

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

МР.АКПМ-15.00.00.000 ПЗ

Група АКПМ-24-1

**Володимир Копильців**

**2025**

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

**Копильців Володимир Зореславович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

**681.5**

(індекс)

# **МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

**Удосконалення системи автоматизації процесу виробництва поліетилену**

(назва роботи)

**середнього тиску**

**Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології**

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

## **Консультант з нормоконтролю**

**асистент**

(посада)

**Л.І. Лагойда**

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

## **Здобувач освітнього ступеня**

**АКПм-24-1**

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

**В.З. Копильців**

(ініціали та прізвище)

## **Науковий керівник**

**к.т.н., доцент**

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

**Л.І. Фешанич**

## **Допущено до захисту**

### **Завідувач кафедри**

**доцент, к.т.н.**

(посада)

(підпис)

(дата)

**А.І. Лагойда**

(ініціали та прізвище)

## **Рецензент**

**доцент, к.т.н.**

(посада)

(підпис)

(дата)

**В.С. Борин**

(ініціали та прізвище)

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

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень другий (магістерський)

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

(шифр і назва)

робототехніка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

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

Копильціву Володимиру Зореславовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення системи автоматизації процесу виробництва поліетилену середнього тиску

керівник роботи Фешанич Лідія Ігорівна, кандидат технічних наук, доцент

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

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

2. Строк подання студентом роботи 08.12.2025

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

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Аналіз технологічного процесу полімеризації етилену середнього тиску. Розробка функціональної схеми автоматизації. Розробка адаптивного нечіткого PID-регулятора для стабілізації технологічних параметрів реактора-полімеризатора. Розробка програмного забезпечення верхнього рівня автоматизації каскаду полімеризаторів. Висновок.

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

## 6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 30.10.2024

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу полімеризації етилену середнього тиску	27.12.2024	
2	Розробка функціональної схеми автоматизації	31.01.2025	
3	Опис технічних засобів автоматизації	28.02.2025	
4	Розробка адаптивного PID-регулятора	01.05.2025	
5	Розробка структури комп'ютерно-інтегрованої системи керування	30.09.2025	
6	Розробка SCADA-системи керування каскадом реакторів-полімеризаторів	30.10.2025	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Копильців В.З. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Фешанич Л.І. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Магістерська робота містить: 84 сторінки друкованого тексту, 66 рисунків, 5 таблиць і 26 переліків посилань на джерела.

Тема: «Удосконалення системи автоматизації виробництва поліетилену середнього тиску».

Об'єкт дослідження: процес полімеризації етилену під дією каталізатора при середньому тиску та температурі.

Мета проекту: розробка автоматизованої системи керування каскадом реакторів полімеризації етилену з використанням SCADA-системи для диспетчеризації та нечіткого регулятора для підвищення якості керування в умовах невизначеності та нелінійностей технологічного процесу.

Методи дослідження: ідентифікація, аналіз та синтез систем автоматичного керування, імітаційне моделювання, використання математичного програмного пакету Matlab, використання програмного пакету GE iFix.

Результати дипломного проектування: впроваджений нечіткий регулятор для керування реактором-полімеризатором, розроблена SCADA-система для контролю процесом полімеризації в каскаді реакторів-полімеризаторів.

Ключові слова: ЕТИЛЕН, ПОЛІЕТИЛЕН, ДАВАЧ, РЕАКТОР-ПОЛІМЕРИЗАТОР, РЕГУЛЯТОР, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, НЕЧІТКИЙ РЕГУЛЯТОР, SCADA.

## ANNOTATION

The master's thesis contains: 84 pages of printed text, 66 figures, 5 tables and 26 lists of references.

Topic: "Improvement of the automation system for the production of medium-pressure polyethylene".

Object of research: the process of polymerization of ethylene under the action of a catalyst at medium pressure and temperature.

Project goal: development of an automated control system for a cascade of ethylene polymerization reactors using a SCADA system for dispatching and a fuzzy controller to improve the quality of control in conditions of uncertainty and nonlinearities of the technological process.

Research methods: identification, analysis and synthesis of automatic control systems, simulation modeling, use of the Matlab mathematical software package, use of the GE iFix software package.

Results of the diploma project: a fuzzy controller for controlling the reactor-polymerizer was implemented, a SCADA system was developed to control the polymerization process in a cascade of reactor-polymerizers.

Keywords: ETHYLENE, POLYETHYLENE, SENSOR, POLYMERIZER REACTOR, REGULATOR, CONTROL SYSTEM, FUZZY REGULATOR, SCADA.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....</b>	<b>8</b>
<b>ВСТУП .....</b>	<b>9</b>
<b>РОЗДІЛ 1</b>	
<b>АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПОЛІМЕРИЗАЦІЇ ПОЛІЕТИЛЕНУ .....</b>	
<b>13</b>	
1.1 Призначення і суть процесу.....	13
1.2 Опис технологічного процесу .....	15
1.2.1 Технічна характеристика технологічного обладнання.....	18
1.2.2 Параметри технологічного процесу .....	24
1.3 Об'єкт керування.....	26
1.4 Постановка задачі.....	27
Висновки до розділу 1 .....	29
<b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....</b>	
<b>30</b>	
2.1 Опис функціональної схеми автоматизації.....	30
2.2 Опис ТЗА .....	33
Висновки до розділу 2 .....	41
<b>РОЗДІЛ 3</b>	
<b>РОЗРОБКА АДАПТИВНОГО НЕЧІТКОГО PID-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕАКТОРА- ПОЛІМЕРИЗАТОРА .....</b>	
<b>42</b>	
3.1 Опис математичної моделі та PID-регулятора реактора-полімеризатора.....	42
3.2 Мета та концепція .....	45
3.3 Синтез нечіткого регулятора .....	47
3.3.1 Формування нечіткої бази правил .....	47
3.3.2 Вибір вхідних та вихідних змінних .....	48
3.3.3 Побудова функцій належності.....	48

	7
3.3.4 Формування бази правил .....	51
3.4 Моделювання системи в MATLAB Simulink.....	56
Висновки до розділу 3 .....	61
<b>РОЗДІЛ 4</b>	
<b>РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВЕРХНЬОГО РІВНЯ</b>	
<b>АВТОМАТИЗАЦІЇ КАСКАДУ ПОЛІМЕРИЗАТОРІВ .....</b>	<b>62</b>
4.1 Розробка структури комп'ютерно-інтегрованої системи керування.....	62
4.2 Характеристика SCADA-системи .....	63
4.3 Розробка проекту.....	65
4.3.1 Загальні відомості про структуру проекту.....	65
4.3.2 Опис панелі «Scheme».....	67
4.3.3 Опис панелі «Control Panel» .....	68
4.3.4 Опис панелі «Indicator Panel» .....	70
4.3.5 Опис панелі «Gauges» .....	72
4.3.6 Опис процесу .....	73
4.3.7 База тегів системи.....	78
4.3.8 Графік подій системи .....	79
Висновки до розділу 4 .....	81
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>82</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>83</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

ПЕСТ – поліетилен середнього тиску.

ТЗА – технічні засоби автоматизації.

SCADA – система диспетчерського керування та збору даних.

FLC – Fuzzy Logic Controller, нечіткий логічний регулятор.

PID – пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор.

GE iFIX – програмний пакет SCADA-системи фірми General Electric.

Matlab – математичний програмний пакет для моделювання динамічних систем.

Simulink – середовище моделювання динамічних систем в Matlab.

OPC – стандарт обміну даними між системами автоматизації.

HMI – Human Machine Interface, людино-машинний інтерфейс.

T – температура, °C.

p – тиск, МПа.

Q – витрата, кг/год.

C – концентрація компонента, %.

E – похибка регулювання.

dE – похідна похибки регулювання.

Kp – пропорційний коефіцієнт регулятора.

Ki – інтегральний коефіцієнт регулятора.

Kd – диференційний коефіцієнт регулятора.

## ВСТУП

### **Актуальність теми.**

Автоматизація процесу виробництва поліетилену середнього тиску (ПЕСТ) являє собою актуальну задачу в хімічній промисловості. Якість та продуктивність процесу полімеризації етилену залежить від точності дотримання технологічних параметрів, таких як температура, тиск, концентрація каталізатора та витрата мономеру.

Суттєвим недоліком традиційних систем керування є їх неадекватність при роботі з нелінійними об'єктами та при наявності невизначеностей у моделі процесу. Класичні ПІД-регулятори, хоча й широко застосовуються в промисловості, не забезпечують достатнього рівня якості керування в умовах змінних режимів роботи та непередбачених змін параметрів технологічного процесу.

### **Обґрунтування вибору теми дослідження.**

Основною причиною досліджень є удосконалення існуючої системи автоматизації каскаду реакторів-полімеризаторів. Розробка адаптивної системи регулювання на базі методів нечіткої логіки (Fuzzy Logic) дозволить суттєво підвищити якість керування процесом полімеризації в умовах невизначеності та нелінійності технологічного процесу.

Крім того, розробка сучасної SCADA-системи для моніторингу та контролю процесу забезпечить операторам виробництва зручний інтерфейс для управління системою та аналізу технологічних параметрів у реальному часі.

### **Мета і завдання дослідження.**

Метою магістерської роботи є розробка удосконаленої системи автоматизації процесу полімеризації етилену з використанням адаптивного нечіткого логічного регулятора для стабілізації технологічних параметрів та розробка SCADA-системи для диспетчеризації та контролю каскаду реакторів-полімеризаторів.

Завдання дослідження:

- 1) Провести аналіз та опис технологічного процесу виробництва ПЕСТ;
- 2) Розробити функціональну схему автоматизації каскаду реакторів;
- 3) Описати математичну модель реактора-полімеризатора;
- 4) Розробити адаптивний нечіткий логічний регулятор (FLC) для керування процесом полімеризації в реакторах;
- 5) Провести порівняльний аналіз результатів роботи Fuzzy-регулятора та традиційного ПД-регулятора;
- 6) Розробити комплексну SCADA-систему для моніторингу та контролю процесу полімеризації в каскаді реакторів.

Об'єктом дослідження є процес полімеризації етилену під дією каталізатора при середньому тиску та температурі.

Предметом дослідження є методи та засоби удосконалення системи автоматизації процесу полімеризації етилену, включаючи розробку адаптивного нечіткого логічного регулятора для стабілізації технологічних параметрів та розробку SCADA-системи для контролю та моніторингу каскаду реакторів-полімеризаторів.

#### **Методи дослідження.**

При виконанні роботи застосовано такі методи дослідження:

- Ідентифікація, аналіз та синтез систем автоматичного керування — для вивчення динаміки об'єкта керування та розробки регулюючих алгоритмів;
- Імітаційне моделювання — для експериментальної перевірки розроблених систем керування;
- Метод нечіткої логіки (Fuzzy Logic) — для розробки адаптивного регулятора;
- Комп'ютерне моделювання у MATLAB/Simulink — для побудови математичної моделі процесу та синтезу регулятора;
- Розробка SCADA-систем у спеціалізованих програмних пакетах (GE iFix) — для створення системи моніторингу та контролю.

### **Новизна отриманих результатів.**

Наукова новизна роботи полягає в:

- Розробці адаптивної системи регулювання на базі нечіткої логіки, яка враховує нелінійність об'єкта керування та забезпечує стабільну роботу процесу в умовах невизначеності технологічних параметрів;
- Синтезі комплексної SCADA-системи для диспетчеризації та моніторингу каскаду реакторів-полімеризаторів з використанням сучасних методів збору та обробки даних;
- Порівняльному аналізу Fuzzy-регулятора та традиційного ПІД-регулятора, який демонструє переваги адаптивного підходу для керування нелінійними процесами.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами**

Магістерська робота виконана відповідно до навчального плану спеціальності 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка" та плану науково-дослідних робіт кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

### **Практичні значення отриманих результатів**

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості впровадження розроблених систем на діючих підприємствах хімічної промисловості для:

- Підвищення якості ПЕСТ за рахунок точнішого керування технологічними параметрами;
- Зменшення браку та відходів у процесі виробництва;
- Оптимізації витрат енергоносіїв шляхом більш ефективного регулювання температури та тиску;
- Підвищення продуктивності процесу полімеризації в каскаді реакторів;

- Покращення умов праці операторів за рахунок розробленої SCADA-системи з зручним інтерфейсом моніторингу.

### **Структура та обсяг магістерської роботи**

Магістерська робота містить 84 сторінки друкованого тексту, 66 рисунків, 5 таблиць та 26 найменувань джерел.

Структура роботи:

- Вступ — обґрунтування актуальності та значущості роботи;
- Розділ 1 — аналіз технологічного процесу полімеризації етилену середнього тиску;
- Розділ 2 — розробка функціональної схеми автоматизації та опис ТЗА;
- Розділ 3 — розробка адаптивного нечіткого ПД-регулятора та порівняння з традиційним ПД-регулятором;
- Розділ 4 — розробка програмного забезпечення верхнього рівня автоматизації (SCADA-система);
- Висновок — узагальнення отриманих результатів та рекомендації щодо їх впровадження.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПОЛІМЕРИЗАЦІЇ ПОЛІЕТИЛЕНУ

### 1.1 Призначення і суть процесу

Поліетилен середнього тиску (ПЕСТ) являє собою полімер, що отримується при полімеризації етилену і розраховано на застосування у виробництві гнучких матеріалів. ПЕСТ позиціонується як матеріал з оптимальним сполученням гнучкості та міцності, що робить його придатним для виробництва плівкових матеріалів, трубопроводів та виробів, які вимагають відповідної еластичності та витривалості.

Процес отримання ПЕСТ заснований на полімеризації етилену в розчинному середовищі при контрольованих температурі та тиску. Основними сировинними матеріалами служать етилен, отриманий з природного газу або шляхом крекінгу вуглеводнів, та каталізатори, які забезпечують активацію мономеру для полімеризації. Важливим етапом є попередня очистка етилену для видалення домішок, які можуть негативно позначитися на характеристиках кінцевого продукту.

Суть процесу полімеризації полягає в активації подвійних зв'язків молекул етилену за допомогою каталізаторів. Каталізатори, що використовуються у промислових процесах виробництва ПЕСТ, зазвичай являють собою оксиди металів змінної валентності (хромум, молібдену, ванадію), нанесені на пористий алюмосилікатний носій. Найпоширенішими є оксиди хрому, які забезпечують оптимальне поєднання активності та селективності процесу. Процес полімеризації проходить у реакторах, де етилен розчиняється у рідкому розчиннику (переважно бензині або ксилолі), забезпечуючи рівномірний розподіл каталізатора та контрольоване тепловідведення.



Рис. 1.1. Гранули поліетилену середнього тиску

Практичні умови проведення полімеризації підбираються таким чином, щоб досягти оптимальної якості продукту. Температура у реакторах підтримується на рівні 140-145 °С, тиск становить близько 4,0 МПа. Дотримання цих параметрів критично важливе для забезпечення однорідного продукту з необхідними молекулярною масою та властивостями. Підвищення температури прискорює реакцію, але може призвести до дезактивації каталізатора, тому її регулювання виконується з високою точністю. Збільшення тиску сприяє зростанню молекулярної маси полімеру, однак ефект уповільнюється при досягненні 3,0-3,5 МПа.

Активність каталізатора визначається пористістю його носія та концентрацією активного компонента. Оптимальний вміст оксидів хрому зазвичай становить 5-6% від маси носія, а температура активації каталізатора досягає 500-600 °С. Підбір каталізатора впливає на швидкість полімеризації та молекулярну масу продукту: з підвищенням активності каталізатора зростає швидкість реакції, однак молекулярна маса може знизитися.

Для управління теплом реакції, яке є значним, використовується введення додаткової кількості етилену та розчинника в реакційну суміш. Ці компоненти, нагріваючись, поглинають частину виділеного тепла, забезпечуючи підтримання стабільної температури у реакторі.

Продукт полімеризації впродовж процесу концентрується від початкових ~8% до ~20% у третьому реакторі каскаду. Отриманий поліетилен

потім проходить процеси концентрування, дегазації та грануляції, в результаті яких отримуються гранули готового ПЕСТ.

Основні переваги ПЕСТ як матеріалу включають:

- гнучкість і міцність - ПЕСТ поєднує достатню гнучкість для плівкового виробництва з механічною міцністю для конструкційних застосувань;
- хімічна стійкість - матеріал стійкий до взаємодії з більшістю хімічних речовин, що розширює спектр його застосування;
- термічна стійкість - здатність зберігати властивості у широкому температурному діапазоні робить ПЕСТ придатним для трубопроводів та систем теплопередачі;
- простота обробки - легкість екструзії та формування дозволяє виробляти різноманітні вироби з високою продуктивністю;
- вторинна переробка - матеріал підлягає переробці, що сприяє створенню ефективних систем утилізації.

Застосування ПЕСТ охоплює численні галузі промисловості: упаковку для харчових та медичних продуктів, газо- та водопровідні системи, контейнери для зберігання, сільськогосподарські плівки, будівельні матеріали для гідро- та теплоізоляції. Висока універсальність матеріалу обґрунтовує його широкого використання в промисловому виробництві.

## **1.2 Опис технологічного процесу**

Процес отримання поліетилену середнього тиску здійснюється у розчинному середовищі при контрольованих температурі та тиску. Отримання ПЕСТ засновано на методі газо-фазної полімеризації етилену у спеціальних реакторах з використанням каталізаторів, які активують мономер.

Основні умови проведення процесу полімеризації підбираються для досягнення оптимальної якості продукту. Типові параметри процесу становлять: температура в реакторах 140-145 °С, тиск близько 4,0 МПа.

Дотримання цих параметрів є критично важливим для забезпечення однорідного продукту з необхідними молекулярною масою та фізико-механічними властивостями.

Технологічний процес виробництва ПЕСТ на окисно-хромовому катализаторі за неперервною схемою складається з наступних основних стадій: підготовка первинної сировини (етилену, катализатора та розчинника), полімеризація етилену, концентрування розчину поліетилену, виділення та грануляція поліетилену, регенерація розчинника й етилену.

#### Підготовка та введення реагентів

«Суспензія катализатора в розчиннику (переважно бензині) приготується у спеціальному апараті змішувачі і потім дозується в перший полімеризатор каскаду. Одночасно в перший полімеризатор подаються етилен та розчинник, попередньо нагріті до 120 °С. Така попередня підготовка забезпечує рівномірний розподіл катализатора та оптимальні умови для початку реакції полімеризації»[6].

#### «Каскадна полімеризація у трьох реакторах

Перший полімеризатор (П1). У першому реакторі при температурі 140-145 °С і тиску 4 МПа відбувається полімеризація етилену. Процес протікає до досягнення концентрації поліетилену в розчині близько 8%. Навколо реактора знаходиться теплообмінна оболонка, через яку циркулює охолоджуюча рідина для контролю температури»[6].

«Другий полімеризатор (П2). Розчин поліетилену з першого реактора через теплообмінник передається у другий полімеризатор, де процес полімеризації продовжується. На цьому етапі концентрація поліетилену досягає приблизно 14%. Тепло реакції відводиться як подачею охолоджуваної суміші, так і введенням додаткової кількості нагрітого етилену, який поглинає частину виділеного під час полімеризації тепла»[6].

«Третій полімеризатор (П3). У третьому реакторі процес полімеризації завершується, і концентрація поліетилену досягає 18-20%. Отримана суміш у

вигляді розчину поліетилену в розчиннику подається далі у технологічний цикл»[6].

#### Охолодження та розділення

«Парогазова суміш, що виходить з третього полімеризатора, надходить у конденсатор, де охолоджується до 60 °С. При охолодженні відбувається конденсація парів розчинника і етилену. Конденсована суміш та розчин поліетилену розділяються у сепараторі на рідку та газову фази. Етилен та розчинник після розділення та очищення повертаються у цикл для повторного використання»[6].

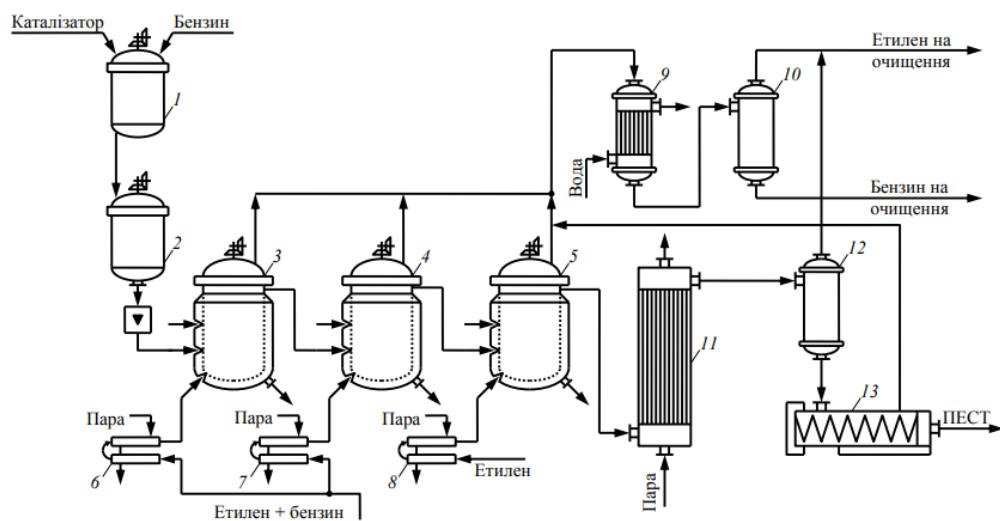


Рис. 3.1. Схема процесу виробництва поліетилену середнього тиску неперервним методом:  
 1 – апарат для приготування суспензії каталізатора; 2 – збирач суспензії; 3, 4, 5 – полімеризатори;  
 6, 7, 8 – підігрівники; 9 – холодильник; 10, 12 – сепаратори-дегазатори; 11 – концентратор розчину поліетилену;  
 13 – шнековий агрегат для виділення та грануляції поліетилену; ПЕСТ – поліетилен середнього тиску

#### Рис. 1.2. Технологічна схема виробництва поліетилену середнього тиску

#### Концентрація розчину

«Розчин поліетилену, розділений від каталізатора, фільтрується для видалення залишків каталітичної системи, а потім передається у концентратор. У концентраторі тиск розчину знижується шляхом дроселювання з 4 МПа до 1 МПа. При такому зниженні тиску розчинник та залишки етилену випаровуються, а концентрація поліетилену зростає до 35%»[6].

#### Дегазація та грануляція

«Далі концентрована суміш надходить у сепаратор-дегазатор, де відбувається видалення залишків етилену та парів розчинника. Очищений поліетилен потім надходить у гранулятор, де розплав розрізається на гранули, охолоджується та упаковується як готовий продукт» [6].

Таким чином, процес виробництва ПЕСТ є циклічним, де основні компоненти (етилен та розчинник) регенеруються та повертаються для повторного використання, що робить виробництво економічно ефективним. Вся система операцій супроводжується постійним контролем температури, тиску та концентрації на кожному етапі для забезпечення стійких показників якості та максимальної продуктивності.

### 1.2.1 Технічна характеристика технологічного обладнання

Для здійснення процесу полімеризації етилену необхідне спеціалізоване обладнання, яке забезпечує контрольовані умови температури, тиску та перемішування. Основні апарати технологічної лінії описані нижче.

#### Змішувач

Змішувач призначений для приготування суспензії каталізатора в розчиннику (бензині) перед подачею в перший полімеризатор. Це вертикальний циліндричний апарат з електромеханічним приводом та теплообмінною оболонкою для контролю температури.

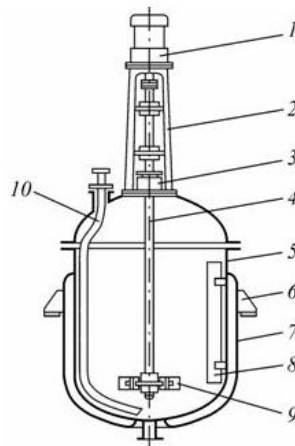


Рис. 1.3. Змішувач для приготування суспензії:

Основні параметри змішувача:

- Об'єм змішувача: від 1 м<sup>3</sup> до 32 м<sup>3</sup>;
- Динамічна в'язкість робочого середовища: не більше 7 Па·с;
- Максимальна масова концентрація твердої фази: 30%;
- Тиск у корпусі апарата: до 1,6 МПа;
- Температура теплоносія: від -30°C до +250°C.

Внутрішня мішалка оснащена лопатками, які приводяться в обертання електродвигуном через редуктор. Теплообмінна оболонка із зовнішньої сторони забезпечує охолодження або нагрівання суспензії під час приготування.

Полімеризатор

Полімеризатор є основним апаратом для проведення реакції полімеризації етилену. Він представляє собою вертикальний циліндричний апарат з теплообмінною оболонкою та внутрішньою мішалкою.

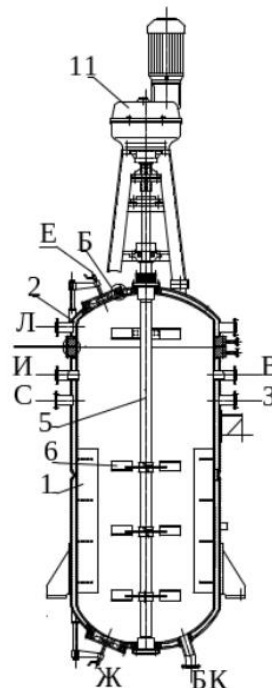


Рис. 1.4. Полімеризатор

Конструкція полімеризатора включає:

- Вертикальний циліндричний корпус з внутрішнім діаметром 1000-3000 мм;
- Теплообмінна оболонка для відведення тепла реакції;
- Вал мішалки з турбінками та лопатками для перемішування;
- Верхній та нижній люки для доступу при обслуговуванні;
- Штуцери для введення реагентів та виводу продуктів;
- Технічні параметри полімеризаторів:;
- Робочий об'єм: 1-3 м<sup>3</sup>;
- Робоча температура: від +20°C до +200°C;
- Максимально допустимий тиск: 7,5 МПа;
- Висота апарата: 3240-5500 мм.

На кожному полімеризаторі каскаду розташовані штуцери для вводу свіжої суспензії каталізатора та розчинника, вводу нагрітого етилену, та вивода розчину поліетилену в наступний реактор або в наступну технологічну ступінь.

#### Конденсатор

Конденсатор служить для охолодження розчину полімеру, що виходить з третього полімеризатора, та для конденсації парів етилену та розчинника.

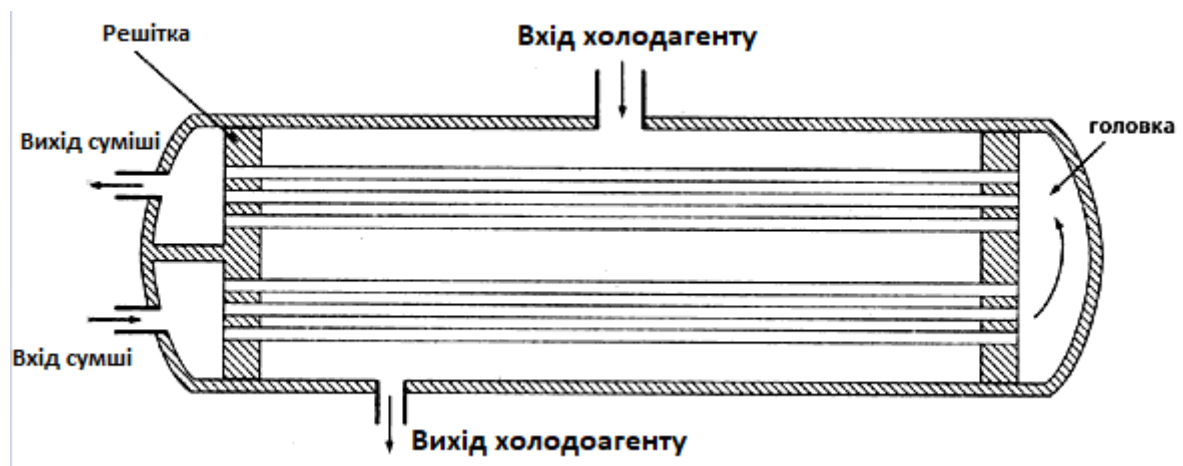


Рис. 1.5. Схема конденсатора

#### Основні характеристики:

- тиск всередині резервуару: близько 1 МПа;
- температура охолодження: 60°C.

При охолодженні та дроселюванні етилен та пари розчинника конденсуються, що дозволяє їх повернути в цикл

Всередині конденсатора знаходиться система охолоджуючих елементів, по яких циркулює холодоносій для видалення тепла реакції.

#### Сепаратор

Сепаратор призначений для розділення газової та рідкої фаз. Конденсована суміш етилену та бензину розділяється, дозволяючи повернути газоподібні компоненти до циклу.

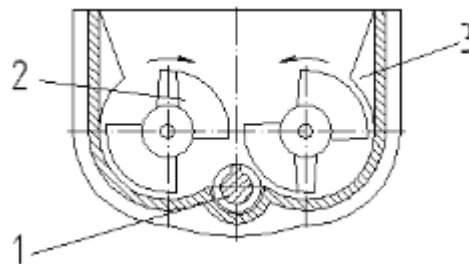


Рис. 1.6. Дегазатор

1 – шнек; 2 – лопаті; 3 – відбивачі

Принцип роботи сепаратора ґрунтується на різниці в щільності фаз. Газова фаза піднімається, а рідка фаза опускається та виводиться через нижній патрубок.

#### Концентратор

Концентратор служить для видалення розчинника та етилену зі розчину полімеру через дроселювання тиску. При зниженні тиску з 4 МПа до 1 МПа випаровуються залишки летких компонентів, концентрація поліетилену підвищується до 35%.

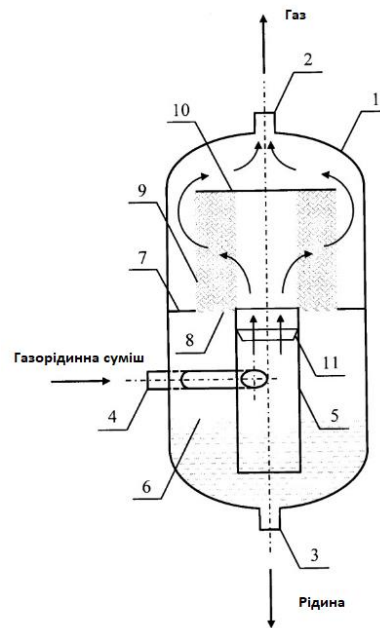


Рис. 1.7. Сепаратор

Основні параметри концентратора:

- тиск на вході: 4 МПа;
- тиск на виході: 1 МПа;
- вихідна концентрація поліетилену: 35%.

Дегазатор

Дегазатор призначений для видалення залишків етилену та розчинника з поліетиленового розчину перед передачею до гранулятора. Процес дегазації здійснюється методом змішування для інтенсивного видалення летких компонентів.

Основні елементи дегазатора:

- циліндричний корпус з вертикальним валом;
- шнек на валу для перемішування та розрідження матеріалу;
- лопаті та відбивачі для інтенсифікації видалення газів;
- верхній та нижній люки для завантаження та розвантаження.

Гранулятор

Гранулятор служить для розрізання розплавленого поліетилену на гранули, охолодження та готування до упаковки.

Основні функції:

- розрізання полімеру на гранули однакового розміру;
- охолодження гранул до кімнатної температури;
- упаковка готової продукції.

Таким чином, весь комплекс обладнання забезпечує послідовне проведення реакції полімеризації від введення каталізатора до виробництва готових гранул поліетилену середнього тиску. Кожен апарат оснащений системами контролю та регулювання для дотримання оптимальних умов процесу.

## 1.2.2 Параметри технологічного процесу

Таблиця 1.1

### Параметри індикації, реєстрації, сигналізації

Позначення/позиція на ФСА	Параметр	Призначення індикатора	Значення параметру	Норма
HL1	Температура в полімеризаторі П1	Сигналізація	Поза нормою	140-145°C
HL3	Температура в полімеризаторі П2	Сигналізація	Поза нормою	140-145°C
HL5	Температура в полімеризаторі П3	Сигналізація	Поза нормою	140-145°C
HL2	Тиск в полімеризаторі П1	Сигналізація	Поза нормою	4МПа
HL4	Тиск в полімеризаторі П2	Сигналізація	Поза нормою	4МПа
HL6	Тиск в полімеризаторі П3	Сигналізація	Поза нормою	4МПа
HL7	Температура в холодильнику Х1	Сигналізація	Поза нормою	60°C
HL8	Тиск в концентраторі К1	Сигналізація	Поза нормою	1МПа
1-б, 1-в	Температура в полімеризаторі П1	Індикація	-	140-145°C
4-б, 4-в	Температура в полімеризаторі П2	Індикація	-	140-145°C
7-б, 7-в	Температура в полімеризаторі П3	Індикація	-	140-145°C
2-б, 2-в	Тиск в полімеризаторі П1	Індикація	-	4МПа

5-б, 5-в	Тиск в полімеризаторі П2	Індикація	-	4МПа
8-б, 8-в	Тиск в полімеризаторі П3	Індикація	-	4МПа
3-б, 3-в	Концентрація в полімеризаторі П1	Індикація, сигналізація	-	8%
6-б, 6-в	Концентрація в полімеризаторі П2	Індикація, сигналізація	-	14%
9-б, 9-в	Концентрація в полімеризаторі П3	Індикація, сигналізація	-	18-20%
12-б, 12-в	Концентрація в концентраторі К1	Індикація, сигналізація	-	35%
3-г	Концентрація в полімеризаторі П1	Керування	-	35%
6-г	Концентрація в полімеризаторі П2	Керування	-	14%
9-г	Концентрація в полімеризаторі П3	Керування	-	18-20%
1-г	Температура в полімеризаторі П1	Керування	-	140-145°C
4-г	Температура в полімеризаторі П2	Керування	-	140-145°C
7-г	Температура в полімеризаторі П3	Керування	-	140-145°C
ПЛК	Тиск і концентрація в полімеризаторах П1, П2, П3, концентраторі К1	Реєстрація	-	-

### 1.3 Об'єкт керування

Основним об'єктом керування є реактор-полімеризатор. Вибір саме цього апарата обумовлений тим, що від його роботи залежить весь подальший технологічний процес.

Реактор-полімеризатор є вертикальним циліндричним апаратом, в якому відбувається основна реакція полімеризації етилену. Входи об'єкта керування:

- витрата суміші каталізатора у бензині на вході (постійна, не регулюється);
- витрата суміші етилену з нагрітим бензином на вході (керована витрата).

Виходи об'єкта керування:

- температура в реакторі;
- тиск у реакторі;
- концентрація поліетилену в розчині на виході;
- витрата суміші на виході.

Регулювання процесу здійснюється керуванням витратою етилену з нагрітим бензином на вході. Введення нагрітої суміші етилену з бензином впливає як на концентрацію поліетилену в розчині, так і на тепловідведення від екзотермічної реакції, сприяючи підтримувannya стабільної температури в реакторі.

Основним регульованим параметром є концентрація поліетилену в розчині. Це значення залежить від витрати етилену на вході та часу перебування суміші в реакторі. Температурний режим та тиск в апараті контролюються давачами та при необхідності коригуються.

Таким чином, реактор-полімеризатор являє собою складний об'єкт керування з розподіленими параметрами, що потребує точного регулювання витрати етилену для забезпечення ефективної та безпечної роботи всієї технологічної системи виробництва поліетилену середнього тиску.

## 1.4 Постановка задачі

Процес виробництва поліетилену середнього тиску характеризується складною нелінійною динамікою об'єкта керування та наявністю невизначеностей у технологічних параметрах. Розробка сучасних методів керування та систем моніторингу може суттєво підвищити якість управління процесом полімеризації.

Розвиток методів нечіткої логіки та SCADA-технологій відкриває нові можливості для удосконалення автоматизації таких процесів. Нечіткі логічні регулятори здатні враховувати експертні знання та забезпечити більш адаптивне керування у порівнянні з традиційними підходами. SCADA-системи дозволяють реалізувати комплексний моніторинг, контроль та архівування даних процесу.

Задача магістерської роботи полягає у розробці удосконаленої системи автоматизації процесу полімеризації етилену, що включає:

### 1) Синтез нечіткого логічного регулятора (FLC).

Розробити нечіткий логічний регулятор для керування концентрацією поліетилену в першому реакторі каскаду. Регулятор повинен:

- враховувати експертні знання про динаміку процесу полімеризації;
- працювати з лінгвістичними змінними та правилами нечіткого виведення;
- забезпечувати адаптивне регулювання витрати етилену на вході в реактор;
- демонструвати кращі характеристики керування у порівнянні з традиційним ПІД-регулятором.

### 2) Розробка SCADA-системи моніторингу та контролю.

Спроекувати та реалізувати програмно-технічний комплекс на базі SCADA-технології для комплексного моніторингу та управління процесом полімеризації. Система повинна забезпечувати:

- безперервний моніторинг основних технологічних параметрів (температура, тиск, концентрація) у всіх реакторах каскаду;
- реалізацію розробленого нечіткого логічного регулятора;
- архівування та накопичення історичних даних процесу для подальшого аналізу;
- видання інформаційних та тривожних сигналів при відхиленнях від заданих режимів;
- розробку зручного людино-машинного інтерфейсу (НМІ) для оператора;
- можливість дистанційного моніторингу та керування процесом.

Очікувані результати:

- розроблена математична модель нечіткого логічного регулятора з визначенням функцій належності для вхідних та вихідних змінних, базою правил нечіткого виведення;
- синтезований нечіткий регулятор для автоматичного керування концентрацією поліетилену з урахуванням специфіки технологічного процесу;
- розроблена SCADA-система з сучасним НМІ-інтерфейсом для моніторингу та контролю процесу полімеризації в режимі реального часу;
- комплексна система архівування та логування технологічних даних для подальшого аналізу та оптимізації режимів роботи;
- методичні рекомендації щодо реалізації розробленої системи нечіткого керування та SCADA-комплексу для автоматизації процесу виробництва поліетилену середнього тиску.

Таким чином, магістерська робота спрямована на удосконалення системи автоматизації процесу полімеризації етилену за рахунок розробки нечіткого логічного регулятора та програмно-технічного комплексу SCADA для підвищення якості керування процесом.

## **Висновки до розділу 1**

В першому розділі магістерської роботи розглянуто сутність процесу виробництва поліетилену середнього тиску, охарактеризована сировина та вихідна продукція, описано технологічний процес та технічну характеристику технологічного обладнання, вибрані параметри індикації, реєстрації, сигналізації, контролю, регулювання, а також визначений об'єкт керування.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

#### 2.1 Опис функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації є графічним зображенням, що відображає структуру автоматизованої системи керування технологічним процесом. Вона вказує на взаємодію компонентів системи та послідовність виконання функцій контролю, регулювання та сигналізації. Функціональна схема містить блоки, які представляють підсистеми або окремі прилади, а також лінії зв'язку, що показують напрямок передачі сигналів між цими блоками.

Процес виробництва поліетилену середнього тиску має наступні контури автоматизації:

- індикація температур в полімеризаторах П1, П2, П3;
- регулювання концентрацій поліетилену в полімеризаторах П1, П2, П3 та концентраторі К1;
- індикації тисків в полімеризаторах П1, П2, П3 та концентраторі К1;
- регулювання температури в холодильнику Х1.

Індикація температури в полімеризаторі П1

В якості давача температури використовується термометр опору ОВЕН ДТ035Д (позиція 1-б) з вихідним сигналом 4-20 мА. Сигнал поступає на показуючий вимірювач температури ОВЕН 2ТРМ0 (позиція 1-в), який виконує функцію вимірювання температури, перетворення сигналу, показу температури, сигналізації та передачі даних на ПЛК ОВЕН ПЛК210 через інтерфейс RS-485.

При аварійно-високій температурі від ПЛК керуючий сигнал 4-20 мА потрапляє на електрично-пневматичний перетворювач АСТРА ЕП-110 (позиція 1-г). Після чого пневматичний сигнал 0-40 кПа потрапляє на

регулюючу арматуру CovnaValve ZJH G300 (позиція 1-е), завдяки якій перекривається подача розігрітої суміші етилену з бензином.

Регулювання концентрації в полімеризаторі П1

Для вимірювання концентрації використовується концентратомір SensoTech LiquiSonic (позиція 3-а) з виходом 4-20 мА. Для обробки сигналу використовується комплектний блок SensoTech LiquiSonic (позиція 3-в) з функцією індикації та передачі даних по інтерфейсу RS-485.

Вимірне значення концентрації передається до ПЛК ОВЕН ПЛК210. Сформований регулюючий вплив потрапляє на електрично-пневматичний перетворювач АСТРА ЕП-110 (позиція 3-г), після чого пневматичний сигнал потрапляє на регулюючу арматуру CovnaValve ZJH G300 (позиція 3-д), завдяки якій збільшується або зменшується подача суспензії в полімеризатор П1, або на регулюючу арматуру (позиція 3-ж), завдяки якій регулюється злив готової суспензії далі в полімеризатор П2.

Індикація температури в полімеризаторі П2

В якості давача температури використовується термометр опору ОВЕН ДТ035Д (позиція 4-б) з вихідним сигналом 4-20 мА. Сигнал поступає на показуючий вимірювач температури ОВЕН 2ТРМ0 (позиція 4-в), який виконує функцію вимірювання температури, показу та передачі даних на ПЛК через інтерфейс RS-485.

При аварійно-високій температурі від ПЛК керуючий сигнал потрапляє на електрично-пневматичний перетворювач АСТРА ЕП-110 (позиція 4-г), після чого пневматичний сигнал потрапляє на регулюючу арматуру CovnaValve ZJH G300 (позиція 4-д), завдяки якій перекривається подача розігрітої суміші етилену з бензином.

Регулювання концентрації в полімеризаторі П2

Для вимірювання концентрації використовується концентратомір SensoTech LiquiSonic (позиція 6-б) з виходом 4-20 мА. Вимірне значення концентрації передається до ПЛК ОВЕН ПЛК210, сформований регулюючий вплив потрапляє на електрично-пневматичний перетворювач АСТРА ЕП-110

(позиція 6-г), після чого пневматичний сигнал потрапляє на регулюючу арматуру CovnaValve ZJH G300 (позиція 6-д), завдяки якій регулюється подача суспензії далі в полімеризатор ПЗ.

#### Індикація температури в полімеризаторі ПЗ

В якості давача температури використовується термометр опору ОВЕН ДТ035Д (позиція 7-б) з вихідним сигналом 4-20 мА. Сигнал поступає на показуючий вимірювач температури ОВЕН 2ТРМ0 (позиція 7-в) з передачею даних на ПЛК через інтерфейс RS-485.

При аварійно-високій температурі керуючий сигнал потрапляє на електрично-пневматичний перетворювач АСТРА ЕП-110 (позиція 7-г), після чого пневматичний сигнал потрапляє на регулюючу арматуру CovnaValve ZJH G300 (позиція 7-д), завдяки якій перекривається подача розігрітої суміші етилену з бензином.

#### Регулювання концентрації в полімеризаторі ПЗ

Для вимірювання концентрації використовується концентратомір SensoTech LiquiSonic (позиція 9-б). Виміряне значення передається до ПЛК, сформований регулюючий вплив потрапляє на електрично-пневматичний перетворювач АСТРА ЕП-110 (позиція 9-г), після чого пневматичний сигнал потрапляє на регулюючу арматуру CovnaValve ZJH G300 (позиція 9-д), завдяки якій регулюється подача суспензії в концентратор К1.

#### Регулювання температури в холодильнику Х1

В якості давача температури використовується термометр опору ОВЕН ДТ035Д (позиція 10-б) з вихідним сигналом 4-20 мА. Сигнал поступає на показуючий вимірювач температури ОВЕН 2ТРМ0 (позиція 10-в) з передачею даних на ПЛК через інтерфейс RS-485.

Від ПЛК керуючий сигнал потрапляє на електрично-пневматичний перетворювач АСТРА ЕП-110 (позиція 10-г), після чого пневматичний сигнал потрапляє на регулюючу арматуру CovnaValve ZJH G300 (позиція 10-д), завдяки якій відбувається злив конденсованої суміші з холодильника Х1.

#### Регулювання концентрації в концентраторі К1

Для вимірювання концентрації використовується концентратомір SensoTech LiquiSonic (позиція 12-б). Вимірне значення передається до ПЛК, сформований регулюючий вплив потрапляє на електрично-пневматичний перетворювач АСТРА ЕП-110 (позиція 12-г), після чого пневматичний сигнал потрапляє на регулюючу арматуру CovnaValve ZJH G300 (позиція 12-д), завдяки якій відбувається злив суміші в сепаратор-дегазатор при досягненні потрібної концентрації.

Індикація тиску в полімеризаторах та концентраторі

В якості давачів тиску використовуються перетворювачі тиску ОВЕН ПД200 (позиції 2-б, 5-б, 8-б, 11-б) з вихідним сигналом 4-20 мА. Сигнали поступають на показуючі вимірювачі ОВЕН 2ТРМ0 (позиції 2-в, 5-в, 8-в, 11-в), які виконують функцію вимірювання тиску, показу, сигналізації та передачі даних на ПЛК ОВЕН ПЛК210 через інтерфейс RS-485.

## 2.2 Опис ТЗА

Термометр опору ОВЕН ДТС035Д

«Давачі температури типу ДТСхх5Д.И призначені для неперервного вимірювання температури рідин, пари, газу на об'єктах та перетворення отриманих значень в уніфікований струмовий вихідний сигнал 4...20 мА. Давачі мають вибухобезпечне виконання» [19].



Рис. 2.1. Термометр опору ОВЕН ДТС035Д

«Середовище вимірювання:

Вибухонебезпечні суміші газів, парів, а також легкозаймистих і вибухонебезпечних речовин.

Характеристики термометра опору ДТС035Д:

- тип виходу: аналоговий;
- сенсор: Pt100;
- діапазон температур навколишнього повітря при експлуатації: -40...+85 °С;
- вихідний сигнал: 4...20 мА, HART;
- діапазон вимірюваних температур: -50...+500 °С;
- клас точності:  $\pm 0,25$  %;  $\pm 0,5$  %.

Міжповірочний інтервал — 2 роки» [19].

Вибухозахист давача

«Забезпечення вибухозахисту датчика досягається розташуванням його електричних частин у вибухонепроникну оболонку (згідно з ГОСТ31610.0-2014 (IEC 60079-0:2012), ГОСТ IEC 60079-1-2013), яка має високий рівень механічної міцності, і поміщенням електричних частин датчика (первинний перетворювач з вивідними проводами) у захисну арматуру, що герметизована епоксидним компаундом і підключенням до електричного кола перетворювача. Це виключає передачу вибуху всередині датчика в навколишнє вибухонебезпечне середовище» [19].

Універсальний вимірювач-перетворювач ОВЕН 2ТРМ0

«ТРМ0 - промисловий вимірювач, призначений для вимірювання температури, тиску, вологості, об'ємного витрати, рівня та інших фізичних величин у різних галузях промисловості» [16].



Рис. 2.2. Вимірювач-перетворювач ОВЕН 2ТРМ0

«Функціональні можливості промислового вимірювача:

- два універсальних входи для підключення широкого спектру датчиків;
- можливість включення в систему диспетчеризації та передачі даних на верхній рівень за допомогою інтерфейсу RS-485;
- одночасне відображення поточних показників по двом каналах на двох цифрових індикаторах;
- розрахунок різниці двох фізичних величин;
- масштабування шкали для кожного входу;
- цифрова фільтрація та корекція вхідного сигналу.

Технічні характеристики:

- напруга живлення: 90-264 В;
- частота напруги живлення: 50, 60 Гц;
- напруга внутрішнього БЖ: 24 В;
- час зчитування входу: не більше 1 секунди;
- температура зовнішнього повітря при експлуатації: -40...+50°C»

[16].

Давач тиску ОВЕН ПД100

«Датчик PD100 є перетворювачем тиску з сенсором типу КНК (кремній на кремнії) із мембраною, яка виготовлена з нержавіючої сталі та вихідним сигналом 4...20 мА. Датчик має "польовий" корпус зі вибухозахистом типу "Вибухонепроникна оболонка"» [17].

«Перетворювачі тиску PD100 призначені для систем автоматичного регулювання та управління в промисловості, як на основних, так і на вторинних виробництвах, що функціонують в складних кліматичних та інших умовах. Це вимагає використання обладнання у "польовому" корпусі, яке застосовується в газотранспортних та газорозподільчих системах, нафтових родовищах, на об'єктах транспортування нафти, нафтопереробних заводах та

об'єктах енергетики. Можливе використання в ускладнених умовах (у важких кліматичних умовах, тощо)» [17].



Рис. 2.3. Давач тиску ОВЕН ПД100

#### Середовище вимірювання

«Гази, пари, вода, агресивні рідини, нейтральні до нержавіючої сталі AISI 316L (AISI 304S).

#### Відмінні особливості

- стійкість до агресивних середовищ – сенсор вварений у штуцер лазерним зварюванням;
- стійкість до вологості – плата нормуючого перетворювача покрита герметиком;
- низька гістерезис, висока точність вимірювань – завдяки використанню стабільного європейського сенсора;
- стійкість до гідрударів;
- стабільне значення "нуля" перетворювача;
- безкоштовна заводська первинна повірка.

#### Основні характеристики

- верхня межа вимірювань – від 0,01 до 40 МПа;
- тип вимірюваного тиску – надлишковий (ДІ), абсолютний (ДА), вакууметричний (ДВ), надлишково-вакууметричний (ДІВ);
- діапазон температур середовища:  $-40 \dots +100$  °С;
- клас точності – 0,25 %; 0,5 %; 1,5 %;
- міжповірочний інтервал – 5 років / 4 роки;

- вибухозахист – «Вибухонепроникна оболонка» 1Ex dII CT6 Gb» [17].

#### Електрично-пневматичний перетворювач АСТРА ЕП-110

Призначений для перетворення електричного уніфікованого струмового сигналу в пневматичний уніфікований аналоговий сигнал.

Технічні характеристики:

- вхідний сигнал — уніфікований струмовий сигнал (4—20) мА;
- вихідний сигнал – пневматичний сигнал 0-50кПа
- межі допустимої основної приведенної похибки —  $\pm 0,5 \%$ ;
- тиск живлення — на 40 кПа більше верхньої межі вихідного сигналу;
- електричне живлення — від мережі постійного струму напругою (9...36) В;
- ступінь захисту від пилу і води — IP65;
- умови експлуатації — температура від -40 до +50 °С при відносній вологості до 95 %;
- маса: не більше 1,5 кг.



Рис. 2.4. Електрично-пневматичний перетворювач АСТРА ЕП-110

#### Регулююча арматура SovnaValve ZJH G300

«Пневматичний регулюючий клапан ZJH, також відомий як регулюючий клапан з пневматичною діафрагмою, оснащений багатожерстовим регульованим приводом, втулкою з низьким опором потоку та однокрильним

регулюючим клапаном без нижньої кришки. Серія ZJH відрізняється легкою конструкцією, великою пропускною здатністю, низьким центром ваги, високою вібростійкістю та простотою установки» [3].

«Ці клапани широко використовуються в різних системах, таких як системи завантаження етанолу/біопалива, системи завантаження/вивантаження LPG-NGL, системи завантаження на шасі та установки регенерації пари» [3].



Рис. 2.5. Регулююча арматура Covna Valve ZJH G300

«Технічні характеристики:

- номінальний діаметр: 300мм;
- номінальний коефіцієнт витрати: 1440 Cv;
- номінальний хід: 100мм;
- температура навколишнього середовища: -40...+80°C;
- температура внутрішнього середовища: -20...+200°C;
- робочий тиск: 0.01 – 40кПа» [3].

Концентратомір SensoTech LiquiSonic.

«Системи вимірювання LiquiSonic® дозволяють аналізу концентрації рідин в реальному часі. Технологія вимірювання може аналізувати компоненти рідких сумішей та надавати інформацію про концентрацію або щільність в реальному часі. Датчики базуються на принципі вимірювання ультразвукової швидкості. Вони практично не потребують обслуговування і можуть надійно надавати вимірні значення навіть в агресивних середовищах» [5].

Таким чином, можна дуже легко визначити відсоток конкретної рідини в суміші рідин. Для різних застосувань та умов монтажу доступні численні варіанти та опції сенсорів.



Рис. 2.6. Концентратомір SensoTech LiquiSonic

«До контролера LiquiSonic можна підключити до 4 датчиків. Пристрої підключені по цифровому інтерфейсу, що гарантує високу, стабільну точність вимірювань та безперебійний безперешкодний обмін даними на відстанях до 1000 м. Також, він має можливість підключення по інтерфейсу RS-485» [5].

«Ультразвуковий процес вимірювання надає результати ідеальної точності. Він може працювати при екстремальних умовах обробки, таких як температури від  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$  та тиск від декількох мбар до 500 бар. Стійкість та надійність LiquiSonic®, а також мінімальні зусилля для монтажу та експлуатації, виправдають себе в довгостроковому плані, особливо при веденні практики постійного вдосконалення процесу» [5].

«LiquiSonic дозволяє проводити вимірювання декількох компонентів одночасно, наприклад, незалежне вимірювання рідин та розчиненої солі, вміст спирту, бензину, етилену в процесах полімеризації та екстракції» [5].

Контролер ОВЕН ПЛК210

ОВЕН ПЛК210 - нова лінійка моноблочних контролерів із покращеними комунікаційними можливостями та додатковими функціями.

«Завдяки єдиному програмному забезпеченні користувач розробляє керуючу логіку, інтерфейс людина-машина та налаштовує обмін із іншими пристроями. В якості модулів розширення вхідних та вихідних сигналів

рекомендується використовувати лінійку модулів Mx210 з інтерфейсом Ethernet» [18].

Основним комунікаційним інтерфейсом ПЛК210 є Ethernet. Контролер має 4 порти Ethernet, з яких 3 об'єднані в керований комутатор. Це дозволяє використовувати контролер як шлюз між промисловою мережею та мережею підприємства, а також застосовувати різні мережеві топології.



Рис. 2.7. Контролер ОВЕН ПЛК210

«Висока продуктивність:

- процесор з частотою до 1800 МГц;
- ROM 8 ГБ;
- RAM 2 ГБ;
- RETAIN 64 Кбайт;
- операційна система Linux;
- підтримка швидких входів/виходів до 95 кГц на відведеному PRU;
- підтримка промислових протоколів Modbus RTU/ASCII/TCP, OPC UA, MQTT, SNMP;
- підтримка веб-візуалізації CODESYS
- підтримка протоколів тепло- та електролічильників
- підтримка застосункових протоколів NTP, FTP, FTPS, HTTP, HTTPS, SSH, SMTP/IMAP/POP3, OpenVPN, WireGuard;
- підтримка GSM/GPRS-модемів;
- можливість підключення до СУБД MySQL та MsSQL;
- веб-інтерфейс для налаштування та діагностики контролера

Збільшена надійність:

- двоїні входи живлення для резервування за живленням;
- підтримка кільцевої топології Ethernet при підключенні модулів

Mx210 (STP/RSTP);

- вбудований брандмауер;

Експлуатація в умовах важких умов:

- розширений діапазон живлення: =10...48 В (для ПЛК210-1х: =10...36 В);
- розширений діапазон температур навколишнього середовища: -40...+55 °С (для ПЛК210-1х: -20...+55 °С).

Інші характеристики:

- ЦП 4x Cortex-A55, 1.8 ГГц;
- напруга живлення 10...36 В» [18].

## Висновки до розділу 2

У другому розділі магістерської роботи розроблено та описано функціональну схему автоматизації, а також підібрано технічні засоби автоматизації, потрібні для керування реактором-полімеризатором.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБКА АДАПТИВНОГО НЕЧІТКОГО PID-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕАКТОРА- ПОЛІМЕРИЗАТОРА

#### 3.1 Опис математичної моделі та PID-регулятора реактора-полімеризатора

На основі попередніх досліджень була отримана модель реактора-полімеризатора у середовищі Matlab. Модель у формі передавальної функції, що відповідає керованому об'єкту, наступна:

$$W(s) = \frac{0.075001 * e^{-28.881}}{1.2951s + 1}$$

Характеристики моделі керування зображені на рисунку 3.1. Також, в графічному середовищі моделювання Matlab Simulink, використовуючи передавальну функцію була розроблена модель об'єкта керування, зображена на рисунку 3.2, а на основі моделі була отримана перехідна характеристика, зображена на рисунку 3.3.

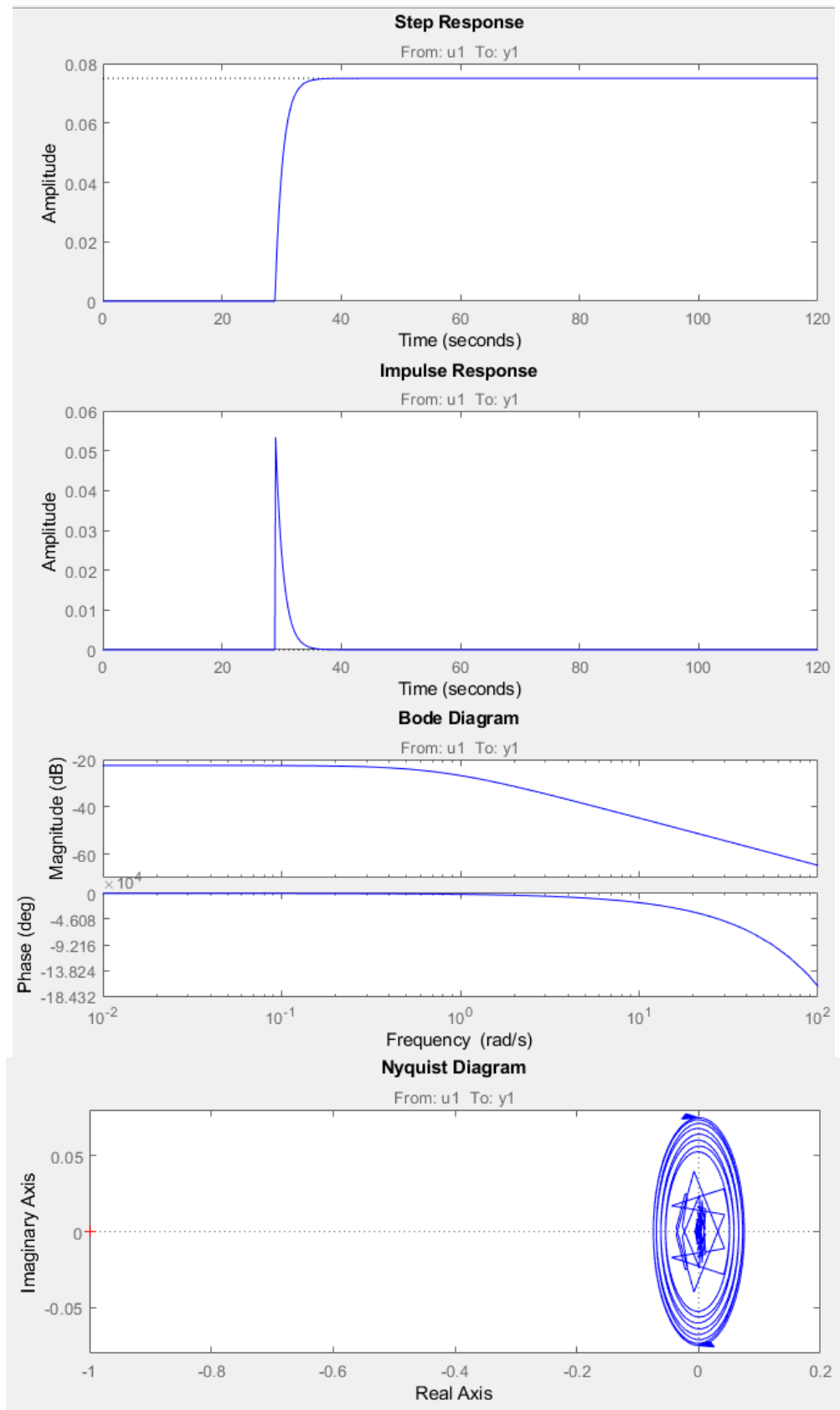


Рис. 3.1. Характеристики моделі керування



Рис. 3.2. Модель об'єкта керування в Simulink

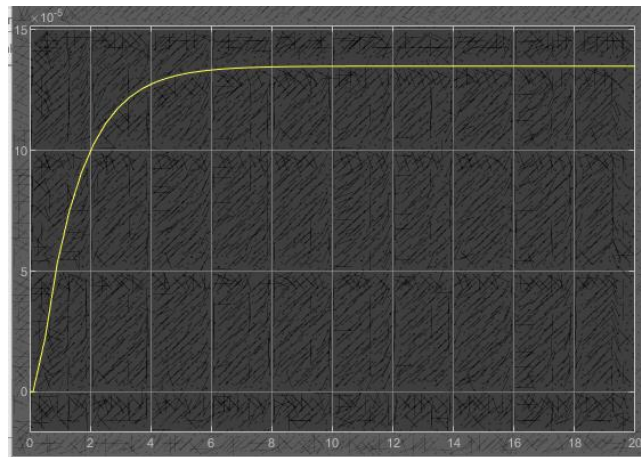


Рис. 3.3. Отримана перехідна характеристика

Найбільш оптимальним регулятором для системи є безперервний паралельний PID-регулятор, в якого час регулювання становить 3.52 секунди, а перерегулювання немає, тобто 0% (рис.3.4). Проте, він має свої недоліки, такі як складнощі з налаштуванням через 3 параметри і вразливість до перешкод.

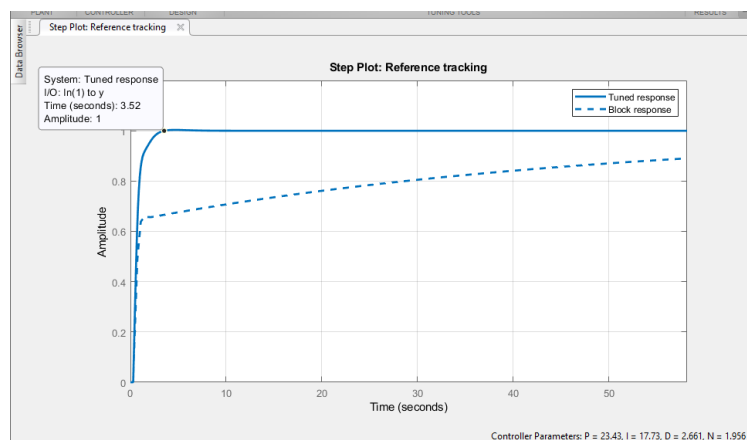


Рис. 3.4. Моделювання системи

В результаті вибору регулятора, була отримана кінцева схема моделі об'єкта регулювання (реактора)(рис. 3.5) та отримана перехідна характеристика об'єкта регулювання (рис. 3.6).

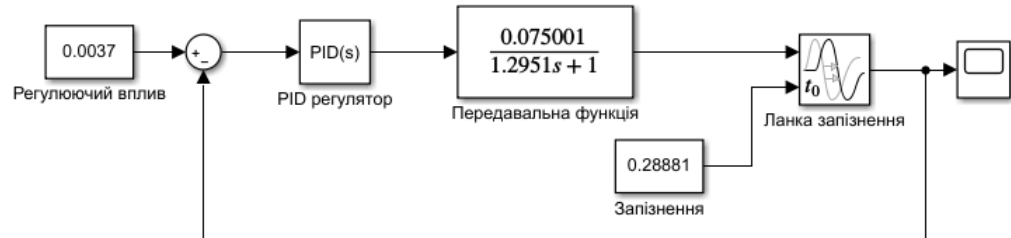


Рис. 3.5. Кінцева модель реактора

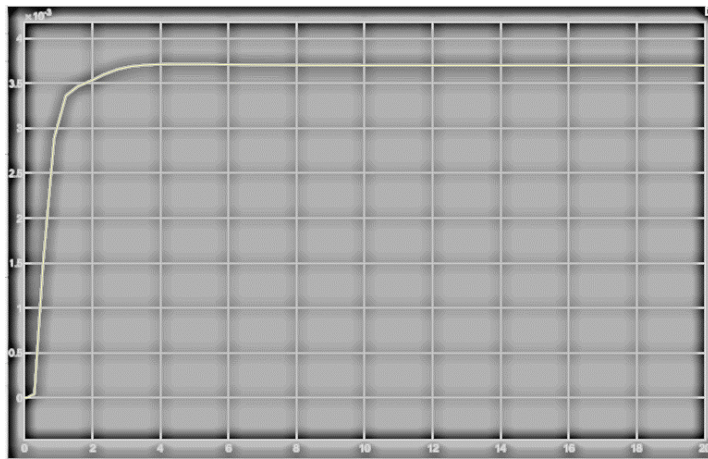


Рис. 3.6. Перехідна характеристика моделі реактора

### 3.2 Мета та концепція

У хімічних технологічних процесах, зокрема в полімеризації етилену для отримання поліетилену середнього тиску (ПЕСТ), існує значна складність у стабілізації параметрів системи через її нелінійність, наявність запізнень, змінну динаміку об'єкта, а також зовнішні збурення. Одним з ефективних підходів до підвищення якості автоматичного регулювання таких об'єктів є використання інтелектуальних систем керування, зокрема — нечітких регуляторів (Fuzzy-регуляторів).

Нечіткий регулятор — це система керування, заснована на принципах нечіткої логіки (fuzzy logic), яка дозволяє приймати рішення в умовах невизначеності, неточності або неповної інформації. На відміну від класичного ПД-регулятора, що працює за чіткими математичними законами з фіксованими коефіцієнтами, Fuzzy-регулятор використовує базу експертних правил типу «якщо—то», що імітують логіку поведінки людини-оператора.

Типова структура нечіткого регулятора включає наступні етапи:

- фазифікація (fuzzification) — перетворення вхідних фізичних величин (наприклад, помилки та її похідної) у нечіткі змінні з певним ступенем належності до термів (наприклад, "висока", "низька");
- нечіткий логічний висновок (inference) — використання бази правил для прийняття рішень на основі лінгвістичних змінних;
- агрегація і композиція — об'єднання результатів усіх правил;
- дефазифікація (defuzzification) — перетворення результату назад у чітке значення керуючого впливу.

У контексті даного дослідження нечіткий регулятор застосовується для керування витратою етилену, яка впливає на дві основні вихідні величини - температуру полімеризату та концентрацію етилену в полімеризаті. Оскільки ці параметри тісно взаємопов'язані й мають складну динаміку, використання класичного ПД-регулятора з фіксованими коефіцієнтами не завжди забезпечує стабільність і точність регулювання. Саме тому обрано підхід з реалізацією адаптивного нечіткого регулятора, який може динамічно змінювати управляючий вплив відповідно до ситуації.

Таким чином, розробка нечіткого регулятора для об'єкта виробництва ПЕСТ дозволяє:

- підвищити стійкість системи до збурень і змін технологічного середовища;
- адаптуватися до нелінійних характеристик процесу;
- забезпечити точніше керування температурою та концентрацією при змінних умовах експлуатації;

- зменшити час стабілізації та перерегулювання.

### 3.3 Синтез нечіткого регулятора

#### 3.3.1 Формування нечіткої бази правил

Для початку потрібно сформувати базу правил для реалізації нечіткого ПІД-регулятора, який дозволяє адаптивно налаштовувати коефіцієнти  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  залежно від поточної ситуації у технологічному процесі. Такий регулятор дозволяє реалізувати адаптивне управління системою з урахуванням нелінійностей, інерцій та невизначеностей, властивих об'єктам хімічної промисловості.

На відміну від класичного ПІД-регулятора з фіксованими параметрами, нечіткий регулятор дозволяє змінювати значення  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  у реальному часі на основі аналізу значень похибки та її зміни. Такий підхід значно покращує динамічні характеристики системи, зменшує час встановлення та перерегулювання, а також дозволяє системі залишатися стабільною при зміні параметрів об'єкта.

Побудова бази знань виконується у програмному середовищі MATLAB, із використанням інструменту Fuzzy Logic Designer, де будуть визначені вхідні та вихідні змінні, побудовані функції належності та сформована база нечітких правил. Схема нечіткого регулятора показана на рисунку 3.7.

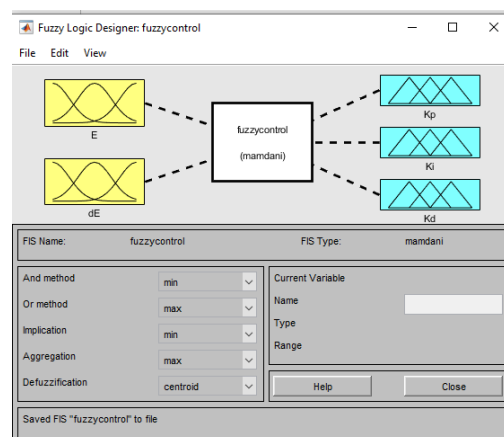


Рис. 3.7. Схема нечіткого регулятора

### 3.3.2 Вибір вхідних та вихідних змінних

Для реалізації нечіткого ПД-регулятора необхідно обрати змінні, що дозволяють визначити динаміку відхилення системи від бажаного режиму та забезпечити налаштування параметрів регулювання.

У якості вхідних змінних обрано:

Похибка (E) — різниця між заданим і фактичним значенням температури реактора; зміна похибки ( $\Delta E$ ) — швидкість зміни похибки в часі. Ці змінні найбільш адекватно описують стан системи у даний момент часу.

Вихідними змінними є:

- Пропорційний коефіцієнт ( $K_p$ );
- Інтегральний коефіцієнт ( $K_i$ );
- Диференційний коефіцієнт ( $K_d$ ).

Ці параметри автоматично налаштовуються нечіткою логікою залежно від поточного стану об'єкта керування.

### 3.3.3 Побудова функцій належності

Параметри нечіткої логіки реалізовані на основі таких функцій належності:

**Вхідна змінна 1:** Похибка (E) (рис. 3.8):

- діапазон: [-15, 15];
- тип функції: trapmf;
- термінальні функції: NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB.

**Вхідна змінна 2:** Зміна похибки ( $\Delta E$ ) (рис. 3.9):

- діапазон: [-10, 10];
- тип функції: trapmf;
- термінальні функції: NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB.

**Вихідна змінна 1:**  $K_p$  (рис. 3.10):

- діапазон: [10, 35];

- тип функції: dsigmf;
- терми: Very Low, Low, Medium, High, Very High.

**Вихідна змінна 2:  $K_i$**  (рис. 3.11):

- діапазон: [5, 30];
- тип функції: dsigmf;
- терми: Very Low, Low, Medium, High, Very High.

**Вихідна змінна 3:  $K_d$**  (рис. 3.12):

- діапазон: [0, 6];
- тип функції: trapmf;
- терми: Very Low, Low, Medium, High, Very High.

Ці функції належності забезпечують плавну зміну коефіцієнтів регулятора залежно від змін у системі. Використання різних типів функцій (трапецієподібних для вхідних змінних і  $K_d$ , та сигмоїдальних для  $K_p$  і  $K_i$ ) дозволяє досягти більшої гнучкості та точності при налаштуванні регулятора.

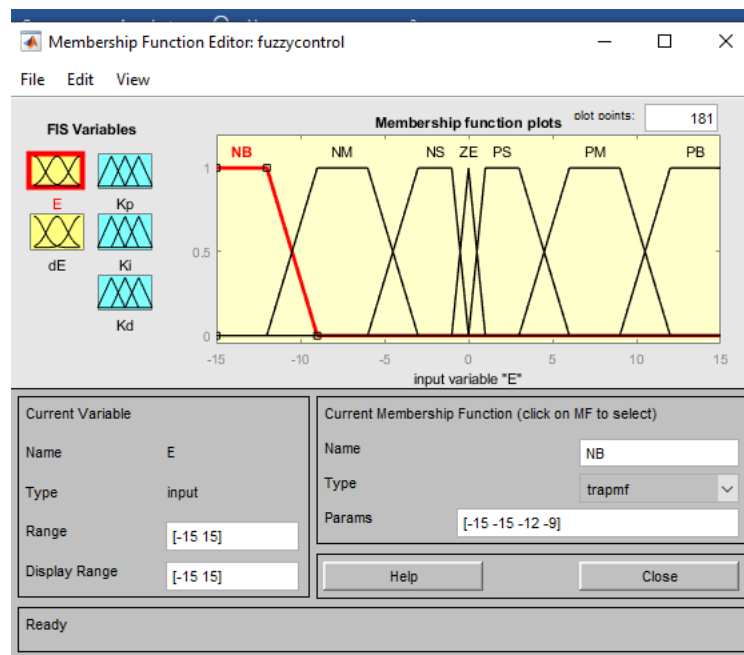
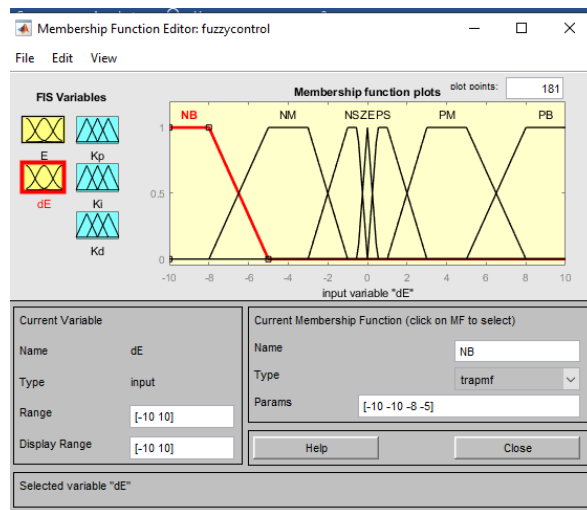
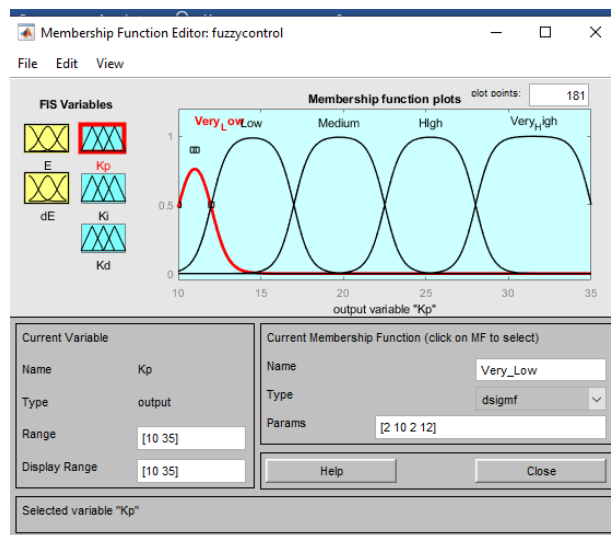
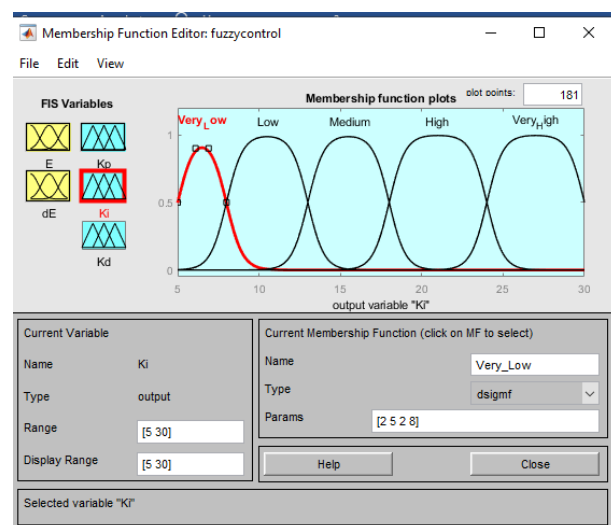


Рис. 3.8. Функції належності  $E$

Рис. 3.9. Функції належності  $\Delta E$ Рис. 3.10. Функції належності  $K_p$ Рис. 3.11. Функції належності  $K_i$

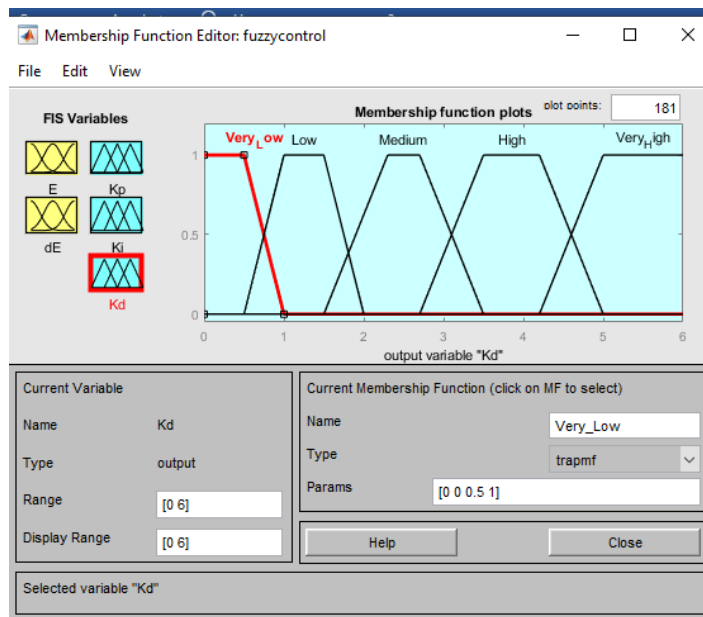


Рис. 3.12. Функції належності Kd

### 3.3.4 Формування бази правил

База правил формує логіку реагування системи на зміни похибки та її динаміки. Загалом створено 49 правил, які враховують усі можливі комбінації 7 термів похибки і 7 термів її зміни. Для кожного поєднання термів E і  $\Delta E$  визначаються відповідні значення термів для вихідних змінних Kp, Ki, Kd. Правила для кожної змінної наведені в таблицях 3.1-3.3.

При формуванні правил використано такі принципи:

- Чим більше абсолютне значення похибки — тим вищим повинен бути Kp;
- Чим стабільніша похибка, тим вище повинно бути значення Ki для усунення залишкової помилки;
- Чим більша швидкість зміни похибки — тим вище Kd для запобігання перерегулюванню.

Форма правила:

*IF E is NB AND dE is PM THEN Kp is High AND Ki is Medium AND Kd is Low*

Таблиця 3.1 – Правила для змінної *Kp*

<b>E \ ΔE</b>	<b>NB</b>	<b>NM</b>	<b>NS</b>	<b>Z</b>	<b>PS</b>	<b>PM</b>	<b>PB</b>
<b>NB</b>	VH	VH	H	H	M	M	L
<b>NM</b>	VH	H	H	M	M	L	L
<b>NS</b>	H	H	M	M	L	L	VL
<b>Z</b>	M	M	M	VL	M	M	M
<b>PS</b>	VL	L	L	M	M	M	M
<b>PM</b>	L	L	L	M	M	H	H
<b>PB</b>	L	L	M	M	H	H	VH

Таблиця 3.2 – Правила для змінної *Ki*

<b>E \ ΔE</b>	<b>NB</b>	<b>NM</b>	<b>NS</b>	<b>Z</b>	<b>PS</b>	<b>PM</b>	<b>PB</b>
<b>NB</b>	VH	VH	H	H	M	M	L
<b>NM</b>	H	H	M	M	M	L	L
<b>NS</b>	M	M	M	M	M	L	L
<b>Z</b>	H	M	M	L	M	M	M
<b>PS</b>	L	L	M	M	M	M	M
<b>PM</b>	L	L	M	M	M	H	H
<b>PB</b>	L	L	M	M	H	H	VH

Таблиця 3.3 – Правила для змінної *Kd*

<b>E \ ΔE</b>	<b>NB</b>	<b>NM</b>	<b>NS</b>	<b>Z</b>	<b>PS</b>	<b>PM</b>	<b>PB</b>
<b>NB</b>	VL	L	L	M	M	H	H
<b>NM</b>	VL	L	L	M	M	H	H
<b>NS</b>	VL	L	L	M	H	H	VH
<b>Z</b>	VL	L	L	M	H	H	VH
<b>PS</b>	VL	L	M	M	L	L	L
<b>PM</b>	VL	L	M	M	L	L	L
<b>PB</b>	VL	L	M	M	L	L	L

Пояснення до позначень в таблицях:

- **NB** - Negative Big - Велике негативне значення;
- **NM** - Negative Medium - Середнє негативне значення;
- **NS** - Negative Small - Маленьке негативне значення;
- **ZE** – Zero - Нульова похибка;
- **PS** - Positive Small - Маленьке позитивне значення;
- **PM** - Positive Medium - Середнє позитивне значення;
- **PB** - Positive Big - Велике позитивне значення;
- **VL** - Very Low - Дуже низьке значення;
- **L** – Low - Низьке значення;
- **M** – Medium - Середнє значення;
- **H** – High - Високе значення;
- **VH** - Very High - Дуже високе значення.

Усі правила впроваджені у Fuzzy Logic Designer у MATLAB (рис. 3.13).

Вони охоплюють усі комбінації термів NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB для кожної вхідної змінної.

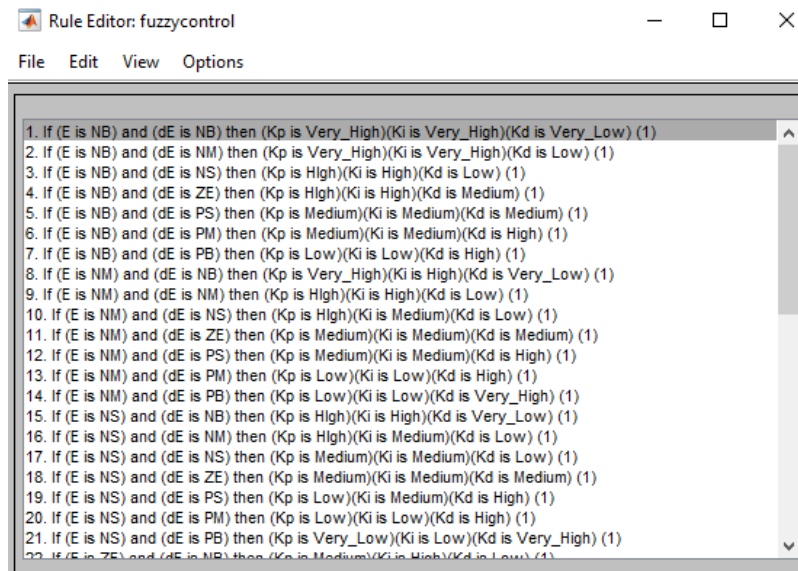


Рис. 3.13. Вигляд бази правил у MATLAB

У інструменті Fuzzy Logic Designer у MATLAB передбачено можливість візуалізації поверхні керування (control surface), яка графічно демонструє залежність вихідного значення від комбінацій вхідних змінних у вигляді 3D-графіка. Поверхні для кожного виходу зображені на рисунках 3.14-3.16.

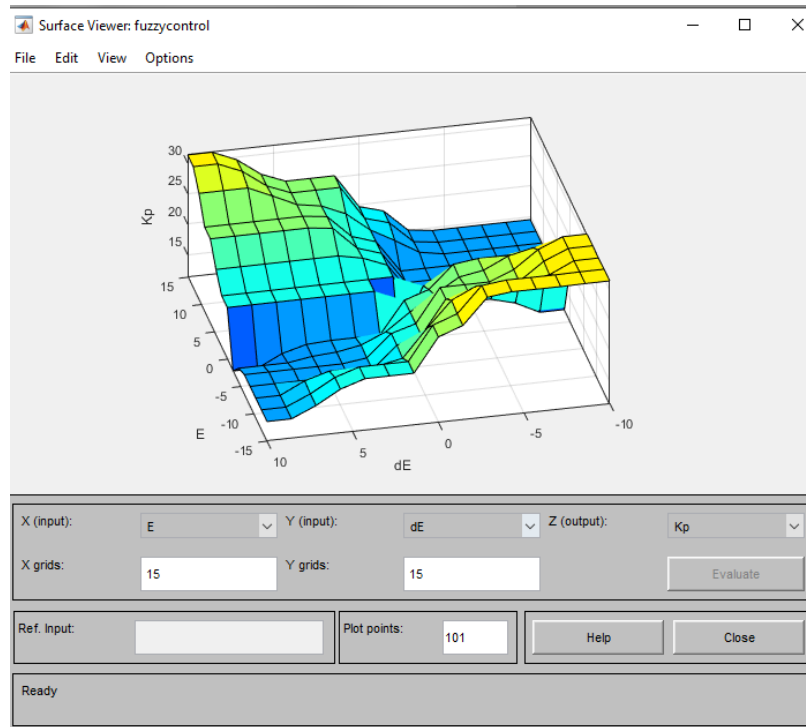
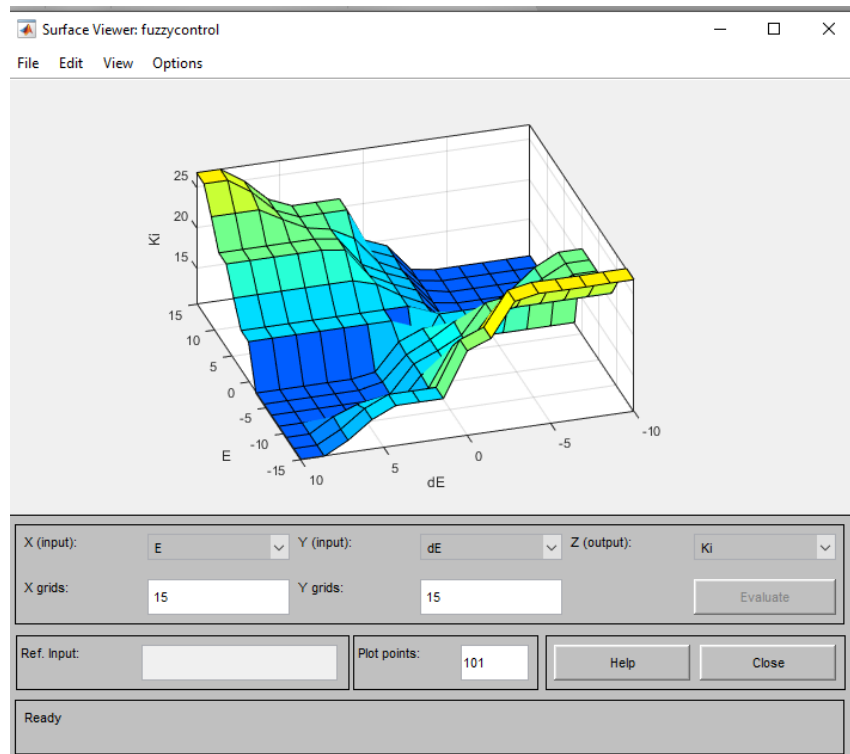
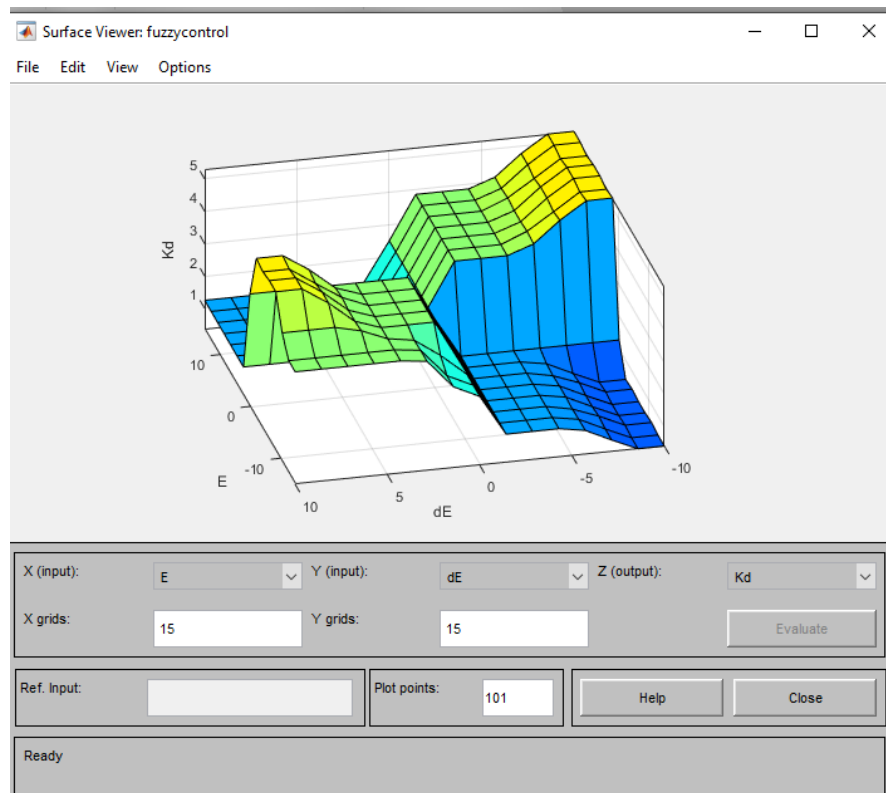


Рис. 3.14. Поверхня для виходу Kp

Рис. 3.15. Поверхня для виходу  $K_i$ Рис. 3.16. Поверхня для виходу  $K_d$



У першому експерименті розглянуто реакцію обох регуляторів на одиничний стрибок у setpoint (задане значення температури). З рисунків 3.19 та 3.20 видно, що:

- Класичний ПІД-регулятор викликає невелике перерегулювання, але має менший час регулювання;
- Fuzzy-PID-регулятор забезпечує гладку реакцію без перерегулювання, що свідчить про його здатність адаптуватися до початкової динаміки об'єкта.

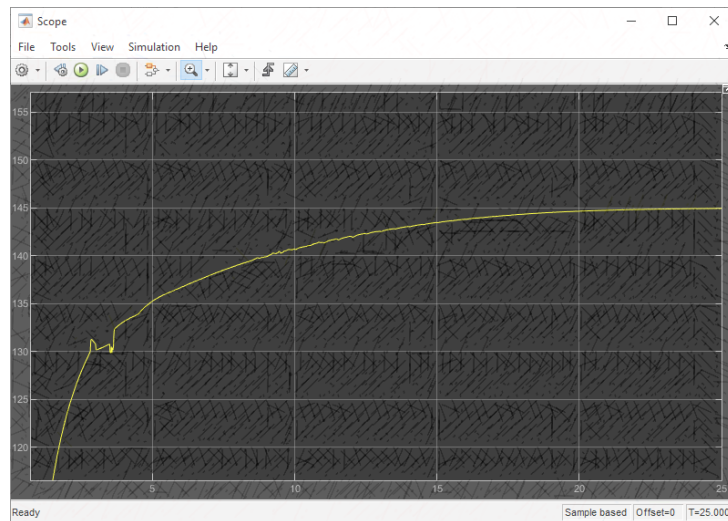


Рис. 3.19. Перехідна характеристика нечіткого ПІД-регулятора

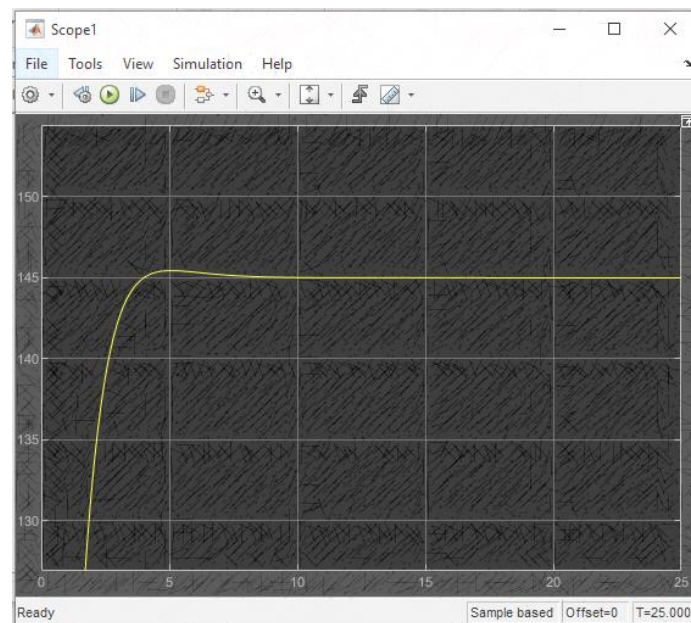


Рис. 3.20. Перехідна характеристика ПІД-регулятора

На рисунку 3.21 наведено приклад графіка ступенів належності (membership output) — видно, як на основі зміни  $E$  і  $\Delta E$  формується відповідна дія на кожен з параметрів регулювання.

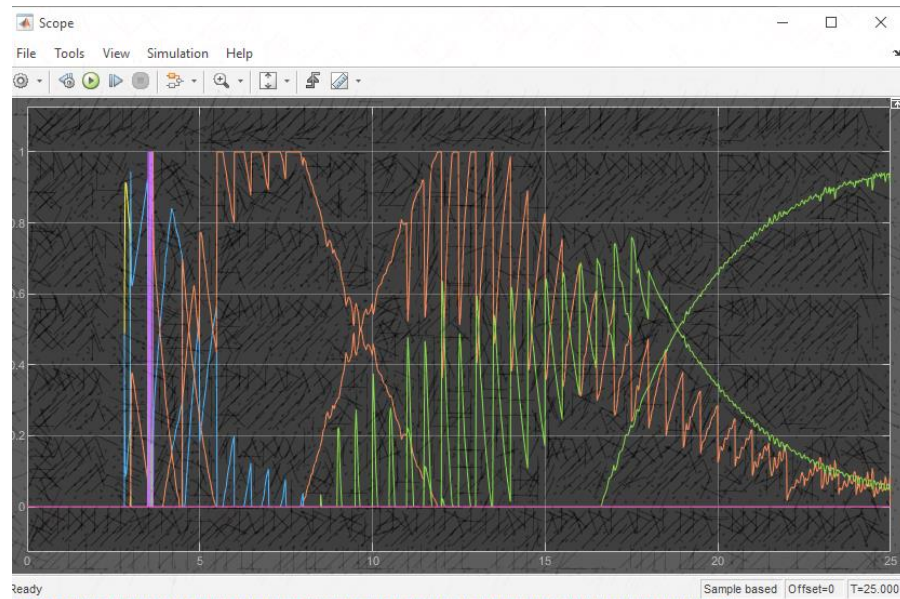


Рис. 3.21. Графік ступеней належності нечіткого регулятора

Для подальшої оцінки якості керування до моделі було додано механізм введення збурення. Його дія ілюструє ситуацію, коли в систему несподівано вносяться зміни (наприклад, коливання тиску чи температури середовища). Структура моделі з врахованим збуренням подана на рисунку 3.22.

Було змодельовано два режими:

- звичайне збурення (невелике відхилення): обидва регулятори демонструють практично ідентичну поведінку, як видно з рисунків 3.23 та 3.24;
- сильне збурення або різка зміна заданого значення: на рисунку 3.25 видно, що нечіткий PID-регулятор швидше стабілізує систему, тоді як звичайний ПІД робить це довше.

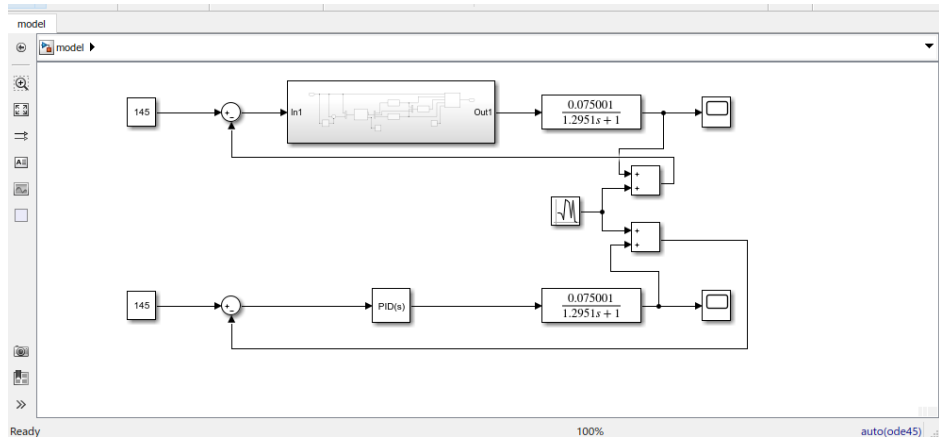


Рис. 3.22. Модель Simulink з генерацією збурень

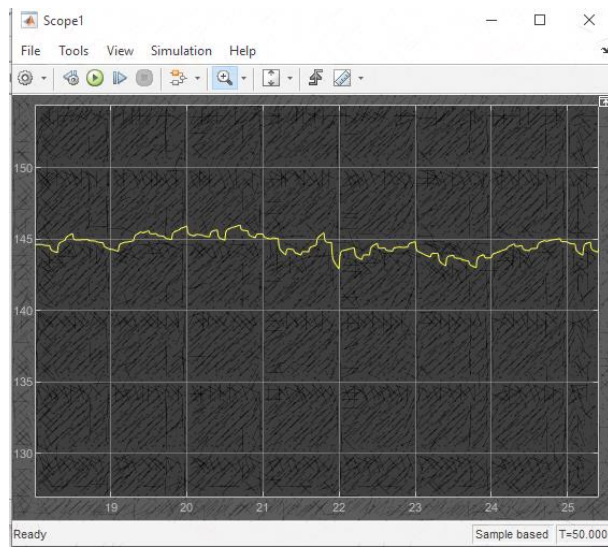


Рис. 3.23. Графік регулювання зі збуреннями нечіткого ПІД-регулятора

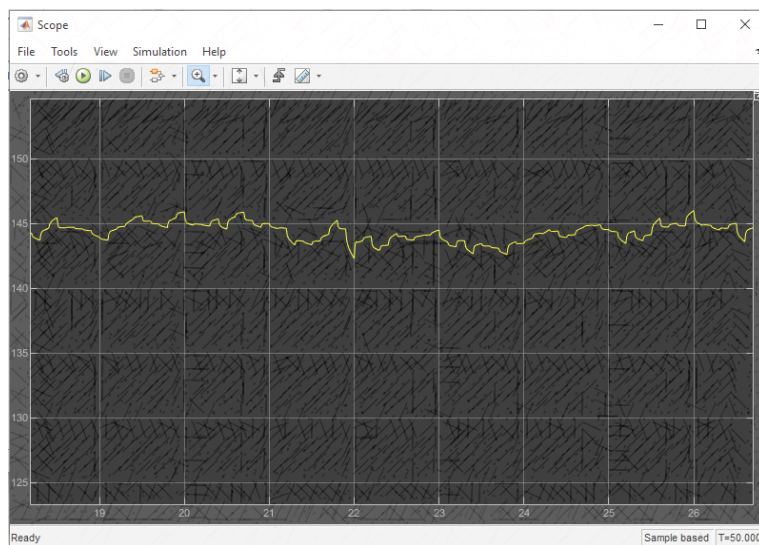


Рис. 3.24. Графік регулювання зі збуреннями ПІД-регулятора

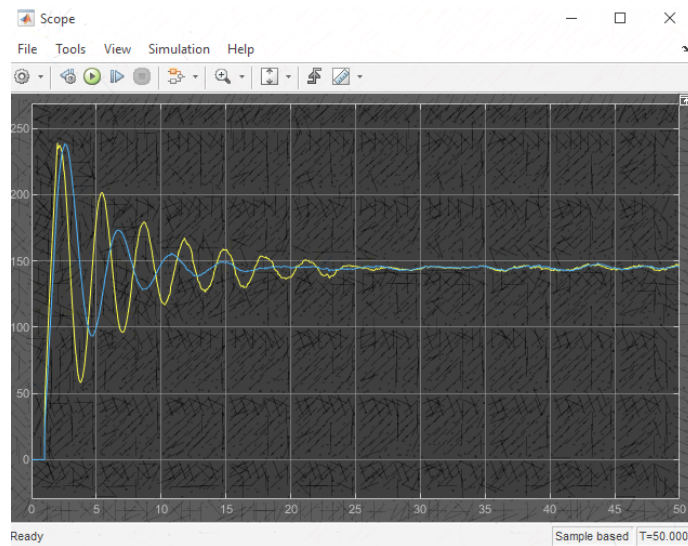


Рис. 3.25. Графік регулювання з різкою зміною заданого значення (синя крива – нечіткий ПД-регулятор, жовта крива – звичайний ПД-регулятор)

У фінальному експерименті система піддавалась багаторазовим змінним стрибкам і збуренням, що імітують нестабільність процесу (наприклад, нестабільну якість сировини чи зміну температури охолодження). На рисунку 3.26 представлено реакцію обох регуляторів на такі коливання.

Результати свідчать, що:

- Класичний ПД-регулятор реагує із затримкою, нерівномірно, з ознаками недорегулювання чи перерегулювання.
- Нечіткий ПД-регулятор в умовах змін дає більш м'яку, адаптивну реакцію, стабілізуючи температуру без перевищень.

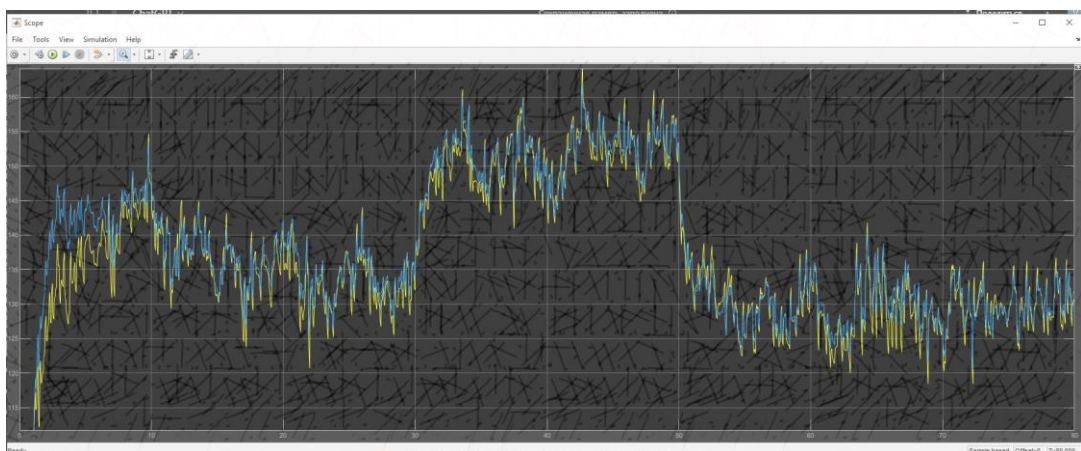


Рис. 3.26. Графік регулювання зі стрибками і збуреннями (синя крива – нечіткий ПД-регулятор, жовта крива – звичайний ПД-регулятор)

### Висновки до розділу 3

У третьому розділі магістерської роботи було здійснено розробку та реалізацію нечіткого ПД-регулятора з використанням засобів MATLAB/Simulink. Сформовано лінгвістичні змінні, функції належності та базу правил для динамічного налаштування параметрів  $K_p$ ,  $K_i$  та  $K_d$ . Побудовано модель керування об'єктом полімеризації, проведено моделювання у стабільних і збурених режимах, а також виконано порівняння результатів з класичним ПД-регулятором. Отримані результати підтвердили ефективність нечіткої логіки в умовах змінної динаміки технологічного процесу.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВЕРХНЬОГО РІВНЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ КАСКАДУ ПОЛІМЕРИЗАТОРІВ

#### 4.1 Розробка структури комп'ютерно-інтегрованої системи керування

Розробка структури комп'ютерно-інтегрованої системи керування (КІСК) є ключовим етапом у створенні сучасних автоматизованих рішень для управління виробничими процесами. Сучасні підприємства потребують високої точності, надійності та оперативності в управлінні своїми технологічними циклами, що стає можливим завдяки впровадженню КІСК.

Основна мета створення такої структури — забезпечення ефективної взаємодії між різними рівнями системи управління, включаючи датчики, виконавчі механізми, контролери, операторські станції та аналітичні інструменти. Це дозволяє автоматизувати контроль і регулювання технологічних параметрів, зменшити вплив людського фактору та підвищити продуктивність виробництва.

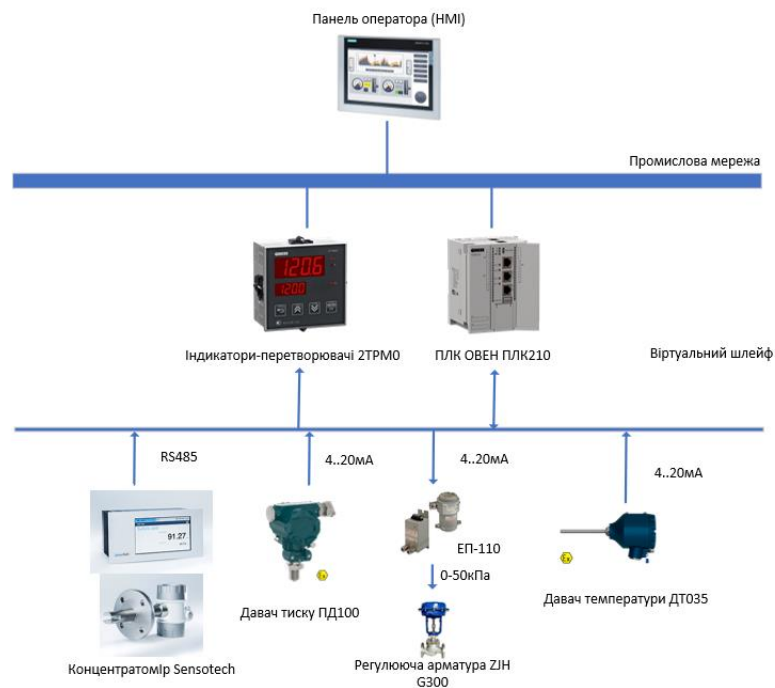


Рис. 4.1. Структура комп'ютерно-інтегрованої системи керування

Розробка структури KICK включає визначення ієрархії компонентів, організацію потоків даних і взаємодії між апаратними та програмними засобами. Добре спроектована система забезпечує не лише високу швидкість обробки даних, але й гнучкість у масштабуванні, можливість інтеграції з іншими інформаційними системами (ERP, MES) та відповідність сучасним стандартам кібербезпеки. На рисунку 4.1 зображена структура комп'ютерно-інтегрованої системи керування для каскаду полімеризаторів процесу полімеризації етилену.

## 4.2 Характеристика SCADA-системи

SCADA-система GE iFIX (від General Electric) є одним із провідних рішень у галузі автоматизації, призначеним для моніторингу, управління та аналізу виробничих процесів у режимі реального часу. Вона використовується на промислових підприємствах, енергетичних об'єктах, у транспорті, комунальному господарстві тощо.

Характеристика GE iFIX:

### 1. Основне призначення:

- Моніторинг і контроль технологічних процесів.
- Збір, обробка та зберігання даних з технологічного обладнання.
- Візуалізація даних у реальному часі.
- Генерація звітів та аналіз історичних даних.

### 2. Основні компоненти:

- НМІ (Людино-машинний інтерфейс) - інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для відображення технологічних процесів, гнучкі інструменти для створення графічних екранів, схем, трендів;

- диспетчеризація - централізований контроль за всіма об'єктами, можливість інтеграції з іншими SCADA та MES-системами;

- база даних - використання SQL або інших баз даних для збереження даних, інтеграція з ERP-системами для оптимізації управління підприємством.

### 3. Основні особливості:

- широкі можливості масштабування - від невеликих локальних рішень до великих корпоративних систем;
- підтримка відкритих стандартів - OPC, BACnet, Modbus, що забезпечує сумісність із різним обладнанням;
- кібербезпека - інтегровані засоби захисту даних та віддаленого доступу;
- гнучкість налаштування - можливість адаптації до потреб конкретного підприємства;
- інтеграція IoT - можливість роботи з хмарними рішеннями та Industrial IoT для передових аналітичних задач.

GE iFIX має багато переваг, які роблять її одним із провідних рішень у галузі SCADA-систем. Однією з головних переваг є її висока масштабованість, що дозволяє використовувати систему як для невеликих об'єктів, так і для великих підприємств з розгалуженою інфраструктурою. Завдяки підтримці відкритих стандартів, таких як OPC, Modbus і BACnet, вона легко інтегрується з різноманітним обладнанням і технологічними системами. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс забезпечує зручність роботи для операторів, а потужні аналітичні інструменти допомагають приймати ефективні управлінські рішення. Крім того, система відзначається високим рівнем надійності, швидкодією та можливістю інтеграції з сучасними технологіями, такими як IoT і хмарні платформи.

Проте, як і будь-яка інша система, GE iFIX має свої недоліки. Одним із них є відносно висока вартість впровадження та обслуговування, що може бути обмеженням для невеликих компаній. Ще одним недоліком є складність у навчанні персоналу для роботи з усіма функціями системи, особливо якщо підприємство раніше не використовувало подібні рішення. Інколи інтеграція з

дуже специфічним обладнанням чи програмним забезпеченням може вимагати додаткових витрат і часу, навіть попри підтримку відкритих стандартів. Також деякі користувачі відзначають, що для налаштування і розширення системи можуть знадобитися вузькоспеціалізовані знання.

## 4.3 Розробка проекту

### 4.3.1 Загальні відомості про структуру проекту

Систему автоматизації розроблено для диспетчерського контролю та управління процесом полімеризації етилену в каскаді 3-х реакторів-полімеризаторів.

Для схематичного відображення процесу полімеризації етилену, потоків між полімеризаторами та для візуального контролю правильності послідовності виконання процесу спроектовано модель з основними вузлами системи, яка зображена на рисунку 4.2.

Для диспетчерського управління передбачена панель керування, зображена на рисунку 4.3, на якій можна здійснювати контроль технологічного процесу.

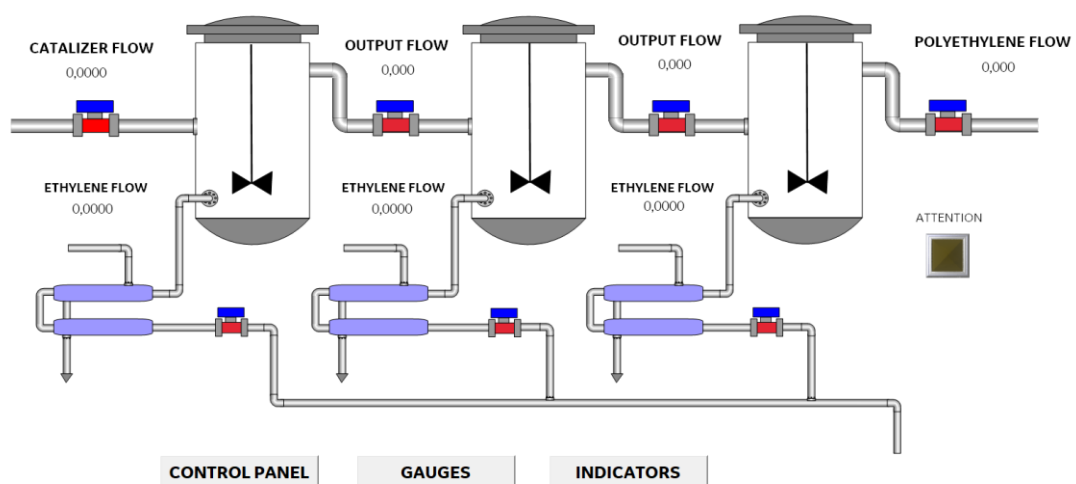


Рис. 4.2. Модель каскаду полімеризаторів

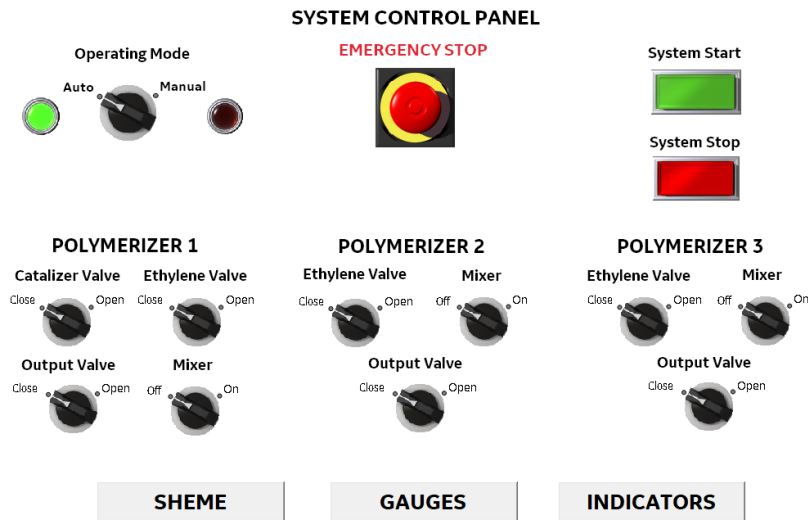


Рис. 4.3. Панель керування

Для відображення стану процесу та можливих аварій розроблена панель індикації, зображена на рисунку 4.4. На ній можна бачити всі дані про технологічні параметри, стан виконавчих механізмів, інформацію про аварії.

Додатково розроблена панель основних параметрів процесу, зображена на рисунку 4.5. На ній відображаються основні параметри процесу – концентрація, температура та тиск в кожному полімеризаторі, а також тренд відображення концентрацій для більш легкого візуального контролю правильності проходження процесу. На кожній панелі також є кнопка аварійної зупинки системи.

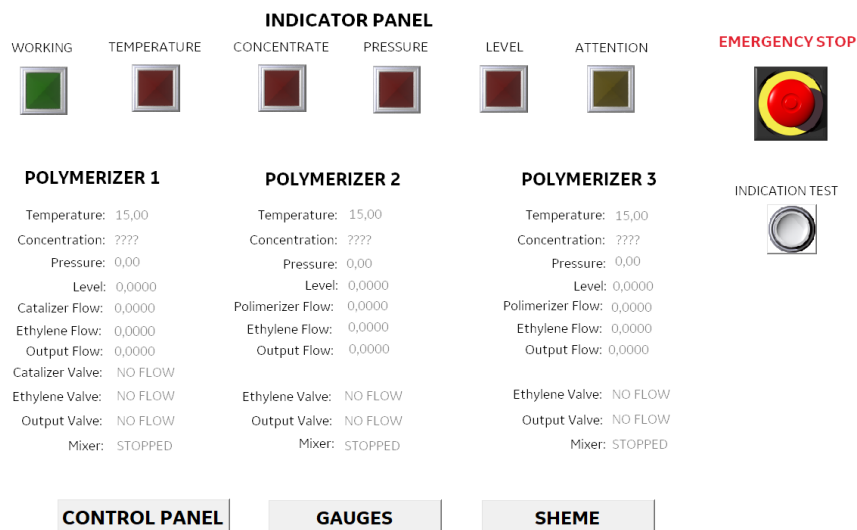


Рис. 4.4. Панель індикації



На панелі внизу під схемою каскадів полімеризаторів присутні кнопки переходу на інші панелі – «Control Panel», «Gauges», «Indicators», які забезпечують перехід на відповідні панелі.

Справа під клапаном виходу полімеризатора 3 розташована лампа «ATTENTION», яка відповідає за індикацію екстреної зупинки системи. Також, під лампою з'являється надпис «SYSTEM STOPPED» (рис. 4.7).

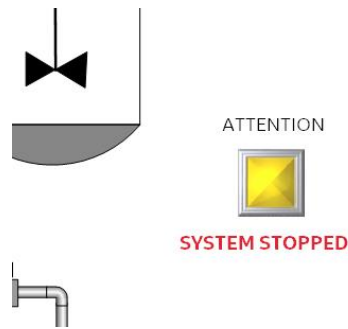


Рис. 4.7. Індикація аварійної зупинки системи

### 4.3.3 Опис панелі «Control Panel»

Панель «Control Panel» (рис. 4.8) призначена для диспетчерського управління.

Зліва вгорі розташований перемикач «Operating Mode», який забезпечує переключення системи в автоматичний та ручний режими (рис. 4.8). Відповідно, в автоматичному режимі світить зелена лампа, а в ручному режимі миготить червона лампа для того, щоб диспетчер легко перевіряв те, в якому стані керування знаходиться система. При обидвох режимах система виконує процес згідно технології, але в ручному режимі диспетчер може перемикач виконавчих механізмів, які розташовані нижче. При спробі перемикнути будь-який перемикач в автоматичному режимі, з'явиться попередження (рис. 4.10) про неможливість виконання цієї дії, так як система знаходиться в автоматичному режимі.

Посередині знаходиться кнопка аварійної зупинки (рис. 4.8). Коли система знаходиться в стані аварійної зупинки, посередині з'являється великий червоний надпис «SYSTEM STOPPED» (рис. 4.9).

Справа розташовані зелена та червона кнопки старту та зупинки системи, відповідно (рис. 4.8).

Нижче розташовані перемикачі для керування виконавчими механізмами полімеризаторів (рис. 4.8), підписані вони відповідно тому, за який виконавчий механізм відповідають.

Внизу розташовані кнопки переходу на інші панелі (рис. 4.8) – «Scheme», «Gauges», «Indicators».

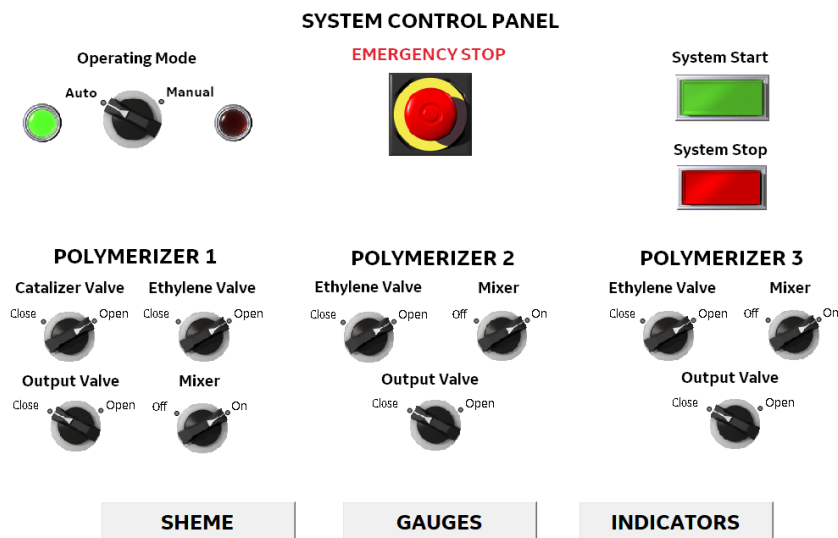


Рис. 4.8. Панель «Control Panel» в процесі виконання ТП

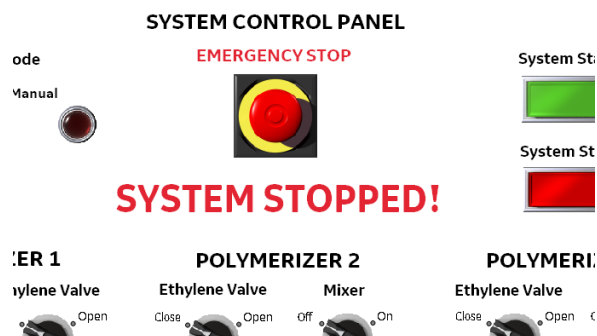


Рис. 4.9. Індикація аварійної зупинки системи

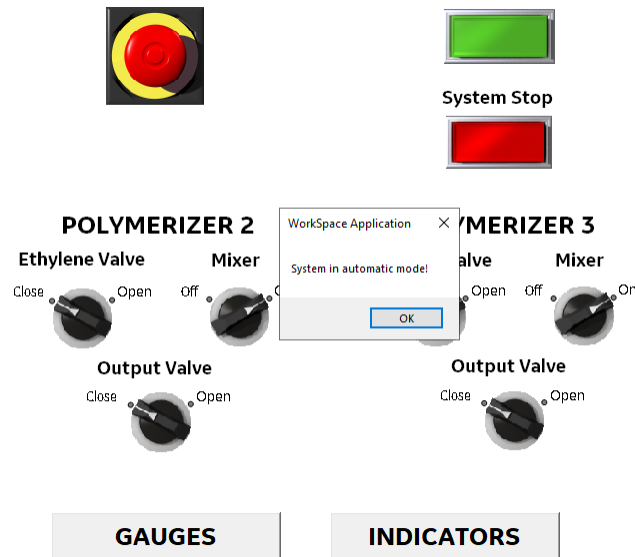


Рис. 4.10. Заборона перемикання ВМ в автоматичному режимі

#### 4.3.4 Опис панелі «Indicator Panel»

Панель «Indicator Panel» (рис. 4.11) призначена для відображення стану процесу та можливих аварій.

Зверху на панелі (рис. 4.11) розміщені індикатори роботи системи («Working», світить зеленим кольором коли система працює), сигналізації кожного параметру («Temperature», «Concentrate», «Pressure», «Level») та аварійної зупинки системи («Attention»).

Справа розташована кнопка аварійної зупинки (рис. 4.11). Вона також розташована на інших панелях. При її натисненні система повністю зупиняється та з'являється червоний надпис «SYSTEM STOPPED» та починає миготіти жовтий індикатор (рис. 4.12).

Нижче розташована кнопка «Indication Test», при натисненні якої на 3 секунди включаються аварійні індикатори для перевірки їх справності, а також при виникненні аварії, під відповідним індикатором з'являється надпис «Error» (рис. 4.13).

Посередині панелі розташовані всі параметри для кожного полімеризатора (рис. 4.11) – температура, концентрація, рівень, вхідні та

вихідні витрати, стан вхідних та вихідних клапанів, стан міксерів, що дозволяє бачити всі параметри зразу та спостерігати за правильністю роботи системи.

Внизу розташовані кнопки переходу на інші панелі (рис. 4.11) – «Control Panel», «Gauges», «Scheme».

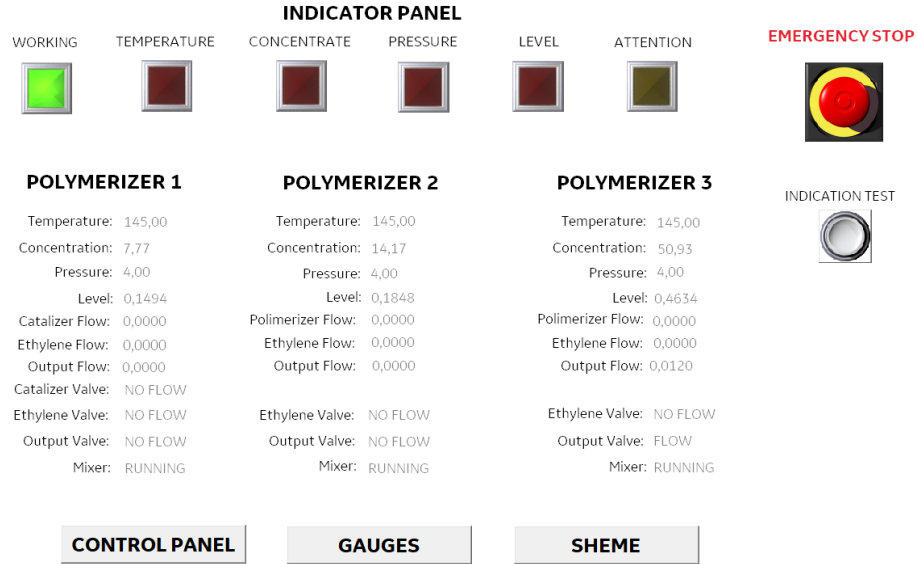


Рис. 4.11. Панель «Indicator Panel» в процесі виконання ТП

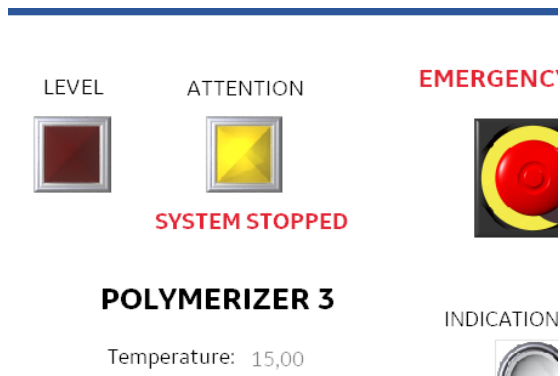


Рис. 4.12. Індикація аварійної зупинки системи

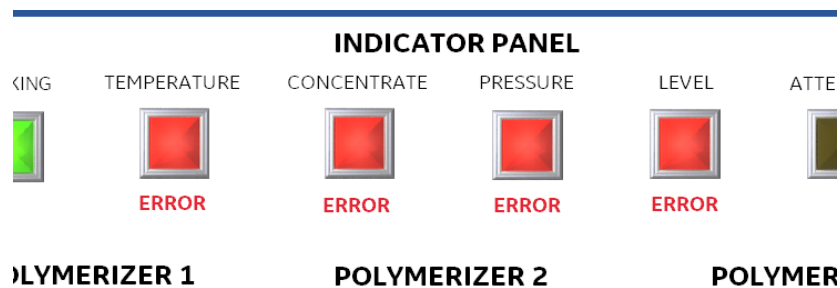


Рис. 4.13. Перевірка індикації

### 4.3.5 Опис панелі «Gauges»

Панель «Gauges» (рис. 4.14) призначена для відображення основних параметрів, щоб забезпечити більш легкий візуальний контроль правильності проходження процесу.

Зверху розташовані індикатори температур та концентрацій в відповідних полімеризаторах з візуальним та цифровим відображенням значення (рис. 4.14).

Нижче розташовані стрілочні та цифрові індикатори тисків в відповідних полімеризаторах (рис. 4.14).

Справа розташована кнопка аварійної зупинки (рис. 4.14). При її натисненні система повністю зупиняється та з'являється червоний надпис «SYSTEM STOPPED» (рис. 4.15).

Нижче кнопки аварійної зупинки розташований тренд (рис. 4.14), на якому відображаються графіки концентрацій впродовж процесу. Якщо процес стабільний, вигляд графіку має однаковий вигляд через певний період часу. Це дозволяє візуально побачити відхилення в процесі, якщо з якихось причин не спрацювала сигналізація.

Внизу розташовані кнопки переходу на інші панелі (рис. 4.14) – «Control Panel», «Scheme», «Indicators».

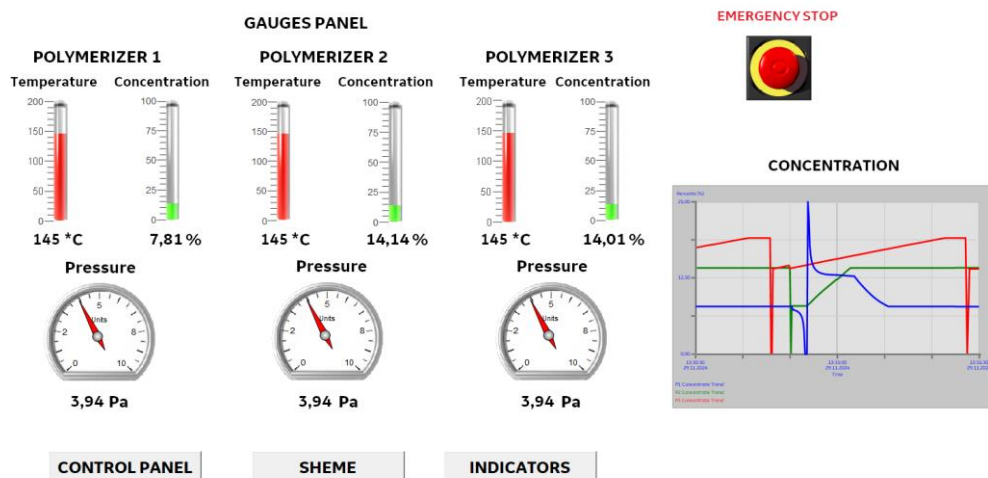


Рис. 4.14. Панель «Gauges» в процесі виконання ТП



Рис. 4.15. Індикація аварійної зупинки системи

### 4.3.6 Опис процесу

Після натиснення кнопки «Start System», відкриваються вхідні клапани етилену та каталізатора полімеризатора 1.

Полімеризатор 1.

Коли рівень в полімеризаторі досягає певного значення рівня, клапан подачі етилену закривається, а подачі каталізатора залишається відкритим. Це забезпечує досягнення заданої концентрації етилену в полімеризаті (8%). Як тільки концентрація досягнула заданого значення, вхідний клапан подачі каталізатора закривається та відбувається перевірка, чи у полімеризатора 2 рівень дорівнює 0, тобто чи він порожній. Якщо він порожній, відкривається зливний клапан полімеризатора 1 та полімеризат з 8% концентрацією етилену зливається в полімеризатор 2. Після зливу вихідний клапан закривається, а вхідні клапани подачі каталізатора та етилену відкриваються. Процес повторюється.

У випадку низької температури, включається сигналізація низької температури, при цьому клапан етилену відкривається, щоб підвищити температуру полімеризату.

У випадку високого рівня, перекриваються вхідні клапани, включається сигналізація високого рівня і система зупиняється, так як якщо рівень високий – значить є якась механічна проблема.

Полімеризатор 2.

Полімеризат з полімеризатора 1 з концентрацією етилену 8% зливається в полімеризатор 2. Після цього відкривається вхідний клапан етилену в полімеризатор 2 для досягнення заданої концентрації (14%). Як тільки концентрація досягнула заданого значення, вхідний клапан подачі етилену закривається та відбувається перевірка, чи у полімеризатора 3 рівень дорівнює 0, тобто чи він порожній. Якщо він порожній, відкривається зливний клапан полімеризатора 2 та полімеризат з 14% концентрацією етилену зливається в полімеризатор 3. Після зливу вихідний клапан закривається.

У випадку заниженої температури, включається сигналізація низької температури, при цьому клапан етилену відкривається, щоб підвищити температуру полімеризату.

У випадку зависокого рівня, перекриваються вхідні клапани, включається сигналізація високого рівня і система зупиняється, так як якщо рівень високий – значить є якась механічна проблема.

Полімеризатор 3.

Полімеризат з полімеризатора 2 з концентрацією етилену 14% зливається в полімеризатор 3. Після цього відкривається вхідний клапан етилену в полімеризатор 3 для досягнення заданої концентрації (19%). Як тільки концентрація досягнула заданого значення, вхідний клапан подачі етилену закривається, а вихідний клапан зливу полімеризату відкривається і полімеризат з 19% концентрацією етилену зливається далі в технологічний процес. Після зливу вихідний клапан закривається.

У випадку заниженої температури, включається сигналізація низької температури, при цьому клапан етилену відкривається, щоб підвищити температуру полімеризату.

У випадку зависокого рівня, перекриваються вхідні клапани, включається сигналізація високого рівня і система зупиняється, так як якщо рівень високий – значить є якась механічна проблема.

На рисунках 4.16 – 4.20 показано процес роботи системи при різних режимах, описаних вище.

На рисунку 4.21 та 4.22 показано аварію рівня при його перевищенні, як приклад сигналізації.

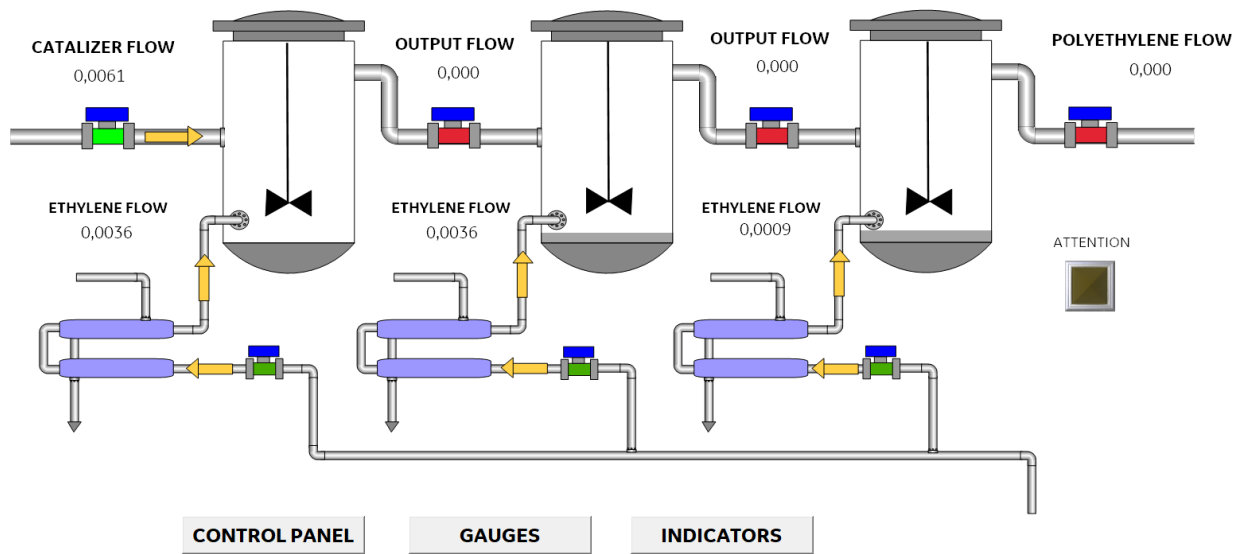


Рис. 4.16. Заливання етилену та каталізатора в полімеризатор 1 та паралельна робота всіх полімеризаторів

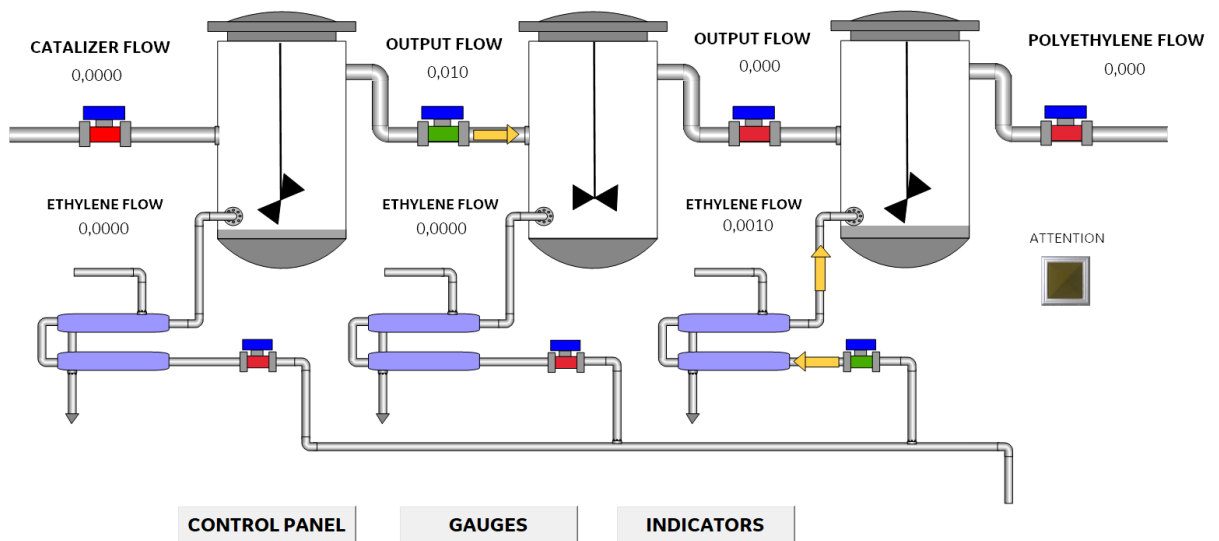


Рис. 4.17. Злив полімеризату з полімеризатора 1 в полімеризатор 2

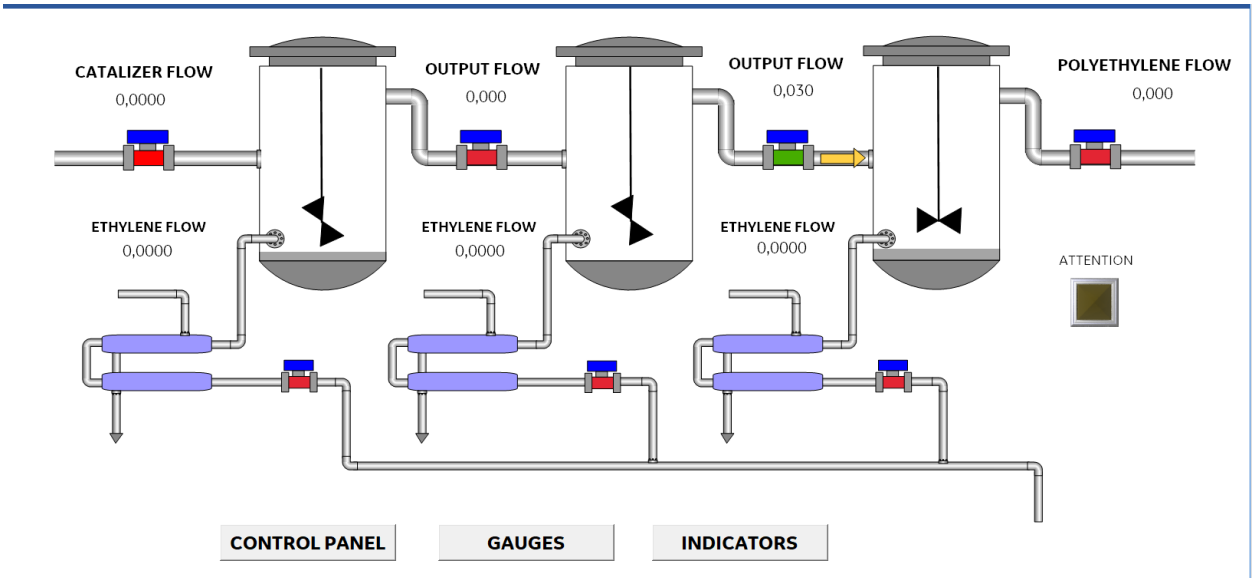


Рис. 4.18. Злив полімеризату з полімеризатора 2 в полімеризатор 3

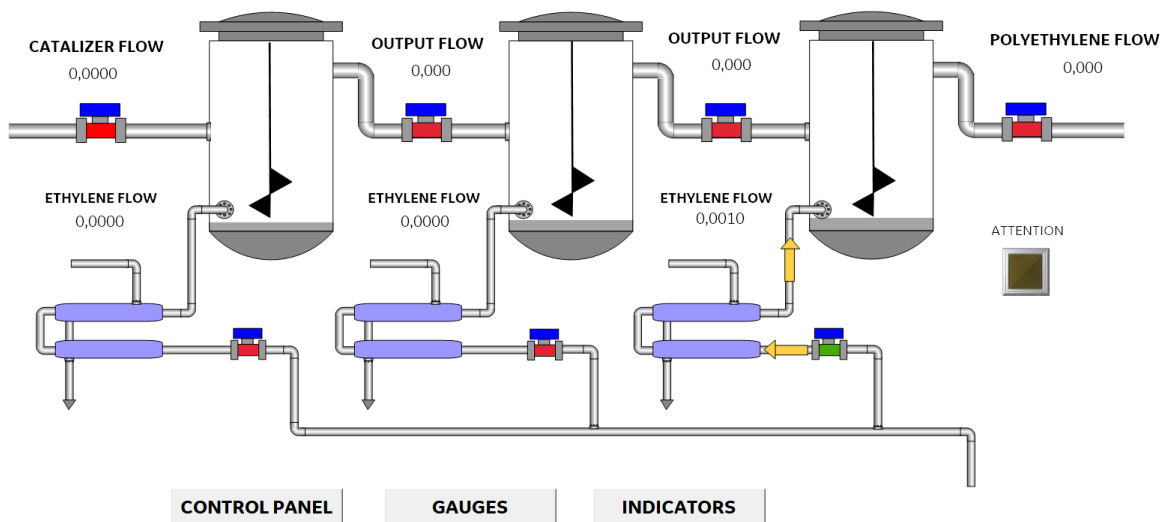


Рис. 4.19. Очікування полімеризатора 2, поки закінчиться процес в полімеризаторі 3; очікування полімеризатора 1, поки закінчиться процес в полімеризаторі 2

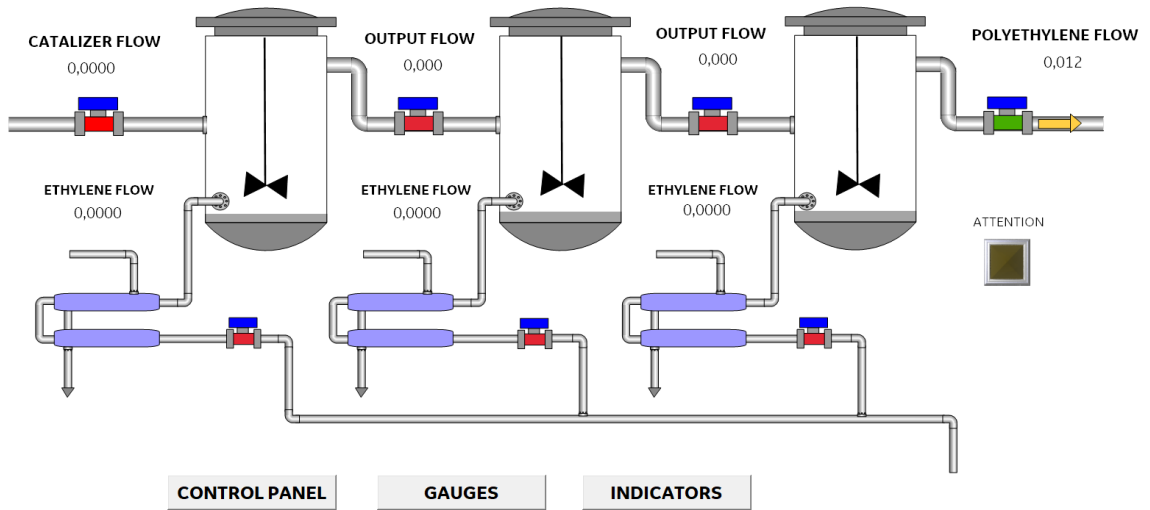


Рис. 4.20. Злив полімеризату з полімеризатора 3 далі в технологічний процес

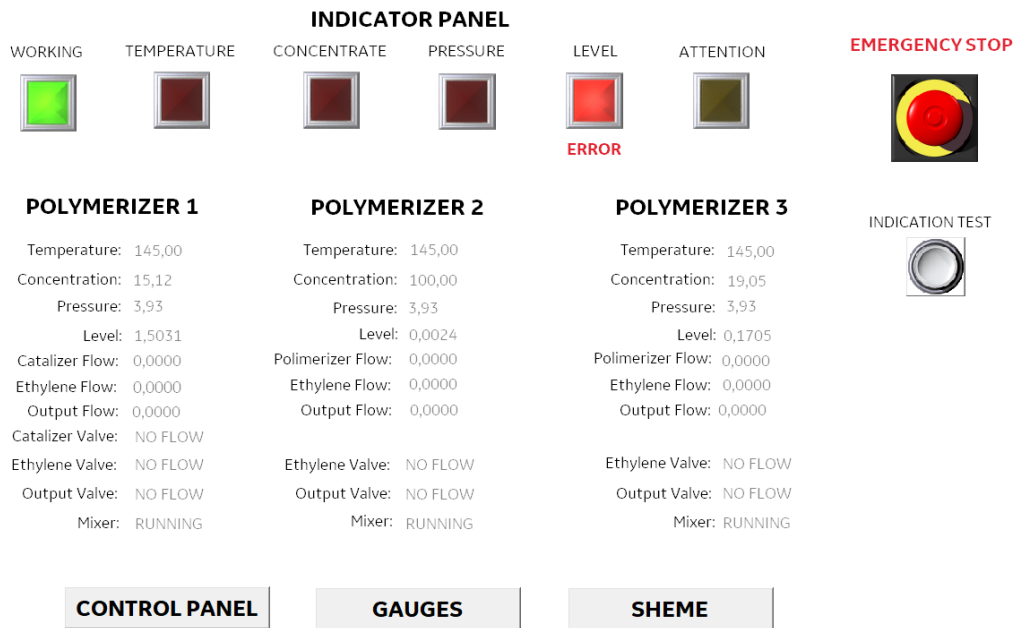


Рис. 4.21. Аварія рівня в полімеризаторі П1

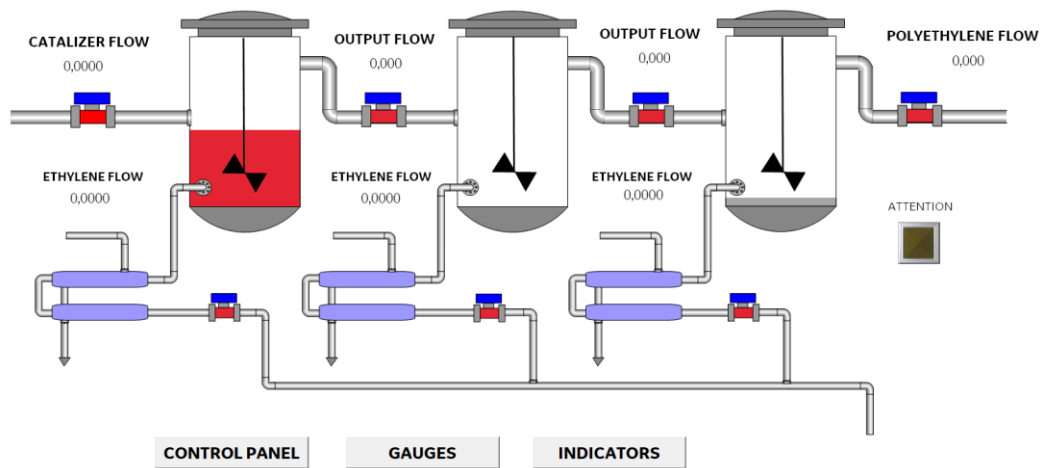


Рис. 4.22. Аварія рівня в полімеризаторі П1

#### 4.3.7 База тегів системи

База тегів системи складається з 78 тегів, з них 11 аналогових входів, 26 дискретних входів, 38 тегів розрахунку та 3 теги тренду.

Для керування виконавчими механізмами і «прапорців» певних подій використовувались дискретні входи «DI Discrete Input».

Для розрахунків всіх параметрів, як концентрація, температура, рівень, тиск, витрати та ін., використовувались розрахункові теги «Calculation».

Для моделювання сигналів з датчиків використовувались аналогові входи (Analog Input).

Для виведення інформації про концентрації в тренд, використовувались теги трендів (ETR).

Вигляд бази тегів зображений на рисунку 4.23 та 4.24.

	Tag Name	Type	Description	Scan Time	I/O Dev	I/O Addr	Curr Value
1	ETHYLENE_FLOW	AJ	Ethylene Random Flow	0.20	SIM	RE	0.0038
2	ETHYLENE_FLOW_2	AJ	Ethylene Random Flow	0.20	SIM	RE	0.0038
3	ETHYLENE_FLOW_3	AJ	Ethylene Random Flow	0.20	SIM	RE	0.0010
4	OUT_FLOW	AJ	Output Flow	0.20	SIM	RE	0.051
5	P1_IN_FLOW_VALUE	AJ	P1 In Flow Value	0.20	SIM	RE	0.007
6	P1_PRESSURE	AJ	Polimerizer 1 Pressure	0.20	SIM	RE	3.96
7	P2_PRESSURE	AJ	Polimerizer 2 Pressure	0.20	SIM	RE	3.96
8	P3_PRESSURE	AJ	Polimerizer 2 Pressure	0.20	SIM	RE	3.96
9	ROTATE	AJ	Rotate Generator	1	SIM	RA	0
10	ROTATE_2	AJ	Rotate Generator	1	SIM	RA	0
11	ROTATE_3	AJ	Rotate Generator	1	SIM	RA	0
12	P1_CATALIZER_V	CA	P1 Catalizer Volume	—	—	—	0.876352
13	P1_CHEMICALS	CA	Polimerizer 1 Input Chemicals	—	—	—	0.00000
14	P1_CONCENTRATE	CA	Polimerizer 1 Concentration	—	—	—	0.1512
15	P1_CONC_PERCENTS	CA		—	—	—	15.12
16	P1_ETHYLENE_FLOW	CA	Polimerizer 1 Ethylene Flow	—	—	—	0.0000
17	P1_ETHYLENE_V	CA	P1 Ethylene Volume	—	—	—	0.6246
18	P1_IN_FLOW	CA	Polimerizer 1 Input Flow	—	—	—	0.00000
19	P1_LEVEL	CA	Polimerizer 1 Level	—	—	—	1.5031
20	P1_MIXER_ROTATE	CA	Polimerizer 1 Mixer Rotate	—	—	—	0
21	P1_OUT_FLOW	CA	Polimerizer 1 Output Flow	—	—	—	0.000
22	P1_PRESSURE_VALUE	CA		—	—	—	3.96
23	P1_TEMP	CA	Polimerizer 1 Temperature Calculate	—	—	—	145.00
24	P2_CHEMICALS	CA	Polimerizer 2 Input Chemicals	—	—	—	0.000
25	P2_CONCENTRATE	CA	P2 Concentrate	—	—	—	1.0000
26	P2_CONC_PERCENTS	CA		—	—	—	100.00
27	P2_ETHYLENE_FLOW	CA	Polimerizer 2 Ethylene Flow	—	—	—	0.0000
28	P2_ETHYLENE_SAVE	CA		—	—	—	0.0371
29	P2_ETHYLENE_V	CA	P2 Ethylene Volume	—	—	—	0.0016
30	P2_LEVEL	CA	Polimerizer 2 Level	—	—	—	0.002
31	P2_MIXER_ROTATE	CA	Polimerizer 2 Mixer Rotate	—	—	—	0
32	P2_OUT_FLOW	CA	Polimerizer 2 Output Flow	—	—	—	0.000
33	P2_POLIMER_SAVE	CA		—	—	—	0.1088
34	P2_POLIMER_V	CA	Polimerizer 2 Polimer Input Volume	—	—	—	0.000000
35	P2_PRESSURE_VALUE	CA		—	—	—	3.96
36	P2_TEMP	CA	Polimerizer 2 Temperature Calculate	—	—	—	145.00

	Tag Name	Type	Description	Scan Time	I/O Dev	I/O Addr	Curr Value
37	P3_CHEMICALS	CA	Polimerizer 3 Input Chemicals	—	—	—	0.000
38	P3_CONCENTRATE	CA	P3 Concentrate	—	—	—	0.1915
39	P3_CONC_PERCENTS	CA		—	—	—	19.15
40	P3_ETHYLENE_FLOW	CA	Polimerizer 3 Ethylene Flow	—	—	—	0.0000
41	P3_ETHYLENE_SAVE	CA		—	—	—	0.0016
42	P3_ETHYLENE_V	CA	P3 Ethylene Volume	—	—	—	0.0578
43	P3_LEVEL	CA	Polimerizer 3 Level	—	—	—	0.151
44	P3_MIXER_ROTATE	CA	Polimerizer 3 Mixer Rotate	—	—	—	180
45	P3_OUT_FLOW	CA	Polimerizer 3 Output Flow	—	—	—	0.000
46	P3_POLIMER_SAVE	CA		—	—	—	0.0000
47	P3_POLIMER_V	CA	Polimerizer 3 Polimer Input Volume	—	—	—	0.0611
48	P3_PRESSURE_VALUE	CA		—	—	—	3.93
49	P3_TEMP	CA		—	—	—	145.00
50	AUTO_MANUAL	DI	System Mode	0.20	SIM	1.0	MANUAL
51	CONC_ERROR	DI	Polimerizers Concentrate Erros	0.20	SIM	20.0	OPEN
52	EMERGENCY_PRESSED	DI		0.20	SIM	45.0	OPEN
53	EMERGENCY_STOP	DI		0.20	SIM	43.0	OPEN
54	INDICATOR_TEST	DI	Indicators Test Flag	0.20	SIM	25.0	FALSE
55	LEVEL_ERROR	DI	Polimerizers Level Erros	0.20	SIM	18.0	CLOSE
56	P1_CONC_FLAG	DI		0.20	SIM	31.0	OPEN
57	P1_ETHYLENE_CONTROL	DI		0.20	SIM	2.0	NO FLOW
58	P1_IN_CONTROL	DI	Polimerizer 1 Input Valve	0.20	SIM	5.0	NO FLOW
59	P1_MIXER	DI	Polimerizer 1 Mixer Control	0.20	SIM	11.0	RUNNING
60	P1_OUT_CHECK	DI		0.20	SIM	40.0	OPEN
61	P1_OUT_CONTROL	DI	Polimerizer 1 Output Valve	0.20	SIM	8.0	NO FLOW
62	P2_ETHYLENE_CONTROL	DI	Polimerizer 2 Ethylene Input Valve	0.20	SIM	3.0	NO FLOW
63	P2_IN_CONTROL	DI	Polimerizer 2 Input Valve	0.20	SIM	6.0	NO FLOW
64	P2_MIXER	DI	Polimerizer 2 Mixer Control	0.20	SIM	12.0	RUNNING
65	P2_OUT_CHECK	DI		0.20	SIM	41.0	CLOSE
66	P2_OUT_CONTROL	DI	Polimerizer 2 Output Valve	0.20	SIM	9.0	NO FLOW
67	P3_ETHYLENE_CONTROL	DI	Polimerizer 3 Ethylene Input Valve	0.20	SIM	4.0	NO FLOW
68	P3_IN_CONTROL	DI	Polimerizer 3 Input Valve	0.20	SIM	7.0	NO FLOW
69	P3_MIXER	DI	Polimerizer 3 Mixer Control	0.20	SIM	13.0	RUNNING
70	P3_OUT_CONTROL	DI	Polimerizer 3 Output Valve	0.20	SIM	10.0	NO FLOW
71	PRESSURE_ERROR	DI	Polimerizers Pressure Erros	0.20	SIM	21.0	OPEN
72	START_VALUE	DI	System Run and Stop	0.20	SIM	14.0	RUN

Рис. 4.23. База тегів, частина 1

73	TEMP_ERROR	DI	Polimerizers Temperature Erros	0.20	SIM	19.0	OPEN
74	TICK_1	DI		0.20	SIM	35.0	OPEN
75	TICK_2	DI		0.20	SIM	36.0	OPEN
76	ETR_P1_CONC	ETR	P1 Concentrate Trend	—	—	—	15.12
77	ETR_P2_CONC	ETR	P2 Concentrate Trend	—	—	—	100.00
78	ETR_P3_CONC	ETR	P3 Concentrate Trend	—	—	—	19.15

Рис. 4.24. База тегів, частина 2

### 4.3.8 Графік подій системи

Щоб виконувати певні дії при певних обставинах, наприклад при досягненні потрібної концентрації етилену в полімеризаторі перекривати входи та відкривати вихід, потрібно десь це прописати. Для реалізації таких

подій використовувався графік подій. Його вигляд для системи показаний на рисунку 4.25.

В нього занесені всі події, такі як відкриття вхідного клапану каталізатора в полімеризатор 1, вхідних клапанів етилену кожного полімеризатора, вихідних клапанів кожного полімеризатора, оновлення рівня в полімеризаторах, оновлення частки каталізатора та елементу при переливі з полімеризатора в полімеризатор, сигналізації при перевищенні температури, рівня, тиску в полімеризатора, реалізація кнопки аварійної зупинки системи.

Принцип роботи графіка подій простий – при настанні події «Expression» перевіряється, чи ця подія є істиною або брехня («Event Type»), і в залежності від цього виконується скрипт, написаний в Virtual Basic Editor.

Приклад скрипта показано на рисунку 4.26.

Time Based Entries		Event Based Entries					
F	Name	Expression	Event Type	Interval	Operation	Description	
1	Level_Error_On	(Fix32.Fix.P1_LEVEL_F_CV > 1.5) OR (Fix32.Fix.P2_LEVEL_F_CV > 1.5) OR (Fix32.Fix.P3_LEVEL_F_CV > 1.5)	While True	00:00:01	Custom Script	Polimerizers Level Error	
2	Level_Error_Off	(Fix32.THISNODE.P1_LEVEL_F_CV <= 1.5) AND (Fix32.THISNODE.P2_LEVEL_F_CV <= 1.5) AND (Fix32.THISNODE.P3_LEVEL_F_CV <= 1.5)	On True	N/A	Custom Script	Polimerizers Level Error Off	
3	Temp_Error_On	((Fix32.THISNODE.P1_TEMP_F_CV < 120) AND (Fix32.THISNODE.P1_LEVEL_F_CV < 1.5)) OR ((Fix32.THISNODE.P2_TEMP_F_CV < 120) AND (Fix32.THISNODE.P2_LEVEL_F_CV < 1.5)) OR ((Fix32.THISNODE.P3_TEMP_F_CV < 120) AND (Fix32.THISNODE.P3_LEVEL_F_CV < 1.5))	On True	N/A	Custom Script	Polimerizers Temperature Error On	
4	Temp_Error_Off	((Fix32.THISNODE.P1_TEMP_F_CV > 121) OR (Fix32.THISNODE.P1_LEVEL_F_CV > 1.5)) OR ((Fix32.THISNODE.P2_TEMP_F_CV > 121) OR (Fix32.THISNODE.P2_LEVEL_F_CV > 1.5)) OR ((Fix32.THISNODE.P3_TEMP_F_CV > 121) OR (Fix32.THISNODE.P3_LEVEL_F_CV > 1.5))	On True	N/A	Custom Script	Polimerizers Temperature Error Off	
5	Indication_Test	Fix32.THISNODE.INDICATOR_TEST.F_CV	On True	N/A	Custom Script	Indicators Test Alter Button Pressed	
6	Start	Fix32.THISNODE.START_VALUE.F_CV	On True	N/A	Custom Script	Start System	
7	Stop_system	Fix32.THISNODE.START_VALUE.F_CV	While False	00:00:01	Custom Script	Stop system	
8	P1_Ethylene_In	(Fix32.THISNODE.P1_LEVEL_F_CV > 0.1) AND (Fix32.THISNODE.EMERGENCY_STOP.F_CV = 0)	On True	N/A	Custom Script	When catalizer level is OK, open ethylene	
9	P1_Ethylene_Out	(Fix32.THISNODE.P1_CONCENTRATE.F_CV <= 0.08) AND (Fix32.THISNODE.P1_LEVEL_F_CV > 0.1)	On True	N/A	Custom Script	When concentration is OK	
10	P1_Level_Check	(Fix32.THISNODE.P1_LEVEL_F_CV > 0.0000) AND (Fix32.THISNODE.START_VALUE.F_CV = 1)	On True	N/A	Custom Script		
11	P2_Ethylene_In	(Fix32.THISNODE.P2_LEVEL_F_CV > 0) AND (Fix32.THISNODE.P1_OUT_CONTROL.F_CV = 1)	On True	N/A	Custom Script		
12	P2_Polmer_Out	(Fix32.THISNODE.P2_CONCENTRATE.F_CV >= 0.14) AND (Fix32.THISNODE.P2_LEVEL_F_CV > 0)	On True	N/A	Custom Script		
13	P1_Out_Valve_Closed	Fix32.THISNODE.P1_LEVEL_F_CV = 0	On True	N/A	Custom Script		
14	P2_Out_Valve_Closed	Fix32.THISNODE.P2_LEVEL_F_CV = 0	On True	N/A	Custom Script		
15	P3_Out_Valve_Closed	Fix32.THISNODE.P3_LEVEL_F_CV = 0	On True	N/A	Custom Script		
16	P2_CatalAndEthyl	(Fix32.THISNODE.P1_OUT_CONTROL.F_CV = 1) AND (Fix32.THISNODE.P1_LEVEL_F_CV > 0.1)	On True	N/A	Custom Script		
17	P2_Concentrate	(Fix32.THISNODE.P2_OUT_CONTROL.F_CV = 1) AND (Fix32.THISNODE.P2_LEVEL_F_CV > 0.1)	On True	N/A	Custom Script		
18	P3_Ethylene_In	(Fix32.THISNODE.P3_LEVEL_F_CV > 0) AND (Fix32.THISNODE.P2_OUT_FLOW.F_CV = 1)	On True	N/A	Custom Script		
19	P3_Polmer_Out	(Fix32.THISNODE.P3_CONCENTRATE.F_CV >= 0.19) AND (Fix32.THISNODE.P2_LEVEL_F_CV > 0)	On True	N/A	Custom Script		
20	P3_CatalAndEthyl	(Fix32.THISNODE.P2_OUT_CONTROL.F_CV = 1) AND (Fix32.THISNODE.P2_LEVEL_F_CV > 0.1)	On True	N/A	Custom Script		
21	P3_Concentrate	(Fix32.THISNODE.P3_OUT_CONTROL.F_CV = 1) AND (Fix32.THISNODE.P3_LEVEL_F_CV > 0.1)	On True	N/A	Custom Script		
22	P1_Out_Check	Fix32.THISNODE.P1_OUT_CHECK.F_CV = 1	While True	00:00:01	Custom Script	Check Open P1_Out if P2 empty	
23	P2_Out_Check	Fix32.THISNODE.P2_OUT_CHECK.F_CV = 1	While True	00:00:01	Custom Script	Check Open P2_Out if P3 empty	
24	Emergency_Stop	Fix32.THISNODE.EMERGENCY_STOP.F_CV = 1	On True	N/A	Custom Script		
25	Emergency_Stop	(Fix32.THISNODE.EMERGENCY_STOP.F_CV = 0) AND (Fix32.THISNODE.EMERGENCY_STOP.F_CV = 1)	On True	N/A	Custom Script		
26							

Рис. 4.25. Графік подій

```
Private Sub P2_Out_Check_WhileTrue()
    Dim check3 As Integer
    Dim check4 As Double
    Dim temp2 As String
    temp2 = ReadValue("Fix32.THISNODE.P2_TEMP.F_CV")
    check3 = CInt(ReadValue("Fix32.THISNODE.P3_OUT_CONTROL.F_CV"))
    check4 = CDbl(ReadValue("Fix32.THISNODE.P3_LEVEL.F_CV"))
    If (check3 = 0 And check4 = 0) Then
        Call P3_CatalAndEthylene_Change_OnTrue
        WriteValue temp2, "Fix32.THISNODE.P3_TEMP.F_CV"
        OpenDigitalPoint "Fix32.THISNODE.P2_OUT_CHECK.F_CV"
        CloseDigitalPoint "Fix32.THISNODE.P2_OUT_CONTROL.F_CV"
    End If
End Sub
```

Рис. 4.26. Приклад скрипта

#### **Висновки до розділу 4**

В четвертому розділі магістерської роботи було розроблено та описано SCADA-систему для контролю та керування каскадом 3-х полімеризаторів в процесі виробництва поліетилену середнього тиску.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розглянута тема "Удосконалення процесу виробництва поліетилену середнього тиску".

1. Проведено аналіз технологічних особливостей виробничого процесу поліетилену середнього тиску.

2. Описано функціональну схему автоматизації процесу та підібрані відповідні технічні засоби автоматизації.

3. Розроблено адаптивний нечіткий регулятор керування процесом з використанням засобів MATLAB/Simulink. Отримані результати підтвердили ефективність нечіткої логіки в умовах змінної динаміки технологічного процесу.

4. Розроблено та описано SCADA-систему для контролю та керування каскададом 3-х полімеризаторів в процесі виробництва поліетилену середнього тиску.

Під час досліджень технології виробництва поліетилену середнього тиску було вивчено механізм реакції полімеризації та розглянуто особливості процесу. Аналіз технологічної схеми та конструкції реактора показав, що оптимізація роботи полімеризатора є ключовим для оптимізації виробництва.

Використані графічні матеріали відповідають сучасним стандартам, а їх розробка відбувалася згідно існуючих міжнародних та українських стандартів. При виконанні бакалаврської роботи та оформленні проектної документації використано програмне забезпечення Matlab для математичних розрахунків, програмне середовище Eplan для розробки технологічної та функціональної схем автоматизації і програмний пакет GE iFix для розробки SCADA-системи.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Ahmad, S., Kim, J., & Lee, H. Adaptive fuzzy PID controller design for nonlinear process control // Journal of Process Control. – 2012. DOI: 10.1021/ie801227d
2. Chatterjee, D., & Majhi, S. Design of PID and fuzzy-PID controller using model reduction technique for complex systems // ISA Transactions. – 2011. Режим доступу:  
[https://www.researchgate.net/publication/220269983\\_Design\\_of\\_PID\\_Fuzzy\\_Logic\\_Controller\\_for\\_Higher\\_Order\\_System](https://www.researchgate.net/publication/220269983_Design_of_PID_Fuzzy_Logic_Controller_for_Higher_Order_System)
3. COVNA Valve, Пневматичний клапан ZJH Series – Режим доступу:  
<https://www.covna-china.com/product/covna-zjh-series-pneumatic-diaphragm-control-globe-valve.html>
4. MathWorks. Fuzzy Logic Toolbox User's Guide. – The MathWorks, Inc., 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу:  
<https://www.mathworks.com/help/fuzzy>
5. Sensotech, Концентратомір LiquiSonic – Режим доступу:  
<https://www.sensotech.com/en/products/systems/liquisonicr>
6. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтегр. технології / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 236 с.
7. Апарати (реактори) з механічними перемішувачами пристроями, вертикальні – Режим доступу: <https://www.hng-ua.com/aparati-reaktori-z-mexanichnimi-peremishuyuchimi-pristroyami-vertikalni%EF%BF%BC/>
8. Бурштинський М.В., Хай М.В., Харчишин Б.М. Давачі / М.В. Бурштинський, М.В. Хай, Харчишин Б.М. – 2-ге вид. доповн. – Львів: ТЗОВ „Простір М”, 2014. – 202 с. Режим доступу:  
[https://www.svaltera.ua/upload/catalogs/davachi\\_2013.pdf](https://www.svaltera.ua/upload/catalogs/davachi_2013.pdf)

9. Іванов, О.М. "Автоматизація технологічних процесів виробництва поліетилену." Київ: Технічна література, 2012.
10. Інструкція з експлуатації та технічного обслуговування автоматизованої системи управління виробництвом поліетилену.
11. Конспект лекцій для самостійної підготовки з дисципліни "Монтаж, обслуговування та ремонт систем управління" (для магістрів спеціальності 151) / Упоряд .: В.Г.Макшанцев. - Краматорськ: ДДМА, 2018. -125с. - Режим доступу:  
[http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/avp/metod/%D0%9C%D0%9E%D0%A0%D0%A1%D0%A3%20%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82%20%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86\\_%D0%B9.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/avp/metod/%D0%9C%D0%9E%D0%A0%D0%A1%D0%A3%20%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82%20%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86_%D0%B9.pdf)
12. Копильців В.З., Фешанич Л.І. Удосконалення системи автоматизації процесу виробництва поліетилену середнього тиску з використанням нечіткої логіки // Теорія і практика сучасної науки та освіти : матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Львів, 29–30 листопада 2025 р.). – Львів : Львівський науковий форум, 2025. – С. 181–182.
13. Літературні джерела та наукові статті, опубліковані в журналах "Автоматизація і приладобудування", "Хімічна промисловість", та "Полімерні матеріали", пов'язані з автоматизацією виробництва поліетилену.
14. Монтаж та наладка засобів автоматизації – Режим доступу:  
<https://naurok.com.ua/montazh-ta-naladka-zasobiv-avtomatizaci-161741.html>
15. Монтаж щитів, пультів і стативів (автоматизація) – Режим доступу:  
[https://refs.co.ua/71381-Montazh\\_shitov\\_pul\\_tov\\_i\\_stativov\\_avtomatizaciya.html](https://refs.co.ua/71381-Montazh_shitov_pul_tov_i_stativov_avtomatizaciya.html)
16. ОВЕН AQTeck, Вимірювач двоканальний 2ТРМ0 – Режим доступу:  
<https://aqteck.com.ua/ua/vymiryuvachi-reguljatory/2trm0-vymirjuvach-dvokanalnij>
17. ОВЕН AQTeck, Давачі тиску ПД100 – Режим доступу:  
<https://aqteck.com.ua/ua/arhiv-produkciji/pd100-115-exd-datchyky-tusku-u-vyhonepronyknomu-vykonanni>

18. ОВЕН AQTeck, Контролер ПЛК210 – Режим доступу: <https://aqteck.com.ua/ua/programovani-logichni-kontrolery/plk210-programovanyj-logichnyj-kontroler>
19. ОВЕН AQTeck, Термоперетворювачі опору ДТС035Д – Режим доступу: <https://aqteck.com.ua/ua/datchyky/dtsxx5mi-yermoperetvorjuvachi-oporu-z-vyhidnym-sygnalom-4...20ma>
20. Офіційна документація виробника обладнання та програмного забезпечення Matlab.
21. Офіційна документація виробника обладнання та програмного забезпечення GE iFix.
22. Проектування систем керування: конспект лекцій для студентів спеціальності «Автоматизоване управління технологічними процесами» / Уклад.: М. З. Кваско, Я. Ю. Жураковський, А. І. Жученко, В. В. Миленський, – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 279 с.
23. Стаття «MATHEMATICAL MODELING ETHYLENE POLYMERIZATION PROCESS IN AUTOCLAVE REACTOR WITH STIRRER», 2023, УДК 66.023:62, EDN BJORUT – Режим доступу: <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2023-2-7-16>
24. Технічний опис установки для виробництва поліетилену середнього тиску, 2017.
25. Технологія виробництва поліетилену середнього тиску – Режим доступу: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi78/0057584.pdf>
26. ТОВ «Завод УкрМашПром», електропневматичні перетворювачі ЕП - Режим доступу: <https://www.mashprom.com.ua/%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C-%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%BD%D0%B5%D0%B2%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81/>

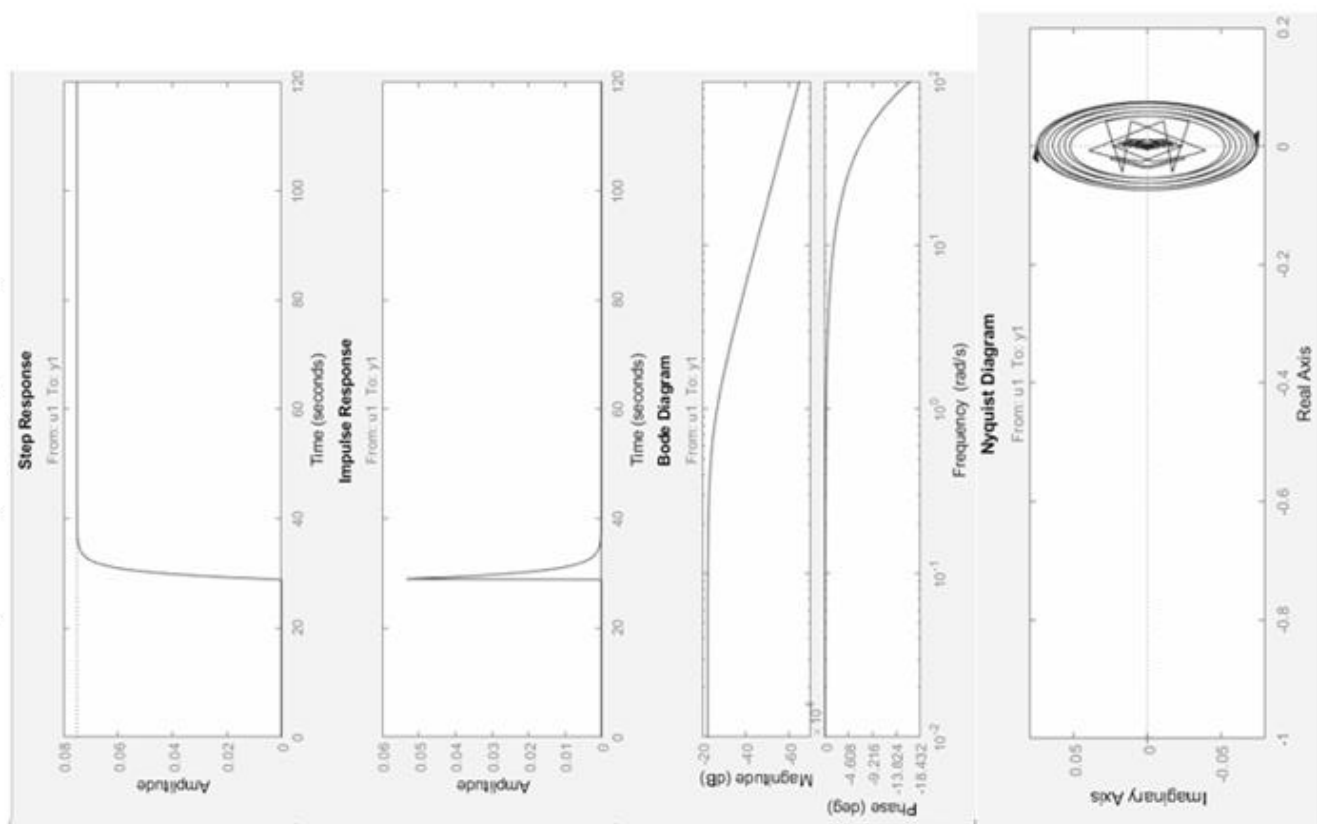
ДОДАТКИ



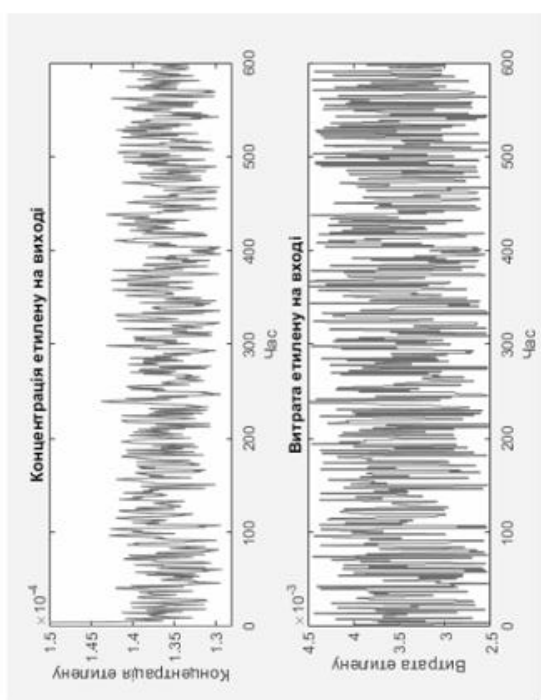
## ДОДАТОК Б

### Характеристика моделі реактора-полімеризатора

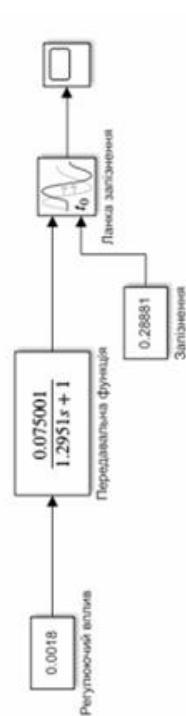
*Перехідна, імпульсна та частотні характеристики реактора-полімеризатора*



*Перевірочна характеристика моделі реактора-полімеризатора*

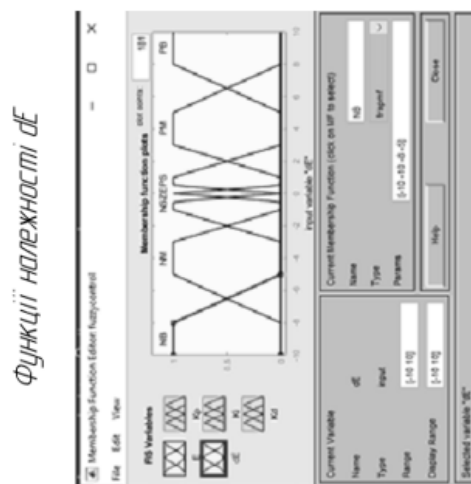
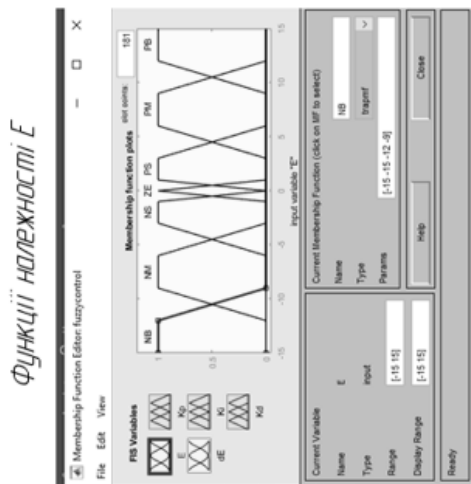
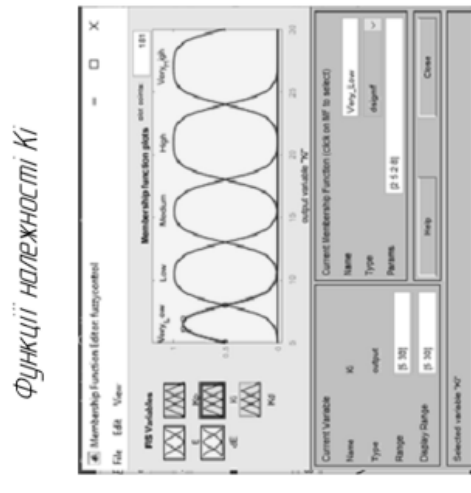
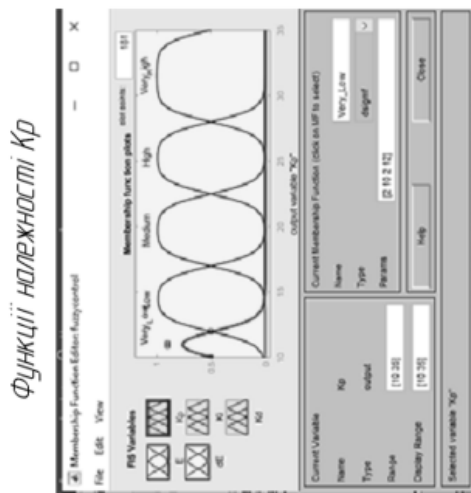
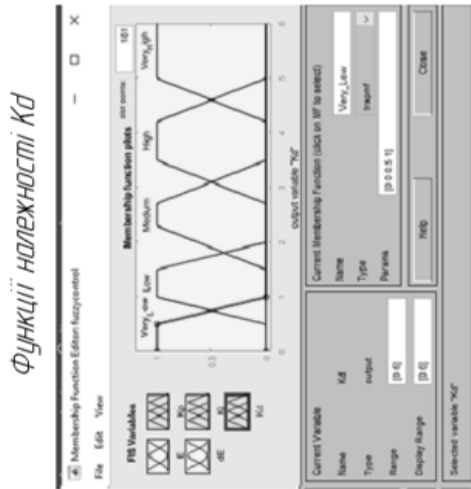


*Модель для отримання перехідної характеристики реактора-полімеризатора*



# ДОДАТОК В

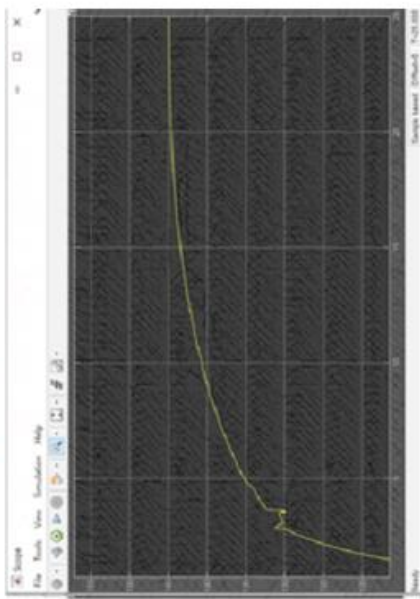
## Функції належності нечіткого регулятора



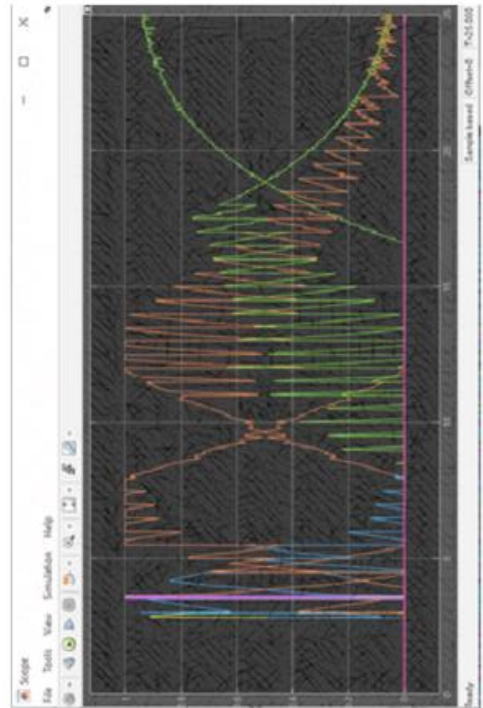
# ДОДАТОК Г

## Параметри нечіткого регулятора

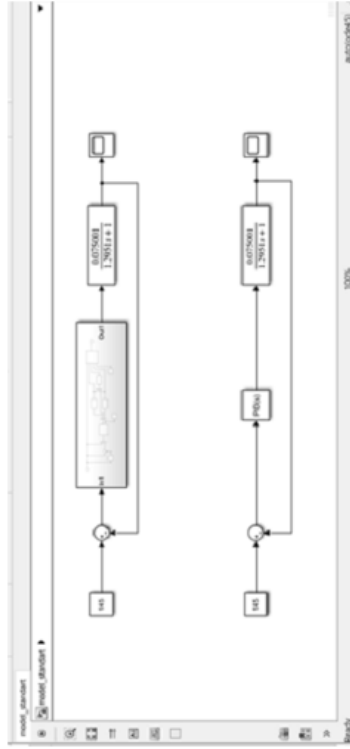
*Перехідна характеристика Fuzzy-регулятора*



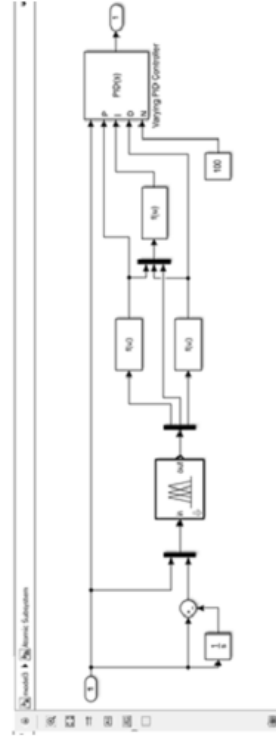
*Графік ступеней належності Fuzzy-регулятора*



*Simulink-модель для експериментів*



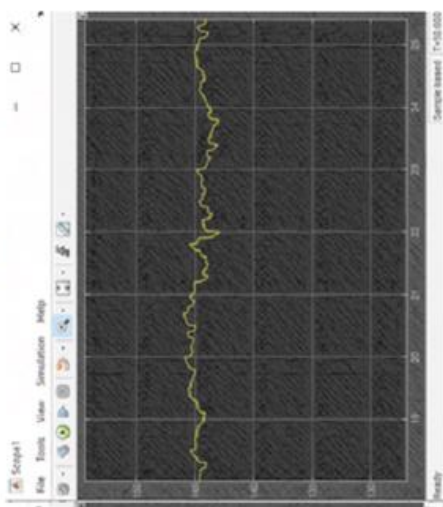
*Simulink-модель Fuzzy-регулятора*



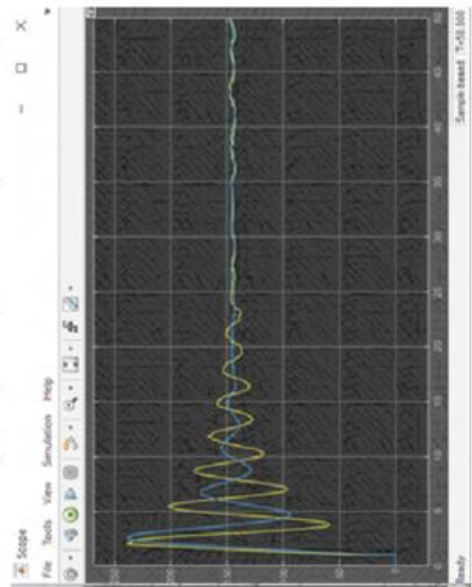
## ДОДАТОК Д

### Порівняння нечіткого та звичайного ПД-регуляторів

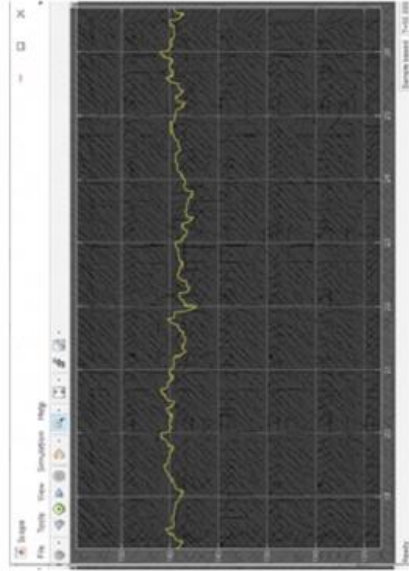
*Графік регулювання зі збуренням Fuzzy-регулятора*



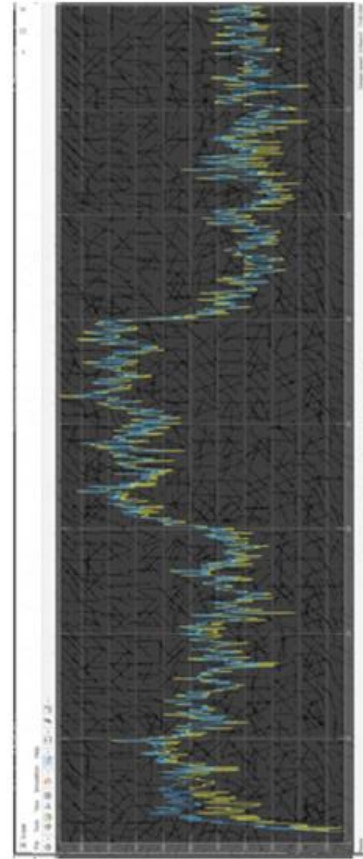
*Графік регулювання з різкою зміною заданого значення (синя крива – Fuzzy-регулятор, жовта крива – ПД-регулятор)*



*Графік регулювання зі збуренням ПД-регулятора*



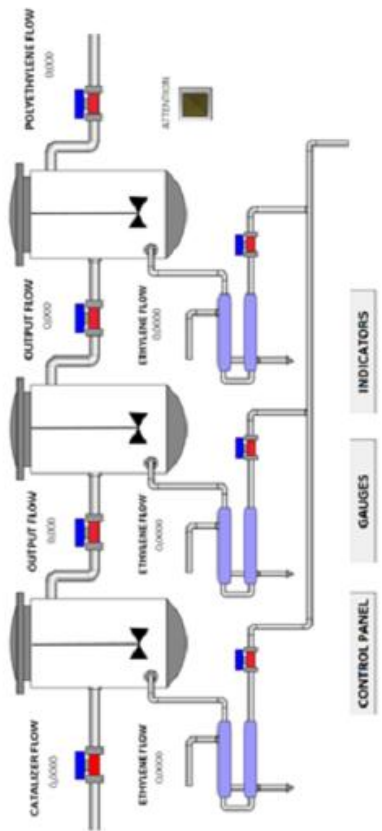
*Графік регулювання зі стрибками і збуреннями (синя крива – Fuzzy-регулятор, жовта крива – ПД-регулятор)*



# ДОДАТОК Е

## Вигляд SCADA-системи керування каскадом полімеризаторів

Модель каскаду реакторів-полімеризаторів



Панель керування

**SYSTEM CONTROL PANEL**

Operating Mode: Auto Manual

**EMERGENCY STOP**

**POLYMERIZER 1**

Catalyzer Valve: Open Close Mixer: Open Close Output Valve: Open Close

**POLYMERIZER 2**

Ethylene Valve: Open Close Mixer: Open Close Output Valve: Open Close

**POLYMERIZER 3**

Ethylene Valve: Open Close Mixer: Open Close Output Valve: Open Close

System Start Start System Stop Stop

**INDICATORS** **GAUGES** **SCHEME**

Панель індикації

**INDICATOR PANEL**

WORKING WORKING TEMPERATURE TEMPERATURE CONCENTRATE CONCENTRATE PRESSURE PRESSURE LEVEL LEVEL ATTENTION ATTENTION **EMERGENCY STOP** EMERGENCY STOP INDICATION TEST INDICATION TEST

**POLYMERIZER 1**

Temperature: 15.00  
Concentration: 7777  
Pressure: 0.00  
Level: 0.0000  
Catalyzer Flow: 0.0000  
Ethylene Flow: 0.0000  
Output Flow: 0.0000  
Catalyzer Valve: 10 FLOW  
Output Valve: 10 FLOW  
Mixer: STOPPED

**POLYMERIZER 2**

Temperature: 15.00  
Concentration: 7777  
Pressure: 0.00  
Level: 0.0000  
Polymerizer Flow: 0.0000  
Ethylene Flow: 0.0000  
Output Flow: 0.0000  
Ethylene Valve: 10 FLOW  
Output Valve: 10 FLOW  
Mixer: STOPPED

**POLYMERIZER 3**

Temperature: 15.00  
Concentration: 7777  
Pressure: 0.00  
Level: 0.0000  
Polymerizer Flow: 0.0000  
Ethylene Flow: 0.0000  
Output Flow: 0.0000  
Ethylene Valve: 10 FLOW  
Output Valve: 10 FLOW  
Mixer: STOPPED

**INDICATORS** **GAUGES** **SCHEME**

Панель основних параметрів

**GAUGES-PANEL**

**POLYMERIZER 1**

Temperature: 15 °C  
Concentration: 7777 %  
Pressure: 0.00 Pa

**POLYMERIZER 2**

Temperature: 15 °C  
Concentration: 7777 %  
Pressure: 0.00 Pa

**POLYMERIZER 3**

Temperature: 15 °C  
Concentration: 7777 %  
Pressure: 0.00 Pa

**EMERGENCY STOP**

**CONCENTRATION**

**INDICATORS** **SCHEME** **CONTROL PANEL** **INDICATORS**

## ЛЬВІВСЬКИЙ НАУКОВИЙ ФОРУМ

### МАТЕРІАЛИ

## ХVІІ МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

## ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА СУЧАСНОЇ НАУКИ ТА ОСВІТИ

29-30 листопада 2025 року

Львів  
2025

I

## ДОДАТОК Ж

Тези доповіді, надані до збірника

<i>Seniuk Y.</i> ENGINEERING THE FULL DEVELOPMENT LIFECYCLE OF INTELLIGENT SYSTEMS: FROM DATA TO DEPLOYMENT .....	176
<i>Shukalovskiy M.</i> THE FUTURE OF WORK IN THE IT INDUSTRY .....	179
<i>Копильців В.З., Фецинич Л.І.</i> УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПОЛЕТІЛЕНУ СЕРЕДЬНОГО ТИСКУ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ.....	181
<i>Осепрова В.</i> ТИПОЛОГІЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕКО-ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВЕЛИКОТОНАЖНИХ СУДЕН.....	183
<i>Стажов А.В., Шпак О.І.</i> ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ПРІОРИТИЗАЦІЇ ЗАВДАНЬ У ПРОЕКТНОМУ МЕНЕДЖМЕНТІ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ.....	186
<i>Фабіянський О.</i> ВПЛИВ РИТМУ МОНТАЖУ НА ЕМОЦІЙНЕ СПРІЙНЯТТЯ ВІДЕО.....	189
<i>Фабіянський О.</i> РОЛЬ КОЛОРИСТИКИ ТА МОНТАЖУ У СТВОРЕННІ НАСТРОЮ ВІДЕО .....	192
<i>Чечурний В.В., Федорка П.П.</i> ПРОЦЕДУРНА ГЕНЕРАЦІЯ ІГРОВИХ РІВНІВ: ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ ТА ЇХ ВПЛИВУ НА ЯКІСТЬ ВІЗУАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА.....	195
<b>ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ НАУКИ.....</b>	<b>198</b>
<i>Радзіва Т.В., Крутський Я.В.</i> ВИКОРИСТАННЯ МОБІЛЬНИХ ТА ВЕБ-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАВЧАЛЬНОЇ МОТИВАЦІЇ УЧНІВ ПРОФІЛЬНОЇ ШКОЛИ ПРИ ВИВЧЕННІ ІНФОРМАТИКИ .....	198
<b>ФІЗИЧНЕ ВИХОВАННЯ І СПОРТ .....</b>	<b>201</b>
<i>Євсєєв В.</i> ВПЛИВ ФІЗИЧНОЇ АКТИВНОСТІ НА ПІДТРИМАННЯ БОЙОВОЇ ГОТОВНОСТІ ПРИКОРДОННИКІВ.....	201
<b>ФІЛОЛОГІЧНІ НАУКИ .....</b>	<b>205</b>
<i>Гудзь С.</i> МОВНА ІНТУЇЦІЯ: ЯК МОЗОК РОЗПІЗНАЄ ГРАМАТИЧНІ ПОМИЛКИ БЕЗ ПРАВИЛ.....	205
<i>Пасєка А.</i> ОПОЗИЦІЇ КОНТРАРНОСТІ В УРОЛОГІЧНІЙ ТЕРМІНОЛОГІЦІ.....	208
<i>Пензор К.</i> АНГЛІЙСЬКА МОВА ЯК ІНСТРУМЕНТ ЦИФРОВОЇ КОМУНІКАЦІЇ.....	211

### **Копильців Володимир Зореславович**

*магістр другого року навчання*

**Фешаннич Лідія Ігорівна**

*доцент кафедри автоматизації та*

*комп'ютерно-інтегрованих технологій,*

*Івано-Франківський національний технічний*

*університет нафти і газу,*

*м. Івано-Франківськ, Україна*

## **УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІЕТИЛЕНУ СЕРЕДНЬОГО ТИСКУ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ**

Виробництво поліетилену середнього тиску є складним технологічним процесом, що потребує точного контролю температури, тиску, концентрації каталізатора та рівня суспензії у реакторах-полімеризаторів. Сучасні вимоги до якості продукції, енергоефективності та безпеки виробництва роблять актуальним впровадження інтелектуальних систем керування з можливостями візуалізації, моніторингу та адаптивного регулювання параметрів процесу.

Метою роботи є розроблення автоматизованої системи керування каскадом реакторів полімеризації стілену з використанням SCADA-системи для диспетчеризації та нечіткого регулювання для підвищення якості керування в умовах невизначеності та нелінійностей технологічного процесу.

Об'єктом дослідження обрано технологічний процес полімеризації стілену у каскаді з трьох реакторів-полімеризаторів із суспензійним методом синтезу за технологією Sclairtech (Metalocene Catalysis).

Процес полімеризації стілену здійснюється у каскаді з трьох послідовно з'єднаних реакторів об'ємом 56 м<sup>3</sup> кожен при температурі 130–170°C та тиску 3,5–4,0 МПа. Використовується каталізатор на основі оксиду хрому (CrO<sub>3</sub>) у концентрації 500–600 ppm. Ключовими керуванними параметрами є температура у трьох реакторах (140–145°C), концентрація каталізатора (заданий рівень для кожної зони), тиск (4 МПа) та рівні продукту [1].

Технологічний процес характеризується складною динамікою, тепловими інерціями, взаємним впливом параметрів та експоненційними залежностями швидкостей реакцій від температури (закон Арреніуса). Це створює труднощі для класичних ПІД-регуляторів і обґрунтовує застосування адаптивних та інтелектуальних методів керування [1].

Розроблено автоматизовану систему керування на базі програмованого логічного контролера ПЛК-210 (Owen) з підтримкою Modbus RTU/TCP, OPC UA та промислових протоколів. Система включає давачі температури (термоперетворювачі опору ДТС-035

з вихідним сигналом 4–20 мА); тиску (манометри TM-100 з цифровим інтерфейсом і вибухозахищеним виконанням IExHIST6); концентрації та густини (SensoTech LiquiSonic з ультразвуковою технологією, інтерфейс RS-485 і 4–20 мА); виконавчі механізми (пневматичні регулюючі клапани SovnaValve ZH G300 з позиціонерами).

Сигнали від давачів передаються на ПЛК, який здійснює обробку, регулювання та обмін даними зі SCADA-системою через Ethernet.

Для оперативного моніторингу та диспетчерського керування розроблено SCADA-додаток на базі GE iFIX. Система включає чотири основних екрани:

1. Scheme – мнемосхема технологічного процесу з анімованими елементами (реактори, трубопроводи, клапани, насоси);
2. Control Panel – панель керування з вибором режиму роботи (ручний/автоматичний), кнопками пуску/зупинки, перемиканням між реакторами;
3. Indicator Panel – табло індикації поточних значень температури, тиску, концентрації, рівня, аварійних сигналів;
4. Gauges – панель аналогових приладів (манометри, термометри) для наочного відображення параметрів.

SCADA-система забезпечує реалтаймову візуалізацію стану обладнання та параметрів процесу, архівування даних і трендів у базі SQL, сигналізацію аварійних ситуацій (ATTENTION); інтеграцію з ПЛК через OPC DA/UA та Modbus TCP; можливість ручного втручання та дистанційного керування клапанами.

Для підвищення якості керування температурою розроблено Fuzzy-PID регулятор у середовищі MATLAB Fuzzy Logic Designer. Регулятор адаптує коефіцієнти  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  ПІД-закону залежно від похибки керування (E) та швидкості її зміни (dE/dt).

Система нечіткого висновку складається з:

- вхідів: E (похибка, діапазон  $-15 \dots +15$ ) і dE (зміна похибки, діапазон  $-10 \dots +10$ );
- виходів:  $K_p$  (10...35),  $K_i$  (5...30),  $K_d$  (0...6);
- функцій належності: trapezoidal (trapmf) і double sigmoidal (dsigmf) для лінгвістичних термів (NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB для вхідів; Very Low, Low, Medium, High, Very High для виходів);
- бази правил: 49 правил нечіткого висновку типу "IF E is NB AND dE is PM THEN  $K_p$  is High AND  $K_i$  is Medium AND  $K_d$  is Low".

Fuzzy-PID-регулятор інтегровано у модель технологічного процесу у MATLAB Simulink. Порівняння з класичним ПІД-регулятором показало зменшення перерегулювання на 15–20%, скорочення часу перехідного процесу, кращу адаптацію до змін завдання та збурень.

Отже, розроблена система автоматизації з інтеграцією SCADA та нечіткого регулятора забезпечує підвищення стабільності температурного режиму у реакторах полімеризації, зручний інтерфейс оператора з візуалізацією технологічного процесу в реальному часі, адаптивність керування до змін властивостей об'єкта та зовнішніх збурень, а також можливість накопичення, аналізу даних та інтеграції з MES/ERP-системами вищого рівня.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Лукінок М. В. Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 236 с. – С. 120-121