,<br>3г,4г,<br>5в,<br>6в,<br>7в,<br>8г,10г | <p>Пневматичний клапан.</p> <p>Вх. Сиг: 20-100 кПа.</p> <p>Вих. сиг: 0-100% ХРО</p> <p>Діаметр умовного проходу: 76,2 ... 304,8 мм.</p> <p>Тиск умовний: 2 ... 5 МПа</p> | Метран<br>8560  | - | Метран                | т. | - |
| PD<br>S1  | <p>Перетворювач частоти,<br/>вх напруга 3ф. 400В,<br/>потужність 15 кВт</p>  | ATV<br>31HD15N4 | - | Schneider<br>Electric | т. | - |

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              | 65   |

## 2.2. Опис функцій, що інтелектуалізуються

Враховуючи, що розробляється ІСК є надбудовою до типової АСУ ТП або АСУ виробництва за принципом «не руйнування нижнього рівня» відповідно до IPDI, перелік функцій та задач ІСК виконується для автоматизованої та інтелектуальної складової.

Функції ІСК розробляються на основі цілі створення системи шляхом декомпозиції. Далі кожна функція може бути поділена на низку задач та підзадач. Рекомендується розробити спочатку функції для АСУ ТП, а потім переходити до функцій ІСК.

Таблиця 2.2.1 Перелік функцій та задач АСУ ТП та ІСК

| Позначення | Найменування функції/задачі  | Закон/алгоритм | Період | Примітка     |
|------------|--|----------------|--------|--------------|
| ТС1        | Регулятор температури підігрітої води після дефлегматора бражної колони    | MPC-алгоритм   | 1 с    | У складі ТС1 |
| ТС2        | Регулятор температури спирту на виході охолоджувача ректифікаційної колони | MPC-алгоритм   | 1 с    | У складі ТС2 |
| ТС3        | Температура на контрольній тарілці бражної колони                          | MPC-алгоритм   | 1 с    | У складі ТС3 |
| РТ4        | Тиск в епюраційній колоні  | MPC-алгоритм   | 1 с    | У складі РТ4 |
| РТ5        | Тиск в ректифікаційній колоні  | MPC-алгоритм   | 1 с    | У складі РТ5 |
| РТ6        | Тиск в ректифікаційній колоні (верхня частина)                             | MPC-алгоритм   | 1 с    | У складі РТ6 |
| FC7        | Витрата  | PI             | 500 мс |              |

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 66   |

|     |   |    |        |  |
|-----|---|----|--------|--|
|     | бражки в бражну колону                                  |    |        |  |
| FC8 | Витрата спирту охолоджувач після ректифікаційної колони | PI | 500 мс |  |

Таблиця 2.2.2 Перелік функцій та задач АСУ виробництва та ІСК

| № по порядку | Найменування змінної  | Джерело | ІСК |   |         | Примітка          |
|--------------|---|---------|-----|---|---------|-------------------|
|              |   |         | Y   | I | C       |                   |
| 1            | Температура води на виході із дефлегматора бражної колони           | БРУ     | N   | I | 1 00с   | Нечіткий алгоритм |
| 2            | Температура спирту на виході із охолоджувача ректифікаційної колони | БРУ     | N   | I | 1 00с   | Нечіткий алгоритм |
| 3            | Температура на контрольній тарілці бражної колони                   | БРУ     | N   | I | 1 00с   | Нечіткий алгоритм |
| 4            | Температура на контрольній тарілці епюраційної колони               | БРУ     | N   | I | 1 00с   | Нечіткий алгоритм |
| 5            | Температура на контрольній тарілці ректифікаційної колони           | БРУ     | N   | I | 1 00с   | Нечіткий алгоритм |
| 6            | Тиск в верхній частині епюраційної колони                           | БРУ     | N   | I | 1 00с   | Нечіткий алгоритм |
| 7            | Тиск в верхній частині ректифікаційної колони                       | БРУ     | N   | I | 1 00с   | Нечіткий алгоритм |
| 8            | Витрата бражки в бражну колону                                      | БРУ     | N   | I | 1 00с   | Нечіткий алгоритм |
| 9            | Витрата спирту в охолоджувач після ректифікаційної колони           | БРУ     | N   | I | 1 00с   | Нечіткий алгоритм |
| 10           | ВМ подача пару в ректиф. колону                                     | БРУ     | UT  | O | 1 0 хв. | Нечіткий алгоритм |
| 11           | ВМ подача пару  | БРУ     | UT  | O | 1 0 хв. | Нечіткий          |

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 67   |

|    |                                      |     |         |            |                          |  |
|----|--------------------------------------|-----|---------|------------|--------------------------|--|
|    | в бражну колону                      |     |         |            | алгоритм                 |  |
| 12 | ВМ подача пару в епюр. колону        | БРУ | О<br>UT | 1<br>0 хв. | Нечіт<br>кий<br>алгоритм |  |
| 13 | ВМ подача бражки                     | БРУ | О<br>UT | 1<br>0 хв. | Нечіт<br>кий<br>алгоритм |  |
| 14 | ВМ подача хол. води в ректиф. колону | БРУ | О<br>UT | 1<br>0 хв. | Нечіт<br>кий<br>алгоритм |  |
| 15 | ВМ подача хол. води в епюр. колону   | БРУ | О<br>UT | 1<br>0 хв. | Нечіт<br>кий<br>алгоритм |  |
| 16 | ВМ подача хол. води в охолоджувач    | БРУ | О<br>UT | 1<br>0 хв. | Нечіт<br>кий<br>алгоритм |  |
| 17 | ВМ подача хол. води в охолоджувач    | БРУ | О<br>UT | 1<br>0 хв. | Нечіт<br>кий<br>алгоритм |  |
| 18 | ВМ подача хол. води в дефлегматор    | БРУ | О<br>UT | 1<br>0 хв. | Нечіт<br>кий<br>алгоритм |  |
| 19 | ВМ подача пару в ректиф. колону      | БРУ | О<br>UT | 1<br>0 хв. | Нечіт<br>кий<br>алгоритм |  |

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

Системна інженерія та індустрія програмного забезпечення використовують вимоги для формалізації потреб зацікавлених сторін, які будуть реалізовуватися як функціональні можливості та обмеження, що задовольняються поставленою системою.

Для зацікавлених сторін вимоги є засобом для забезпечення відповідності рішення (тобто наданої системи) переліку вимог.

Вимоги можуть бути формалізовані та організовані, наприклад, шляхом відокремлення функціоналу від технічних вимог. Цього можна досягти за допомогою електронної таблиці Excel або за допомогою спеціального інструменту, такого як DOORS або EA. Ці засоби мають перевагу в тому, що дозволяють користувачам повністю керувати та контролювати вимоги.

Модельний підхід використовує вимоги через асоціації залежностей з

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 68   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

елементами моделі, такими як use cases, blocks, або test cases, встановлюючи простежуваність моделі. Зокрема створюються асоціації з елементами моделі (наприклад, у use cases може бути асоціація реалізована з однією або кількома вимогами).

Отже, SysML визначає візуальне та графічне зображення текстових вимог, спеціалізованих асоціацій між собою або з іншими елементами моделі та способом управління ними в структурованому та ієрархічному середовищі.

SysML визначає нові типи асоціацій (стереотипні залежності):

- Derive (успадковування): одна або декілька вимог, що впливають із вимоги;
- Satisfy (забезпечують, задовольняють): один або кілька модельних елементів виконують вимогу;
- Verify (перевірка): один або кілька модельних елементів, наприклад тестова система, перевіряє виконання вимог;
- Refine (уточнення): один або кілька модельних елементів, наприклад use case, додатково уточнює вимогу;
- Copy (перенесення): один або кілька модельних елементів системи переноситься на інший елемент;
- Trace (прослідковування): один або кілька модельних елементів системи відслідковуються на інші елементи.

SysML визначає нові типи коментарів, вводячи стереотипи, дозволяючи зв'язувати пояснення з асоціаціями або елементами моделі:

- Problem (проблема): коментар, опис якого визначає виявлену проблему або потребу, після недоліку, обмеження або відмови одного або декількох елементів моделі;
- Rationale (обґрунтування): коментар який описує причину чи обґрунтування рішення, пов'язаного з асоціацією чи елементом.

На діаграмі вимог показуються лише функціональні вимоги ІСК та АСУ, що пов'язані з нею. Вимоги за іншими видами забезпечення не вказуються, так як були вказані в технічному завданні.

Діаграма вимог для інтелектуального регулятора температури наведений на рис. 2.2.1

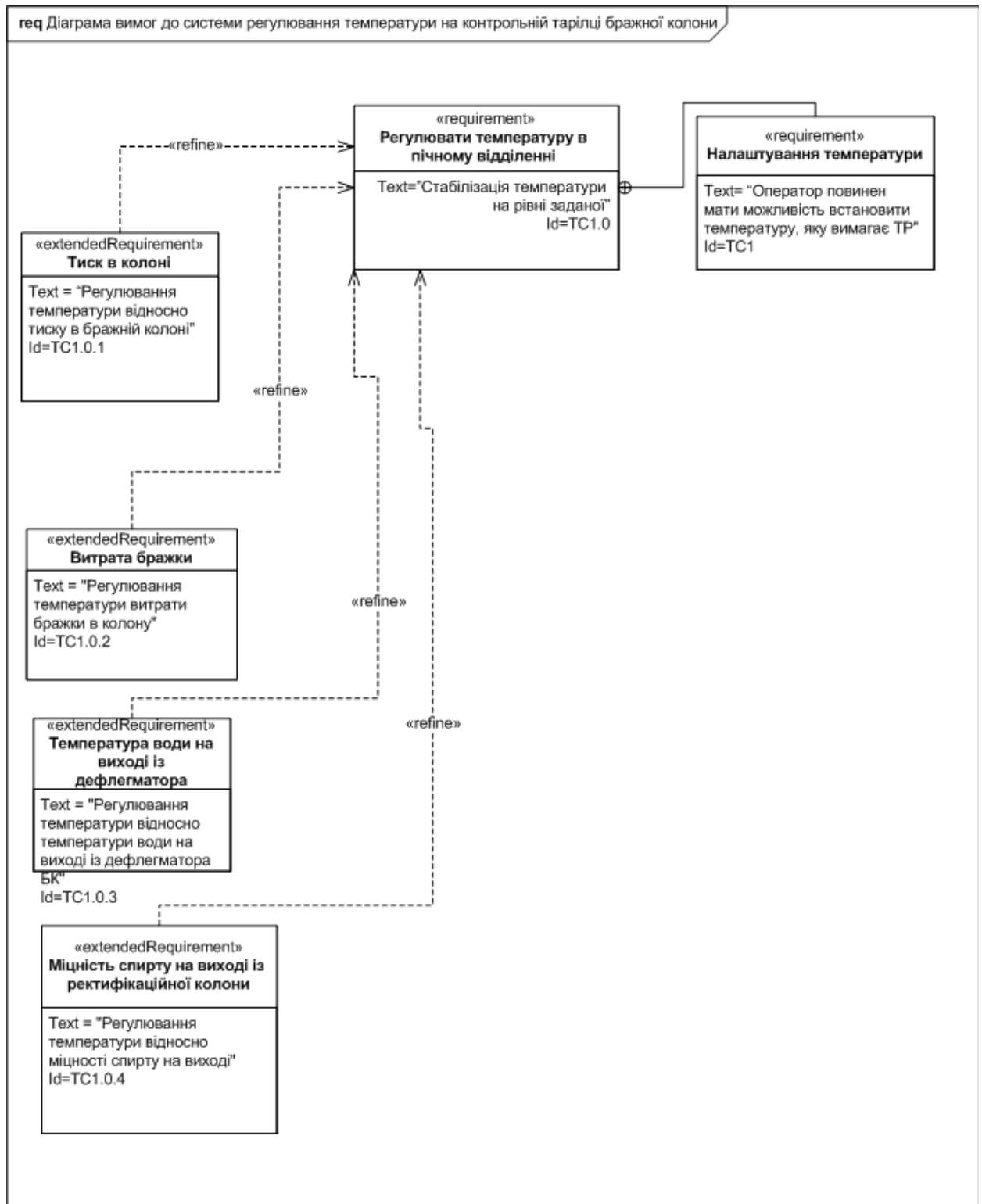


Рис. 2.2.1. Requirement Diagram для інтелектуального регулятора температури на контрольній тарілці бражної колони

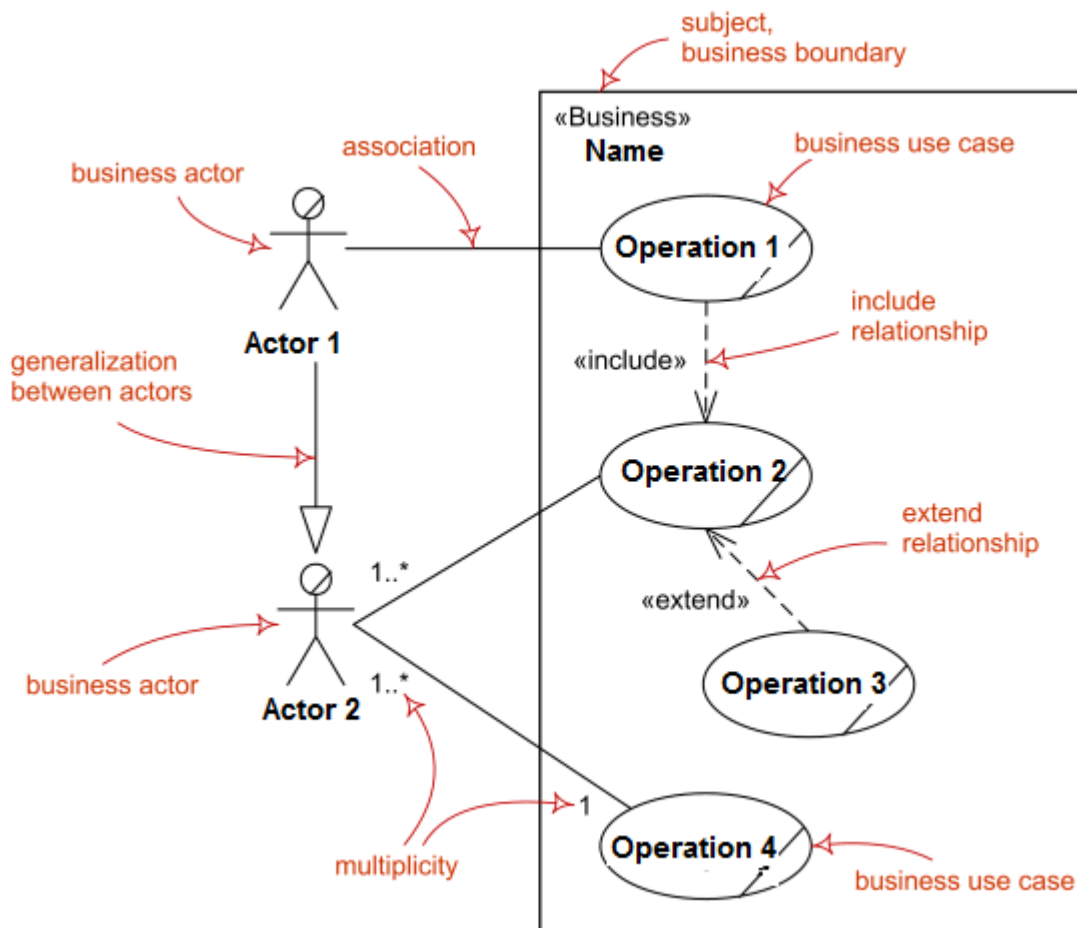
|             |             |                 |               |             |                              |      |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|------------------------------|------|
|             |             |                 |               |             | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                              | 71   |



## 2.4. Визначення функцій користувачів (Use Case diagram)

Жодна грамотно побудована система не існує в ізоляції: вона взаємодіє з дійовими особами (людьми або системами), які використовують її для досягнення певної мети, чекаючи від неї певної поведінки. Діаграма варіантів використання специфікує очікувану поведінку суб'єкта (системи або її частини), – вона описує послідовності дій, включаючи їх варіанти, які суб'єкт здійснює для досягнення дійовою особою певного результату.

Варіанти використання застосовуються для вираження необхідного поведіння системи без опису реалізації її поведінки. Вони дозволяють розробникам, кінцевим користувачам і експертам в предметній області досягти взаєморозуміння, а крім того, допомагають упевнитися в правильності архітектурних рішень і перевіряти систему по ходу її розробки. Крім того, так як ця діаграма аналогічна UML, тому вона застосовується для того, щоб визуалізувати створену систему, підсистему, щоб користувач міг зрозуміти, як застосовувати цей елемент, а розробник – як реалізувати його.



|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

Рис. 2.4.1. Основні елементи Use Case diagram

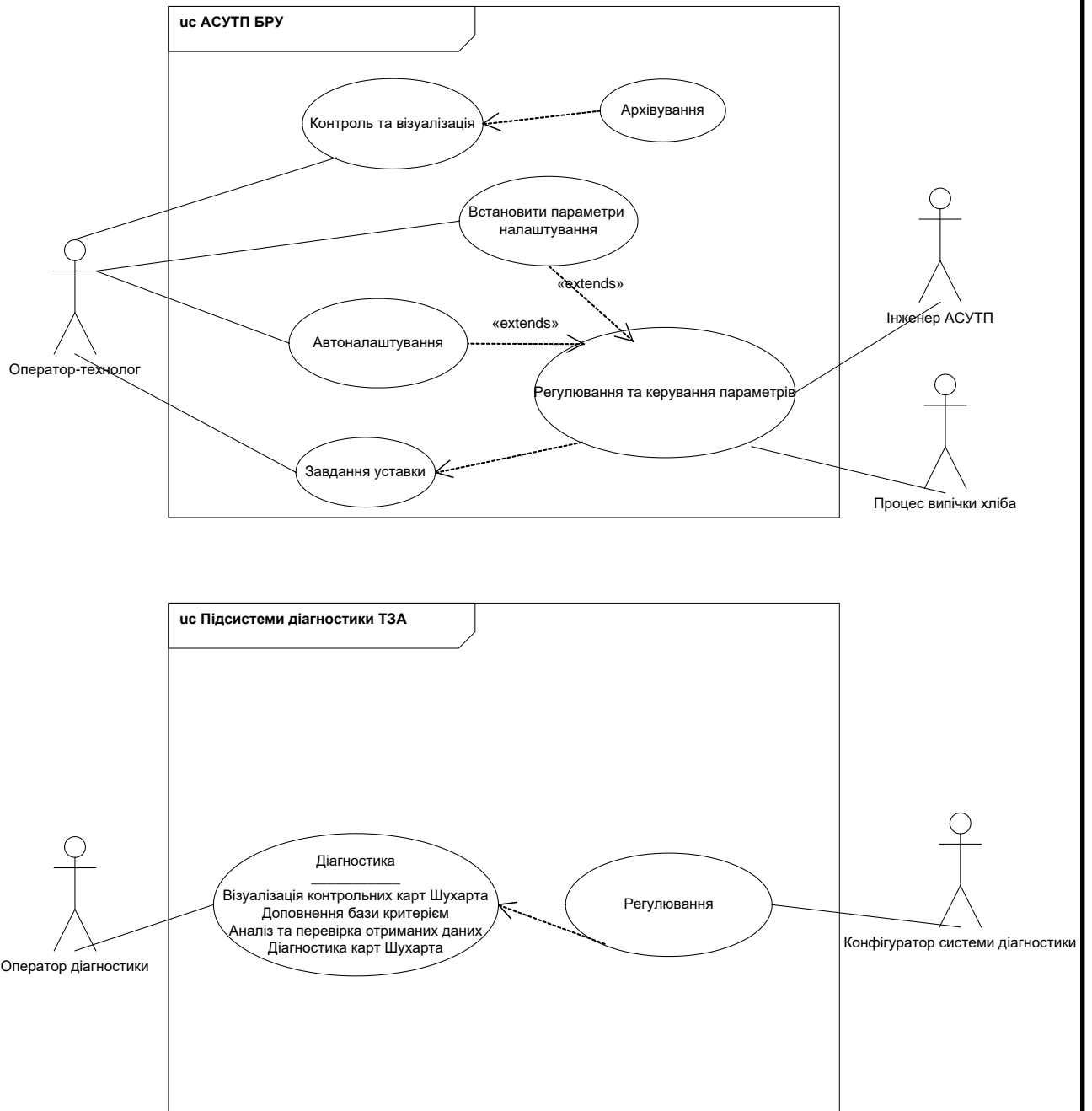


Рис. 2.4.2 Фрагмент Use Case diagram для підсистем АСУТП та діагностики ТЗА

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

BDD (Block Definition Diagram) – діаграма визначення блоків надає блокове подання системи, тобто основного блоку, поряд з ієрархією його складових блоків. BDD може включати блоки будь-якого типу, включаючи програмне забезпечення, обладнання тощо. Порівняно з UML2, BDD SysML переосмислює схему класів, замінюючи класи блоками та вводячи порти потоків. При проектуванні ІСК рекомендується розробляти три BDD для: технологічної, технічної та інтелектуальної (інформаційної) складових.

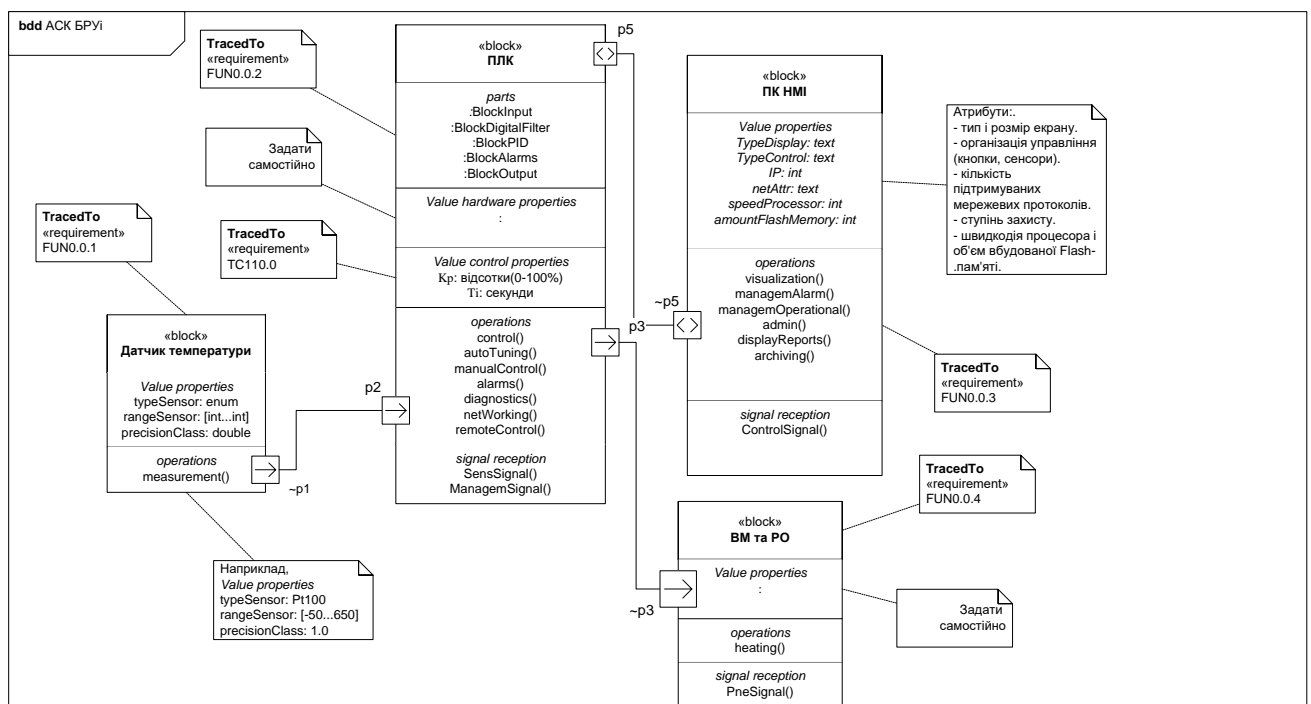


Рис. 2.5.1 BDD діаграма для АСК та ІАСК БРУ

Частина нижніх блоків фізично належать до основного блоку ("має" співвідношення), оскільки асоціації, використані на схемі, є композицією або "сильною" агрегацією, що представлена стрілкою з суцільним ромбом. Інші блоки є частиною основного блоку, але фізично не належать до нього, тому називається посиланням, а асоціація представлена відкритим ромбом (проста агрегація). Порт потоку (flow port) – це нове визначення від SysML. Порти потоку представляють те, що може пройти через блок (в /із), наприклад інформаційні дані, матеріальні потоки або енергія.

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              | 75   |

## 2.6. Розробка алгоритмічного забезпечення ІСК

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

Моделювання поведінки системи окреслює входи, виходи, послідовності та умови для координації підсистем. Дані діаграми забезпечують гнучкі посилання на блоки, що володіють такою поведінкою.

Діаграма машинного (планувального) стану State Machine (State chart) diagram використовуються як у UML2, тобто вони дають спосіб визначити життєвий цикл блоків BDD, якому повинні відповідати всі екземпляри. Життєвий цикл визначає всі можливі стани для блоку, події та умови, що визначають переходи стану.

Тільки складні блоки або важливі з точки зору системи, які крім того залежать від багатьох станів, повинні мати State Machine diagram. Усі визначення цієї діаграми, що використовуються в UML, також застосовуються до SysML: події, засоби захисту / умови, ефекти, переходи, складені стани, області тощо.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 76   |



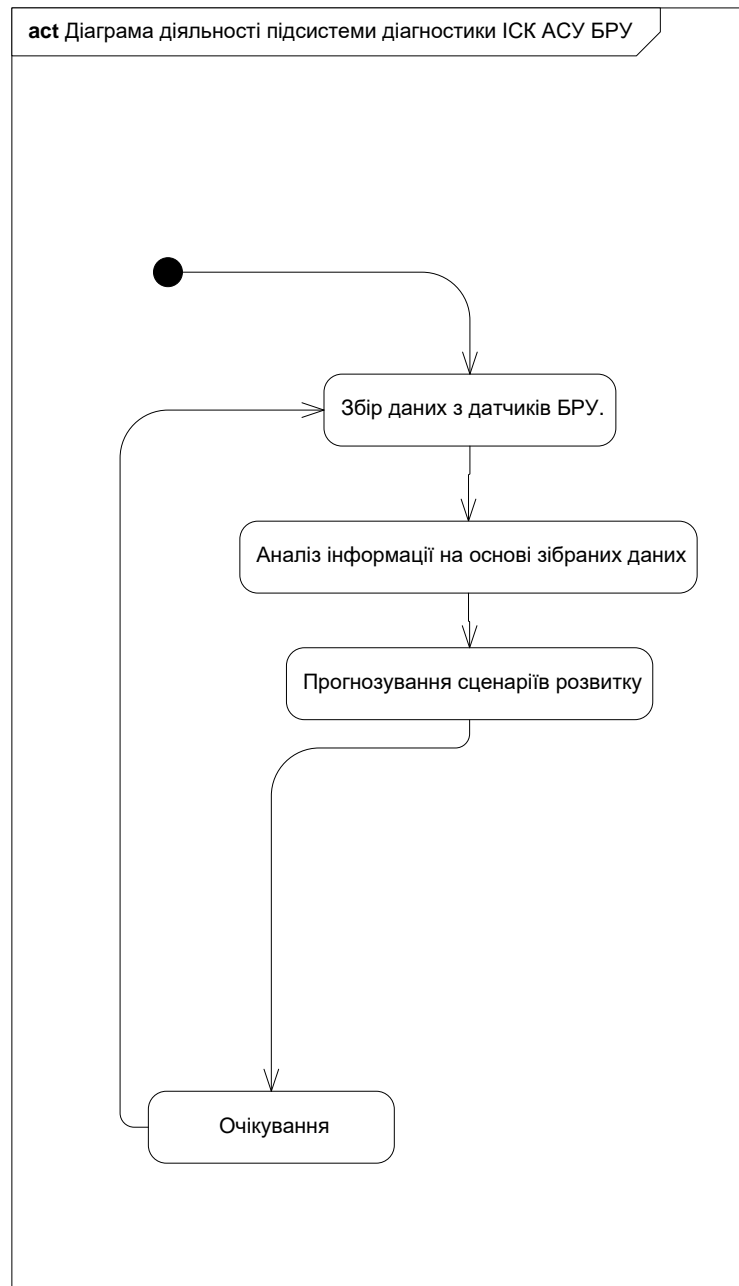


Рис. 2.6.1.2 Діаграма активності для підсистеми моніторингу АСУ БРУ  
Activity diagram

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

Діаграма послідовності показує інформацію про взаємодію блоків на часовій послідовності. Діаграма має два виміри: вертикальну вісь, що представляє час і горизонтальну вісь, що представляє об'єкти-учасники. Вісь

часу може бути фактичною опорною точкою, розміщуючи позначки часу як текстові поля. Горизонтальне впорядкування об'єктів не є важливим для операції, і ви можете їх переставити за необхідності.

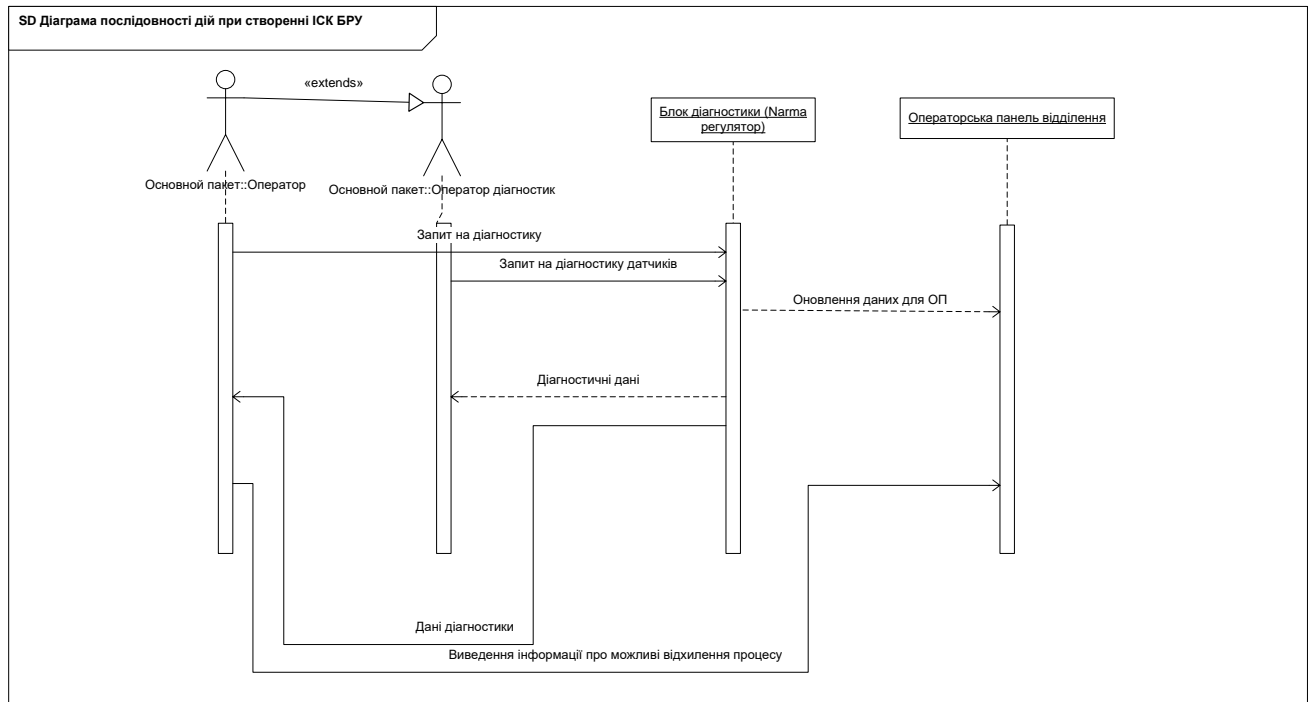


Рис. 2.6.2.1 Приклад Sequence diagram

## Розділ 3 – Розробка інформаційного та програмного забезпечення ІСК

### 3.1 Вибір програмного забезпечення для всіх компонентів системи

Розглядається система управління температурою в бражній колоні за допомогою нейроконтролера із використанням моделі нелінійаризованного авторегресивного ковзаючого середнього для ідентифікації і управління електроприводом як динамічною системою.

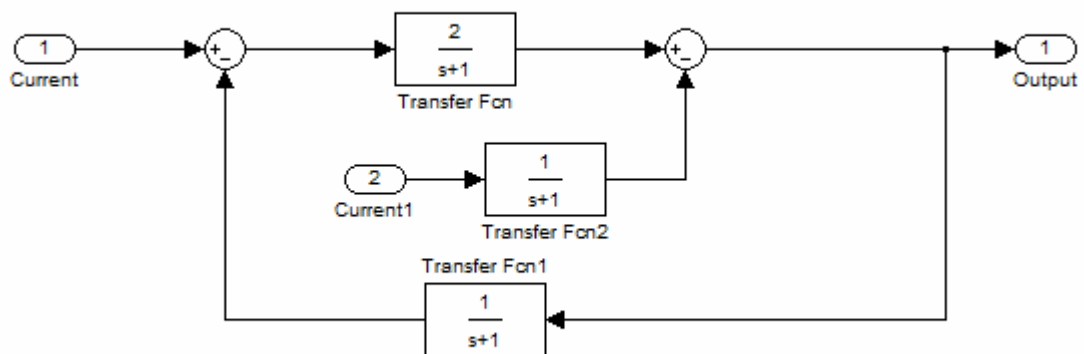


Рис. 3.1.1. Структурна схема контуру регулювання температури в бражній колоні БРУ

|              |             |                 |               |             |   |                 |             |                |
|--------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|---|-----------------|-------------|----------------|
|              |             |                 |               |             | <i>Кваліфікаційна робота</i>  |                 |             |                |
| <i>Змн.</i>  | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |   |                 |             |                |
| Студент      |             | Скриник Д.І.    |               |             | Інтелектуальне керування<br>технологічними процесами<br>брагоректифікації | <i>Літ.</i>     | <i>Арк.</i> | <i>Акрушів</i> |
| Керівник     |             | Кишенько В.Д.   |               |             |   |                 |             |                |
| Зав.кафедри. |             | Смітюх Я.В.     |               |             |   | НУХТ АІ-2-1М 80 |             |                |
| Секретар ДЕК |             | Проскурка Є.С.  |               |             |   |                 |             |                |

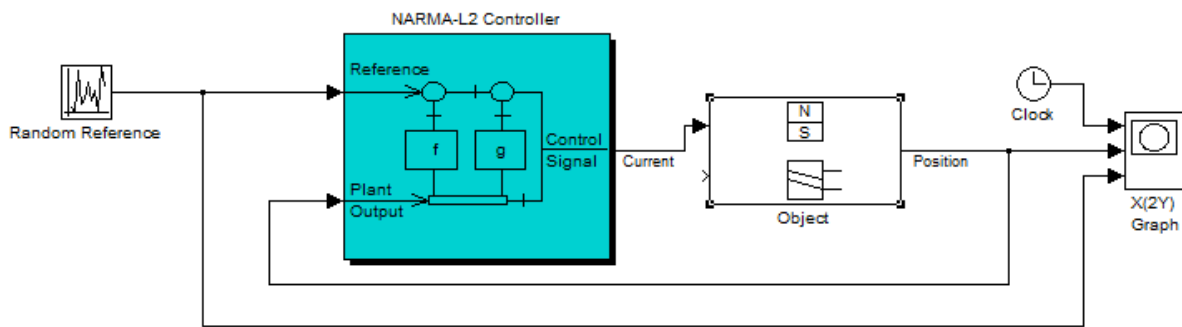


Рис. 3.1.2. Структурна схема системи управління контуром температури з допомогою нейроконтролера.

Структурна схема системи управління температури з нейроконтролером NARMA-L2 зображена на рис.3.1.2:

При застосуванні NARMA-L2 з використанням управління із лінеаризованим зворотнім зв'язком перший етап полягає в ідентифікації параметрів об'єкту управління. Навчання нейронної мережі здійснюється з використанням прогнозованої зміни динаміки об'єкту. Також, на першому етапі визначається структура моделі нейроконтролера [3]. В нейроконтролері застосовується одна стандартна модель для узагальненого представлення нелінійних дискретних систем – це модель із використанням нелінійної авторегресії із ковзаючим середнім (NARMA):

На етапі ідентифікації об'єкту, можна тренувати нейронну мережу апроксимуючи нелінійну функцію  $N$ . Для того, щоб вихід системи мав вигляд деякої заданої траєкторії  $y(k + d) = y_r(k+d)$ , наступний етап буде полягати у розробці нелінійного контролера виду:

$$u(k) = G[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), y_r(k+d), u(k-1), \dots, u(k-m+1)]. \quad (2)$$

Проблема з використанням цього контролера в тім, що при тренуванні нейронної мережі для створення функції  $G$  з метою мінімізації квадратичної похибки, необхідно використовувати динаміку зворотнього розповсюдження.

Це призведе до уповільнення процесу тренування. Одне з рішень полягає у використанні наближених моделей для представлення об'єкту управління. Виходячи з цього нейроконтролер, що використовується для управління засновується на наближеній моделі NARMA-L2.

$$y(k+d) = f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] + g[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] \cdot u(k). \quad (3)$$

Використання цього рівняння безпосередньо може викликати проблеми при реалізації, тому необхідно визначити управляючий вхід  $u(k)$ , який відповідає виходу  $y(k)$  для однакового періоду часу. Таким чином, замість алгоритму, що описується (4), використовується алгоритм який відповідає:

$$y(k+d) = f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] + g[y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-m+1)] \cdot u(k+1), \quad (5)$$

де  $d > 2$ .

На наступному рисунку представлена структура нейронної мережі:

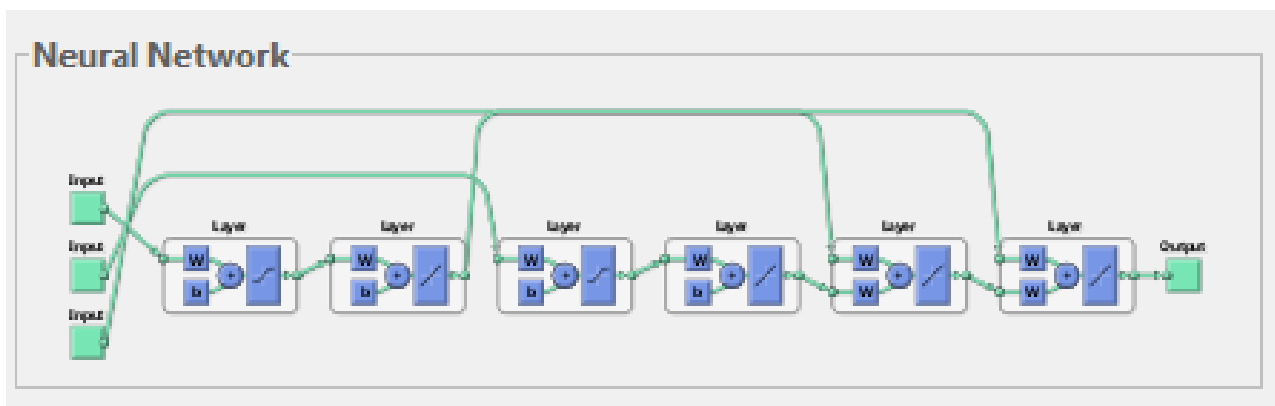


Рис.3.1.3. Структурна схема нейронної мережі

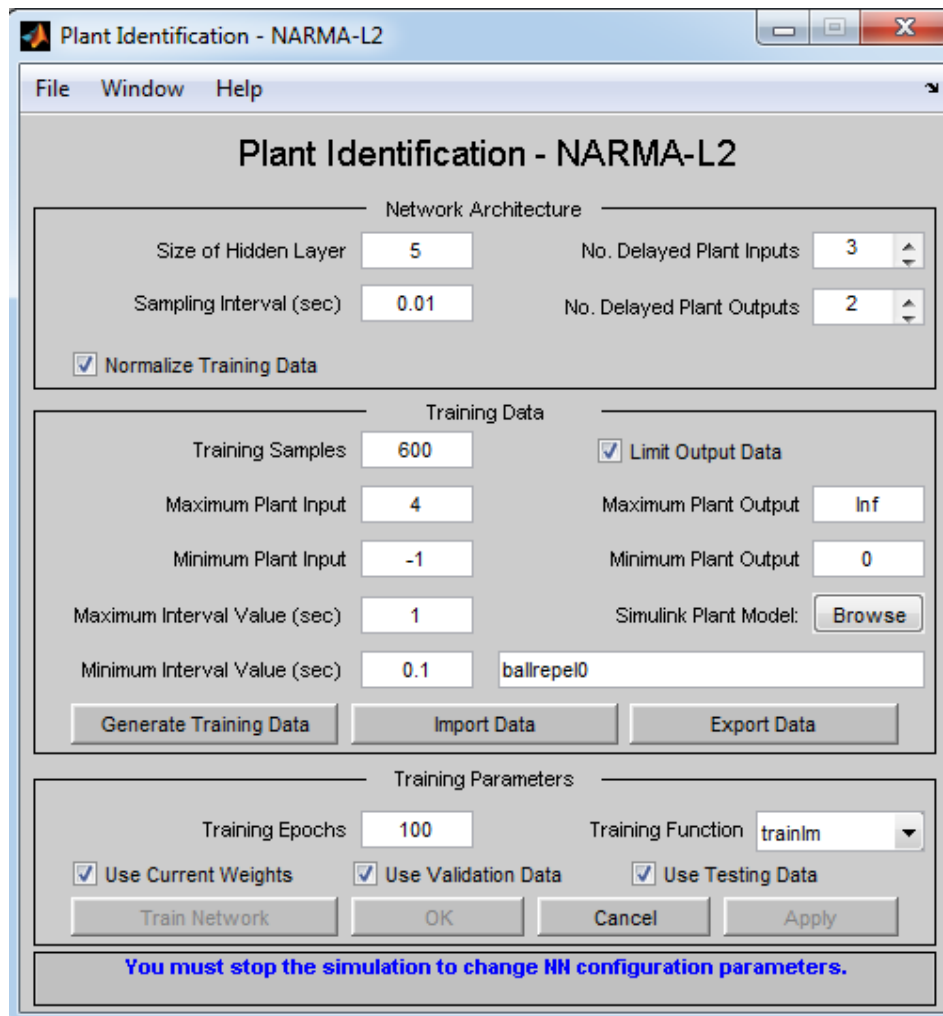


Рис. 3.1.4 Вікно процедури ідентифікації.

Набір параметрів для формування структури нейронної мережі наступний:

1. **Size of the Hidden Layer** – 2 – кількість нейронів у прихованому шарі;
2. **No. Delayed Plant Inputs** – 3 – число ліній затримки для вхідного шару нейронів;
3. **No. Delayed Plant Outputs** – 2 – число ліній затримки для вихідного шару нейронів;
4. **Sampling Interval (sec)** – 0.01 – період дискретності між двома послідовними моментами відліку даних;
5. **Normalize Training Data** – встановлення нормування для приведення даних навчання до діапазону [0 1].

Набір елементів управління, для завдання характеристик навчальної послідовності нейронної мережі наступний:

1. **Training Samples – 1000** – число точок відліку для отримання навчальної послідовності у вигляді пар значень вхід-вихід для управляемого процесу, який визначається моделлю **Simulink**;
2. **Maximum Plant Input – 4** – максимальне значення вхідного сигналу;
3. **Minimum Plant Input – -4** – мінімальне значення вхідного сигналу;
4. **Maximum Interval Value (sec) – 2** – максимальний інтервал ідентифікації, в секундах;
5. **Minimum Interval Value (sec) – 0.1** – мінімальний інтервал ідентифікації, в секундах;
6. **Limit Output Data** – встановлює обмеження значень вихідного сигналу;
7. **Simulink Plant Model** – для завдання моделі управляемого процесу, що має порти входу і виходу і зберігається у файлі **\*.mdl**, вибір моделі проводиться за допомогою **Browse**, де вводиться ім'я моделі.
8. **Training Epochs – 200** – кількість циклів навчання;
9. **Training Function** – задає функцію навчання;
10. **Use Current Weights** – встановлює використання поточних вагових коефіцієнтів нейронної мережі;
11. **Use Validation Data** – встановлює використання контрольної множини в об'ємі **25 %** від навчальної множини;
12. **Use Testing Data** – встановлює використання тестової множини в об'ємі **25%** від навчальної множини. При синтезі системи управління для ТРН-АД було проведено тренування нейронної мережі. Результати тренування показані на рисунках:

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              | 84   |

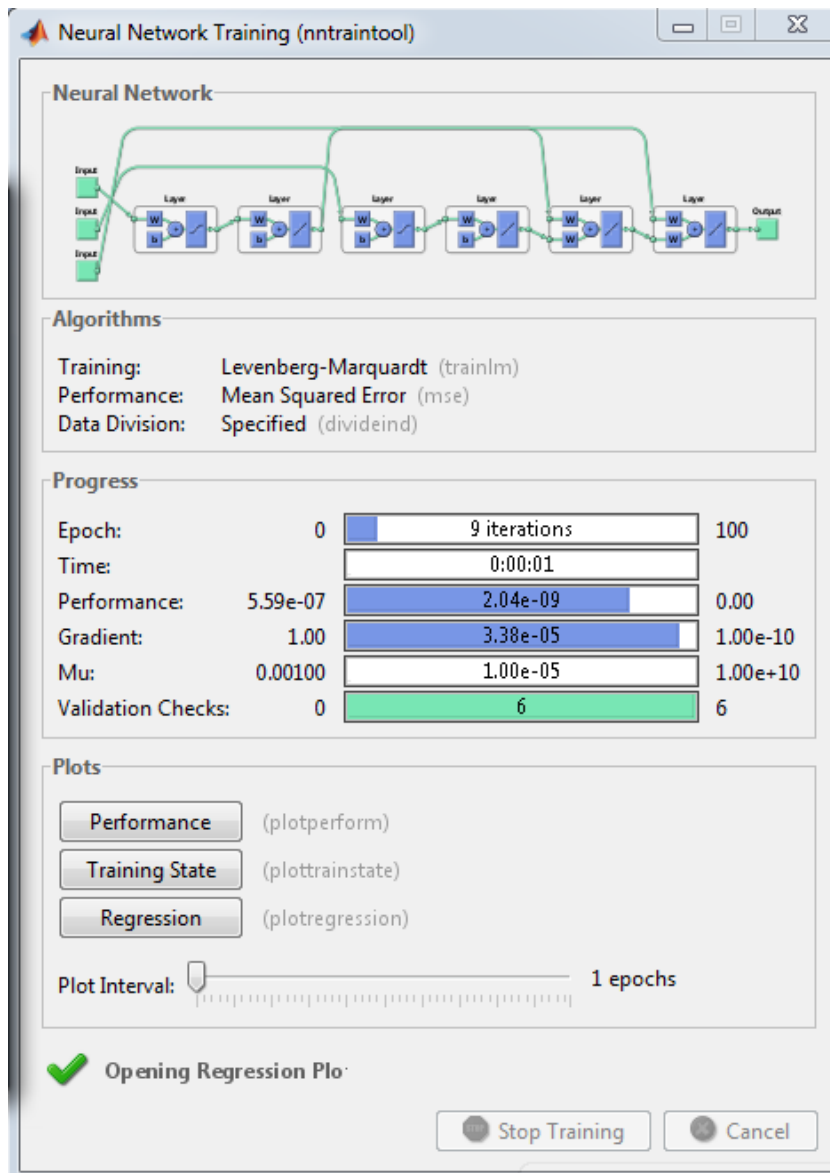


Рис. 3.1.4. Головне меню тренування нейронної мережі та дані навчання

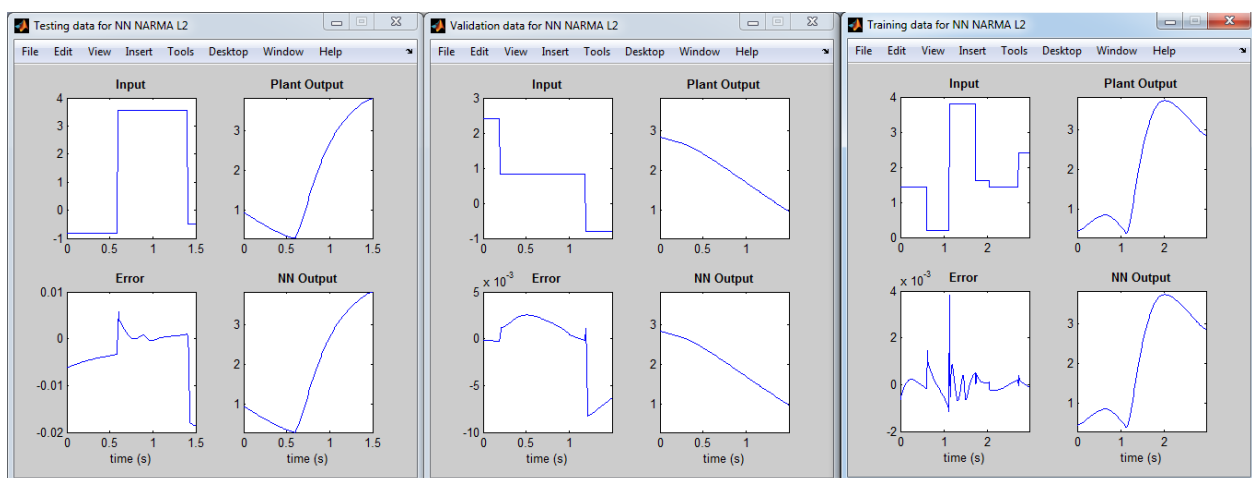


Рис. 3.1.5. Графіки вхідного і вихідного сигналів об'єкта управління

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

Графіки перехідних процесів, які були зняті при моделюванні в середовищі MatLab приведені на рисунках:

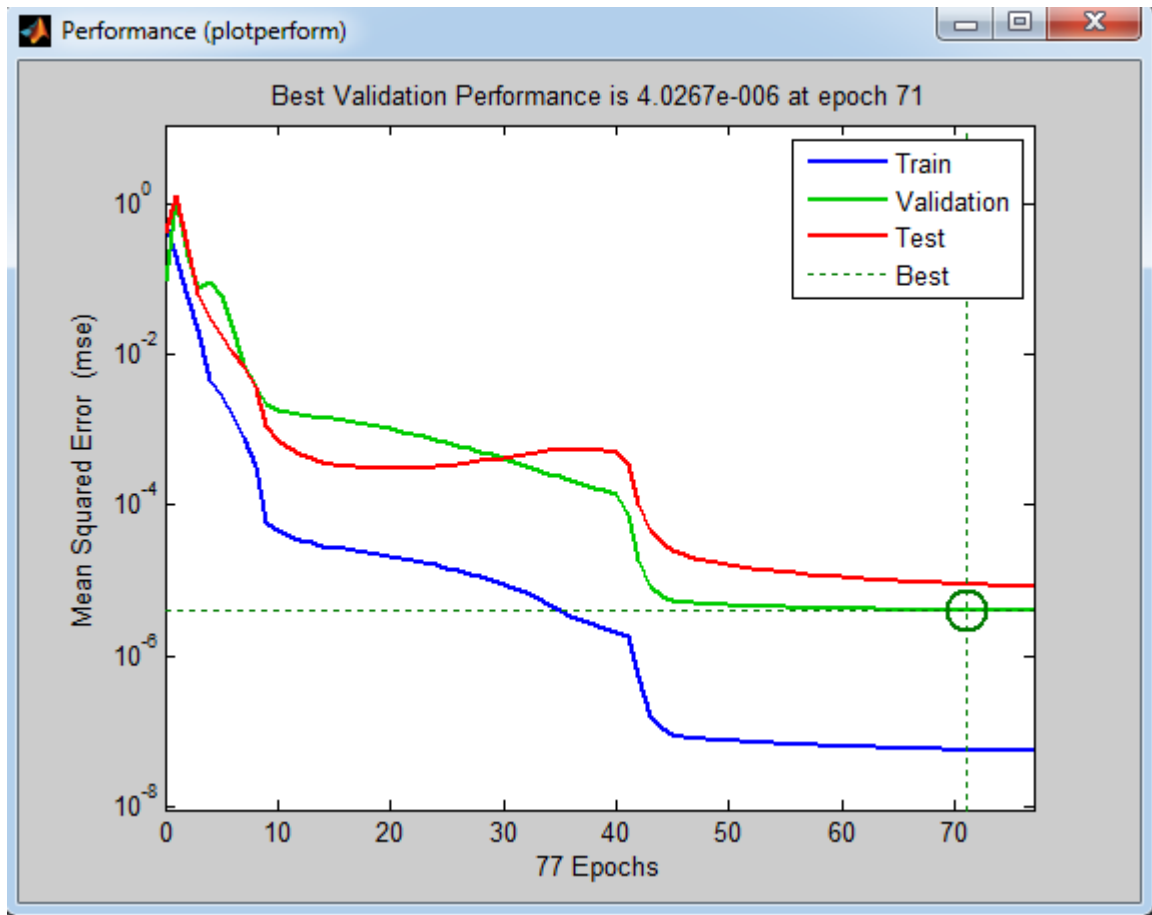
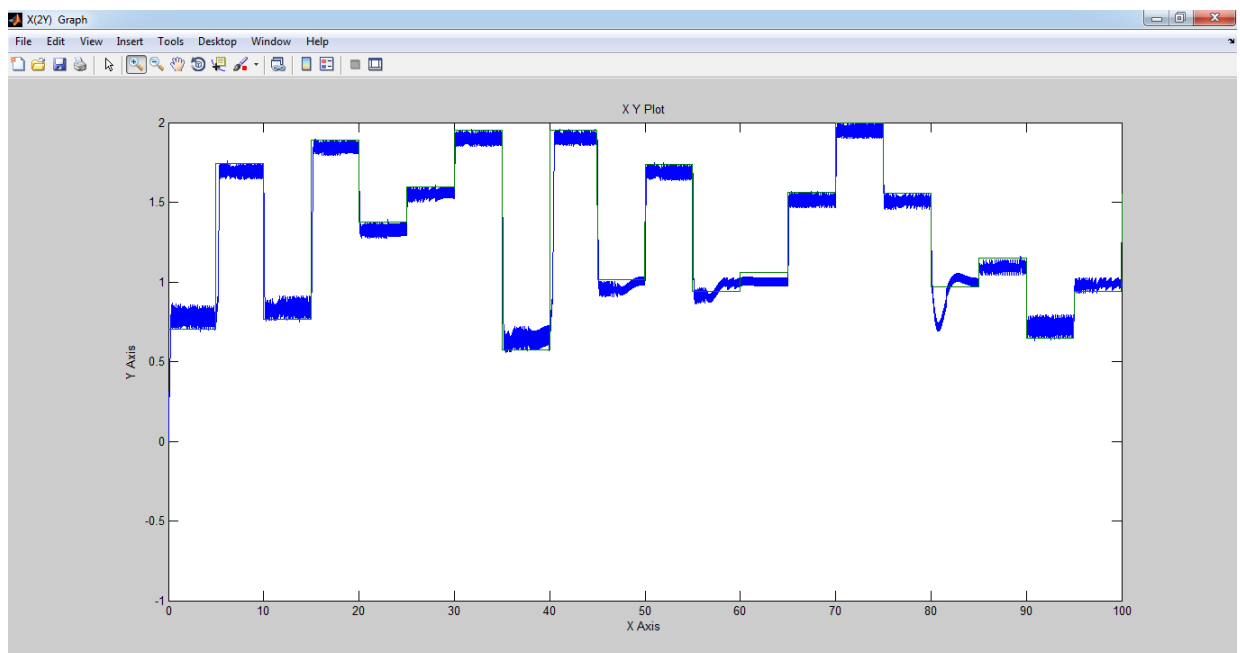


Рис. 3.1.5. Графік зміни швидкості навчання мережі



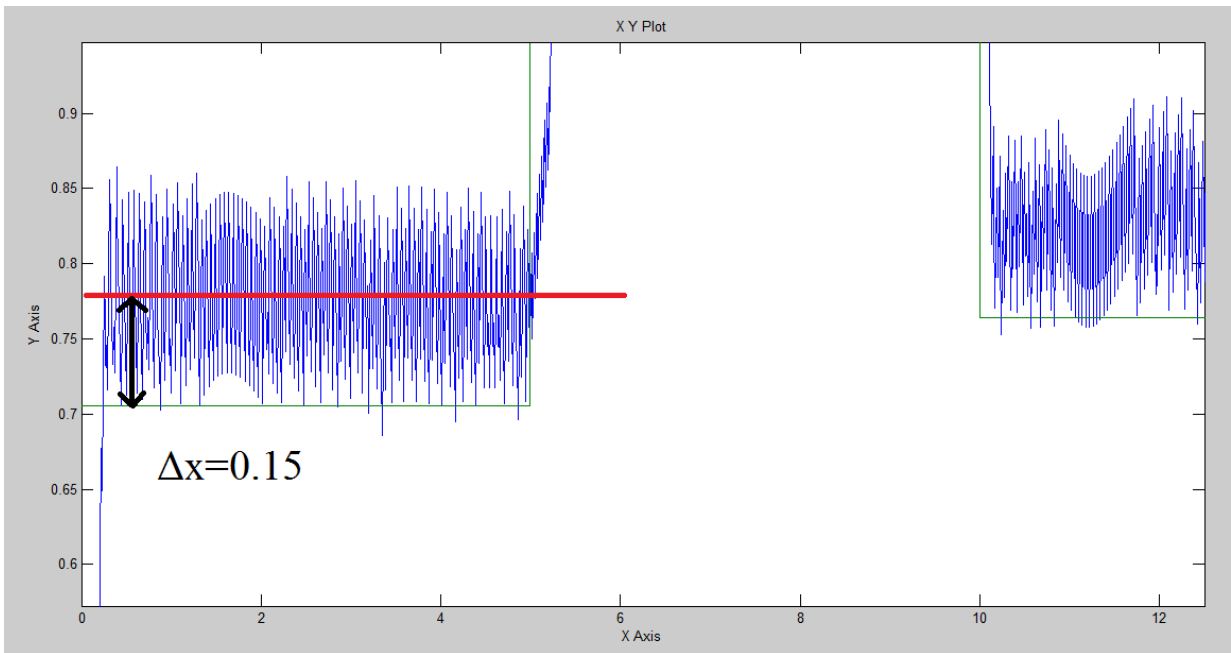


Рис.3.1.6. Графік зміни температури

Змінюємо завдання блоком Random Number. При зміні завдання отримуємо графік:

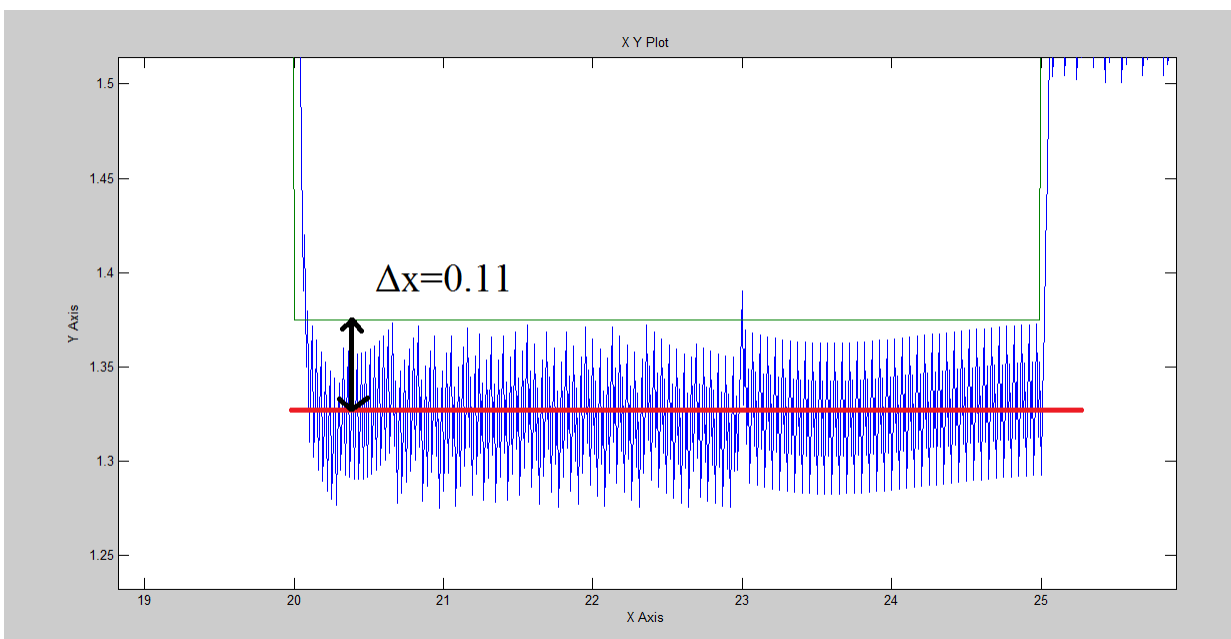


Рис. 3.1.7. Графік зміни температури

Тобто статична похибка змінюється в межах 0,1-0,15 при зміні завдання. Метод найменших квадратів забезпечує необхідний рівень перехідного процесу. Тому він нас повністю задовольняє.

## Висновки

Висновок. Основною перевагою використання нейроконтролерів для управління є те, що для синтезу структури та параметрів нейроконтролера не потрібні кількісні оцінки параметрів об'єкту, достатньо оперувати координатами, які характеризують стан об'єкту. Основний напрямок дослідження який визначився у останні роки це ідентифікація та управління. Цю складну задачу можна вирішити тільки із використанням нейронних мереж.

### 3.2. Дослідна перевірка підвищення ефективності

#### 3.2.1. Оцінка точності часткових розв'язків задачі керування нейромережевим регулятором

Настройки ПД-регулятора визначаємо за допомогою Циглера –Ніколса. Для цього знаходимо  $K_r$  критичне, при якому система (рис. 1) знаходиться на межі стійкості(рис.2).

$$K_{pкрит}=5,6. T_p=50 (с).$$

Наближеним методом розрахунку параметрів настрійок регуляторів є метод *незагасаючих* коливань (в технічній літературі його називають методом Ціглера-Нікольса). Замкнену систему автоматичного регулювання з П-регулятором переводять в режим автоколивнь за допомогою збільшення  $K_{рег}$ . Якщо в системі працює ПІ-регулятор, то  $T_i \rightarrow \infty$ , при ПД-регуляторі  $T_i \rightarrow \infty$ ,  $T_d \rightarrow 0$ . Для отримання автоколивнь визначають критичні значення  $K_{рег}^{крит}$  і період  $T_p^{крит}$ . Тоді наближеними параметрами настрійки П, ПІ та ПД-регулятора будуть :

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 88   |

*Параметры типовых регуляторов*

|                      | $k_{п}$       | $k_{и}$           | $k_{д}$           |
|----------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| <b>П-регулятор</b>   | $0,50k_{п}^*$ |                   |                   |
| <b>ПИ-регулятор</b>  | $0,45k_{п}^*$ | $0,54k_{п}^*/T^*$ |                   |
| <b>ПИД-регулятор</b> | $0,60k_{п}^*$ | $1,2k_{п}^*/T^*$  | $0,075k_{п}^*T^*$ |

Для П-регулятора:

$$K_{п}=5,6*0,5=2,8$$

Для ПИ-регулятора:

$$K_{п}= K_{п(крит)}*0,45=0,45*5,6=2,52;$$

$$K_{и}=(0,54*K_{п(крит)})/T_{п}=0,06$$

Для ПИД-регулятора

$$K_{п}= K_{п(крит)}*0,6=0,6*5,6=3,36;$$

$$K_{и}=(1,2*(крит))/T_{п}=(1,2*5,6)/50=0,1344;$$

$$K_{д}=0,075* K_{п(крит)}*T_{п}=0,075*5,6*50=21;$$

Встановлюємо відповідні настройки у схему (рис.3.2.1.1-3.2.1.3) і отримуємо перехідні процеси, що зображені на рис. 3.2.1.4.

Встановлюємо коеф. Настройки ПИД-регулятора в структурну схему (рис.3) і отримуємо перехідний процес (рис.4), який має такі якісні показники:  $\phi=0,9$ ,  $A_1=4,85$ . Порівнюючий його з перех. Процесом з ПИ-регулятором можна сказати, що час регулювання у ПИД-регулятора менший, але не набагато, ступінь затухання більший, і динамічна похибка також менша. Тобто робимо висновок, що використання ПИД- регулятора в даному випадку доцільне. П-регулятор має статичну похибку, що суттєво звужує його область застосування.

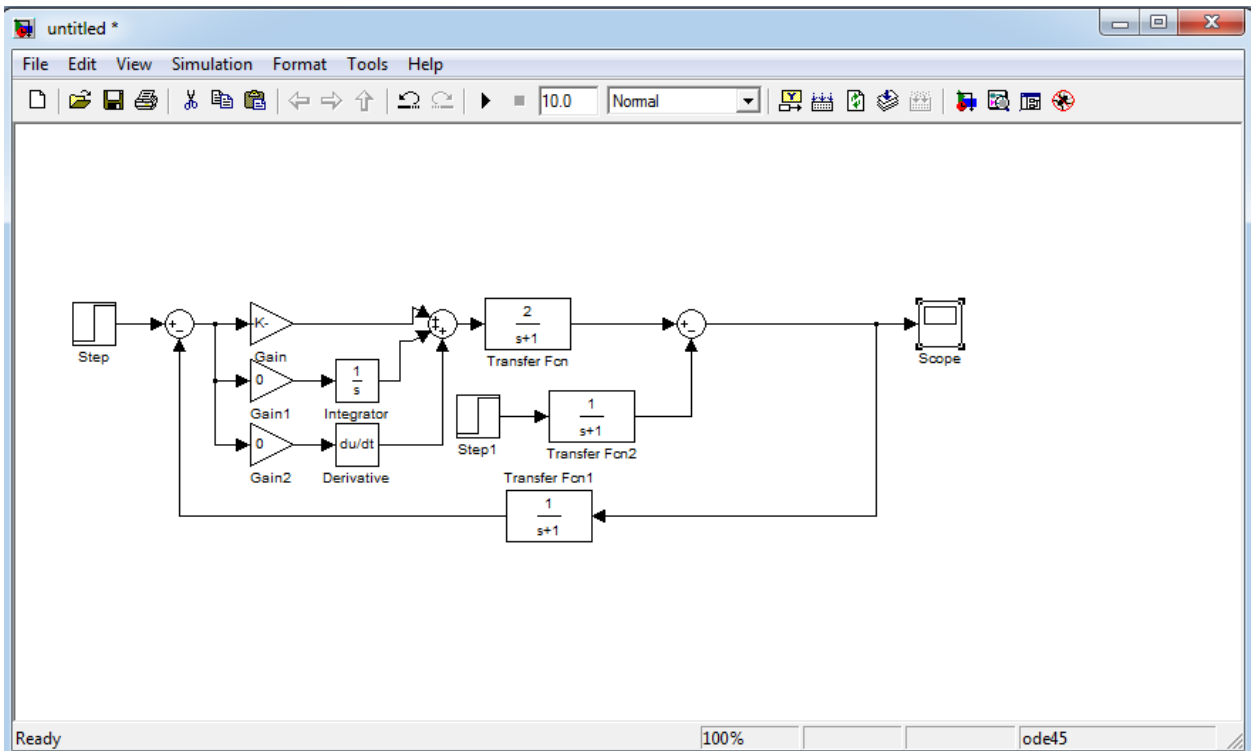


Рис. 3.2.1.1. Структурна схема АСР з П-регулятором

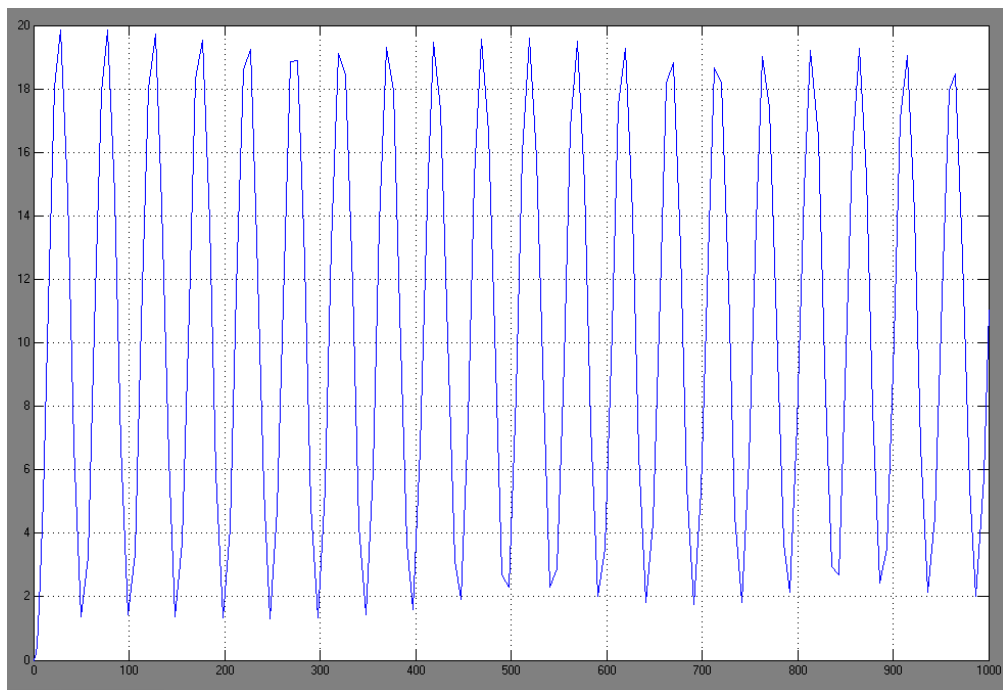


Рис. 3.2.1.2. Перехідний процес АСР з П-регулятором на межі стійкості  
( $K_p(\text{крит.})=5,6$ )

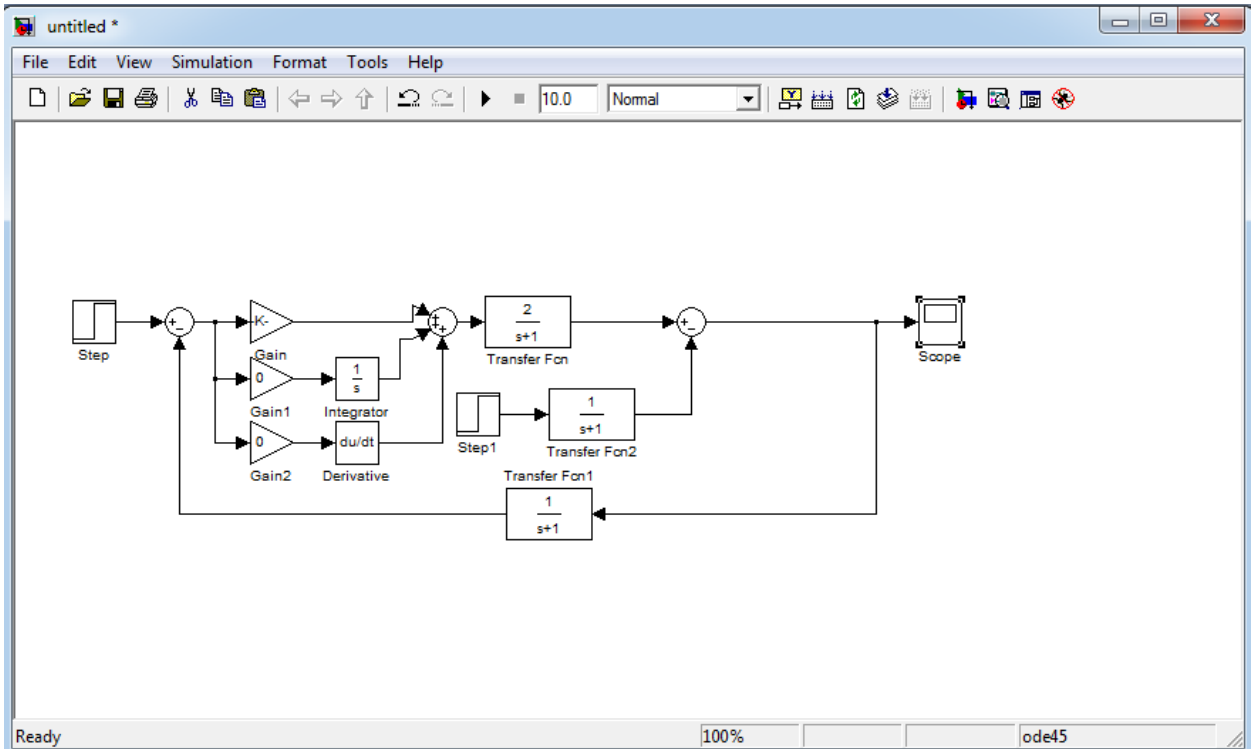


Рис. 3.2.1.3. Структурна схема АСР з ПІД-регулятором

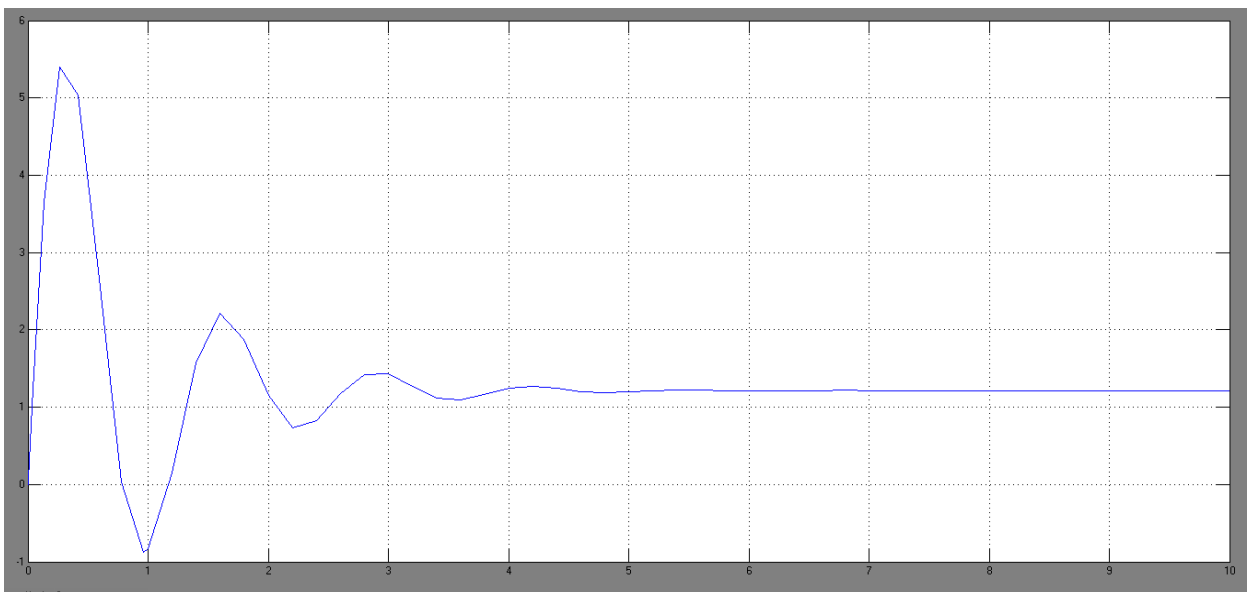


Рис. 3.2.1.4. Перехідний процес АСР з ПІД-регулятором.

$$\psi = (A1 - A3) / A1 = (4 - 0,9) / 4 = 0,77; \quad A1 = X1_{\max} = 4 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \Delta X_{\text{ст}} = 0,085 \text{ } ^\circ\text{C};$$

Тобто бачимо по графіках перехідного процесу, що якісні показники в ПІД-регулятора кращі, через меншу статичну похибку, та затухаючий перехідний процес. Динамічна похибка в нейрорегулятора менша.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 91   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

## Порівняння регуляторів

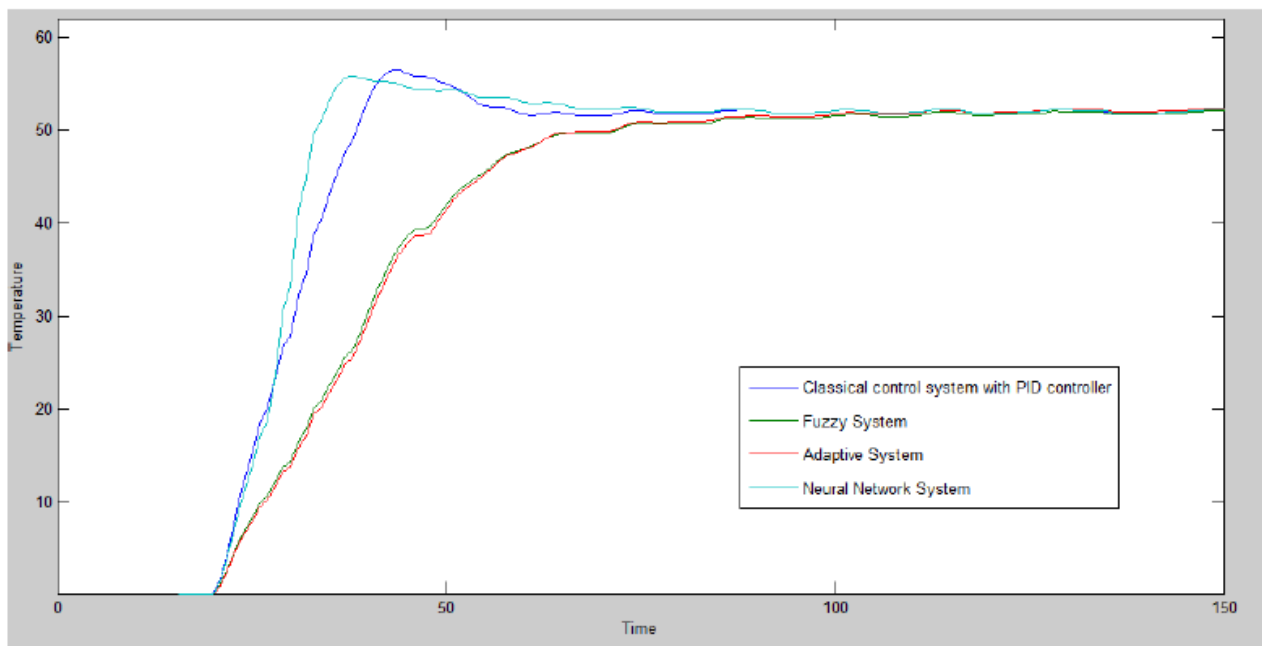


Рис. 3.2.1.5. Графіки переходних процесів

### Результати моделювання

|                                   | АСР з ПІД-регулятором | АСР с fuzzy-регулятором | Адаптивна АСР з нечітким блоком адаптації | АСР зі спеціалізованим нейронним керуванням |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------|---|---|
| Перерегулювання, %                | 8,5%                  | 0,3%                    | 0,82%                                     | 7,2%  |
| Тривалість переходного процесу, с | 64                    | 97                      | 97  | 67  |
| Інтегральний показник якості      | 173,99                | 211,72                  | 214,27                                    | 171,68                                      |

Із таблиці та графіків можна зробити такі висновки:

1. Найшвидше на заданий режим виходить АСР з ПІД-регулятором, найповільніше – АСР з нечітким регулятором, що може бути пов’язане з необхідністю оптимізації функцій належності чи збільшення кількості термів.

2. Найбільше перерегулювання спостерігають у АСР з ПІД-регулятором, причому налаштування здійснювалося автоматично, тобто покращити цей результат суттєво неможливо. Найменше перерегулювання – у АСР з fuzzy-регулятором, що пояснюється повільним та поступовим виходом на усталений режим, без стрибків. Такий самий результат показує і адаптивна система за рахунок використання нечіткої моделі в якості блоку адаптації.

3. Інтегральний показник якості найменший у АСР зі спеціалізованим нейронним керуванням, що вказує на найменшу похибку керування; найгірший показник – у АСР з fuzzy-регулятором.

Тобто найкращі якісні показники має система із нерорегулятором.

### 3.2.2 Оцінка єдності розв'язків за змінюваних параметрів регулятора

Змінюємо кількість епох для навчання нейронної мережі.

TRAINLM - функція тренування мережі, яка модифікує значення ваг і зміщень відповідно до методу оптимізації Левенберга-Маркара.

TRAINOSS - функція навчання мережі, яка модифікує ваги і зміщення відповідно до одноступінчастим методом січних.

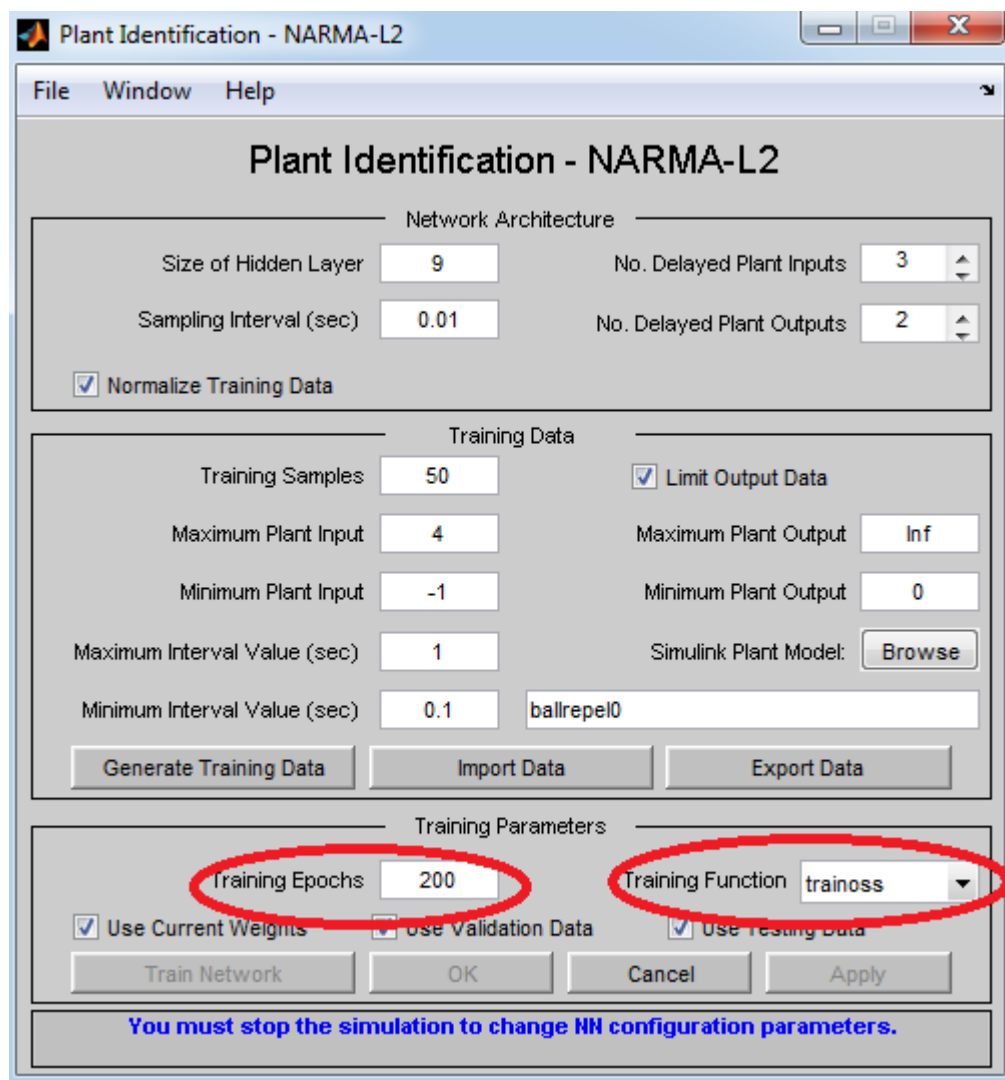


Рис. 3.2.2.1 Вибір кількості епох та методу навчання мережі

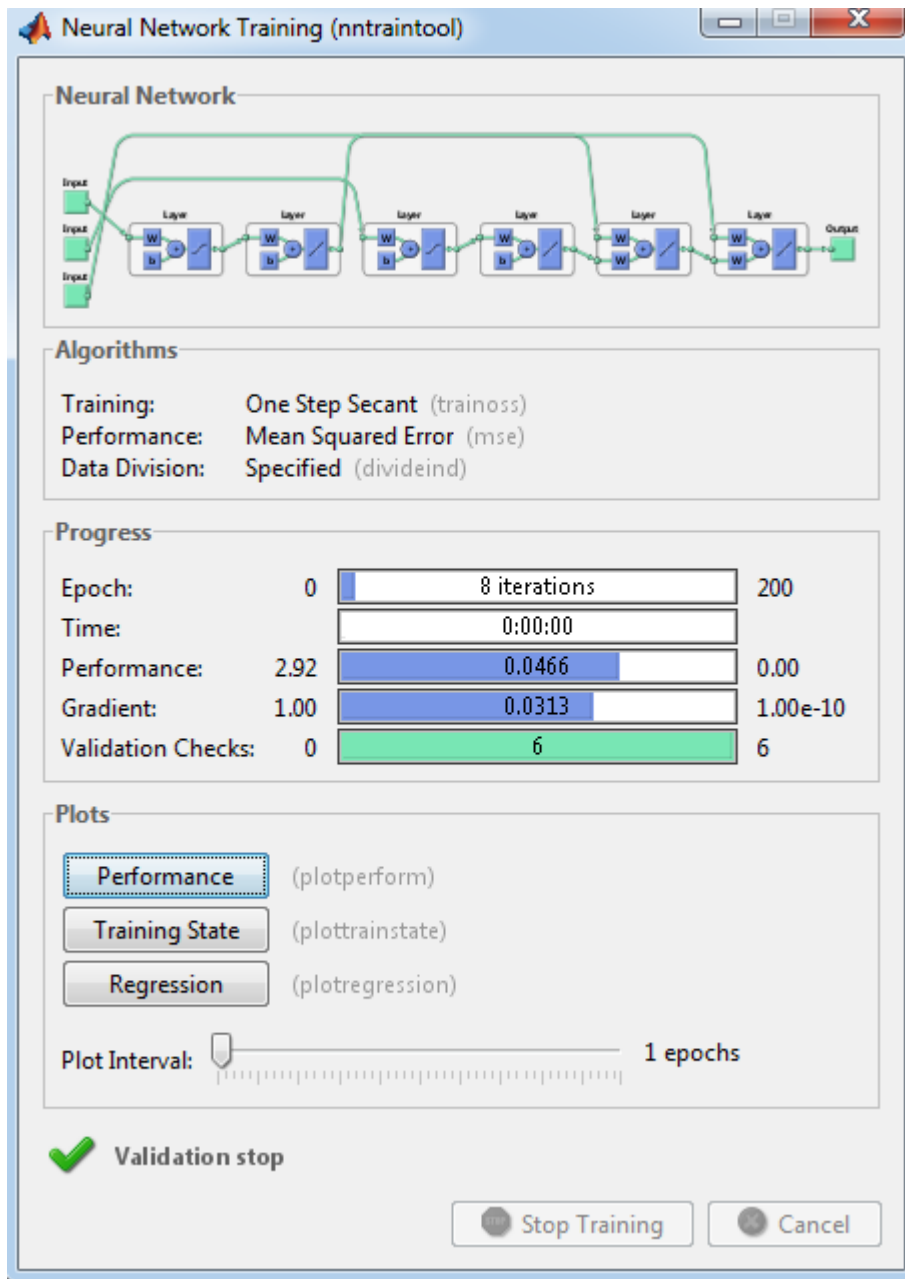
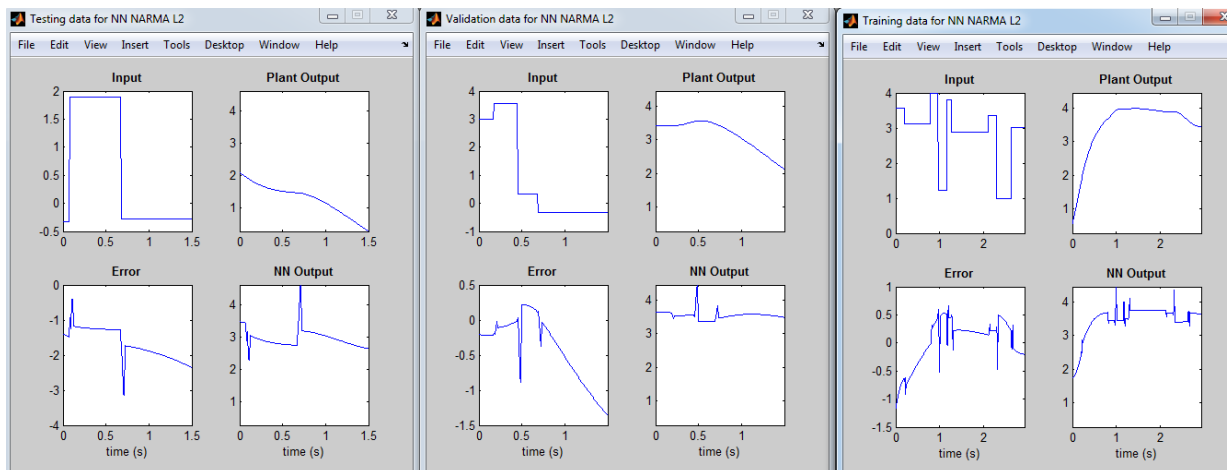


Рис. 3.2.2.2 Головне меню тренування нейронної мережі та дані навчання



|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

Рис. 3.2.2.3. Дані тесту та дані перевірки

Графіки перехідних процесів, які були зняті при моделюванні в середовищі MatLab приведені на рисунках:

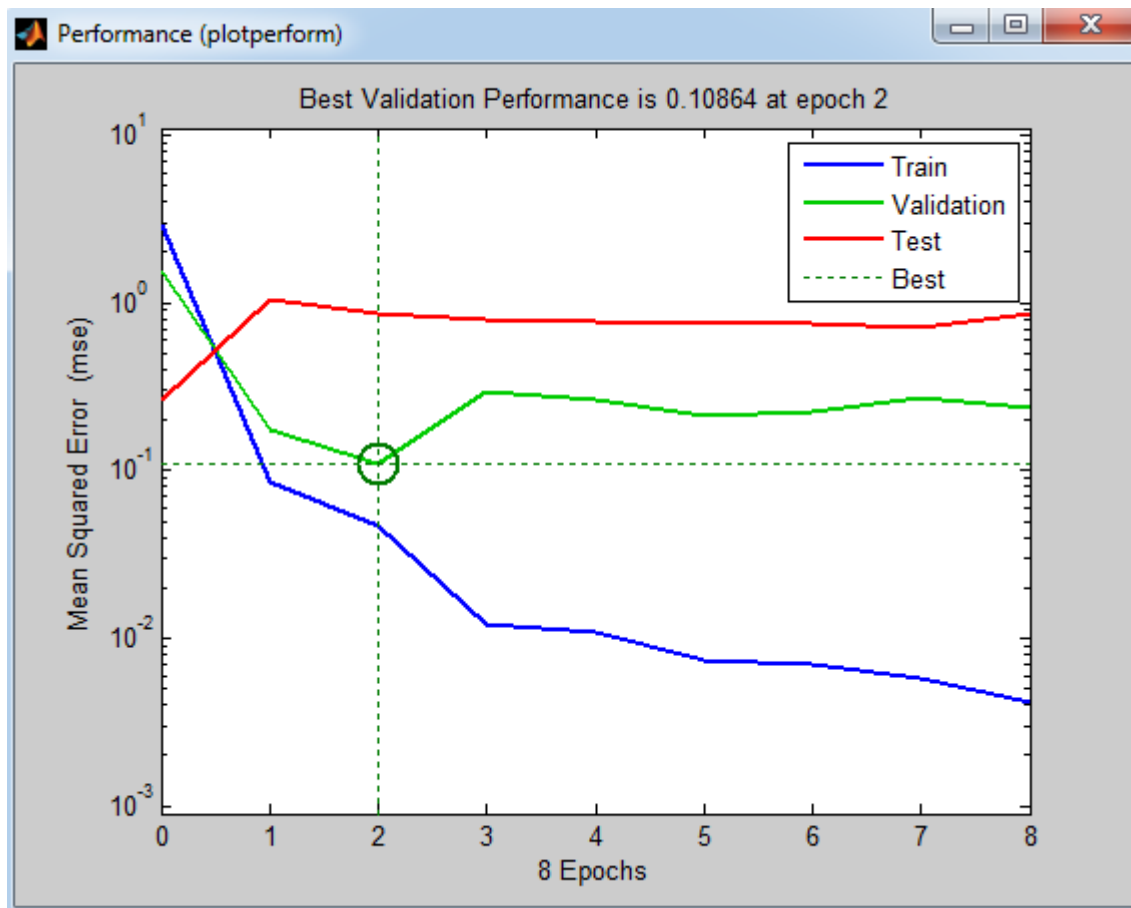


Рис. 3.2.2.4 Графік зміни швидкості

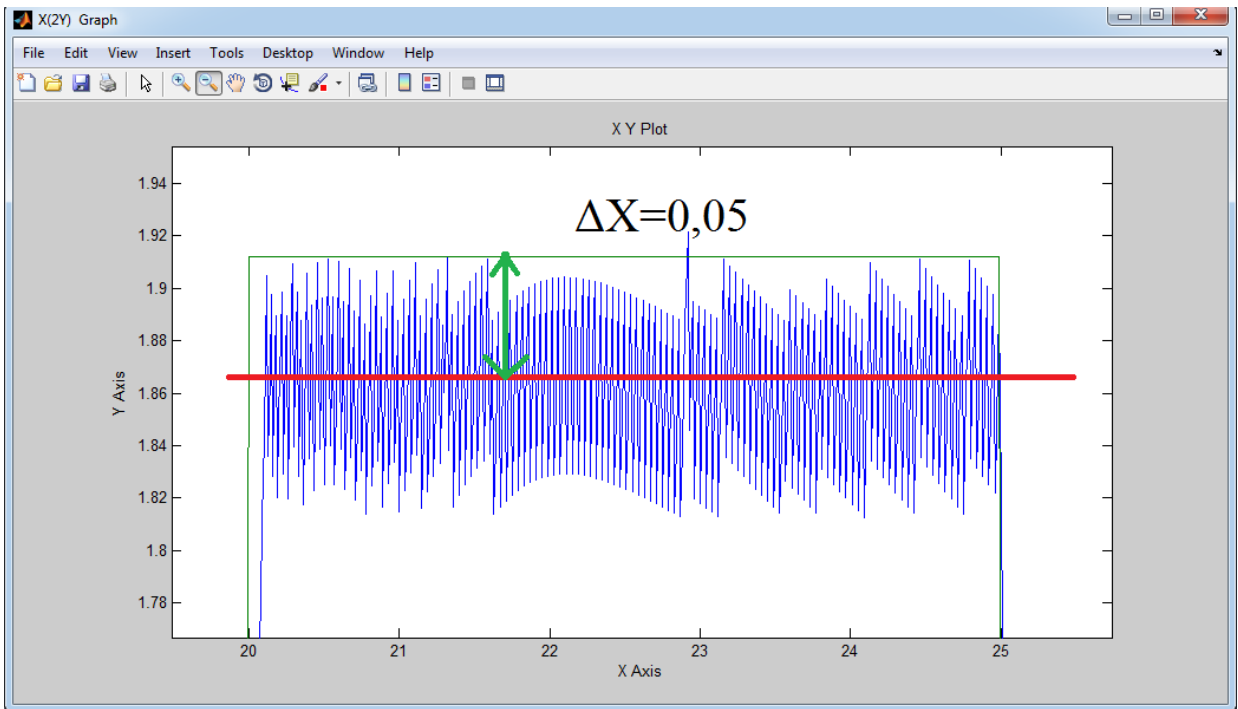
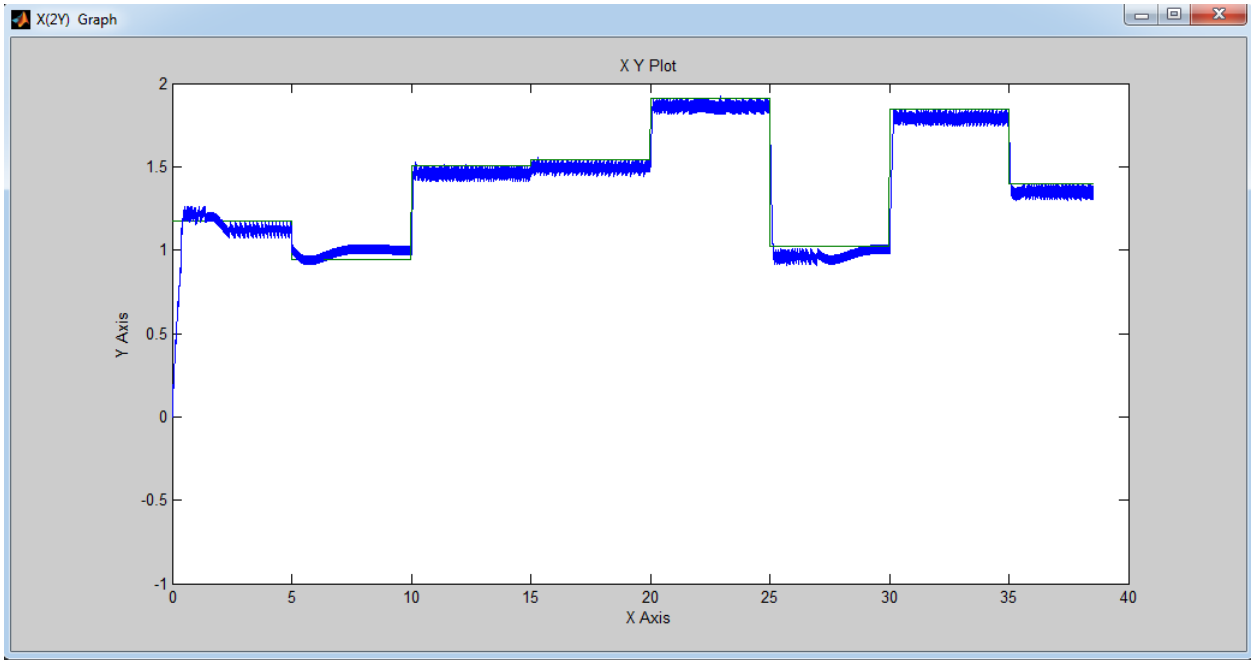


Рис. 9. Графік зміни температури

Висновок: За збільшення кількості епох з 100 до 200 зменшується статична похибка при зміні завдання. Тобто спостерігаємо єдність розв'язків при зміні завдання та умов навчання нейромережі. В даному розділі було показано що зміна кількості епох та методу навчання зменшує тривалість перехідного процесу та статичної похибки. Було підтверджено доцільність використання нейрорегулятора, в порівнянні із ПІД-регулятором. В першу чергу це швидка адаптація до зміни завдання перехідного процесу.

### 3.3. Оцінка техніко-економічних переваг та отриманої ефективності

Температура є одним з найважливіших параметрів у технологічному режимі роботи виробничої лінії і має чітко встановлені значення, дотримання яких забезпечує якість та надійність протікання технологічного процесу. У разі підвищення температури відбувається зменшення подачі теплоносія на вході у змішувач, а в іншому випадку відбувається відкриття клапану подачі охолодженої рідини (води), яка поступає у сорочку барабанного кристалізатора у разі пониження температури нижче встановленого рівня погіршується процес розчину патоки із цукровою масою тобто відбувається дегідратування цукрози з утворенням темнокольорових пігментів які негативно впливають на технологічний процес. Для вимірювання температури використовуються такі технічні засоби автоматизації, як термометр розширення, термоперетворювач опору, термопари різних градувань. Впровадження системи автоматизації для даного параметру забезпечить надійність технологічного режиму.

При точному дозуванні таких компонентів як патоки та цукру забезпечується дуже висока якість вихідного сиропу, який служить основою цукрової помади. Тому система автоматизації дає можливість точного контролю та регулювання витрати за допомогою сучасних регуляторів та технічних засобів. Для нормального теплового режиму роботи установки необхідно своєчасно відводити вихідну суміш із кристалізаційної камери. Це відбувається шляхом відкриття регулюючого клапану, який сприймає керуючий

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 97   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

сигнал від регулятора рівня. Дана система автоматизації повинна забезпечити надійну, безперебійну та якісну роботу виробничої лінії, а також зводити до мінімуму втрати фізичної праці й значно підвищити надійність роботи системи. У харчовій промисловості постійно вдосконалюється техніка і технологія виробництва шляхом впровадження прогресивних технологічних схем нового виду обладнання, передового досвіду. Хочу сказати, що потрібно з особливою увагою підходити до питання автоматизації, оскільки від вибору надійних та якісних технічних засобів автоматизації залежить весь подальший процес виготовлення цукрової начинки та її якість.

Синтезовано інтелектуальну систему автоматичного регулювання (САР) регулювання температури, діючу на основі теорії нейронних мереж. Розроблено математичну модель об'єкта дослідження. Аналіз показників якості перехідних процесів за різних режимів роботи парового котла засвідчив, що традиційна САР має істотні недоліки, пов'язані зі значним часом регулювання і першим відхиленням. Для вдосконалення традиційної САР та підвищення її ефективності запропоновано використовувати нейромережевий підхід в управлінні. Синтезований нейромережевий регулятор навчений визначати оптимальні керуючі впливи для компенсації глибоких збурень, викликаних піковими та регульовальними режимами роботи енергоблоків. Для апробації запропонованих рішень у програмі MatLab (Simulink, NT) проведено комп'ютерні експерименти з розроблення та випробування нейромережевої системи регулювання. Аналіз показників якості перехідних процесів під час проведення експерименту з визначення робастності і стійкості нейромережевого регулятора в процесі впливу глибоких зовнішніх і внутрішніх збурень засвідчив перевагу адаптивної нейромережевої системи у порівнянні з традиційною комбінованою, яка вимагає проведення етапу адаптації.

Після навчання нейромережевого ПІД-регулятора його було включено в САК замість класичного цифрового ПІДрегулятора. Для збереження значень  $u$  та  $v$  з попередньої ітерації використано запам'ятовуючі пристрої. Проведено

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | Кваліфікаційна робота | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 98   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

порівняння перехідних процесів системи з нейромережевим ПІД-регулятором, цифровим ПІД-регулятором та системи без регулятора. В результаті використання ПІД-регулятора помилка системи зменшилась до нуля, зникло перерегулювання, що загалом значно покращило перехідний процес системи (рис. 10). Завдяки вибраній низькій середньоквадратичній помилці при навчанні, перехідні процеси з нейромережевим ПІД-регулятором та цифровим ПІД регулятором майже збігаються.

У роботі представлена покрокова методологія синтезу й реалізації нейромережевого ПІД-регулятора графічною мовою програмування G засобами LabVIEW. Були побудовані моделі ОК, та класичного ПІД-регулятора, розраховані коефіцієнти настроювання класичного ПІД-регулятора. Для програмної реалізації нейромережевого ПІД-регулятора було обрано структуру та архітектуру штучної нейронної мережі із певним набором нейронів, шарів та активаційною функцією. Настроювання нейронної мережі відбувалось шляхом процедури навчання за результатами роботи класичного ПІДрегулятора в САК. Завдяки вибраній низькій середньоквадратичній помилці, перехідні процеси з нейромережевим ПІДрегулятором та класичним цифровим ПІДрегулятором майже збігаються. Головні переваги нейромережевої реалізації ПІД-регулятора наступні: – використовуючи здатність навчання на великій кількості навчальних вибірок, нейронна мережа має можливість вирішувати задачі, в яких невідомі закономірності між вхідними і вихідними даними ОК; – можливість стійкого функціонування САК при наявності більшої кількості неінформативних сигналів шляхом адаптування до змін зовнішнього середовища; – потенційно більша швидкодія, що досягається за рахунок організації масової квазіпаралельної обробки даних із використанням програмних технологій LabVIEW та цільової апаратної платформи CompactRIO на базі FPGA; – гарантована відмовостійкість при апаратній реалізації нейромережевого ПІД-регулятора. Це означає, що при несприятливих умовах продуктивність мережі падатиме незначно. Програмне моделювання інших

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 99   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

інтелектуальних регуляторів в САК засобами LabVIEW є перспективним та актуальним для даного наукового напрямку.

### 3.4. Розробка та моделювання ІСК

#### 3.4.1. Лінгвістична апроксимація вхідних та вихідних змінних

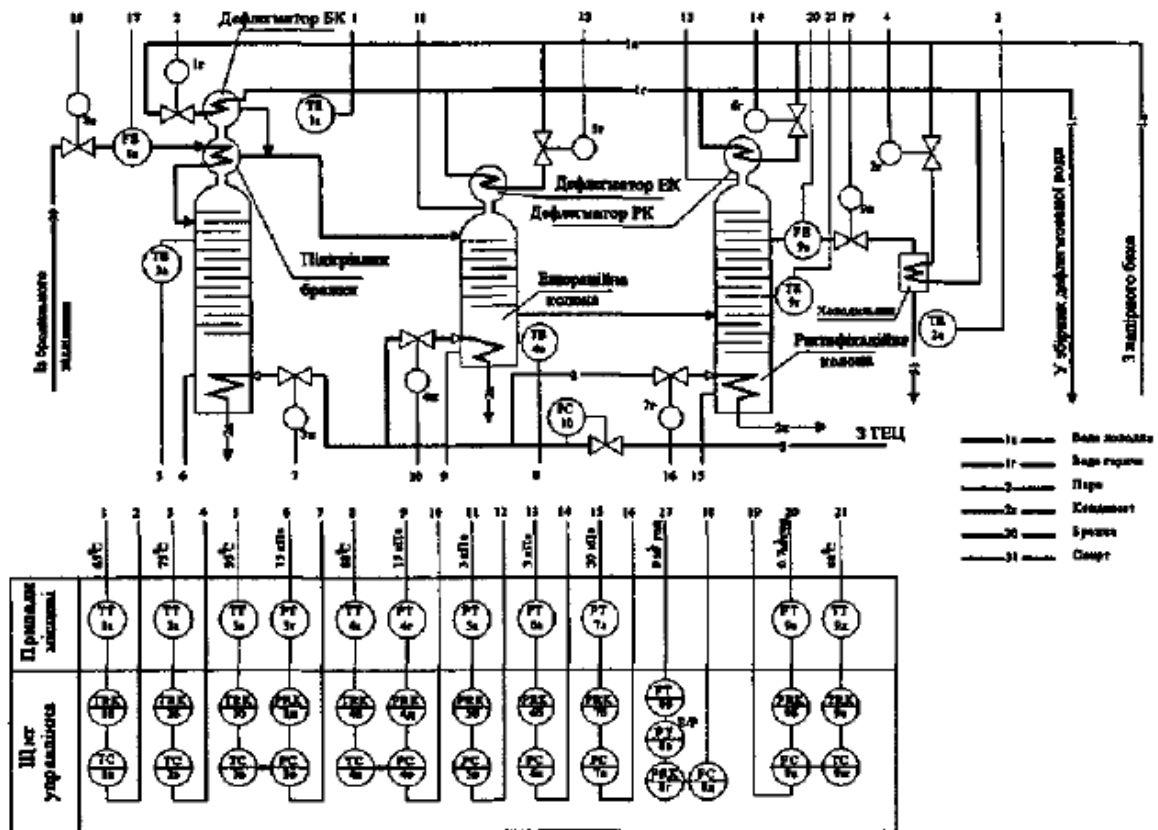


Рис. 1 Технологічна схема БРУ

БРУ, як об'єкт керування являє собою легку динамічну систему з декількома взаємопов'язаними вхідними величинами. Зате явно виражена спрямованість контурів регулювання за основними каналами регулюючих дій, таких як витрата бражки, пари, холодної води в дефлегматор. На виході ми отримуємо спирт-сирець із певним значенням вмісту спирту.

За основу взято три вхідні змінні:

T: [(0-100)С] - температура в бражній колоні;

F1: [(0-1000)л./год.] - витрата води в дефлегматор;

F2: [(0-3000)л./год.] - витрата бражки в колону.

F3: [(0-500)м3/год.] - витрата пари в апарат.

PT: [(0-3000) КПа] тиск в колоні.

Вихідна змінна:

QE: [(0-96) %] – вміст спирту;

В роботі використовуються трикутні функції належності. Нечіткі змінні: дуже низька, низька, нижче норми, норма, вище норми, висока.

В протоколі роботи зафіксувати правила нечіткого висновку, поверхні відгуку бази знань та зробити відповідні висновки.

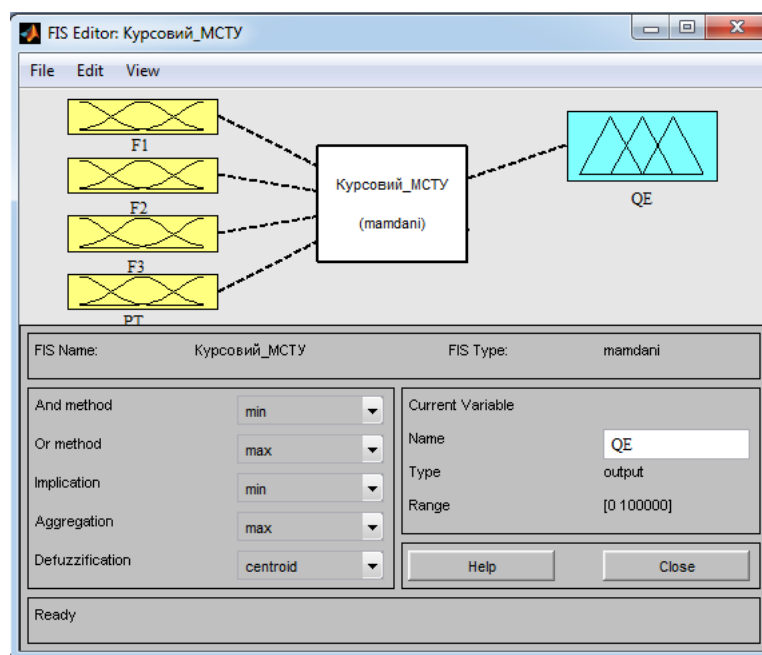


Рисунок 3.1 – Параметрична структура підсистеми (нечіткого висновку)

Настроювання функції належності:

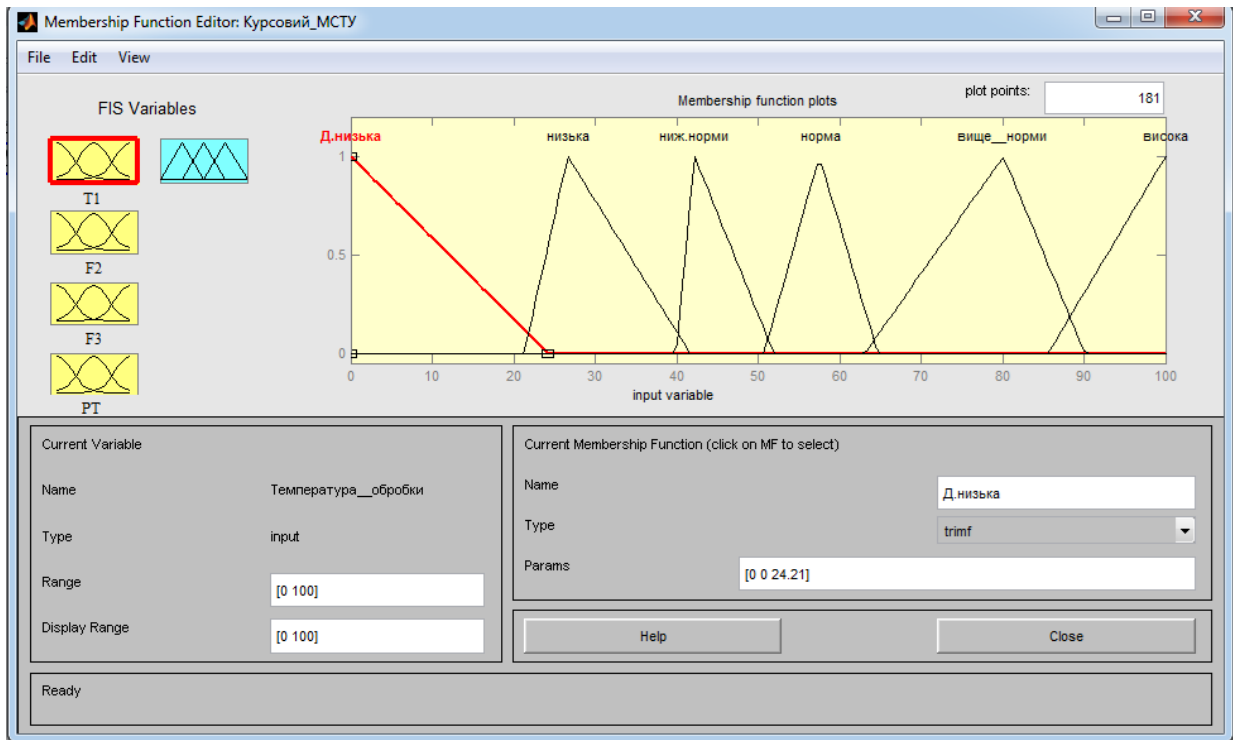


Рисунок 3.2 – Вікно редагування функції належності (температура в апараті)

Виділяємо курсором миші функцію належності і в нижній частині вікна змінюємо в зоні параметрів Current Variable параметри Range (ряд) і Display Range (ряд, що відображається) - діапазон змінювання вхідного параметру. Як правило, це мінімальне і максимальне значення параметру.

| Лінгвістичні<br>поняття | Температура обробки, С |     |     |
|-------------------------|------------------------|-----|-----|
|                         | 0                      | 25  | 100 |
| Дуже низька             | 0                      | 25  | 100 |
| Низька                  | 21                     | 30  | 42  |
| Нижче норми             | 40                     | 44  | 52  |
| Норма                   | 50                     | 58  | 67  |
| Вище норми              | 64                     | 80  | 90  |
| Висока                  | 86                     | 100 | 100 |

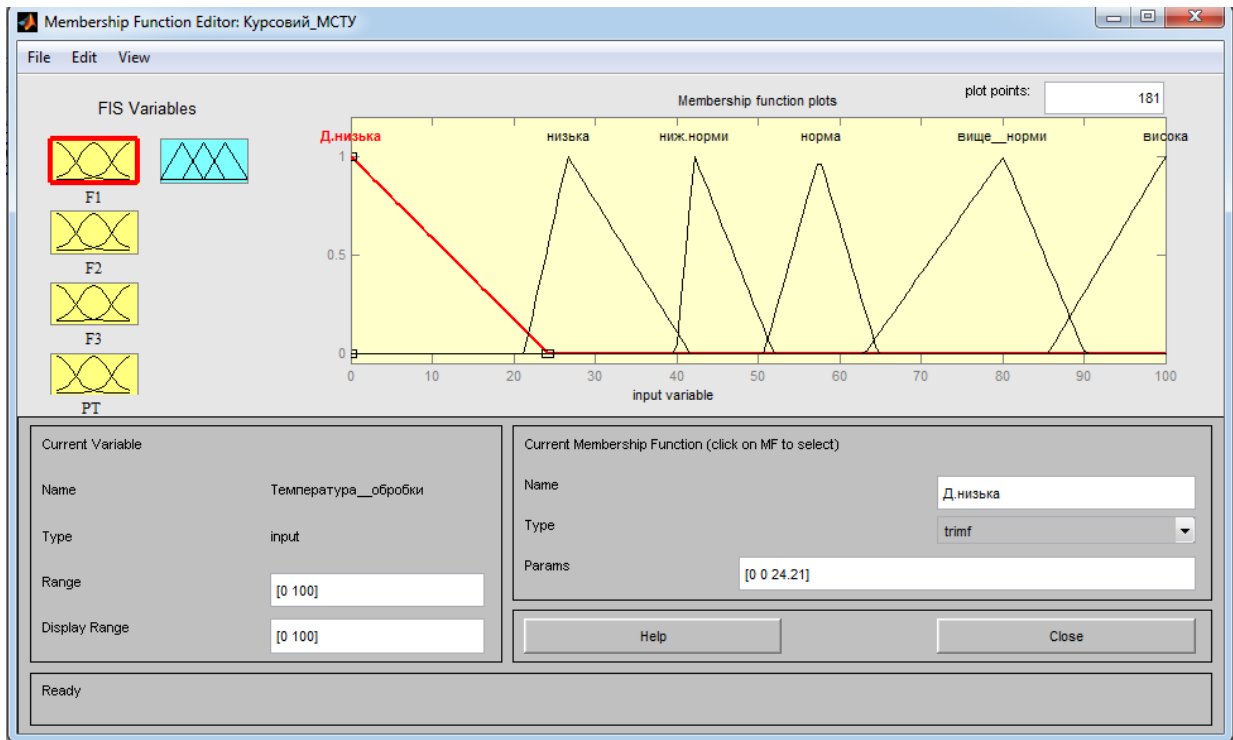


Рисунок 3.3 - Вікно редагування функції належності (витрата воли в дефлегматор)

| Лінгвістичні<br>поняття | Витрата води, л |     |     |
|-------------------------|-----------------|-----|-----|
|                         | Дуже низька     | 0   | 0   |
| Низька                  | 90              | 160 | 210 |
| Нижче норми             | 200             | 250 | 320 |
| Норма                   | 295             | 325 | 350 |
| Вище норми              | 340             | 380 | 425 |
| Висока                  | 400             | 500 | 500 |

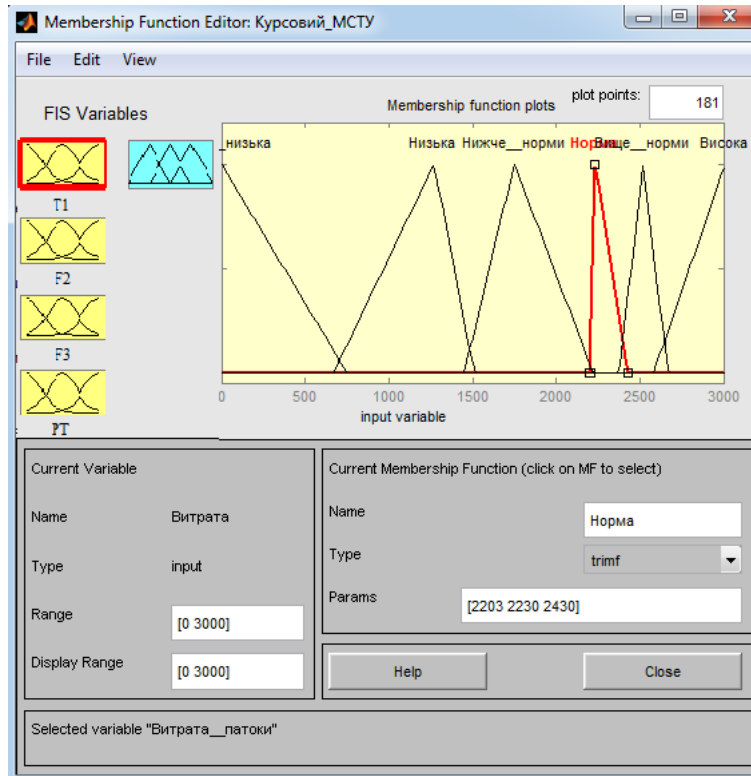


Рисунок 3.4 - Вікно редагування функцій належності (витрата бражки)

| Лінгвістичні<br>поняття | Витрата бражки, літрів |      |      |
|-------------------------|------------------------|------|------|
|                         | Дуже низька            | 0    | 0    |
| Низька                  | 700                    | 1300 | 1500 |
| Нижче норми             | 1450                   | 1700 | 2250 |
| Норма                   | 2200                   | 2300 | 2400 |
| Вище норми              | 2350                   | 2550 | 2700 |
| Висока                  | 2600                   | 3000 | 3000 |

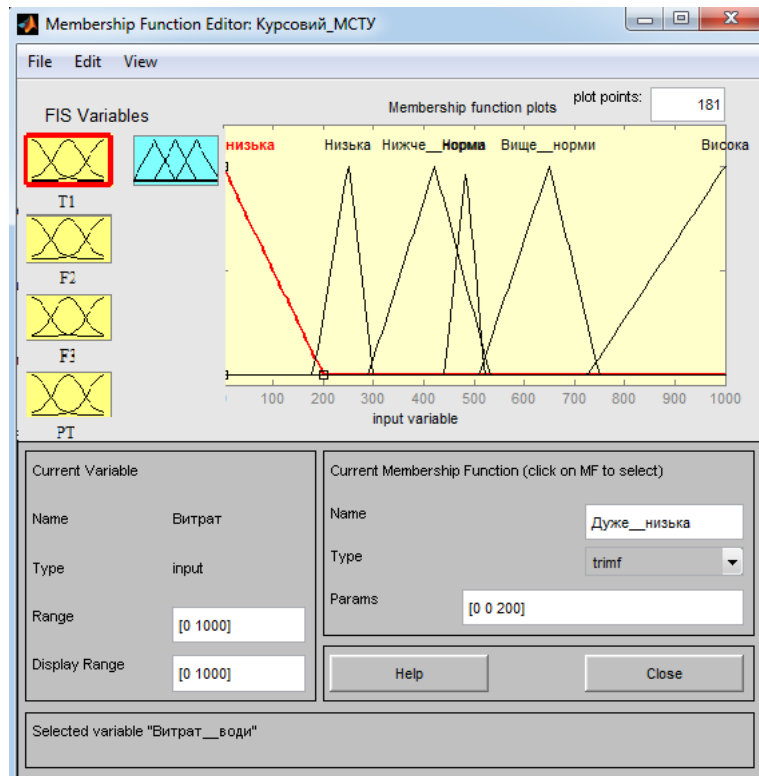


Рисунок 3.4 - Вікно редагування функцій належності (витрата пари)

| Лінгвістичні<br>поняття | Витрата пари, м <sup>3</sup> /год |      |      |
|-------------------------|-----------------------------------|------|------|
|                         | Дуже низька                       | 0    | 0    |
| Низька                  | 190                               | 260  | 300  |
| Нижче норми             | 290                               | 420  | 500  |
| Норма                   | 480                               | 520  | 580  |
| Вище норми              | 560                               | 680  | 760  |
| Висока                  | 730                               | 1000 | 1000 |

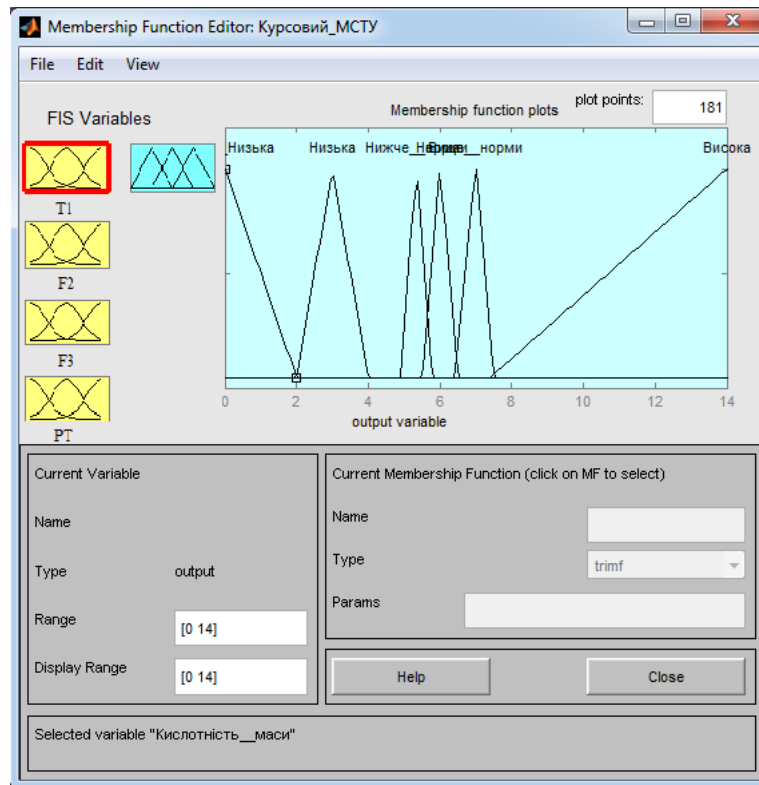


Рисунок 3.5 - Вікно редагування функцій належності (Вміст спирту)

| Лінгвістичні<br>поняття | Вміст спирту, % |    |    |
|-------------------------|-----------------|----|----|
|                         | Дуже низька     | 0  | 0  |
| Низька                  | 15              | 20 | 30 |
| Нижче норми             | 25              | 35 | 45 |
| Норма                   | 40              | 50 | 60 |
| Вище норми              | 50              | 60 | 70 |
| Висока                  | 65              | 70 | 75 |

### 3.4.2 Розробка бази правил для нечіткої системи. Аналіз результатів роботи системи

В головному вікні FIS Editor в меню Edit→Rules... відкриється вікно Rule Editor. Це вікно також відкриється подвійним натисканням лівої клавіші миші на центральному білому прямокутнику. В даному вікні визначаються нечіткі правила поведінки системи, що створюється (рис. 12).

Для перегляду результату роботи системи (підсистеми) нечіткої логіки в головному вікні FIS Editor обирають в меню View команду Rules – графічне відображення роботи алгоритму нечіткого висновку (рис.13) або команду Surface – відображення поверхні відгуку (рис.14).

В головному вікні FIS Editor в меню Edit→Rules... відкриється вікно Rule Editor. Це вікно також відкриється подвійним натисканням лівої клавіші миші на центральному білому прямокутнику. В даному вікні визначаються нечіткі правила поведінки системи, що створюється (рис. 12).

Для перегляду результату роботи системи (підсистеми) нечіткої логіки в головному вікні FIS Editor обирають в меню View команду Rules – графічне відображення роботи алгоритму нечіткого висновку (рис.4.1) або команду Surface – відображення поверхні відгуку (рис.4.2).

|             |             |                 |               |             |                              |      |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|------------------------------|------|
|             |             |                 |               |             | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|             |             |                 |               |             |                              | 107  |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                              |      |

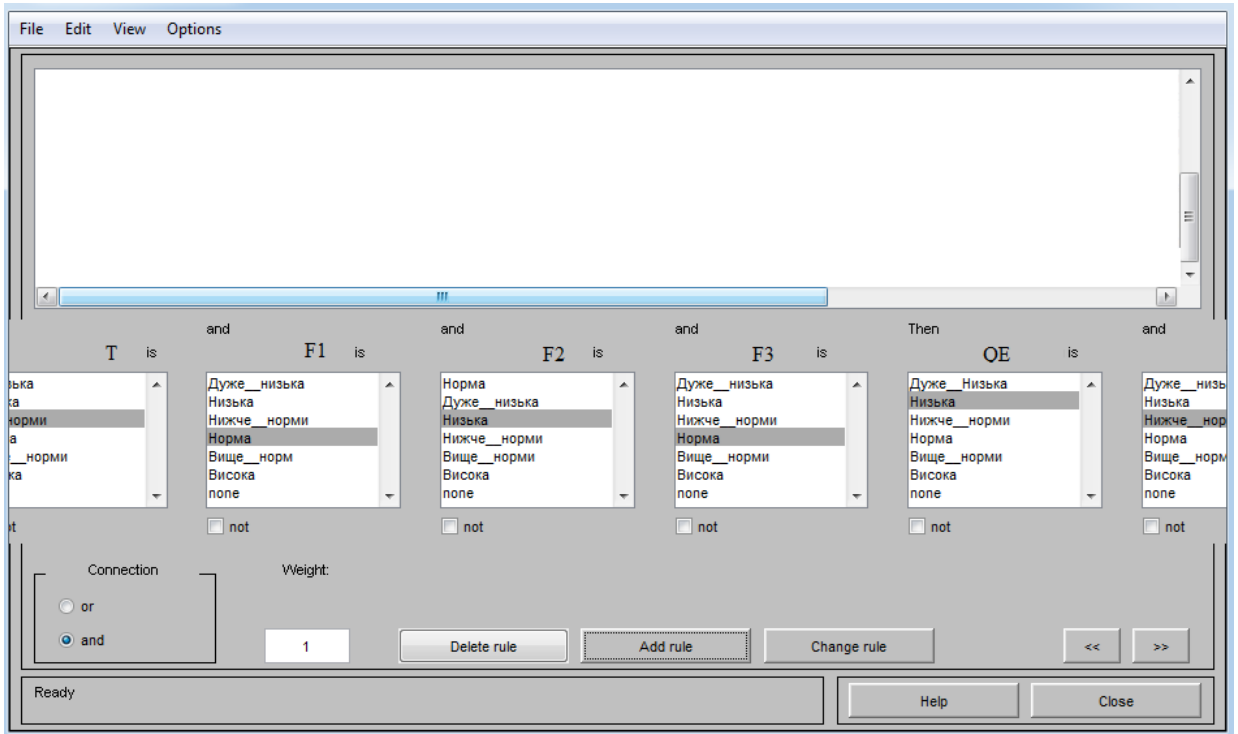


Рис.4.1 Графічне відображення роботи алгоритму нечіткого висновку. Вікно редагування правил нечіткого висновку.

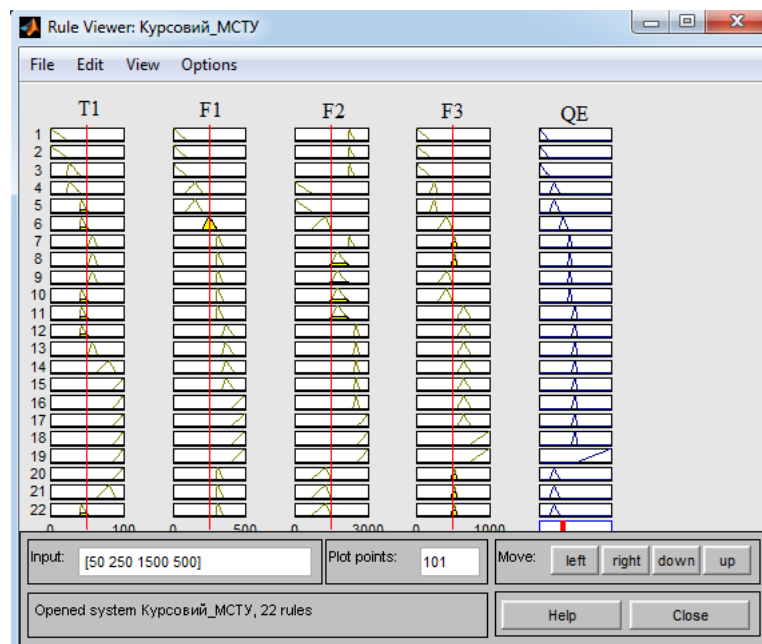


Рисунок 4.2 – Вікно графічного відображення роботи алгоритму нечіткого висновку

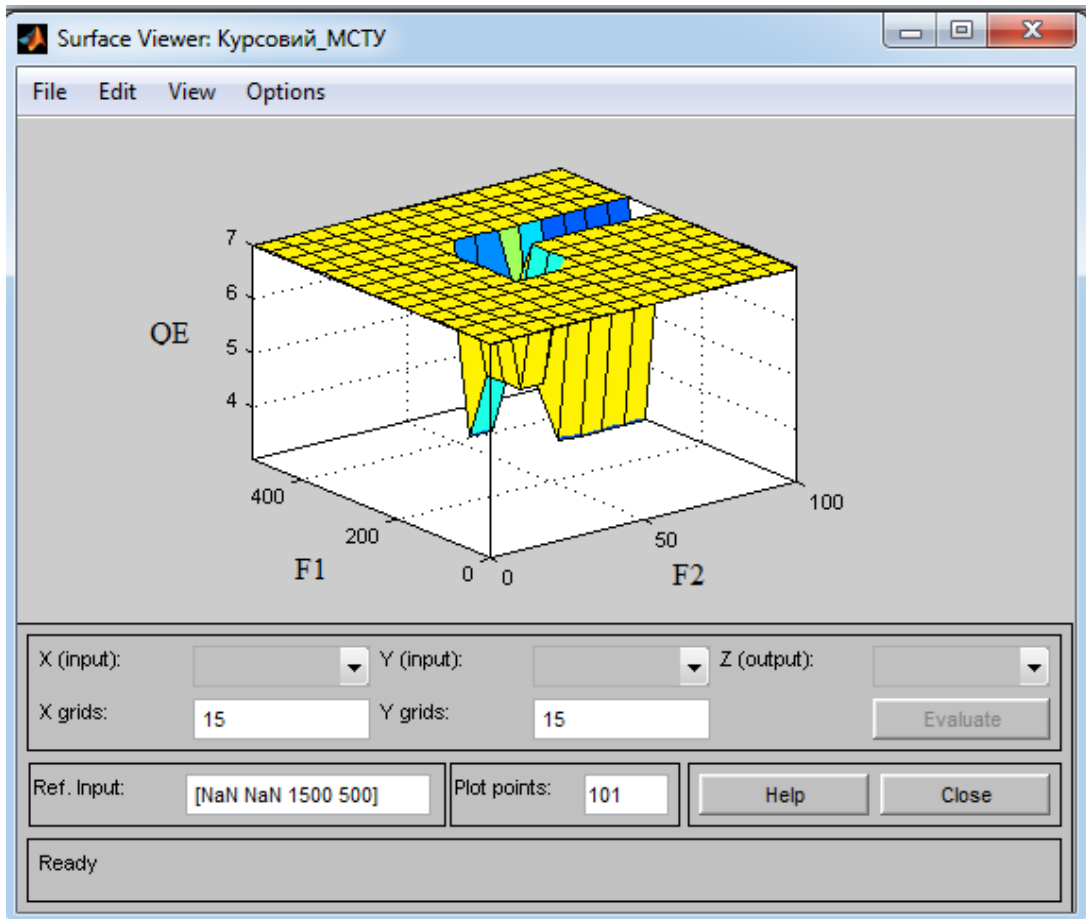


Рисунок 4.2 – Вікно відображення вмісту спирту від зміни витрати води в дефлегматор, та бражки.

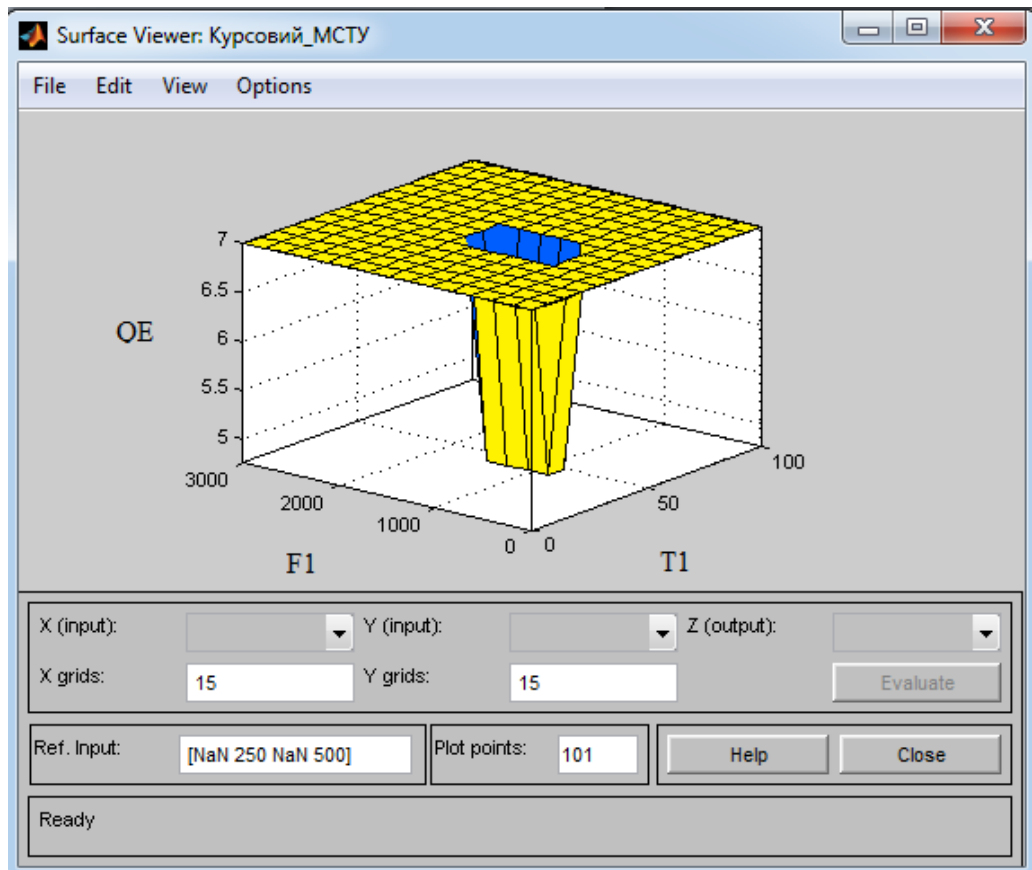


Рисунок 4.3 – Вікно відображення вмісту спирту від зміни витрати води в дефлегматор, та температури в апараті.

## Висновок

В даному проекті було створено нечітку систему логічного висновку для керування температурою в бражній колоні БРУ спиртового заводу. Основні етапи побудови систем інтелектуального керування на основі нечіткої логіки. З аналізу процесу було визначено 3 входів та 1 вихід процесу.

Функція належності являє собою імовірнісну оцінку, що показує наближене відтворення числового діапазону до лінгвістичного поняття. Для вхідних параметрів використовувалися такі функції належності: «низька», «нижче норми», «норма», «вище норми», «висока», а для вихідного: «низька», «нижче норми», «норма», «вище норми», «висока». В роботі використано гаусівську функцію належності і алгоритм Мамдані, приведення до чіткості приводиться центроїдним методом.

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 111  |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

## Список використаної літератури

1. Соколов, В.А. Автоматизация технологических процессов пищевой промышленности: навч. посіб. / В.А. Соколов. –М.: ВО Агропромиздат, 2001-445с.
2. Трегуб, В.Г. Проектирование, монтаж и эксплуатация систем автоматизации в пищевой промышленности: : навч. посіб. / В.Г Трегуб, А.П. Ладанюк, Плужников Л.Н. — К.: ЦУЛ, 2012. — 352 с.
3. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: навч. посіб. / А.С. Ключев, Б.В. Глазов, А.Х. Дубровський, А.А. Ключев. - М.: Энергоатомиздат, 2002.-464с.
4. Волошин, З.С. Автоматизация сахарного производства: навч. посіб. / З.С. Волошин, Л.П. Макаренко, П.В. Яцковский. – М.: Агропромиздат, 2001. – 271 с.
5. Сапронов, А.Р. Технология сахарного производства: навч. посіб. / В.А. Соколов –М.: Агропромиздат, 2002. – 431 с.
6. Трегуб, В.Г. Проектування, монтаж та експлуатація систем автоматизації: навч. пос. / В.Г. Трегуб –К.:НМК ВО, 2001.- 80с.
7. Останчук Н.В. Основы математического моделирования процессов пищевых производств: навч. пос. / Н.В. Останчук – М: ВО Агропомиздат, 2001.-352с.
8. Ключев, А.С. Техника чтения схем автоматического управления и технологического контроля: навч. посібник / А.С. Ключев - М.: Энергоатомиздат, 2002.- 432 с.
8. Ключев, А.С. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: навч. Посібник / А.С. Ключев. - М.: Энергия, 2003. – 388 с.
9. Тищенко, Н.И. Введение в проектирование сложных систем автоматики: навч. Посібник / Н.И. Тищенко - М.: Энергия, 2005.-304 с.

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 112  |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

10. Ключев, А.С. Монтаж средств измерений автоматизации: Справочное и пособие / А.С. Ключев. - М.: Энергоатомиздат, 2001.
11. Ладанюк, А.П. Оперативное управление технологическими комплексами в пищевой промышленности: підручник / А.П. Ладанюк, В.Г.Перепечаенко. – К.: Урожай, 2001. – 160 с.
12. Пупена О.М. Програмування промислових контролерів у середовищі Unity Pro: Навчальний посібник/ О.М. Пупена І.В. Ельперін посібник – К.: НУХТ, 2013. – 233 с.
13. Дьяченко П.Ф и др. Технология молока и молочных продуктов. Дьяченко П.Ф., Коваленко М.С., Грищенко А.Д., Чеботарёв А.Н.,-2-е изд. перераб. и доп.- М: пищевая промышленность, 2001.-447 с.,ил.
14. Технологическое оборудование предприятий молочной промышленности / Сурков В.Д., Липатов Н.Н., Золотин Ю.П. -3-е изд., перераб. и доп. – М: Лёгкая и пищевая промышленность, 2006.-432 с.
15. Трегуб В.Г. Основы комп'ютерно-інтегрованого управління: Навчальний посібник./ В.Г. Трегуб – К.: НУХТ, 2006 – 139 с.
16. «Технологические измерения и приборы в пищевой промышленности».- 2-е издание – М.:Агропроиздат, 1985. – 344 с.
17. Широкова Л.А «Автоматизация производственных процес сов и АСУ ТП в пищевой промышленности» / Л.А. Широкова – М.:Агропромиздат, 2005. – 542с.
18. Ключев А.С Проектирование систем автоматизации
19. технологических процес сов: Справочное пособие» /А.С Ключев, - М.:Энергоатомиздат, 2006. - 464 с.
20. Жидецкий В.Ц. «Основы охорони праці»/ В.Ц. Жидецкий, В.С. Джигерей, О.В. Мельников - Львів: Авіша, 2002. – 348с.
21. Основы охорони праці: Метод. рекомендації до вивч. дисципліни, викон. контрол. роботи та розділу диплом. проекту для студентів освітньо-кваліфік. рівня «бакалавр» усіх напрямів підготовки енергетик. ф-ту та ф-ту автоматиз. і

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 113  |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

комп'ютер. систем ден. та заоч. форм навч. / Уклад.: А.М. Литвиненко, В.М. Фалес, О.В. Хіврич., А.О. Сірик – К.:НУХТ, 2013-39с.

22. Ельперін І.В. Контролери та їх програмне забезпечення. Курс лекцій для студ. напр. 6.50202 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" денної та заочної форм навчання. Частина 3/

23. О.М Пупена., І.В Ельперін.. – К.: НУХТ, 2011. – 48 с.

24. Волошин З.С. Автоматизація сахарного виробництва: Учеб. Для вузов – 2-е изд/ З.С Волошин. М.: Агропромиздат, 1990. – 271с.

25. Vijeo Look. Версія 2.6. Руководство пользователя (пер. с англ.). Copyright © 2006 Schneider Automation.

26. Программное обеспечение систем автоматизации производства на базе Windows..Citect. Версия б. Руководство пользователя (пер. с англ.). Si Technologies Pty. Limited. Australia, 2005.

27. Назаров Н.И Общая технология пищевых производств. –

Н. И Назаров, М.: Легкая и пищевая промышленность. 1981. - 360 с.

28. Стабников В.Н Общая технология пищевых продуктов/ В.Н Стабников., Н.В Остапчук. К.: Вища школа 1980 р. – 340с.

29. 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.

30. Трегуб В. Г., Ладанюк А. П., Плужников Л. Н. Проектирование, монтаж и эксплуатация систем автоматизации в пищевой промышленности: Учебник для вузов. – М.: Агропромиздат, 2001. – 352 с.

31. Трегуб В. Г., Ладанюк А. П. Проектирование, монтаж и эксплуатация систем автоматизации пищевых производств. – М.: Лег. и пищ. пром-сть, 2001. – 352 с.

32. Трегуб В. Г. Проектування, монтаж та експлуатація систем автоматизації: Навч. посібник – К.: НМК ВО, 2000. – 80 с.

33. Основи проектування систем автоматизації з елементами САПР: Метод. вказівки до практичних занять для студ. напряму 0925 "Автоматизація і

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 114  |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

комп'ютерно-інтегровані технології" ден. та заоч. форм навч./ Уклад.: В.Г. Трегуб. – К.:НУХТ, 2008. – 67 с.

34. Попович, М.Г. Теорія автоматичного керування [Текст]: підручник / М.Г.Попович, О.В.Ковальчук. - К.: Либідь, 1997. - 577 с.

35. Ладанюк А.П. Курс лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного керування (для студентів усіх форм навчання напряму 0925 - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» - (частина перша)) [Текст] / А.П. Ладанюк; Над. університет харчових технологій. - К.: Т1УХТ, 2004. - і 84 с.

36. Ладанюк А.П. Курс лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного керування (для студентів усіх форм навчання напряму 0925 - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» - (частина друга)) [Текст] / А.П.Ладанюк; Нац. університет харчових технологій. - К.: НУХТ, 2005. -115 с.

37. Ладанюк. А.П. Конспект лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного керування (для студентів усіх форм навчання напряму 0925 - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» ~ (частина перша)) [Текст] /

38. Ладанюк А.П., К.С.Архангельська; Нац. університет харчових технологій. - К.: НУХТ, 2007. - 102 с.

39. Ладанюк, А.П. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: Підручник/ А.П. Ладанюк, В.Г.Трегуб,- 1.В. Ельперін,

40. Д.І. Дюцюра. - К.: Аграрна освіта, 2001. - 224 с.

41. Солодовников. В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования [Текст]: учебное пособие для вузов / В.В.Солодовников, В.А.Плотников, А.В.Яковлев.- М: Машиностроение, 1985. - 536 с.

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>Кваліфікаційна робота</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 115  |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |