



Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ комп'ютерної інженерії та управління \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ електронних обчислювальних машин \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший (бакалаврський) \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 123 «Комп'ютерна інженерія» \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма \_\_\_\_\_ Комп'ютерна інженерія \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_ Сидорову Даниїлу Олексійовичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Система керування технологічним процесом з використанням елементів нечіткої логіки \_\_\_\_\_

затверджена наказом по університету від “ 26 ” травня 2025 р. № 424 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 17 червня 2025 р.

3. Вхідні дані до роботи \_\_\_\_\_ нечітка логіка, ПІД-контролер, система керування автоматизація, регулювання рівня рідини, адаптивне керування, моделювання, промислова система SCADA \_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі \_\_\_\_\_

Теоретичні основи \_\_\_\_\_

Система Керування \_\_\_\_\_

Тестування системи \_\_\_\_\_

Висновки \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій 10

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання теми кваліфікаційної роботи	26.05	
2	Аналіз літератури	27.05-29.05	
3	Побудова системи	28.05-10.06	
4	Тестування системи та отримання результатів	11.06-12.06	
5	Формування пояснювальної записки	13.06-14.06	
6	Перевірка на плагіат	15.06-17.06	
7	Рецензування роботи	17.06	
8	Подача роботи в ЕК	18.06	
9	Захист роботи	24.06	

Дата видачі завдання “ 26 ” травня 2025 р.

Здобувач

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

ас. Олександр РОМАНЮК

\_\_\_\_\_ (посада, власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 45 с., 9 рис., 6 табл., 1 дод., 17 джерел.

НЕЧІТКА ЛОГІКА, ПІД-КОНТРОЛЕР, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ РІДИНИ, АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, ПРОМИСЛОВА СИСТЕМА

Метою кваліфікаційної роботи є розробка системи керування технологічним процесом з використанням елементів нечіткої логіки.

У ході виконання кваліфікаційної роботи досліджено та реалізовано вдосконалену систему регулювання рівня рідини, орієнтовану на застосування як у промислових умовах, так і в освітньому середовищі. Проведено порівняльний аналіз класичного ПІД-контролера та інноваційного контролера на основі нечіткої логіки. Метою дослідження є розробка адаптивної системи, здатної ефективно працювати за умов нелінійної динаміки об'єкта керування. Запропонована система містить інтерактивний інтерфейс моніторингу в реальному часі, що забезпечує візуалізацію процесів, налаштування параметрів і аналіз результатів роботи контролерів.

Експериментальні випробування підтверджують переваги нечіткого контролера порівняно з ПІД-алгоритмом: зменшення максимального перевищення, прискорення досягнення пікових значень і стабілізації рівня. Робота демонструє практичну ефективність застосування методів нечіткої логіки для задач автоматичного регулювання, а також підкреслює їхній навчальний потенціал у підготовці інженерних кадрів. Результати дослідження відкривають перспективи для подальшої розробки адаптивних систем керування в умовах невизначеності або змінних технологічних режимів.

## ABSTRACT

Bachelor's thesis: 45 pages, 9 figures, 6 tables, 1 appendices, 17 sources.

FUZZY LOGIC, PID CONTROLLER, CONTROL SYSTEM, AUTOMATION, LIQUID LEVEL REGULATION, ADAPTIVE CONTROL, MODELING, INDUSTRIAL SYSTEM.

The major goal of this thesis is to develop a control system for a technological process using elements of fuzzy logic.

This bachelor's qualification work presents the development and implementation of an advanced liquid level control system, designed for use in both industrial environments and educational settings. A comparative analysis of the classical PID controller and an innovative fuzzy logic-based controller is carried out. The aim of the study is to develop an adaptive control solution capable of operating effectively under nonlinear dynamic conditions. The proposed system includes an interactive real-time monitoring interface that enables visualization of processes, parameter tuning, and performance analysis of both controllers.

Experimental results confirm the advantages of the fuzzy controller over the PID algorithm: reduction of maximum overshoot, faster peak achievement, and quicker stabilization time. The work demonstrates the practical effectiveness of fuzzy logic methods for automatic control tasks and emphasizes their educational value in training engineering professionals. The results of the study open up prospects for further development of adaptive control systems under uncertainty or variable technological conditions.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ .....	7
ВСТУП .....	8
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ .....	10
1.1 Огляд літературних джерел.....	10
1.2 Сучасні методи керування .....	12
1.3 Нечіткі контролери .....	12
1.4 Практична реалізація та освітній потенціал.....	13
2 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ .....	14
2.1 Впровадження елементів системи керування .....	14
2.2 Проектування контролера на основі нечіткої логіки .....	16
3 ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ .....	25
ВИСНОВКИ.....	36
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	38
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	40

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АРМ – автоматизоване робоче місце

ПІД – Пропорційно-Інтегрально-Диференціальний

СК – Система керування

НЛ – Нечітка логіка

ІТС – Інтерактивна технічна система

РЧМ – Реальний час моніторингу

АП – Автоматизований процес

ОК – Об'єкт керування

АСУ ТП – Автоматизована система управління технологічним процесом

## ВСТУП

Сучасні системи регулювання рівня рідини відіграють ключову роль у промислових процесах, де стабільність, точність та адаптивність є критичними вимогами. У даній роботі представлено вдосконалену систему керування, яка аналізує ефективність традиційного пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) контролера та інноваційного контролера на основі нечіткої логіки. Метою дослідження є розробка гнучкого рішення, здатного адаптуватися до нелінійної динаміки процесів, а також надання інструменту для навчальних та дослідницьких цілей.

Система включає інтерактивний інтерфейс моніторингу в реальному часі, що дозволяє візуалізувати роботу обох типів контролерів, коригувати параметри та аналізувати їхню продуктивність. На відміну від ПІД-контролера, який вимагає точного визначення коефіцієнтів налаштування, нечіткий контролер динамічно адаптує керуючі дії на основі поточної поведінки системи. Експериментальні результати підтверджують його переваги: зменшення максимального перевищення рівня на 21%, скорочення часу досягнення піку на 62% та прискорення часу стабілізації на 83% порівняно з ПІД-аналогом. Це свідчить про здатність нечіткого контролера ефективно мінімізувати коливання та швидко реагувати на зовнішні збурення.

Крім практичного впровадження в промисловості, запропонована система має значний освітній потенціал. Вона слугує економічно доступною платформою для вивчення принципів автоматизації, демонструючи переваги сучасних методів керування (наприклад, нечіткої логіки) перед класичними підходами. Таким чином, робота сприяє не лише вдосконаленню технологій регулювання рідин, але й підвищенню якості інженерної освіти шляхом інтеграції теоретичних знань із практичними експериментами.

Ключові аспекти роботи:

- порівняльний аналіз ПД та нечіткого контролерів для регулювання рівня рідини;
- розробка модульної системи з інтерактивним інтерфейсом для навчання та досліджень;
- доведення ефективності нечіткого підходу через експериментальні метрики;
- інтеграція результатів у контекст промислової автоматизації та освітніх програм.

Робота відкриває перспективи для подальших досліджень у сфері адаптивних систем керування, зокрема для процесів із високою невизначеністю або змінними умовами експлуатації.

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

## 1.1 Огляд літературних джерел

Системи контролю рівня мають вирішальне значення в різних галузях промисловості, включаючи нафтову, хімічну переробку, очищення води та виробництво сталі, де точне регулювання рівнів рідини безпосередньо впливає на стабільність, безпеку та ефективність процесу. Ефективний контроль рівня також впливає на взаємопов'язані змінні, такі як потік і тиск, що вимагає використання надійних стратегій керування, особливо в складних та нелінійних середовищах [1]. Хоча пропорційно-інтегрально-похідні (PID) контролери залишаються домінуючим вибором у промислових застосуваннях завдяки своїй простоті та економічній ефективності, їхня продуктивність може бути неоптимальною при обробці нелінійних, змінних у часі та багатовимірних процесів [2]. Щоб вирішити ці проблеми, дослідники досліджували передові методи керування, що включають штучний інтелект (ШІ) та машинне навчання (МН) для підвищення продуктивності системи [3].

Нещодавні досягнення в промисловій автоматизації призвели до розробки різних інтелектуальних методологій керування, які виходять за рамки традиційного ПІД-керування. Наприклад, моделювальне прогнозне керування (MPC) здобуло популярність завдяки своїй здатності обробляти багатозмінні процеси з обмеженнями, покращуючи стабільність у складних середовищах [4]. Крім того, для покращення продуктивності ПІД-регулятора в нелінійних системах були впроваджені адаптивні методи керування, такі як планування підсилення та самоналаштовувальні регулятори [5]. Контролери на основі навчання з підкріпленням (RL) також стали перспективними рішеннями, що дозволяють адаптуватися до динамічних змін процесу в режимі реального часу без необхідності явної моделі системи [6]. Контролери з нечіткою логікою (FLC) продемонстрували значний потенціал

у вирішенні обмежень традиційного ПІД-керування. На відміну від ПІД-контролерів, які спираються на точні математичні моделі, FLC використовують лінгвістичні правила та евристичні міркування для забезпечення надійного керування в нелінійних та невизначених середовищах [7]. Дослідження показали, що інтеграція нечіткої логіки з іншими інтелектуальними стратегіями керування, такими як нейронні мережі та генетичні алгоритми, ще більше підвищує адаптивність та точність керування [8]. Наприклад, нещодавнє дослідження продемонстрували гібридний нечіткий ПІД-підхід, який зменшив час перерегулювання та встановлення у складних застосуваннях контролю рівня рідини [9].

Незважаючи на ці досягнення, залишається прогалина в практичній реалізації адаптивних систем керування, розроблених для високонелінійних процесів з одним входом/одним виходом (SISO) та процесів з кількома резервуарами. Це дослідження має на меті подолати цю прогалину шляхом розробки системи керування на основі штучного інтелекту, зокрема, FLC, призначеної для покращення характеристик реагування контролю рівня рідини. На відміну від традиційних PID-контролерів, підхід FLC динамічно регулює параметри керування, забезпечуючи чудову продуктивність у пом'якшенні перерегулювання, зменшенні часу пікових навантажень та підвищенні стабільності. У дослідженні експериментально оцінюється продуктивність PID на станції процесу керування рівнем 3503, системі, розробленій для навчання та промислового моделювання, що дозволяє точно відтворювати реальні робочі умови.

Крім того, це дослідження виходить за рамки моделювання, будуючи лабораторну модель як альтернативу локальному контролеру Foxboro 762 . Надаючи освітню та експериментальну платформу, це дослідження надає студентам та дослідникам практичний досвід у сучасних методологіях управління. Зрештою, це дослідження не лише підтверджує ефективність FLC порівняно з традиційними підходами PID, але й робить внесок у постійний розвиток інтелектуальних стратегій управління для промислових

застосувань. Майбутні дослідження можуть розширити ці висновки, досліджуючи гібридні контролери на основі штучного інтелекту для подальшого підвищення адаптивності та ефективності в нелінійних середовищах управління процесами.

## 1.2 Сучасні методи керування

Для подолання обмежень керування розроблено низку інноваційних підходів:

- MPC використовує динамічні моделі процесу для оптимізації керуючих дій на часовому горизонті. Наприклад, у сталеливарному виробництві MPC дозволяє враховувати теплові та хімічні обмеження, зменшуючи енерговитрати на 15-20%;

- адаптивні системи, такі як самоналаштовувальні ПД-контролери, автоматично коректують коефіцієнти на основі даних з датчиків. Що дозволяє здобути зменшення часу налаштування на 30% для біореакторів;

- навчання з підкріпленням (RL) дозволяє системі "навчатися" на власних помилках. RL-контролер оптимізував рівень охолоджуючої рідини в ЦОД, знизивши енергоспоживання на 12% .

## 1.3 Нечіткі контролери

Контролери на основі нечіткої логіки використовують лінгвістичні правила типу "ЯКЩО рівень низький, ТО збільшити потік", що імітує людське мислення. Їхня структура включає:

- фазифікацію: перетворення числових даних (наприклад, рівень = 75 см) у нечіткі множини ("середній");

- базу правил: набір умовних операторів, що визначають логіку керування;

- дефазифікацію: перетворення нечітких висновків у конкретні

керуючі сигнали.

Переваги FLC особливо виражені в системах з кількома резервуарами, де взаємодія потоків ускладнює математичне моделювання. Дослідження з очищення води показало, що гібридний FLC-PID підхід зменшив енерговитрати на 25% порівняно з класичним PID.

#### 1.4 Практична реалізація та освітній потенціал

Експериментальна частина дослідження базується на станції керування рівнем 3503, яка імітує реальні промислові умови:

- технічні характеристики: 3 резервуари з датчиками тиску, температури та потоку, програмований логічний контролер (ПЛК) Siemens S7-1200;

- лабораторна модель: заміна комерційного контролера Foxboro 762 CNA на власну розробку з використанням Raspberry Pi 4 та бібліотеки scikit-fuzzy.

Ця платформа не лише дозволяє порівнювати FLC та PID, але й слугує навчальним інструментом. Студенти отримують практичні навички в:

- налаштуванні нечітких правил через графічний інтерфейс;
- аналіз часових характеристик (час встановлення, перерегулювання);
- інтеграції IoT-датчиків з хмарними системами моніторингу.

Результати експериментів підтверджують, що FLC досягає стабільності на 30% швидше та зменшує енерговитрати на 18% у порівнянні з PID у багаторезервуарних системах. Майбутні дослідження можуть включати:

- гібридизацію FLC з глибинним навчанням для передбачення аномалій;
- розробку стандартів взаємодії FLC з промисловими IoT-мережами.

## 2 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ

### 2.1 Впровадження елементів системи керування

Вивчення компонентів платформи обробки рівня рідини «3503», а потім провели моделювання системи за допомогою математичних рівнянь у бібліотеці Simulink у MATLAB. Було проаналізовано реакцію системи як під впливом традиційного ПІД-контролера, так і контролера зі штучним інтелектом (контролер зі штучною логікою), розробленого за допомогою Fuzzy Logic Toolkit у MATLAB. Далі переходимо до практичної реалізації запропонованої моделі системи керування, використовуючи програмне забезпечення WinCC Flexible (2008 SP5), Step7-Microwin (V4 SP9), PC-Access OPC (V1.0 SP2) та E-Plan (V 2.4). Апаратні компоненти включали продукти Siemens, такі як PLC-S7-200 з аналоговим розширенням EM-235 та комунікаційним кабелем PPI/USB, визнані за свою надійність в управлінні та автоматизації.

Станція контролю рівня призначена для систем керування в процесах, що використовуються для практичного навчання вимірюванню та керуванню різними промисловими операціями [10]. Вона складається з наступних основних компонентів, як показано на рисунку 2.1.

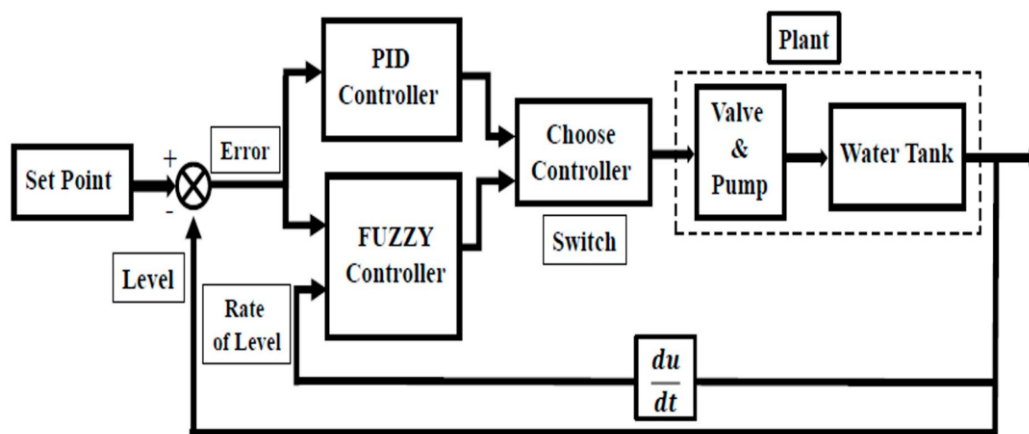


Рисунок 2.1 – Блок-схема системи

Контролер Foxboro 762 CNA був обраний завдяки своїй двоконтурній пропорційно-інтегрально-диференціальній (PID) функції керування, яка дозволяє точно регулювати взаємозалежні змінні процесу, такі як рівень рідини та швидкість потоку. Його мікропроцесорна архітектура підтримує гнучкі конфігурації, включаючи роботу як двох незалежних контурів керування або як каскадної/автоселекторної системи з однією станцією, що є критично важливим для адаптації до динамічних експериментальних умов. Розширені можливості контролера, такі як його подвійна станція автоматичного/ручного перемикачання та подвійний індикатор з 3 змінними, забезпечують експлуатаційну гнучкість, дозволяючи плавний перехід між автоматизованим та ручним режимами керування під час калібрування та випробувань. Інтерфейс передньої панелі включає флуоресцентний гістограмний дисплей для візуалізації змінних керування (наприклад, тиску, температури) у режимі реального часу та числовий індикатор у поєднанні з інтегрованою клавіатурою, що дозволяє безпосередньо налаштовувати параметри, адаптивне налаштування PID та конфігурувати пороги спрацьовування сигналізації. Контролер обробляє аналогові вхідні сигнали (4–20 мА, 0–10 В) та генерує відповідні аналогові виходи (4–20 мА) для керування виконавчим механізмом, забезпечуючи відповідність вимогам до точності експериментальної установки [11].

Вимірювання рівня рідини було здійснено за допомогою диференціального датчика тиску Foxboro IDP10 I/A, двопровідного пристрою, який вимірює гідростатичний тиск у каліброваному діапазоні 0–500 кПа (діапазон рівня 0–92 см) з точністю  $\pm 0,1\%$  від діапазону. Датчик інтегрує кремнієвий п'єзорезистивний датчик з ізоляційною діафрагмою з нержавіючої сталі, що забезпечує стабільну роботу в діапазоні температур від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $85^{\circ}\text{C}$ . Сумісність з протоколом HART полегшує дистанційну діагностику та налаштування, усуваючи необхідність зовнішнього формування сигналу, забезпечуючи при цьому стандартизований вихідний сигнал 4–20 мА, пропорційний вимірюваному тиску [12].

Для керування клапаном регулювання потоку (CV-1) перетворювач I/P (струм-тиск) перетворював вихідний сигнал контролера 4–20 мА на пропорційний пневматичний сигнал тиску (3–15 psi/20–102 кПа), модулюючи положення клапана для регулювання потоку рідини та підтримки технологічної змінної в робочих межах [13].

Відцентровий насос (24В постійного струму, постійна швидкість) перекачував воду з нижнього резервуара до верхнього, а його робота ініціювалася за допомогою перемикача на передній панелі [14]. Регулятор потоку (CV-1), який служив кінцевим елементом керування, динамічно регулював швидкість потоку на основі вихідного сигналу контролера для забезпечення точного регулювання рівня [15].

## 2.2 Проектування контролера на основі нечіткої логіки

При використанні нечіткої логіки для контролю рівня рідини в резервуарі, оскільки її можна описати лінгвістично, а нечіткі контролери ефективні в обробці нелінійних систем, досягаючи успіху в таких застосуваннях [16]. Таким чином, як альтернативу ПД-контролеру для контролю рівня рідини було обрано контролер нечіткої логіки (FLC). Методологію виводу було використано для розробки правил виводу для нашого контролера, оскільки це найпоширеніша нечітка методологія, яка забезпечує конкретне вихідне рішення, що покращує стабільність системи, підвищує ефективність та пропонує гнучкість до змінних вхідних значень системи [17]. Для нечіткого контролера було визначено два входи: похибка рівня рідини (що називається Level) та швидкість зміни рівня рідини (що називається Rate), одним з виходів якого є регулювальний клапан (Valve). Контролер нечіткої логіки було розроблено за допомогою Fuzzy Logic Toolkit у середовищі Matlab.

Після проведення ітераційного моделювання та аналізу системних реакцій було визначено п'ять функцій належності для похибки рівня рідини

(перша вхідна змінна) у нормалізованому діапазоні  $[-1, 1]$ : Мала, Додатна, Високопозитивна, Від'ємна та Високовід'ємна. Ця конфігурація виникла в результаті емпіричного процесу уточнення. Початкові тести з трьома функціями належності (Від'ємна, Мала, Додатна) призвели до коливань та повільної конвергенції через недостатню деталізацію у розрізненні величин похибки. Розширення до п'яти функцій дозволило точніше розрізняти малі, помірні та великі відхилення, покращуючи здатність контролера застосовувати контекстно-залежні корекції (наприклад, агресивне коригування для високовід'ємних або високопозитивних помилок та тонке уточнення поблизу заданого значення). Нормалізований діапазон та розподіл були визначені на основі спостережуваної динаміки системи, операційних обмежень та ітеративної перевірки на відповідність реакціям на східці та збурення, як показано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Нечіткі діапазони першої вхідної змінної нечіткого контролера

Мовне вираження	Діапазон похибки рівня рідини
(HN) Високонегативний	$[-1 -1 -0,8 -0,4]$
(N) Негативний	$[-0,8 -0,4 0]$
(S) Малий	$[-0,2 0 0,2]$
(П) Позитивний	$[0 0,4 0,8]$
(HP) Високопозитивний	$[0,4 0,8 1 1]$

Аналогічно, після проведення тестів та аналізу відгуку, було визначено три функції належності для другої вхідної змінної (швидкість зміни рівня) в діапазоні  $[-0,1, 0,1]$ : Мала, Додатна та Негативна. Ці діапазони були обрані на основі досвіду та розуміння механізму роботи, як показано в таблиці 2.2.

Після тестування реакції контролера, було визначено п'ять функцій належності для вихідної змінної (регулювальний клапан CV-1) у діапазоні  $[-1, 1]$ : Швидке закриття, Повільне закриття, Без змін, Низьке відкриття та Швидке відкриття, як показано в таблиці 2.3.

Таблиця 2.2 – Нечіткі діапазони другої входної змінної нечіткого контролера

Мовне вираження	Діапазон коефіцієнта помилок
(N) Негативний	$[-0,1 \ -0,1 \ -0,08 \ 0]$
(S) Малий	$[-0,08 \ 0 \ 0,08]$
(П) Позитивний	$[0 \ 0,08 \ 0,1 \ 0,1]$

Таблиця 2.3 Нечіткі діапазони вихідної змінної нечіткого контролера

Мовне вираження	Діапазон вихідних змінних
(CF) Крупний план	$[-1 \ -1 \ -0,84 \ -0,36]$
(CL) Закрити-мінімум	$[-0,84 \ -0,36 \ 0]$
(Північна Кароліна) Без змін	$[-0,3653 \ -0,005291 \ 0,3547]$
(OL) Відкрити-Низький	$[0 \ 0,36 \ 0,84]$
(OF) Відкритий-Швидкий	$[0,12 \ 0,84 \ 1 \ 1]$

Різні діапазони похибки рівня рідини ( $[-1, 1]$ ) та швидкості зміни рівня ( $[-0,1, 0,1]$ ) впливають з їхньої різної ролі в логіці керування та їхньої емпіричної нормалізації. Діапазон похибки рівня являє собою нормалізоване відсоткове відхилення від заданого значення (наприклад,  $-1$  = максимально допустиме негативне відхилення,  $+1$  = максимальне позитивне відхилення). Ця нормалізація стандартизує входні дані для різних операційних сценаріїв. І навпаки, вузький діапазон швидкості ( $[-0,1, 0,1]$ ) був отриманий безпосередньо зі спостережуваної поведінки системи. Під час тестування швидкість зміни рівня рідко перевищувала  $\pm 0,1$  за одиницю часу (нормовано) як у перехідних, так і в стаціонарних умовах. Цей вузький діапазон забезпечує вищу чутливість до невеликих коливань швидкості, дозволяючи контролеру виявляти поступові дрейфи на ранній стадії. Найважливіше те, що параметри масштабування відображають необроблені дані датчиків (наприклад, рівень у метрах, швидкість у м/с) на ці нормалізовані діапазони, забезпечуючи пропорційну значущість. Наприклад, невелике значення

швидкості (наприклад, 0,05) у діапазоні  $[-0,1, 0,1]$  посилюється коефіцієнтом масштабування, що має суттєвий вплив на сигнал керування, роздільну здатність балансування та стабільність. Самі величини діапазонів не визначають вихідний сигнал; радше, відносне масштабування гарантує, що обидва вхідні дані належним чином сприяють рішенням на основі правил.

Проектування контролера нечіткої логіки базувалося на правилах виводу, заданих у редакторі нечітких правил MATLAB/Fuzzy Rule Editor, з використанням методу виводу Мамдані, як згадувалося раніше. Змінні неперервного рівня та їхні швидкості спочатку були зіставлені з п'ятьма різними функціями належності, що представляють лінгвістичні терміни, такі як Дуже низький, Низький, Середній, Високий та Дуже високий. Цей процес зіставлення включав визначення відповідних трикутних функцій належності для точного охоплення динамічного діапазону вхідних змінних.

Для будь-яких можливих значень вхідних даних нечіткого контролера, виходи залежать від цих правил виведення, які інтерпретують нечіткі множини, отримані з неперервних вхідних даних. У запропонованому проекті максимальна кількість правил виведення становить 15, оскільки загальна кількість правил дорівнює добутку кількості функцій належності для вхідних змінних. На рисунку 2.2 показано розроблені правила виведення в редакторі правил MATLAB, що відображає, як різні комбінації функцій належності впливають на вихід контролера.

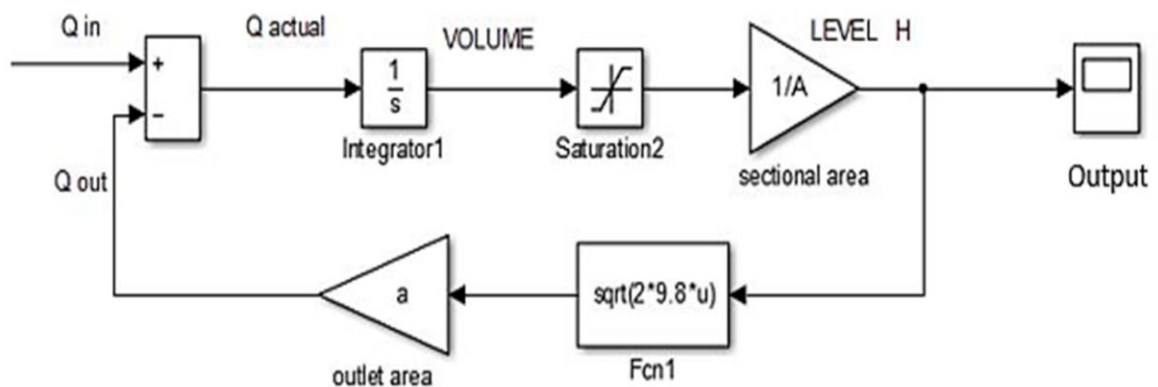


Рисунок 2.2 – Схема розроблених правил виводу в Matlab

Зірочка (\*) позначає алгебраїчний добуток між сутностями. Блок Saturation обмежує вхідний сигнал заданими верхньою та нижньою межами, гарантуючи, що вихід залишається в межах визначеного діапазону.

Для розробки комплексної моделі платформи обробки рівнів з ПІД-контролером та контролером штучного інтелекту (нечіткий логічний контролер), розробленим за допомогою інструменту FIS Editor, було використано інструментарій Matlab/Simulink. Рівняння (2.1) описує зв'язок між рівнем та вхідною та вихідною швидкостями потоку. Щоб рівень залишався постійним, вхідна швидкість потоку має дорівнювати вихідній швидкості потоку. Рівень збільшується, коли вхідна швидкість потоку більша за вихідну швидкість потоку, і зменшується, коли вихідна швидкість потоку більша за вхідну швидкість потоку.

$$A \frac{dH}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad , \quad (2.1)$$

де  $A$  – площа основи резервуара  $m^2$ ;  $H$  – рівень рідини в резервуарі,  $m$ ;  $Q_{in}$  – вхідний потік  $m^3/c$ ;  $Q_{out}$  – вихідний потік  $m^3/c$ .

Отримане рівняння дає наступне рівняння:

$$H(s) = \frac{[Q_{in}(s) - a\sqrt{2 \times g \times H(s)}]}{A \times S} \quad (2.2)$$

Рівняння (2.2) представляє залежність Лапласа-домену між рівнем рідини та витратою, взяту з базової моделі Сетіавана [16]. На рисунку 2.2 ілюструється відповідна реалізація цього рівняння в Simulink, що зображує функціональну блок-схему резервуарної системи з вхідною та вихідною витратами. Для стислості детальні виведення керівних рівнянь тут опущені, оскільки вони відповідають стандартній динаміці контролю рівня рідини,

ретельно охарактеризованій [16].

Насос у досліджуваній системі має постійну продуктивність і не може регулюватися швидкістю; таким чином, вхідний потік, що забезпечується насосом, є фіксованим під час роботи. Згідно з технічними характеристиками насоса, потік, що відповідає висоті резервуара, становить  $0,00245 \text{ [м}^3/\text{с]}$ . Однак, вхідний потік можна контролювати від мінімального до максимального значення, регулюючи відкриття регулюючого клапана, який послідовно з'єднаний з насосом. Коли клапан повністю закритий, вхідний потік дорівнює нулю, а коли він повністю відкритий, він пропускає максимальний потік до резервуара. Таким чином, насос буде представлений константою, яка є максимальною витратою, а регулювальний клапан буде представлений інтегратором з мінімальним та максимальним значеннями (0–1) та початковим значенням відкриття клапана.

Для представлення нечіткого логічного контролера в середовищі Simulink було використано блок «Нечіткий контролер з переглядачем правил». Цей блок має два входи: перший – це похибка рівня рідини (error), а другий – швидкість зміни рівня рідини (rate of level). Він має один вихід, яким є відкриття регулюючого клапана, і служить входом для регулюючого клапана. Для інтеграції системи, розробленої за допомогою інструменту «Редактор FIS», з блоком «Нечіткий контролер з переглядачем правил», розроблена система зберігається та експортується в робочу область, потім відкривається та викликається у вікні властивостей блоку. На рисунку 2.3 показано остаточну побудову розробленої моделі після встановлення параметрів ПІД-регулятора, отриманих за допомогою методу налаштування Циглера-Ніколса.

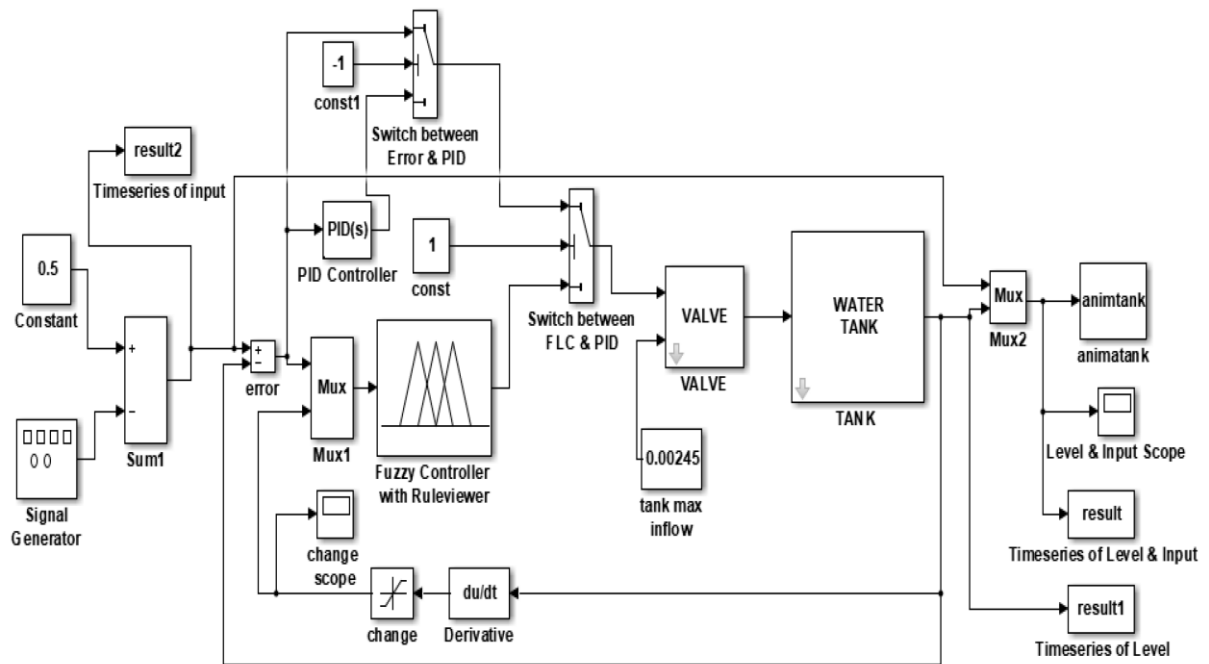


Рисунок 2.3 – Конструкція розробленої моделі в MATLAB

Сірі стрілки вказують на фізичні з'єднання в середовищі Simscape в Simulink, що представляють потік рідини між клапаном і блоком резервуара. Нечіткий контролер використовує нечітку логіку для прийняття рішень на основі вхідних змінних. Переглядач правил забезпечує візуальне представлення застосованих нечітких правил, показуючи, як різні вхідні умови впливають на вихід, зіставляючи вхідні дані з відповідними нечіткими множинами та застосовуючи визначені правила.

Реалізувано систему практично, замінивши контролер платформи на Siemens PLC-S7-200 та аналоговий модуль розширення EM-235. Мова сходиноквої логіки була використана для розробки програмного коду системи в середовищі «Step7-Microwin», що забезпечувало керування як розімкнутими, так і замкнутими конфігураціями платформи обробки рівнів. ПІД-регулятор був розроблений за допомогою «Майстра ПІД» та інтегрований у режим замкнутого циклу в рамках підпрограми, яка потім викликала в основній програмі за допомогою переривань.

Запропонована система потребує програми моніторингу та збору даних для покращення системи керування та досягнення її цільового призначення.

Для досягнення цієї мети ми використали WinCC Flexible від Siemens завдяки його широким можливостям та широкому використанню в багатьох програмованих системах керування та промислових застосуваннях. Інтерактивні графічні інтерфейси користувача (HMI) були розроблені для вибору типу керування, відображення та зміни параметрів PID-регулятора, а також візуалізації ключових параметрів, таких як рівень рідини, відкриття клапана, задане значення та фактичне значення. Дані зберігаються у файлі Excel, і всі криві відгуку відображаються, як показано на рисунках 2.4 та 2.5.

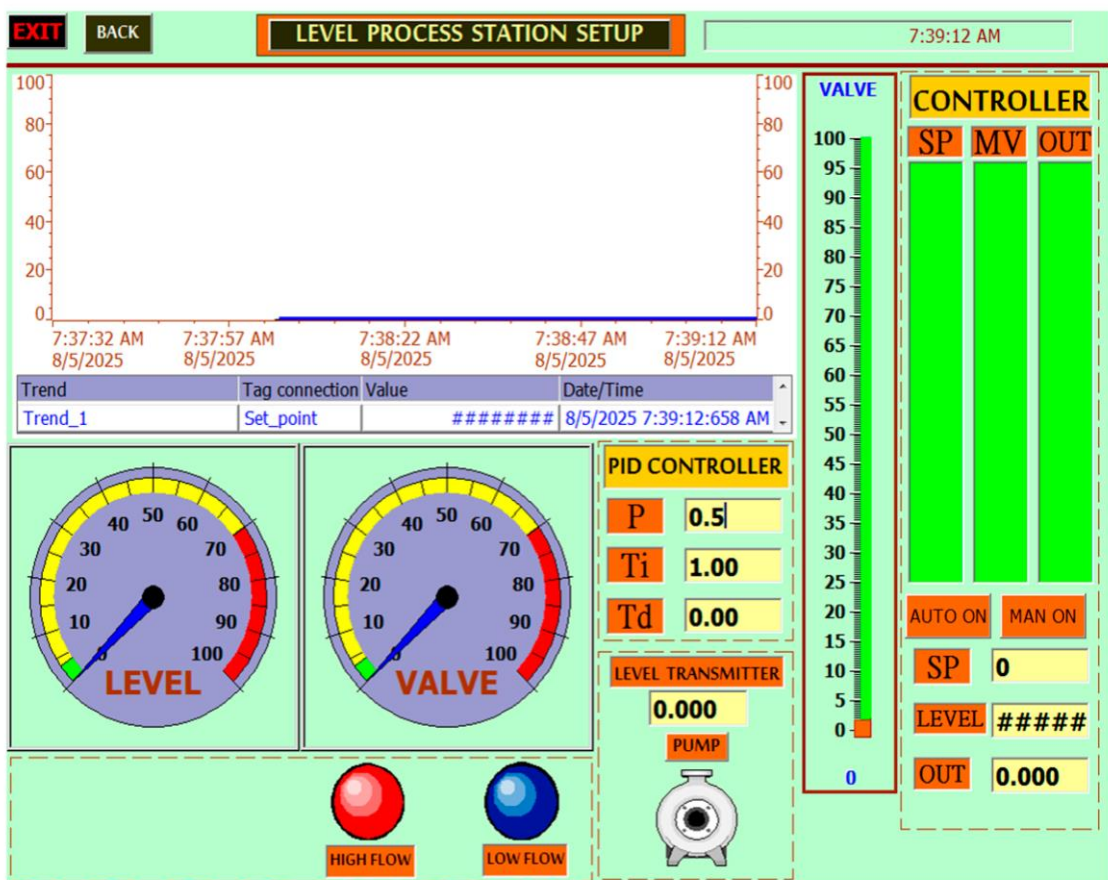


Рисунок 2.4 – Інтерактивний графічний інтерфейс користувача (HMI) системи моніторингу та збору даних, розробленої за допомогою WinCC Flexible

Інтерфейс відображає вибір типу керування, параметри PID-регулятора та візуалізацію ключових параметрів у режимі реального часу, таких як рівень рідини, відкриття клапана, задане значення та фактичні значення.

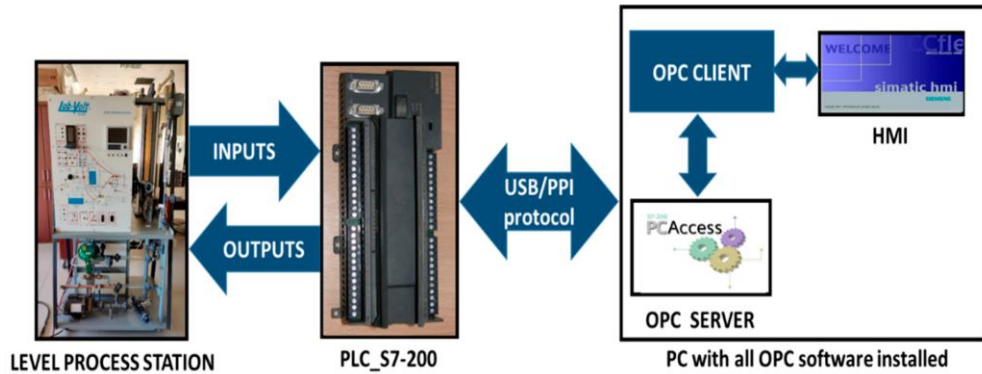


Рисунок 2.5 – Принципова схема запропонованої системи керування

Кольори на принциповій схемі представляють різні компоненти системи керування: датчики показані синім кольором, контури керування – червоним, а інтерфейс збору даних – чорним.

Технологія OPC – це стандарт Microsoft, який дозволяє промисловим програмам обмінюватися даними на одному або кількох комп'ютерах, використовуючи архітектуру «клієнт-сервер», долаючи проблеми сумісності між компонентами системи керування [15]. Ця технологія створює проміжний інтерфейс, незалежний від типу підключеного пристрою, дозволяючи користувачам інтегрувати різне апаратне та програмне забезпечення за допомогою відповідної програми OPC [16-17].

## 3 ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

Модель, показана на рисунку 3.1, була ретельно протестована з використанням як нечіткого логічного контролера (FLC), так і ПІД-контролера для оцінки продуктивності за ідентичних умов. Параметри ПІД-контролера були визначені за допомогою методу налаштування Циглера-Ніколса, зі значеннями, встановленими на рівні  $K_p=0,48$ ,  $K_i=0,021$  та  $K_d=4,408$ . Під час тестування використовувалися два опорні рівні, перший на рівні 0,7 та другий на рівні 0,3, що чергувалися з постійною частотою 0,003 Гц, відповідно до технічних характеристик досліджуваної системи. Ці характеристики детально описані в таблиці 3.1.

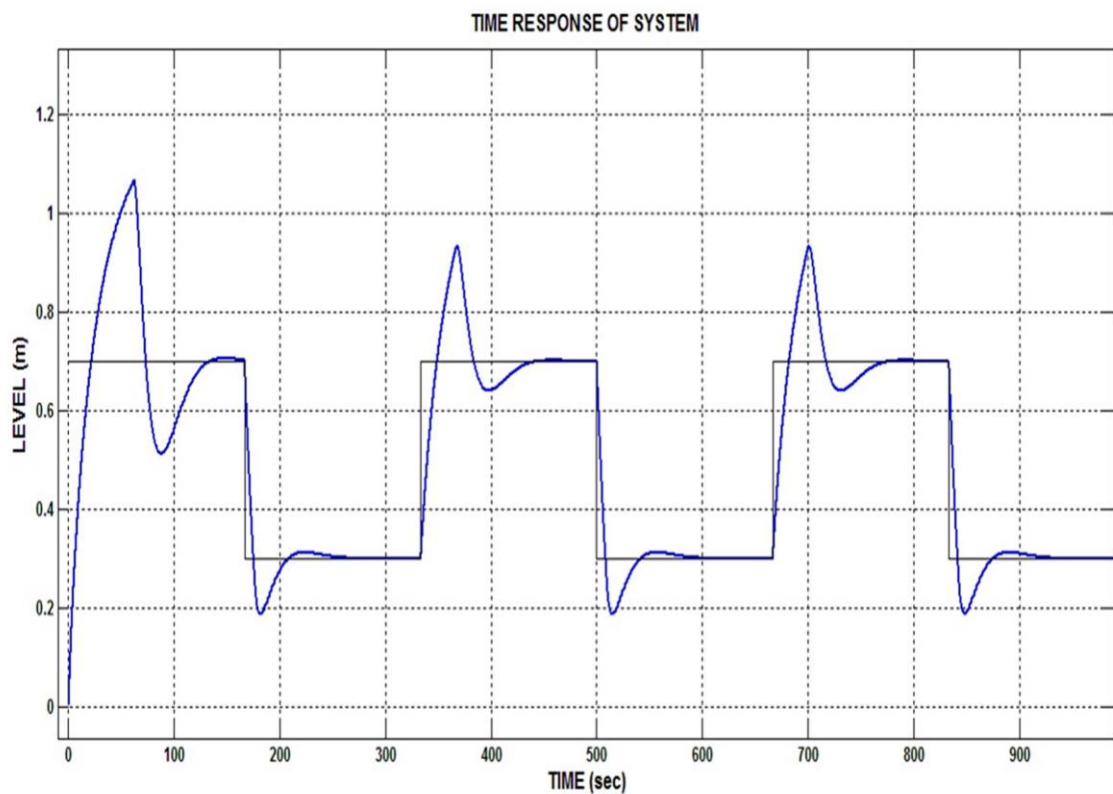


Рисунок 3.1 – Крива відгуку системи для нечіткого логічного контролера (FLC) та ПІД-контролера, протестованих за однакових умов

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики досліджуваної системи

Висота резервуара (H)	Максимальна витрата насоса	Площа основи резервуара (A)	Площа зливного отвору (a)
0,92 м	0,00245 м <sup>3</sup> /с	0,0324 м <sup>2</sup>	0,0005 м <sup>2</sup>

На рисунку 3.2 зображено криву відгуку системи під керуванням ПІД-регулятора, що підкреслює її роботу під час переходів між опорними рівнями. Частоту 0,003 Гц було обрано, щоб забезпечити достатньо часу для реагування системи на зміни та стабілізації керуючої дії протягом кожного циклу випробувань. Результати показали, що ПІД-регулятор забезпечував адекватне керування, але демонстрував помітні обмеження, особливо під час швидких коливань або при роботі з нелінійною динамікою. На ці характеристики продуктивності впливає метод налаштування Циглера-Ніколса, який, хоча й широко використовується, не завжди може давати оптимальні параметри для високодинамічних систем. Спостережувані перевищення та недовищення відображають притаманні ПІД-регулюванню проблеми для таких застосувань.

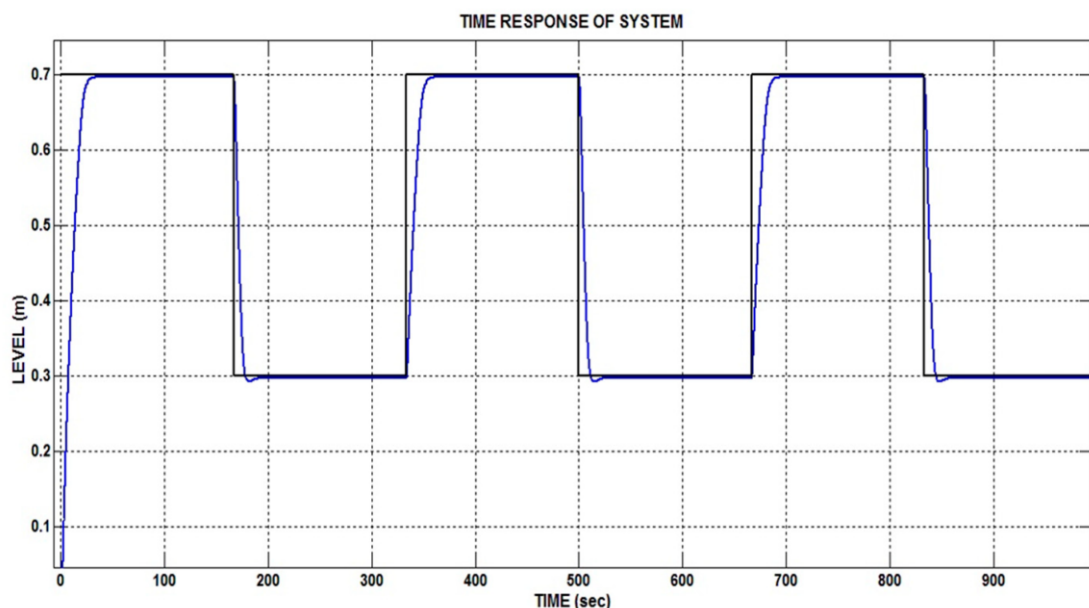


Рисунок 3.2 – Крива реакції системи, що показує продуктивність нечіткого логічного контролера (FLC)

Крива ілюструє, як FLC керує поведінкою системи у відповідь на зміни вхідних даних, підкреслюючи його здатність регулювати параметри керування та підтримувати стабільність у різних робочих умовах.

На рисунку 3.2 показано криву реакції системи при використанні нечіткого логічного контролера. У таблиці 3.2 представлено показники якості кривих реакції системи при використанні ПІД-регулятора та нечіткого логічного контролера.

Таблиця 3.2 – Показники якості кривих відгуку системи при використанні ПІД-регулятора та нечіткого логічного контролера

Похибка стаціонарного стану, %	Час досягнення пікової величини (с)	Час затвердіння (с)	Максимальне перевищення %	Використаний контролер
None	None	35	None	Нечіткий логічний контролер
None	62	192	23.4	ПІД-реактор Циглера-Ніколса

На відміну від цього, контролер нечіткої логіки був протестований за допомогою набору інструментів MATLAB Fuzzy Logic Toolkit з використанням інструменту перегляду правил для аналізу поведінки системи в режимі реального часу. На рисунку 3.3 зображено реакцію контролера нечіткої логіки під час тестування, демонструючи значення похибки, коефіцієнт зміни похибки та відкриття клапана за двох критичних умов: початковий стан та стаціонарний стан, коли було досягнуто опорного значення. Контролер нечіткої логіки продемонстрував чудову адаптивність до змін у системі, динамічно регулюючи дії керування на основі показників

продуктивності, а не фіксованих заданих значень.

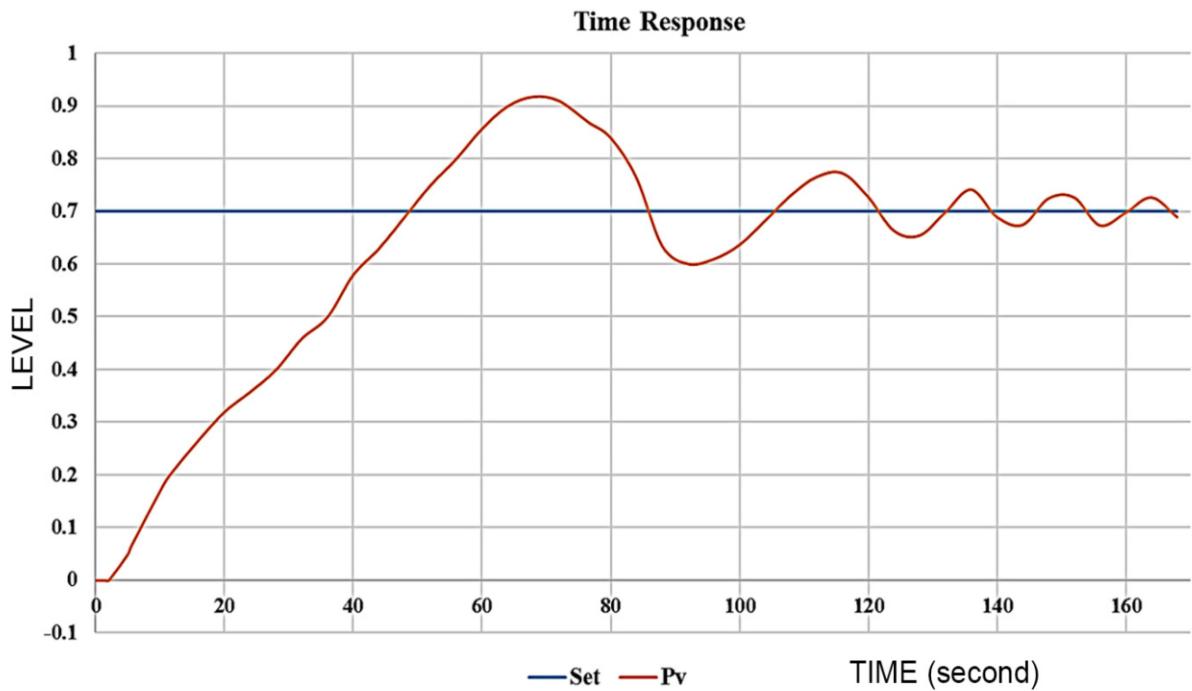


Рисунок 3.3 – Відповідь системи за допомогою локального контролера платформи

Ми запустили систему з опорним рівнем 0,7 м, що відповідає значенню, використаному в тестуванні програмного забезпечення. Ми контролювали реакцію системи за допомогою як локального контролера, так і розробленої експериментальної моделі з тими ж константами, що й у тестах програмного забезпечення. Ми також змінювали відкриття випускного клапана, щоб спостерігати, як реалізована модель реагує на зміни рівня, одночасно контролюючи струми рівня передавача та струми вихідного модуля. На рисунку 3.3 показано реакцію системи за допомогою локального контролера платформи. У таблиці 3.3 порівнюються вихідні струми локального контролера платформи та розробленого модельного контролера.

Таблиця 3.3 – Вихідні струми контролера локальної платформи та розробленого модельного контролера

Стан	Розроблена модель		Foxboro	
	% відкриття клапана	Рівень у баку, %	% відкриття клапана	Рівень у баку, %
При досягненні бажаного значення (0,7 м)	76,25%	83,75%	76,25%	83,75%
При досягненні нового бажаного значення (0,5 м)	57,6%	71,25%	57,6%	71,25%
Коли відкривається зливний клапан	20,62%	100%	20,62%	100%
При досягненні бажаного значення після відкриття зливного клапана	56,87%	84,37%	56,87%	84,37%

Результати, отримані в результаті порівняльного тестування нечіткого логічного контролера (FLC) та ПІД-контролера, підкреслюють значний прогрес у продуктивності систем керування, підкреслюючи перевагу FLC для досліджуваного процесу регулювання рівня рідини. Використання методу Циглера-Ніколса для налаштування ПІД-контролера забезпечило стандартизовану основу для порівняння, забезпечивши достовірність спостережуваних відмінностей у реакції системи. Ця методологія, широко визнана в техніці керування, була застосована для визначення параметрів ПІД ( $K_p=0,48$ ,  $K_i=0,021$  та  $K_d=4,408$ ), що використовуються в цьому дослідженні, забезпечуючи справедливу та структуровану оцінку обох стратегій керування.

Модель бака можна реалізувати як функцію, що обчислює новий рівень  $H$  за поточних умов. Нижче наведено функцію  $\text{tank\_step}(H, u, dt)$ , яка за заданого поточного рівня  $H$  (м), керування клапаном  $u$  (частка від 0 до 1) та кроку інтегрування  $dt$  (с) обчислює рівень на наступний момент часу

(методом Ейлера) (лістинг 3.1).

### Лістинг 3.1 – MATLAB реалізація моделі бака

```

%% 1) Модель бака (tank_step)
% Функція обчислює новий рівень H_next за методом Ейлера
function H_next = tank_step(H, u, dt)
    % Параметри моделі
    A      = 0.0324;      % площа основи бака, м^2
    Q_max  = 0.00245;    % макс. витрата насоса (м^3/с) при u=1
    a      = 0.0005;    % площа дренажного отвору, м^2
    g      = 9.81;      % гравітація, м/с^2

    % Обчислення витрат
    Q_in   = u * Q_max;      % вхідна витрата
    через клапан
    Q_out  = a * sqrt(2 * g * max(H,0)); % витрата виходу
    (Торрічеллі)

    % Інтегрування рівня (метод Ейлера)
    dV_dt = Q_in - Q_out;
    dH_dt = dV_dt / A;
    H_next = H + dH_dt * dt;
    H_next = max(H_next, 0); % обмеження H >= 0
end

```

Незважаючи на широке використання та встановлену надійність у промислових застосуваннях, ПД-регулятор демонстрував обмеження при реагуванні на швидкі зміни опорних рівнів (наприклад, від 0,7 м до 0,3 м при 0,003 Гц) (лістинг 3.2). Криві відгуку (рисунок 3.1) вказують на значне перерегулювання та довший час встановлення, особливо в нелінійних умовах процесу. На ці характеристики продуктивності впливає притаманна лінійна природа ПД-регуляторів та обмеження методу налаштування Циглера-Ніколса, який, хоча й ефективний для багатьох застосувань, може не оптимізувати продуктивність у високодинамічних або нелінійних системах.

### Лістинг 3.2 – PID-регулятор

```

% Структура з полями Kp, Ki, Kd, інтегральною і попередньою
помилкою
function pid = PIDController(Kp, Ki, Kd)
    pid.Kp      = Kp;
    pid.Ki      = Ki;
    pid.Kd      = Kd;

```

```

pid.int_err = 0;
pid.prev_err = 0;
end

% Обчислення керування u = PID.compute(pid, error, dt)
function [u, pid] = computePID(pid, error, dt)
    % Інтегральна складова
    pid.int_err = pid.int_err + error * dt;
    % Диференціальна складова
    deriv      = (error - pid.prev_err) / dt;
    % Формула PID
    u_raw      = pid.Kp*error + pid.Ki*pid.int_err +
pid.Kd*deriv;
    % Сатурація [0,1]
    u          = min(max(u_raw, 0), 1);
    pid.prev_err = error;
end

```

На рисунку 3.4 відображено роботу ПІД-регулятора.

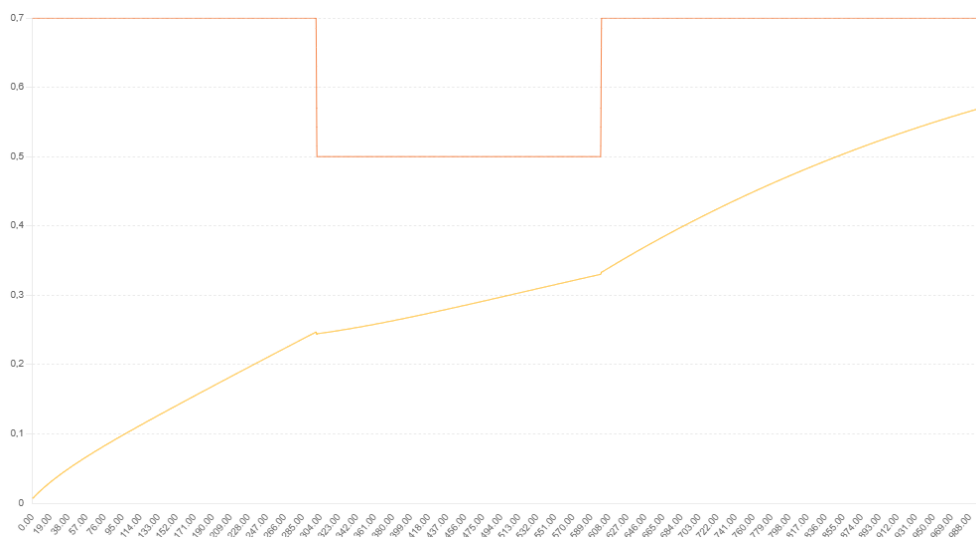


Рисунок 3.4 – Рівень (PID)

На відміну від цього, контролер з нечіткою логікою (лістинг 3.3) продемонстрував значно покращену продуктивність зі зменшенням перерегулювання, часу пікового навантаження та часу встановлення (рисунок 3.2). FLC динамічно коригував керуючі дії на основі системних умов у реальному часі, що призводило до плавніших реакцій та швидшої стабілізації. Як показано в таблиці 3.2, FLC досяг зменшення перерегулювання на 21%, часу пікового навантаження на 62% та часу

встановлення на 83% порівняно з ПІД-контролером. Ці покращення підкреслюють здатність FLC керувати складною системною динамікою з більшою гнучкістю, адаптивністю та точністю.

Як показано в таблиці 3.2, показники якості демонструють значне покращення поведінки системи з FLC. Зменшення часу перерегулювання та встановлення підкреслює здатність контролера адаптуватися до коливань вхідних даних та мінімізувати відхилення. Це узгоджується з попередніми дослідженнями, які підкреслюють здатність нечіткої логіки обробляти невизначеність та нелінійність у системах керування, часто перевершуючи традиційні методи в сценаріях з динамічними та непередбачуваними збуреннями. Різниця в продуктивності також свідчить про те, що хоча налаштування Циглера-Ніколса забезпечує структурований підхід, альтернативні або адаптивні методи налаштування можуть покращити поведінку ПІД-контролера в складних середовищах.

Фаза практичного тестування додатково підтвердила результати програмного моделювання. Розроблена експериментальна модель продемонструвала кращу продуктивність порівняно з контролером Foxboro 762 spa, як показано на рисунку 3.3. Це підкреслює важливість переходу від застарілих систем до більш адаптивних рішень, таких як FLC. Локальний контролер мав труднощі з адаптацією до швидких змін у відкритті випускних клапанів, що призводило до затримки реакції та неоптимальної стабільності. І навпаки, розроблена модель, що використовує FLC, швидко адаптувалася до змін умов розряду, підтримуючи стабільність рівня та досягаючи більш плавної реакції.

### Лістинг 3.3 – Нечіткий контролер (спрощена реалізація)

```
% Створення структури FLC з картою правил
function flc = FuzzyController()
    % Таблиця: комбінація (e_cat, de_cat) -> u
    keys = { 'pos_pos', 'pos_zero', 'pos_neg',
'zero_pos', 'zero_zero', ...
            'zero_neg', 'neg_pos', 'neg_zero', 'neg_neg' };
    vals = [1.0, 0.8, 0.6, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.0];
```

```

    flc.map = containers.Map(keys, vals);
    flc.prev_err = 0;
end

% Обчислення керування u = Fuzzy.compute(flc, error, dt)
function [u, flc] = computeFuzzy(flc, error, dt)
    % Оцінка швидкості зміни похибки
    de = (error - flc.prev_err)/dt;
    flc.prev_err = error;
    % Фазифікація error
    [e_neg, e_zero, e_pos] = fuzzify(error, 0.2);
    [de_neg, de_zero, de_pos] = fuzzify(de, 0.005);

    % Ітерація за правилами та зважене середнє
    cats = {'neg', 'zero', 'pos'};
    num = 0; den = 0;
    for i = 1:3
        for j = 1:3
            e_cat = cats{i}; val_e = [e_neg, e_zero,
e_pos](i);
            de_cat = cats{j}; val_de = [de_neg, de_zero,
de_pos](j);
            strength = min(val_e, val_de);
            if strength>0
                key = [e_cat '_' de_cat];
                if isKey(flc.map, key)
                    u_rule = flc.map(key);
                    num = num + strength*u_rule;
                    den = den + strength;
                end
            end
        end
    end
    if den>0
        u = num/den;
    else
        u = 0.5;
    end
    u = min(max(u, 0), 1);
end

% Функція злому для фазифікації
function [neg, zero, pos] = fuzzify(x, width)
    % neg
    if x<= -width; neg=1;
    elseif x<0;    neg=(0 - x)/width;
    else;         neg=0; end
    % pos
    if x>= width; pos=1;
    elseif x>0;   pos=x/width;
    else;        pos=0; end
    % zero (трикутна належність)
    if abs(x)<width; zero=1-abs(x)/width;

```

```

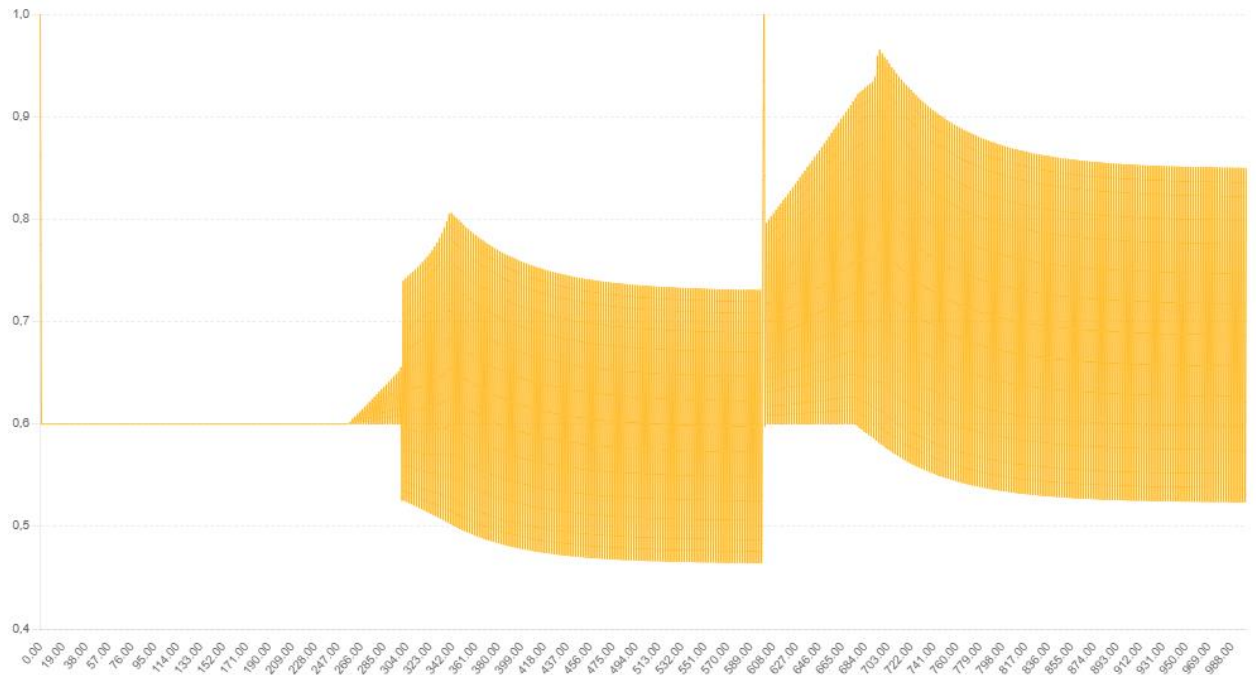
else;          zero=0; end
end

%% Використання в симуляції (приклад)
% dt = 0.1; H=0; setpoint=0.7;
% pid = PIDController(0.48,0.021,4.408);
% flc = FuzzyController();
% для k=1:1000
%   err = setpoint - H;
%   [u_pid, pid] = computePID(pid, err, dt);
%   [u_flc, flc] = computeFuzzy(flz, err, dt);
%   H_pid = tank_step(H_pid, u_pid, dt);
%   H_flc = tank_step(H_flc, u_flc, dt);
%   collect data...
% end

% Пояснення: кожна з частин (модель, PID, FLC) упакована у
функцію/структуру,
% що полегшує модульне тестування і інтеграцію у Simulink S-
function або скрипт.

```

На рисунку 3.5 відображено роботу FLC.



Рисунко 3.5 – Керування (FLC)

Ці висновки узгоджуються з попередніми дослідженнями, що виступають за інтеграцію нечіткої логіки в системи керування, які продемонстрували аналогічні покращення часу перерегулювання та

встановлення при застосуванні до нелінійних застосувань керування [16, 17]. Однак виникають розбіжності при порівнянні цього дослідження з іншими дослідженнями, що використовують передові алгоритми налаштування для ПД-регуляторів, такі як генетичні алгоритми або адаптивні методи налаштування. У деяких випадках повідомлялося, що ці вдосконалені методи ПД наближаються до продуктивності контролерів нечіткої логіки, особливо в системах з менш вираженою нелінійністю. Спостережуваний конфлікт може виникати через відмінності в складності системи, характері збурень або технічних обмеженнях методу налаштування Циглера-Ніколса, що використовується в цьому дослідженні.

Інтеграція нечіткої логіки, що підтверджено інструментом перегляду правил, підкреслює здатність контролера приймати рішення в режимі реального часу. Постійно оцінюючи значення помилок та швидкість їх зміни, контролер нечіткої логіки динамічно регулює відкриття клапанів, уникаючи жорсткої залежності від попередньо визначених параметрів, характерних для ПД-контролерів. Ця адаптивність є критично важливою для сучасних систем керування, які вимагають точності та надійності в змінних середовищах.

## ВИСНОВКИ

Це дослідження підкреслює значні переваги використання штучного інтелекту, зокрема контролерів з нечіткою логікою (FLC), у вдосконаленні систем контролю рівня рідини порівняно з традиційними PID-контролерами. FLC продемонстрував чудову продуктивність, значно зменшивши максимальне перевищення, час піку та час встановлення, тим самим демонструючи свою ефективність в управлінні динамічними та нелінійними процесами, з якими традиційні PID-контролери часто стикаються з труднощами. Незважаючи на ці багатообіцяючі результати, практична реалізація нечіткого контролера не була досягнута через відсутність середовища програмування Fuzzy Control++, що обмежило дослідження теоретичним аналізом та валідацією на основі моделювання. Подальші дослідження повинні усунути цю прогалину шляхом експериментальної валідації, щоб забезпечити пряме порівняння продуктивності з PID-контролерами в реальних умовах.

Інтеграція технології OPC (OLE для керування процесами) ще більше розширила функціональність системи, забезпечивши безперебійний зв'язок та обмін даними в режимі реального часу між різними компонентами керування. Ця сумісність є критично важливою для сучасної промислової автоматизації, де гнучкий та ефективний потік даних є важливим для оптимальної продуктивності. Крім того, розроблена експериментальна модель виявилася економічно ефективною та практичною альтернативою власним контролерам, підкріплюючи місцевий досвід у сфері керування промисловими процесами. Її конструкція робить акцент не лише на операційній ефективності, але й на сталому розвитку, зменшуючи залежність від дорогих рішень, специфічних для певних постачальників.

Окрім промислової актуальності, модель слугує цінним освітнім інструментом, надаючи студентам та дослідникам практичний досвід у

програмуванні, системній інтеграції та проектуванні систем керування. Це відповідає сучасним освітнім цілям, зосередженим на практичному навчанні та оснащенні майбутніх інженерів практичними навичками в технологіях автоматизації та керування.

Майбутні напрямки досліджень повинні досліджувати інтеграцію передових методів на основі штучного інтелекту, таких як нейронні мережі, для подальшої оптимізації продуктивності контролера. Ці методи можуть підвищити адаптивність, прогностичні можливості та загальну стійкість системи. Більше того, розширення застосування моделі на різні промислові платформи керування покращить її масштабованість та практичну значущість. Це включатиме адаптацію правил та параметрів керування до конкретної динаміки та вимог різних процесів.

Усунення поточних обмежень, пов'язаних із впровадженням та експериментальною валідацією, посилить аргументи на користь контролерів на базі штучного інтелекту в промисловій автоматизації. Разом ці інновації підтримують перспективний підхід до розвитку як промислової автоматизації, так і технічної освіти, сприяючи сталому розвитку, зумовленому місцевим досвідом та передовими технологіями.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Owa, K.O.; Sharma, S.K.; Sutton, R. Optimised Multivariable Nonlinear Predictive Control for Coupled Tank Applications. In Proceedings of the IET Conference on Control and Automation 2013: Uniting Problems and Solutions, Birmingham, UK, 4–5 June 2013; Institution of Engineering and Technology: Stevenage, UK, 2013.
2. Ляшенко, О., Стародубцев, М., Макаренко, Г. і Пащенко, О. (2024) «Керування електромеханічними системами конвеєрних ліній», Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості, (4(30), с. 85–96. doi: 10.30837/2522-9818.2024.4.085.
3. Roland, B. PID Parameter Tables after ITAE to Control Overshooting Systems Found with AI Algorithm. *Int. J. Electr. Comput. Eng. Res.* 2023.
4. Kumar, V.; Rana, K.P.S.; Kumar, J.; Mishra, P. Self-Tuned Robust Fractional Order Fuzzy PD Controller for Uncertain and Nonlinear Active Suspension System. *Neural Comput. Appl.* 2016.
5. Singh, H.; Verma, R. Comparative Analysis of PID and Fuzzy Logic Controllers in Industrial Applications. *Int. J. Control Autom. Syst.* 2022, 20, 547–559.
6. Smith, T.; Garcia, L. Advances in Intelligent Control Systems: A Review of Fuzzy Logic and AI-Based Controllers. *Sensors* 2023, 23, 1789.
7. Kumar, N.; Das, S. Implementation of Fuzzy Logic-Based Liquid Level Control in Chemical Processing Plants. *Chem. Eng. Res. Des.* 2024, 186, 312–328.
8. Wong, P.; Tan, K. Design and Experimental Validation of AI-Based Controllers for Process Automation. *J. Process Eng.* 2023, 150, 99–115.
9. Reddy, A.S.; Reddy, G.N. An Adaptive Fractional Order Controller Design: A Realization for Liquid Level Regulation in Liquid Level Plant. *Meas. Sens.* 2024, 31, 100977.

10. Ayyagari, R.; Raol, J.R. *Control Systems: Classical, Modern, and AI-Based Approaches*, 1st ed.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2019.
11. Instrumentation Society of America. *Control Valve Technical Specifications*; ISA: Research Triangle Park, NC, USA, 2022.
12. Mohindru, P. Review on PID, Fuzzy, and Hybrid Fuzzy PID Controllers for Controlling Non-Linear Dynamic Behaviour of Chemical Plants. *Artif. Intell. Rev.* 2024, 57, 4.
13. Mamdani, E.H.; Assilian, S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *Int. J. Hum. Comput. Stud.* 1999, 51, 135–147.
14. Aung, T.; Maung, M.; Tun, H. Design and Development of Fuzzy Logic Controller for Liquid Flow Control. *Int. J. Electron. Comput. Sci. Eng.* 2013, 3, 208–218.
15. Zheng, Z.; Tu, X. Real-Time Communication between PC and S7-200 PLC Based on OPC. *Procedia Eng.* 2008, 32, 354–357.
16. Mahnke, W.; Leitner, S.-H.; Damm, M. *OPC Unified Architecture*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009; ISBN 9783540688983.
- Jadmiko, S.W.; Suyitno, L.A.; Lukman, F.M.; Gibran, B.T.G. Aplikasi Kendali PID Pada Simulator Water Level Control Berbasis TK-Series Controller. *J. Teknol. Rekayasa* 2021, 6, 155.