

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

СОРОКА СЕРГІЙ СВЯТОСЛАВОВИЧ

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ
ПРОМИСЛОВОГО ПРОЦЕСУ / RESEARCH ON CONTROLLERS FOR
TEMPERATURE CONTROL IN AN INDUSTRIAL PROCESS

спеціальність: 174 — Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
освітньо-професійна програма - Автоматизація та програма комп'ютерно-
інтегровані технології

Магістерська робота

Виконав студент групи АКІТм-21
С.С.Сорока

Науковий керівник:
д.т.н., проф. Н.Я.Возна

Магістерську роботу допущено до захисту:
" ____ " _____ 2025р.

Завідувач кафедри
_____ А.І. Сегін

Тернопіль 2025

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Ступінь вищої освіти "магістр"
Спеціальність: 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СКС

_____ Андрій СЕГІН

“ _____ ” _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
СОРОКА Сергій Святославович

_____ (прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

_____ Дослідження регуляторів для керування температурою промислового
процесу / Research on Controllers for Temperature Control in an Industrial
Process _____

_____ керівник роботи _____ д.т.н., професор Н.Я.Возна _____

затверджені наказом по університету від 28 листопада 2024 р. № 938

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи:

01 грудня 2025р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Принципи роботи регуляторів типів: PID, ІМС і MFC _____
2. Технічні характеристики мікропроцесорного регулятора LB-600 _____
3. Базові властивості штучних нейронних мереж _____

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз способів автоматичного регулювання _____
2. Обґрунтування теоретичних основ _____
3. Проектування та дослідження системи регулювання температурою _____

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структурна схема регулятора ІМС _____
2. Структурна схема регулятора MFC _____
3. Схема нейронної мережі у просторі станів _____
4. Функціональний блок регулятора LB-600 _____

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Возна Н.Я. д.т.н., професор, професор кафедри СКС		
2	Возна Н.Я. д.т.н., професор, професор кафедри СКС		
3	Возна Н.Я. д.т.н., професор, професор кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 02 грудня 2024 р..

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз способів автоматичного регулювання	11.2024р. – 12.2024р.	
2	Обґрунтування теоретичних основ	01.2025р. – 04.2025р.	
3	Проектування та дослідження системи регулювання температурою	04.2025р. – 10.2025р.	

Студент

_____ (підпис)

Сорока С.С.

Керівник роботи

_____ (підпис)

д.т.н., проф. Возна Н.Я.

РЕФЕРАТ

Сорока С.С. Дослідження регуляторів для керування температурою промислового процесу. – Рукопис.

Дослідження на здобуття ступеня вищої освіти «магістр» за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітньо-професійна програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2025.

Магістерська робота присвячена розробленню системи автоматизованого керування температурою для моделюваного технологічного процесу. Програмну частину системи реалізовано із застосуванням математичного середовища Matlab. Як основний керувальний елемент використано мікропроцесорний регулятор LB-600 виробництва LAB-EL. У роботі проведено порівняльний аналіз роботи традиційного PID-регулятора та регуляторів, що функціонують на основі моделі об'єкта. Додатково розглянуто можливості застосування штучних нейронних мереж для побудови моделі об'єкта в системах автоматичного керування.

ABSTRACT

Soroka S.S. Research on Controllers for Temperature Control in an Industrial Process. - Manuscript.

Research on obtaining the degree of higher education "master" in specialty 174 "Automation and computer-integrated technologies", educational and professional program. - West Ukrainian National University, Ternopil, 2025.

The master's thesis is devoted to the development of an automated temperature control system for a simulated technological process. The software part of the system was implemented using the Matlab computational environment. The microprocessor-based controller LB-600 manufactured by LAB-EL was employed as the main control unit. The thesis presents a comparative analysis of the performance of a conventional PID controller and controllers that operate on the basis of a process model. Additionally, the work examines the potential application of artificial neural networks for developing a model of the controlled object in automatic control systems.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП	7
1. АНАЛІЗ СПОСОБІВ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ.....	11
1.1 Двопозиційне регулювання.....	11
1.2 Регулювання за принципом PID.....	12
1.3 Нечітке регулювання.....	14
1.4 Регулювання з використанням моделі процесу.....	15
1.5 Підсумок проведеного аналізу.....	17
2. ОБГРУНТУВАННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ.....	18
2.1 Регулятор PID.....	18
2.2 Регулювання Internal Model Control (IMC).....	20
2.3 Двоконтурна структура Model Following Control (MFC).....	22
2.4 Ідентифікація об'єкта за допомогою штучних нейронних мереж.....	24
3 ПРОЄКТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ	30
3.1 Опис проєктованої системи регулювання.....	30
3.2 Порівняльний аналіз дії регуляторів PID і МВС	37
3.3 Висновки до третього розділу.....	45
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49
ДОДАТОК А Копії публікацій.....	52

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

PID-регулятор - Proportional-Integral-Differential;

MBC - модель процесу (Model-Based Control);

IMC - метод регулювання з внутрішньою моделлю (Internal Model Control);

MFC - метод керування за зразком (Model Following Control);

NARX - мережа (Nonlinear AutoRegressive eXogenous);

OPC - технологія (Object Linking and Embedding for Process Control) - це відкритий комунікаційний стандарт, який використовується в промисловій автоматизації та інформаційних системах;

IAE - інтегральний критерій якості регулювання (Integral of Absolute Error).

ВСТУП

Актуальність дослідження. Керування - це вплив на об'єкт із метою досягнення визначеної мети. Метою керування може бути, наприклад, підтримання заданої температури в приміщенні або у виробничому процесі. Завдання досягнення певної температури може бути реалізоване різними способами.

Найчастіше регулювання температури здійснюється на основі певних знань та інформації про об'єкт. Параметри, що описують процес, дають змогу налаштувати регулятор відповідно до конкретного об'єкта. Однак слід зазначити, що більшість технологічних процесів із часом змінюють свою динаміку. Отже, один раз визначений опис процесу може виявитися неадекватним за інших умов роботи, оскільки в реальних системах об'єкти мають нестационарний характер.

Прикладом може бути процес обігріву приміщення у різні пори року. Змінні атмосферні умови протягом року зумовлюють зміну термодинамічної моделі об'єкта, тобто приміщення, яке нагрівається. Рішенням цієї проблеми може бути застосування кількох моделей, що описують процес керування, з подальшим перемиканням активної моделі залежно від умов роботи. Зміна опису об'єкта керування, у свою чергу, вимагає коригування параметрів регулятора.

Варто також підкреслити, що на керований об'єкт впливають не лише цілеспрямовані дії системи, але й випадкові неконтрольовані чинники, які ускладнюють процес керування. Тому під час проектування систем автоматичного керування необхідно враховувати вплив зовнішніх збурень. Використання керування з урахуванням моделі процесу дає змогу зменшити вплив збурень на об'єкт.

Застосування керування, що враховує модель процесу, дозволяє досягти вищих показників якості регулювання. Лінійний опис процесу є лише наближеним відображенням його властивостей. Складність побудови

математичної моделі об'єкта зумовлена взаємним впливом і залежністю між змінними, які його описують.

Одним із напрямів підвищення якості регулювання є використання методів штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж. Нейронні мережі дають змогу апроксимувати будь-яку нелінійну функцію із заданою точністю. Важливою властивістю цих систем є здатність навчання, що дозволяє формувати модель процесу на основі наявних експериментальних даних «вхід–вихід». У такому разі отримується модель типу “чорної скриньки”, яка відтворює поведінку об'єкта без необхідності його аналітичного опису.

Процес навчання нейронної мережі може відбуватися також у режимі реального часу, тобто одночасно з роботою системи керування, забезпечуючи її адаптацію до поточних умов функціонування.

Керування термодинамічними параметрами повітря, зокрема температурою, у приміщеннях і промислових процесах є важливим завданням у галузі інженерних і агротехнічних застосувань. Удосконалення та впровадження нових методів регулювання дозволяє оптимізувати витрати на виробництво та зберігання продукції, підвищуючи ефективність технологічних процесів.

Метою роботи є підвищення ефективності системи автоматичного керування температурою шляхом порівняльного аналізу та дослідження регуляторів типу PID, ІМС (Internal Model Control) і MFC (Model Following Control), а також оцінювання впливу використання моделей процесу на якість регулювання.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз сучасних методів автоматичного керування температурою, зокрема регуляторів типу PID, ІМС та MFC;
- розробити математичні моделі процесу регулювання температури для дослідження характеристик різних структур керування;

- проаналізувати використання контролера LB-600 для контролю температури промислового процесу;
- здійснити моделювання роботи регуляторів у середовищі Matlab/Simulink із використанням стандартів OPC та MODBUS для обміну даними;
- виконати порівняльний аналіз якості регулювання систем типу PID, ІМС і МРС за показниками точності, стійкості та швидкодії;
- дослідити вплив використання моделі процесу на стійкість системи та її здатність до компенсації зовнішніх збурень;
- оцінити можливість застосування нейронних мереж для ідентифікації процесу та підвищення адаптивності системи керування;
- сформулювати практичні рекомендації щодо вибору структури регулятора для систем автоматичного регулювання температури в промислових умовах.

Об'єкт дослідження. Процес автоматичного керування температурою в технологічних системах із використанням моделей процесу та адаптивних методів регулювання.

Предмет дослідження. Методи синтезу та налаштування регуляторів типу PID, ІМС і МРС у системах керування температурою, а також вплив застосування моделей процесу на якість регулювання.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Удосконалено підхід до аналізу систем регулювання температури на основі використання внутрішніх і еталонних моделей процесу.
2. Показано, що використання моделі процесу у структурі регулятора типу ІМС та МРС підвищує точність і стійкість системи за наявності зовнішніх збурень.
3. Розроблено узагальнену схему порівняння характеристик регуляторів PID, ІМС і МРС за критеріями чутливості та якості перехідного процесу.
4. Обґрунтовано доцільність застосування нейронних моделей для ідентифікації термодинамічних процесів у системах автоматизації.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Запропоновані результати можуть бути використані під час проєктування систем керування температурою в промислових установках, сушильних камерах, інкубаторах та інших технологічних об'єктах.

2. Реалізована модель системи керування з використанням середовища Matlab/Simulink і комунікаційних стандартів OPC та MODBUS може бути застосована для навчальних і дослідницьких цілей.

3. Отримані результати дозволяють підвищити точність регулювання, скоротити час перехідного процесу та зменшити вплив збурень у реальних системах автоматичного керування.

Апробація. 1 Модельно-орієнтоване керування типу Internal Model Control в системах регулювання температури / С.Сорока, М.Бернадський, О.Бурлак // Збірник матеріалів науково-практичного симпозіуму «Технології інтернету речей: системи та рішення» (ТІР:СТ – 2025), м.Тернопіль, 24 жовтня 2025, Тернопіль, 2025. - С.14-17.

2. Формування математичної моделі автоматизованої системи регулювання процесом розділення продуктів окислення при виробництві адипінової кислоти / М.Бернадський, С.Сорока, Р.Лизун // Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (ІКСМ осінь 2025), м. Тернопіль, ЗУНУ, 25 листопада 2025 р. Тернопіль, 2025. – С.168-169.

1 АНАЛІЗ СПОСОБІВ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

1.1 Двопозиційне регулювання

Одним із найпростіших способів автоматичного регулювання температури є двопозиційне регулювання. Його принцип роботи полягає в тому, що керуючий пристрій може перебувати лише у двох станах: «увімкнено»/«вимкнено» (ON/OFF). Коли різниця між заданим значенням температури та фактичним перевищує певний поріг, регулятор активує виконавчий механізм; коли похибка зменшується - вимикає його. Таке рішення застосовується в системах, де необхідно підтримувати певне значення температури незалежно від зовнішніх збурень. Принцип дії двопозиційного регулятора та його модифікації описано у працях [1-5].

Керуючий сигнал у двопозиційній системі є дискретним, оскільки може набувати лише двох значень. Перевагою такого способу регулювання є його простота та висока надійність. Недоліком є виникнення коливань регульованої величини та часті перемикання виконавчого елемента. На виході регулятора формується послідовність імпульсів керування позитивної полярності (якщо $e > N$). Коли різниця між заданим і поточним значенням (e) менша за ширину зони нечутливості, сигнал керування дорівнює нулю.

Основною перевагою такого способу керування є простота конструкції, висока надійність та мінімальні вимоги до налаштування. Проте через дискретний характер сигналу виникають періодичні коливання температури навколо заданого значення, що знижує точність регулювання. Часті перемикання також можуть спричиняти знос виконавчих елементів.

Зміну температури та керуючого сигналу під час двопозиційного регулювання наведено на рисунку 1.1.

У практиці двопозиційні регулятори застосовують у побутових термостатах, електронагрівачах, холодильних установках і системах вентиляції, де допустимі невеликі відхилення від уставки. Для зменшення

частоти перемикаць іноді вводять зону нечутливості (гістерезис), у межах якої регулятор не реагує на незначні зміни температури.

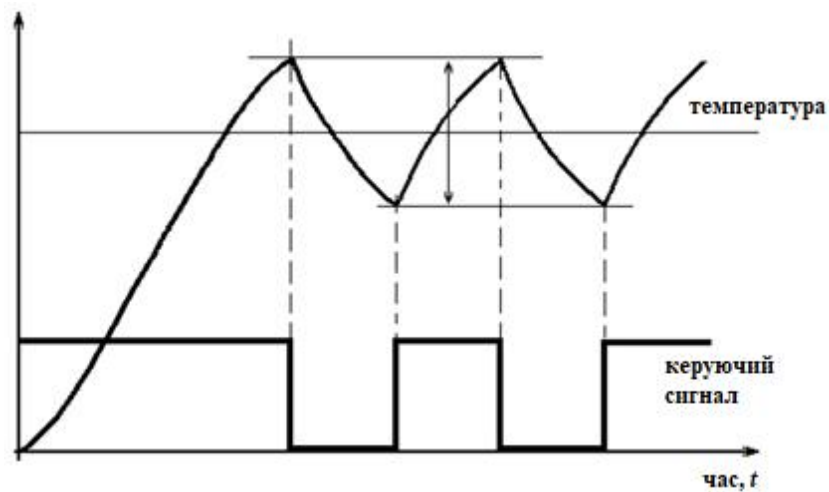


Рисунок 1.1 - Зміна температури та керуючого сигналу під час двопозиційного регулювання

Принцип роботи трипозиційного регулятора є аналогічним, проте сигнал керування може приймати три визначені рівні.

1.2 Регулювання за принципом PID

PID-регулятор є одним із найпоширеніших у практичних застосуваннях. У цьому типі регулятора сигнал керування формується як сума трьох складових - пропорційної (що забезпечує миттєву реакцію на величину похибки), інтегральної (яка компенсує сталу систематичну похибку) та диференційної (що враховує швидкість зміни похибки та зменшує коливання під час перехідного процесу) [1-5]. Звідси походить назва - Proportional-Integral-Differential.

Аргументом для всіх трьох операцій є різниця між заданим і вимірним значенням температури. Найпростішим варіантом є пропорційний регулятор, у якому сигнал керування прямо пропорційний температурній похибці. Однак такий підхід характеризується тривалим часом перехідного процесу та

наявністю сталого відхилення - тобто температура у встановленому стані відрізняється від заданої.

Додавання диференціальної складової дозволяє зменшити час регулювання, збільшуючи ефективність керування.

Повна PID-конфігурація забезпечує додатково усунення сталого відхилення завдяки інтегральній складовій, яка вирівнює задану і фактичну температуру у сталому стані.

Комбінація цих складових дозволяє досягти необхідного компромісу між швидкодією, точністю та стійкістю системи. Проте ефективність PID-регулятора безпосередньо залежить від правильного вибору його параметрів K_p , K_i , K_d . Невдале налаштування може призвести до надмірних коливань, тривалого перехідного процесу або навіть до нестабільності системи.

У реальних технологічних процесах, де параметри об'єкта змінюються з часом, використання фіксованих значень коефіцієнтів часто не забезпечує стабільної роботи. Тому на практиці все ширше застосовуються адаптивні PID-схеми, у яких налаштування регулятора автоматично змінюються залежно від поточного стану системи.

Регулювання за принципом PID забезпечує високу якість керування за умови правильного підбору параметрів трьох складових. Їх оптимальні значення визначаються на основі динамічних характеристик об'єкта. Неправильний вибір параметрів може суттєво погіршити стабільність і точність системи.

Попри наявність методик налаштування, параметри часто доводиться уточнювати експериментально. Однак у промислових умовах така процедура може призводити до втрат продуктивності, тому зазвичай обрані параметри залишаються сталими навіть при зміні умов роботи. Це прийнятно лише для стаціонарних систем, але в реальних об'єктах їхні характеристики змінюються з часом.

1.3 Нечітке регулювання

Використання PID-регулятора при наближенні нелінійного об'єкта лінійною моделлю не забезпечує оптимального керування у широкому діапазоні змінних. Як зазначено у [6-8], вирішенням цієї проблеми може бути застосування нечіткої логіки та нечітких множин.

Сутність підходу полягає у представленні змінних не точними числовими значеннями, а лінгвістичними категоріями - такими, як “низька температура”, “середня швидкість нагріву” чи “висока похибка”. Кожне з таких понять описується функцією належності, яка визначає, наскільки певне значення відповідає тій чи іншій категорії.

Метод базується на визначенні ступеня належності елемента до нечіткої множини за допомогою функції належності (рисунок 1.2).

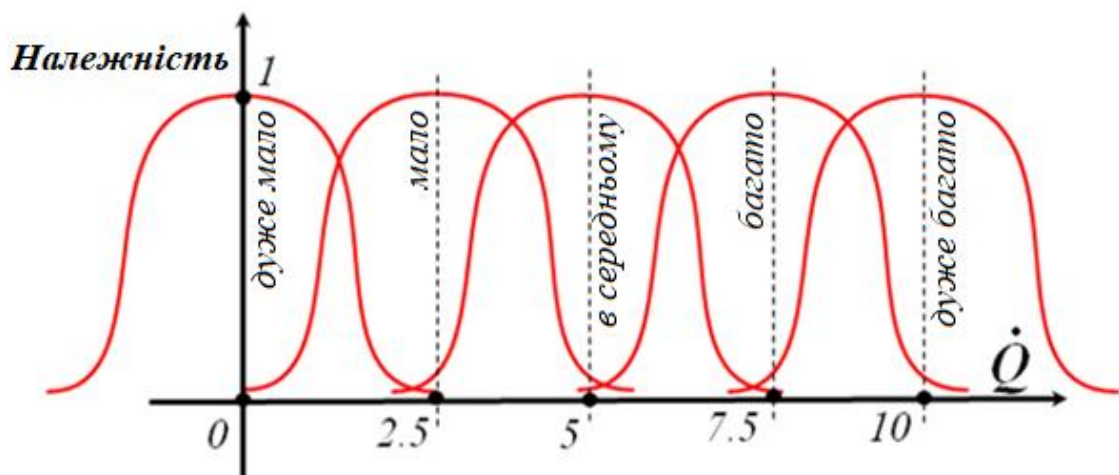


Рисунок 1.2 - Функція належності

Функція належності приймає значення в діапазоні від 0 до 1 ($0 < \mu; \mu < 1$). Таким чином, один елемент може одночасно належати до кількох множин із певними ступенями належності. Робота з нечіткими множинами дозволяє оперувати лінгвістичними змінними. Наприклад, змінна “температура” може мати значення “низька” або “висока”, що описуються відповідними функціями належності.

Використання нечітких змінних забезпечує більш інтуїтивне описання процесів. На основі нечіткої логіки формують базу правил, наприклад:

- якщо температура низька і похибка велика, то збільшити потужність нагріву.

- якщо температура близька до заданої, то зменшити потужність.

- якщо \langle попереднє значення \rangle То \langle наступне \rangle ;

- якщо \langle x – лінгвістична змінна \rangle То \langle $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ \rangle .

Сукупність таких правил формує базу знань про об'єкт, що дає змогу реалізувати регулювання нелінійних систем за допомогою лінійних функцій керування. Для кожної області значень вхідної змінної можуть застосовуватися різні функції керування або параметри регулятора, коли x належить до певних нечітких множин.

Такий спосіб регулювання наближений до логіки прийняття рішень людиною-оператором. Він забезпечує гнучкість системи, дозволяє ефективно працювати у змінних умовах і не потребує точного математичного опису процесу.

Недоліком нечітких систем є складність формалізації правил і вибору функцій належності. Для підвищення ефективності часто застосовують комбіновані структури, у яких PID-регулятор підлаштовується під поточні умови за допомогою нечіткої логіки.

1.4 Регулювання з використанням моделі процесу

Керування, при якому для формування сигналу керування використовуються дані моделі об'єкта, називають керуванням на основі моделі (Model-Based Control) [9-11].

Методи керування на основі моделі процесу (Model-Based Control) передбачають наявність у системі математичної моделі об'єкта, що дозволяє передбачати реакцію системи на зовнішні впливи та формувати оптимальний

сигнал керування. Такий підхід забезпечує високу якість регулювання з урахуванням дії збурень.

До найвідоміших методів належать регулювання з внутрішньою моделлю (ІМС - Internal Model Control) (рисунк 1.3) та керування за зразком (МФС - Model Following Control) [12-14]. Схему регулятора з внутрішньою моделлю процесу подано нижче. Використання моделі об'єкта дозволяє оцінювати вплив збурень та компенсувати їх у процесі керування.

Детальніше методи ІМС та МФС розглядатимуться у наступному розділі.



Рисунк 1.3. Структурна схема регулятора ІМС.

У структурі ІМС модель процесу використовується паралельно з реальним об'єктом для оцінювання впливу збурень. Це дає змогу компенсувати їх дію ще до того, як вони суттєво позначаться на вихідній величині. Метод МФС, у свою чергу, спрямований на те, щоб вихід системи точно повторював поведінку заданої еталонної моделі.

Перевагою цих підходів є висока точність регулювання та здатність швидко реагувати на зміну умов роботи. Водночас ефективність методу суттєво залежить від точності побудованої моделі: будь-яке спрощення або невраховані нелінійності можуть зменшити якість керування.

1.5 Підсумок проведеного аналізу

Основним завданням будь-якої системи регулювання є зміна керуючого сигналу на основі інформації, отриманої з вимірюваних параметрів процесу.

Використання моделі процесу для керування дозволяє швидше реагувати на збурення [10]. Додаткові знання про об'єкт підвищують ефективність і точність регулювання. Порівняльна оцінка досліджуваних методів регулювання наведена у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Порівняльна оцінка методів регулювання

Метод	Переваги	Недоліки	Області застосування
Двопозиційне	Простота, надійність, низька вартість	Коливання, низька точність	Побутові та прості промислові системи
PID-регулювання	Висока точність, гнучкість налаштування	Необхідність коректного вибору параметрів	Загальнопромислові процеси
Нечітке регулювання	Адаптивність, інтуїтивність, робота без точної моделі	Складність формалізації та налаштування	Нелінійні або слабоформалізовані системи
Модельне керування	Висока якість, компенсація збурень	Складність моделювання, великі обчислення	Складні технологічні та енергетичні системи

Таким чином, традиційні схеми керування забезпечують достатню якість лише в обмежених умовах. Зі зростанням складності об'єктів керування доцільно застосовувати модельно-орієнтовані або комбіновані методи, що поєднують адаптивність і точність. У подальших розділах роботи буде розглянуто побудову математичної моделі об'єкта та розробку регулятора з використанням моделі процесу для підвищення ефективності керування.

2 ОБГРУНТУВАННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ

2.1 Регулятор PID

Незважаючи на постійний розвиток нових методів керування, регулятор PID досі широко використовується в багатьох галузях промисловості. Основним чинником, що визначає якість отриманого регулювання, є вибір параметрів регулятора PID. Тому в літературі можна знайти велику кількість публікацій, присвячених різним методам налаштування параметрів регулятора, а також способам розширення його функціональних можливостей для підвищення надійності роботи системи автоматичного керування температурою.

Принцип дії.

Регулятор - це пристрій із певною передавальною функцією, який у системі автоматичного регулювання формує відповідний сигнал керування об'єктом. У випадку PID-регулятора сигнал керування є сумою трьох математичних операцій, аргументом яких є значення похибки, тобто різниця між заданою та поточною величинами регульованого параметра [1-5].

Сигнал керування є пропорційним до поточного значення похибки. Таким чином, дія пропорційної складової описується рівнянням (2.1).

$$u(t) = K_p * e(t) = K_p * [r(t) - y(t)] \quad (2.1)$$

Параметр K_p є пропорційним коефіцієнтом підсилення. Робота регулятора, який складається лише з пропорційної складової, полягає в тому, що чим більша похибка, тим більша величина сигналу керування. Перевагою такого регулятора порівняно з двопозиційним керуванням є те, що при малих значеннях похибки амплітуда сигналу керування також зменшується. Недоліком пропорційного регулятора є відсутність реакції на наявність сталого відхилення у встановленому режимі.

Для усунення цієї вади вводять інтегральну складову, що описується рівнянням (2.2).

$$u(t) = K_i * \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.2)$$

Значення сигналу керування інтегральної складової залежить від значень похибки у попередні моменти часу. Операція інтегрування дозволяє звести сталу похибку до нуля. Використання пропорційної та інтегральної складових утворює PI-регулятор, передавальну функцію якого можна подати у вигляді (2.3).

$$G_R(s) = K_p * \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right). \quad (2.3)$$

PI-регулювання усуває сталу похибку у встановленому режимі.

Останньою складовою PID-регулятора є диференціальна частина, що описується рівнянням (2.4).

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.4)$$

Щоб пояснити вплив диференціювання на процес регулювання, можна розглянути перші два члени розкладу похибки в ряд Тейлора [1-5].

$$e(t + T_d) \cong e(t) + T_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5)$$

Таким чином, операція диференціювання враховує прогнозовані майбутні значення похибки. Це дозволяє регулятору реагувати на небажані тенденції зміни похибки та здійснювати компенсацію у високочастотному діапазоні при стрибках заданої величини або в перехідних режимах.

Ідеальний неперервний PID-регулятор працює відповідно до рівняння (2.6).

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.6)$$

Цей запис можна також подати у вигляді передавальної функції (2.7).

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s\right) \quad (2.7)$$

Метод Ціглера-Ніколса (Ziegler–Nichols). Налаштування PID-регулятора.

Найважливішим завданням при проєктуванні PID-регулятора є оптимальний вибір параметрів для конкретного процесу. Коректно підібрані значення K_p , K_i , K_d забезпечують правильну роботу системи. Існують методи налаштування, що передбачають обчислення параметрів, які мінімізують певний критерій якості регулювання.

Одним із найпоширеніших методів є метод Ціглера - Ніколса. Існують дві його модифікації, що базуються на ідентифікації об'єкта [15-19].

1. Перший спосіб використовує реакцію об'єкта на одиничний стрибок. На основі отриманої перехідної характеристики проводять дотичну в точці з найбільшим нахилом кривої, визначають часову сталу запізнення та кут нахилу дотичної. Ці параметри дозволяють обчислити необхідні коефіцієнти регулятора.

2. Другий спосіб полягає у дослідженні системи, що містить лише пропорційну складову. Підсилення поступово збільшують до моменту появи незатухаючих коливань. У цей момент система перебуває на межі стійкості. На основі отриманого граничного підсилення та періоду коливань визначають параметри PID-регулятора.

2.2 Регулювання ІМС

Принцип дії.

Регулювання за принципом Internal Model Control (ІМС) використовує внутрішню модель процесу. Якщо регулятор є точною апроксимацією оберненої функції реального процесу, то вихідна величина завжди дорівнює заданій. Проте реалізація регулятора, що повністю відтворює обернену модель процесу, зазвичай є неможливою [12-14] (рисунок 2.1).

$$G_c(s) = G_p(s)^{-1} \quad (2.8)$$

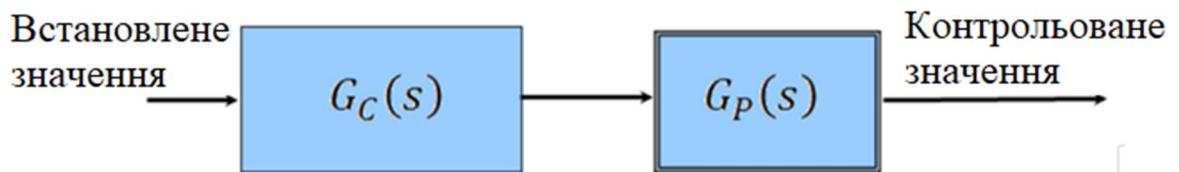


Рисунок 2.1 - Регулятор у вигляді оберненої моделі.

Застосування зворотного зв'язку є необхідним, якщо модель процесу неточна або неповна. Система зі зворотним зв'язком частково компенсує похибки моделі та підвищує стійкість до збурень і шумів, що впливають на об'єкт керування (рисунок 2.2).

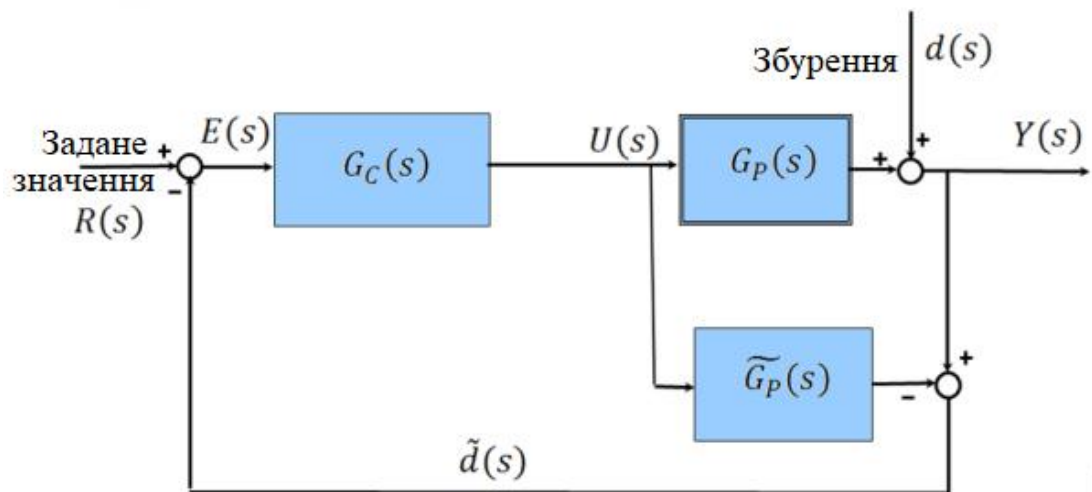


Рисунок 2.2 - Регулятор ІМС із зворотним зв'язком.

Позначення, використані на рисунку 2.2:

$d(s)$ – невідоме збурення, що діє на об'єкт;

$U(s)$ – сигнал керування;

$Y(s)$ – вихід системи;

$\tilde{d}(s)$ – різниця між реакцією системи та моделі.

Сигнал містить інформацію, не враховану в моделі процесу, а також вплив зовнішніх збурень. Якщо реакції системи та моделі збігаються, цей сигнал дозволяє усунути дію збурень у контурі керування. Виходячи зі схеми регулятора ІМС, можна записати рівняння (2.9) [13]:

$$y = r \frac{G_c G_p}{1 + G_c (G_p - \tilde{G}_p)} + d \frac{1 - G_c \tilde{G}_p}{1 + G_c (G_p - \tilde{G}_p)} \quad (2.9)$$

Використання низькочастотного фільтра.

У системі ІМС низькочастотний фільтр застосовують для зменшення підсилення шуму та компенсації похибок моделювання процесу. Щоб уникнути надмірного підсилення сигналів високих частот, необхідно обмежити коефіцієнт підсилення регулятора для цього діапазону. Можна вибрати додатковий параметр, при якому підсилення для високих частот не перевищує значення для низьких частот більш ніж у 20 разів [13].

$$\frac{G_c(\infty)}{G_c(0)} \leq 20 \quad (2.10)$$

Це рівняння впливає з принципу обмеження підсилення високочастотних складових, який також застосовується при проектуванні традиційних PID-регуляторів. Нехай передавальна функція процесу має вигляд (2.11).

$$G_p(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (2.11)$$

Якщо функція не має нулів у правій півплощині або має їх поблизу уявної осі, а модель процесу є оборотною та стабільною, то передавальна функція регулятора ІМС визначається рівнянням (2.12).

$$G_c(s) = \frac{D(s)}{N(s)(\lambda s + 1)^n} \quad (2.12)$$

Рівняння (2.13) показує, що регулятор складається з оберненої моделі процесу та низькочастотного фільтра.

$$G_c(s) = G_p(s)^{-1} F(s) \quad (13)$$

Фільтр (2.14) має просту структуру і лише один параметр, який підлягає налаштуванню, що спрощує реалізацію регулятора.

$$F(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (2.14)$$

Параметр фільтра вибирають таким чином, щоб його порядок був вищим за порядок моделі на одиницю. Відповідно до умови обмеження підсилення, отримаємо нерівність (15), яка визначає часову сталу фільтра.

$$\lambda \geq \left[\lim_{s \rightarrow \infty} \frac{D(s)N(0)}{20s^r N(s)D(0)} \right]^{1/r} \quad (2.15)$$

2.3 Двоконтурна структура MFC

Принцип дії.

У структурі Model Following Control (MFC) (рисунок 2.3), як і в ІМС, використовується модель процесу, але без побудови його оберненої моделі. Принцип MFC полягає у формуванні системи з двома ступенями свободи, що забезпечують відтворення заданої траєкторії та придушення збурень. Цей метод також відзначається стійкістю до похибок моделі.

У регуляторі MFC модель процесу використовується для генерування сигналу керування $\widetilde{G}_p(s)$, формованого регулятором $G_{c1}(s)$. Другий компонент генерує сигнал, що залежить від різниці між виходами моделі та реального процесу. Регулятор $G_{c1}(s)$ відповідає за реалізацію основного керування, а регулятор $G_{c2}(s)$ - за коригування, необхідне при появі збурень або невідповідності між моделлю та процесом [11, 14].

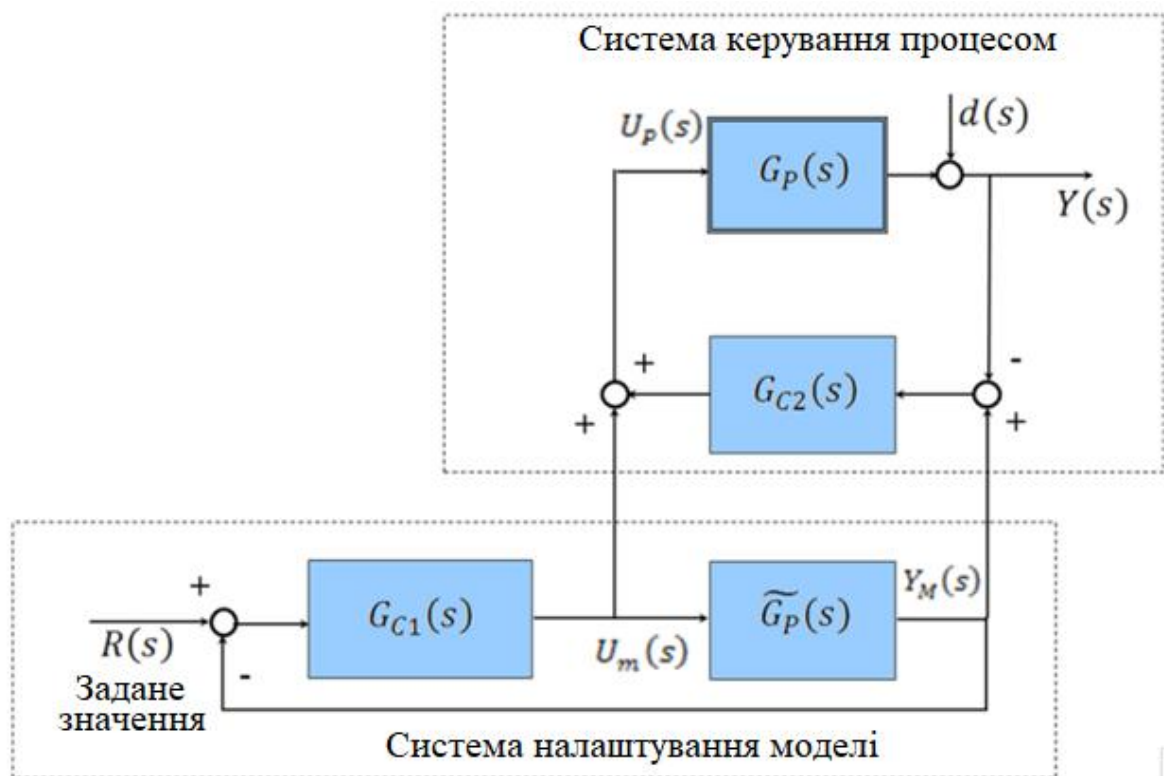


Рисунок 2.3 - Структура Model Following Control.

Подана структура є відносно простою й дозволяє використовувати у своїй схемі два традиційні PID-регулятори. Під час налаштування необхідно враховувати відмінності умов їх роботи. На вході регулятора $G_{c2}(s)$ при стрибковій зміні заданої величини не виникають різкі зміни сигналу, тому регулятор $G_{c2}(s)$ можна налаштовувати з меншим запасом стійкості.

Методи проектування моделі

Існує чотири способи побудови моделі процесу, що використовується під час регулювання [9-11].

Методи вибору моделі:

- вибір моделі на основі передавальної функції системи регулювання MFC;
- вибір моделі на основі сигналу керування процесом;
- формування передавальної функції моделі за допомогою вагової передавальної функції;
- зменшення порядку моделі з використанням норми H^∞ .

У цій роботі використано метод вибору моделі на основі вагової передавальної функції.

Цей підхід впливає з рівняння (2.16), що описує модель процесу з урахуванням мультиплікативної невизначеності:

$$\widetilde{G}_p(s) = G_p(s) * (1 + \Delta(s) * W(s)) \quad (2.16)$$

Якщо норма $\Delta(s)$ задовольняє умову $\|\Delta\|_\infty < 1$, то в частотній області можна записати рівняння (17):

$$\max_{\widetilde{G}_p} \left| \frac{\widetilde{G}_p(j\omega)}{G_p(j\omega)} - 1 \right| < |W(j\omega)| \quad (2.17)$$

Рівняння (2.17) означає, що модуль похибки моделі повинен бути меншим або рівним модулю вагової передавальної функції $W(s)$.

2.4 Ідентифікація об'єкта за допомогою штучних нейронних мереж

Моделювання та ідентифікація.

У сучасних системах керування на основі моделей точний опис процесу є необхідною умовою побудови ефективного регулятора. Модель процесу може бути отримана шляхом моделювання або ідентифікації [9, 10, 20]. Моделювання ґрунтується на аналітичному описі відомих фізичних закономірностей і визначенні параметрів рівнянь. Ідентифікація ж базується виключно на аналізі експериментальних або історичних даних. Якість і кількість даних суттєво впливають на точність моделі.

Процедура ідентифікації включає кілька етапів: збирання даних, вибір структури моделі, налаштування параметрів і валідацію (рисунок 2.4). Якщо під час перевірки виявлено, що модель не відповідає заданим критеріям, це може бути наслідком недостатньої інформативності експериментальних даних, неправильно обраної структури моделі або невдалого критерію оптимізації.

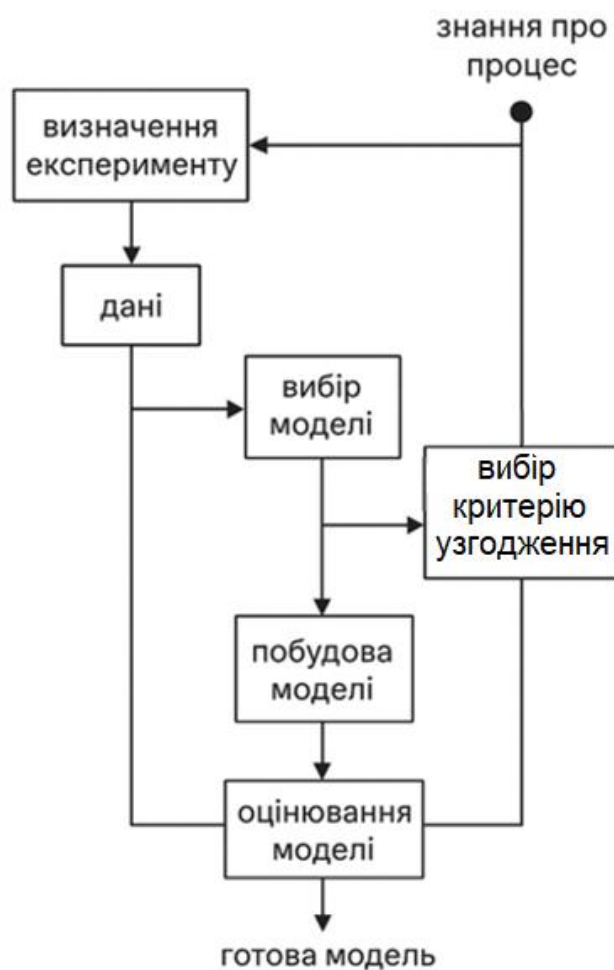


Рисунок 2.4 - Схема процесу побудови моделі об'єкта

Штучна нейронна мережа як універсальний апроксиматор.

Штучні нейронні мережі є ефективним інструментом для моделювання складних нелінійних процесів. Вони здатні апроксимувати будь-які нелінійні залежності, використовуючи експериментальні дані як навчальні зразки. Нейронна мережа складається з взаємопов'язаних елементів - нейронів, що виконують обчислення.

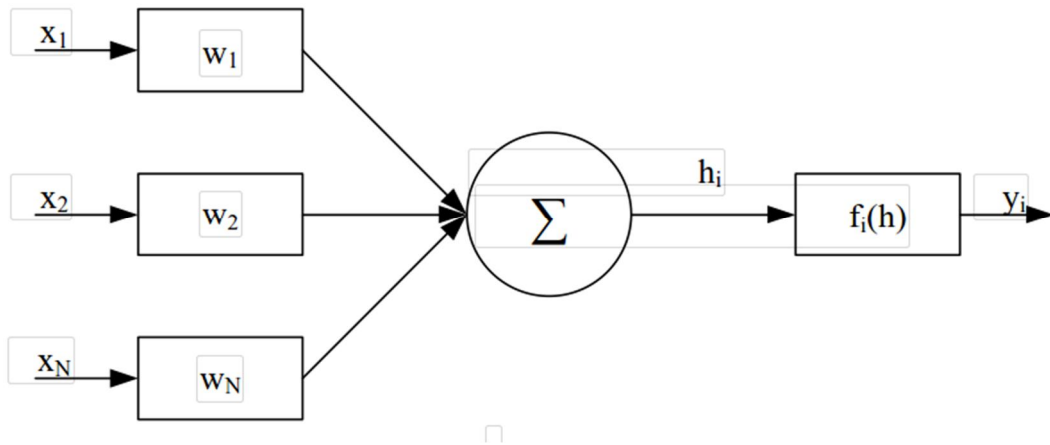


Рисунок 2.5 - Схема одного нейрона.

Позначення на рисунку 2.5:

$x = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ - вектор вхідних сигналів;

$W = [W_1, W_2, \dots, W_N]$ - вектор вагових коефіцієнтів;

$f_i(h_i)$ - функція активації;

y_i - вихід i -го нейрона;

x_0 - пороговий параметр (bias).

Основне рівняння роботи нейрона має вигляд (2.18) [20]:

$$y_i = f_i(\sum_{n=1}^N w_n x_n + x_0) \quad (2.18)$$

Найпоширенішими є сигмоїдна, гіперболічна тангенсна та лінійна функції активації (рисунок 2.6).

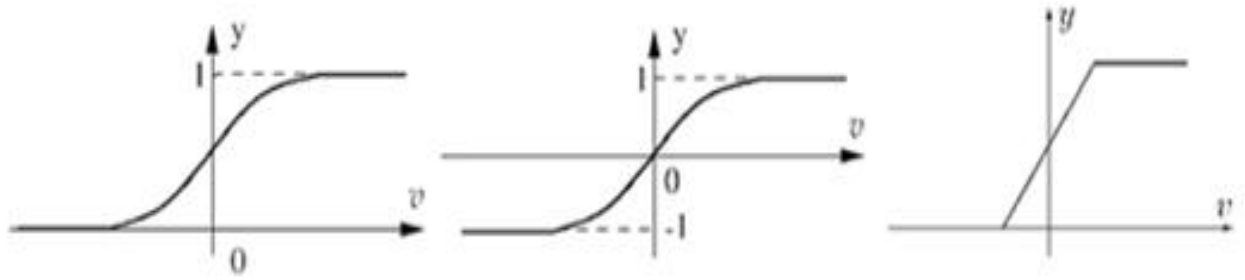


Рисунок 2.6 - Функції активації.

Найчастіше використовується архітектура багат шарового перцептрона (рисунок 2.7). Три-шарова структура містить вхідний шар із сигналами x_i , прихований шар із L нейронами та вихідний шар із сигналами y_i .

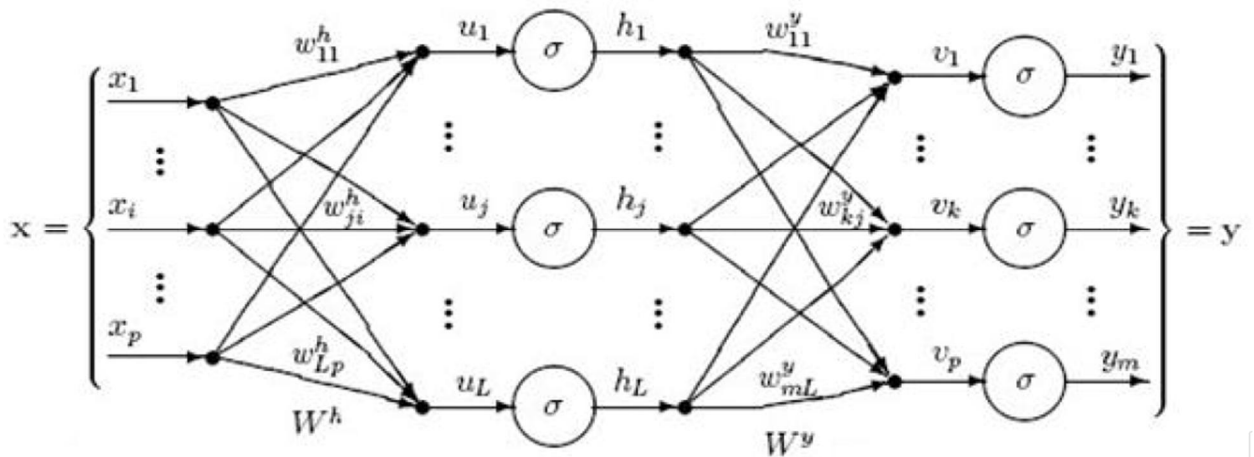


Рисунок 2.7 - Багат шаровий перцептрон.

Сигнали з виходів одного шару подаються на входи наступного. Кожен зв'язок має ваговий коефіцієнт, який визначає вплив відповідного сигналу. Сума зважених вхідних сигналів подається на функцію активації, яка формує вихід нейрона.

Навчання штучної нейронної мережі.

Основною властивістю нейронних мереж є здатність навчатися. У процесі навчання з учителем на входи подаються навчальні дані, а результати порівнюються з очікуваними. Різниця між фактичним і бажаним виходом формує функцію помилки, яка мінімізується шляхом корекції вагових коефіцієнтів.

$$w_i(t + 1) = w_i(t) + \Delta w_i(t) \quad (2.17)$$

Функція помилки визначається як середньоквадратичне відхилення між бажаним і фактичним виходом.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^N (d_i(t) - y_i(t))^2 \quad (2.18)$$

Для мінімізації функції помилки застосовується градієнтний метод, у якому зміна ваг пропорційна негативному градієнту функції цілі.

$$\Delta w_i(t) = f[\nabla E] \quad (2.19)$$

Найчастіше використовується метод найкрутшого спуску (так звана дельта-правила).

$$\Delta w_i(t) = -\eta \nabla E \quad (2.20)$$

Модифікація ваг виконується таким чином, щоб забезпечити найшвидше зближення до оптимальних значень.

Опис динаміки процесів за допомогою нейронних мереж.

Найпростішим випадком є опис статичного об'єкта, коли динамічні властивості можна знехтувати, що виражається рівнянням (2.21).

$$y(k) = F(u(k)) \quad (2.21)$$

Для динамічних процесів зазвичай використовують модель виду (2.22).

$$y(k + 1) = F(u(k), \dots, u(k - m + 1), y(k), \dots, y(k - n + 1)) \quad (2.22)$$

Динаміку нейронної моделі можна реалізувати шляхом введення затримок сигналів або зворотних зв'язків. У рекурентних мережах на входи подаються не лише поточні, а й попередні значення сигналів.

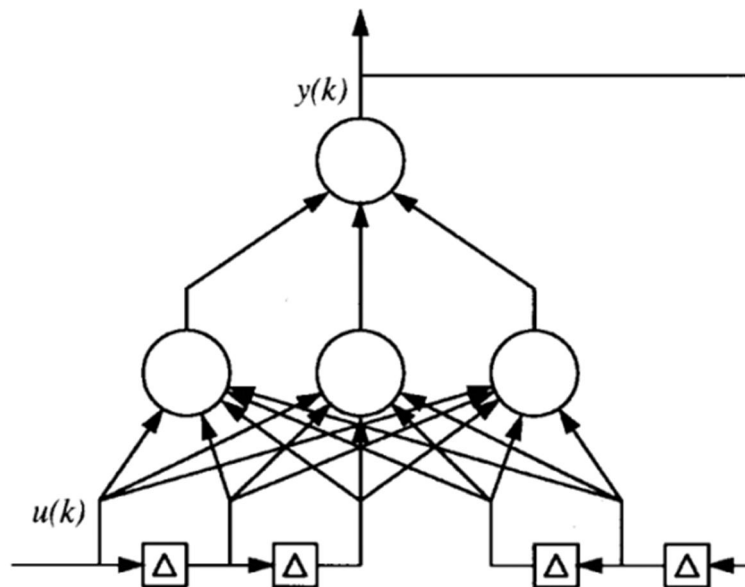


Рисунок 2.8 - Схема мережі типу NARX (3 приховані нейрони, затримка на 2 кроки для вхідного та вихідного сигналів).

Мережа NARX (Nonlinear AutoRegressive eXogenous) (рисунок 2.8) є нелінійною авторегресійною моделлю із зовнішніми змінними. Її входи складаються з поточних і попередніх значень сигналів, а вихід є комбінацією цих значень. Такі мережі застосовуються для прогнозування, фільтрації та моделювання динамічних процесів.

Окрім моделей типу «вхід–вихід», існує представлення процесів у просторі станів (рисунок 2.9). У цьому випадку виходи прихованого шару подаються на входи моделі, утворюючи внутрішні стани системи.



Рисунок 2.9 - Схема нейронної мережі у просторі станів.

Опис символів, що використовуються на рисунку 2.9:

$$x(k + 1) = f(x(k), u(k)) \quad y(k) = C * x(k)$$

$u(k) \in R^n$ - вхідний вектор;

$x(k) \in R^m$ - вектор у просторі станів;

$y(k) \in R^m$ - вихідний вектор;

$F(\cdot)$ - функція, що описує прихований шар нейронної мережі;

C - матриця ваг зв'язків між прихованим і вихідним шарами.

3 ПРОЄКТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ

3.1 Опис проєктованої системи регулювання

На рисунку 3.1 наведено схему побудованої системи керування. Розроблене експериментальне середовище було використане для проведення порівняльного аналізу регуляторів. Програма Matlab у створеній системі виконує функцію середовища для проєктування, моделювання та аналізу систем автоматичного керування. Дані, що описують процес, доступні у Matlab через комунікаційний стандарт OPC. Функцію OPC-сервера виконує система iFIX, що є програмним забезпеченням типу SCADA, що призначене для контролю та візуалізації промислових процесів. Обмін даними між системою iFIX і регулятором LB-600 здійснюється за допомогою комунікаційного стандарту MODBUS.



Рисунок 3.1 - Схема проєктованої системи керування.

Стандарт комунікації OPC

Технологія OPC (Object Linking and Embedding for Process Control) - це відкритий комунікаційний стандарт, який використовується в промисловій автоматизації та інформаційних системах. Розвитком стандарту OPC

займається організація OPC Foundation [22], до складу якої входять провідні виробники промислового обладнання.

Стандарт OPC був створений як рішення проблем сумісності між програмними застосунками, що працюють під управлінням загальних операційних систем, і пристроями автоматичного керування технологічними процесами. OPC є стандартизованою специфікацією інтерфейсу для застосунків, призначених для керування процесами.

Архітектура систем OPC базується на принципі клієнт–сервер. Сервер OPC є застосунком, який обмінюється даними з пристроями керування та надає отриману інформацію іншим застосункам через інтерфейс OPC. Клієнтська програма надсилає запити на читання або запис даних до сервера.

Протокол комунікації Modbus

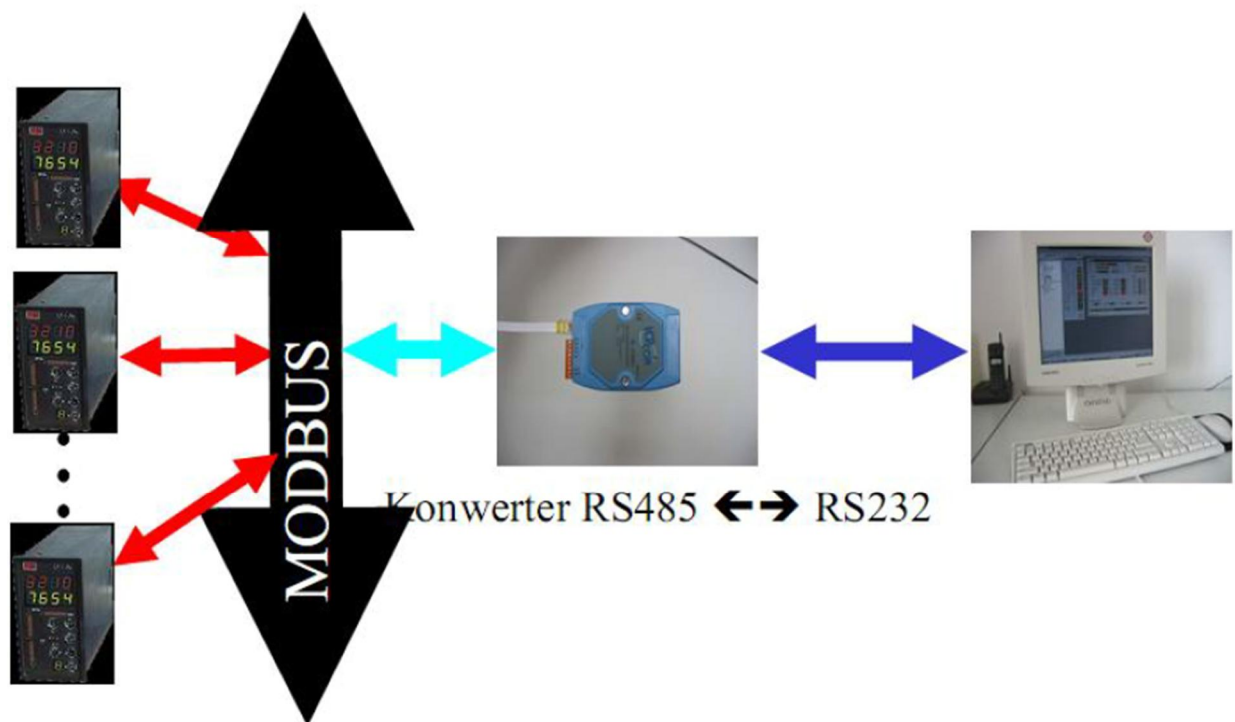


Рисунок 3.2 - Комунікація між регулятором LB-600 і комп'ютером

Обмін даними між регулятором та комп'ютером реалізовано з використанням протоколу Modbus. Цей протокол було розроблено компанією

Modicon. Комунікація за протоколом Modbus базується на передачі повідомлень між головним і підлеглим пристроями (рисунок 3.3) [21].

Існує два типи повідомлень:

- запит - команда, яку надсилає головний пристрій;
- відповідь - реакція підлеглого пристрою на отриманий запит.

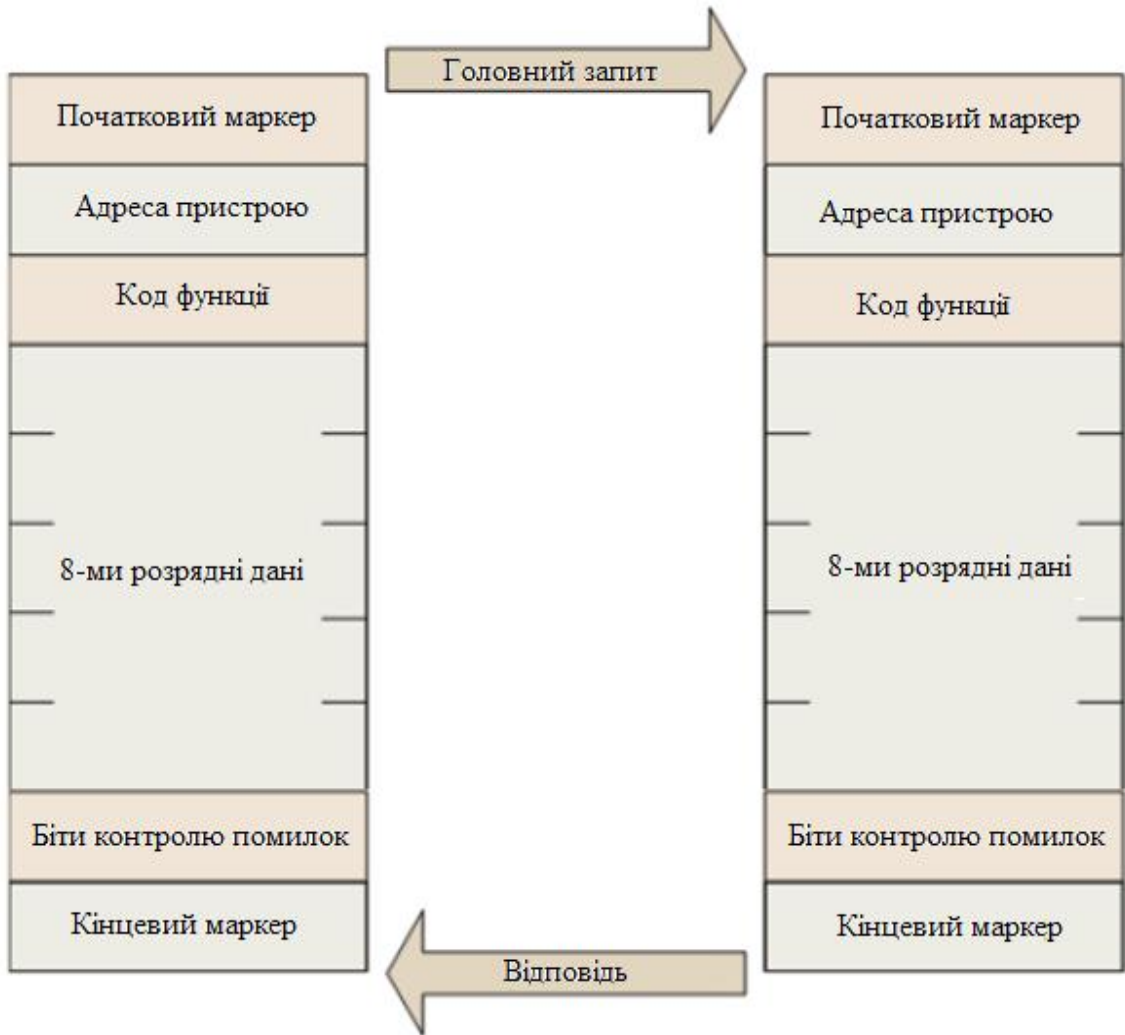


Рисунок 3.3 - Комунікація в протоколі MODBUS.

Код функції визначає дію, яку має виконати підлеглий пристрій. Передані дані використовуються для реалізації цієї функції, наприклад, містять номер регістру або значення, що потрібно записати чи зчитати.

У даній роботі використано протокол Modbus у режимі RTU (Remote Terminal Unit). У цьому режимі передача даних здійснюється у вигляді двох 4-бітних знаків у шістнадцятковому записі.

На рисунку 3.4 показано конфігурацію програмного драйвера MB1, який використовується у середовищі iFIX для організації зв'язку між регулятором LB-600 і комп'ютером у створеній системі керування.

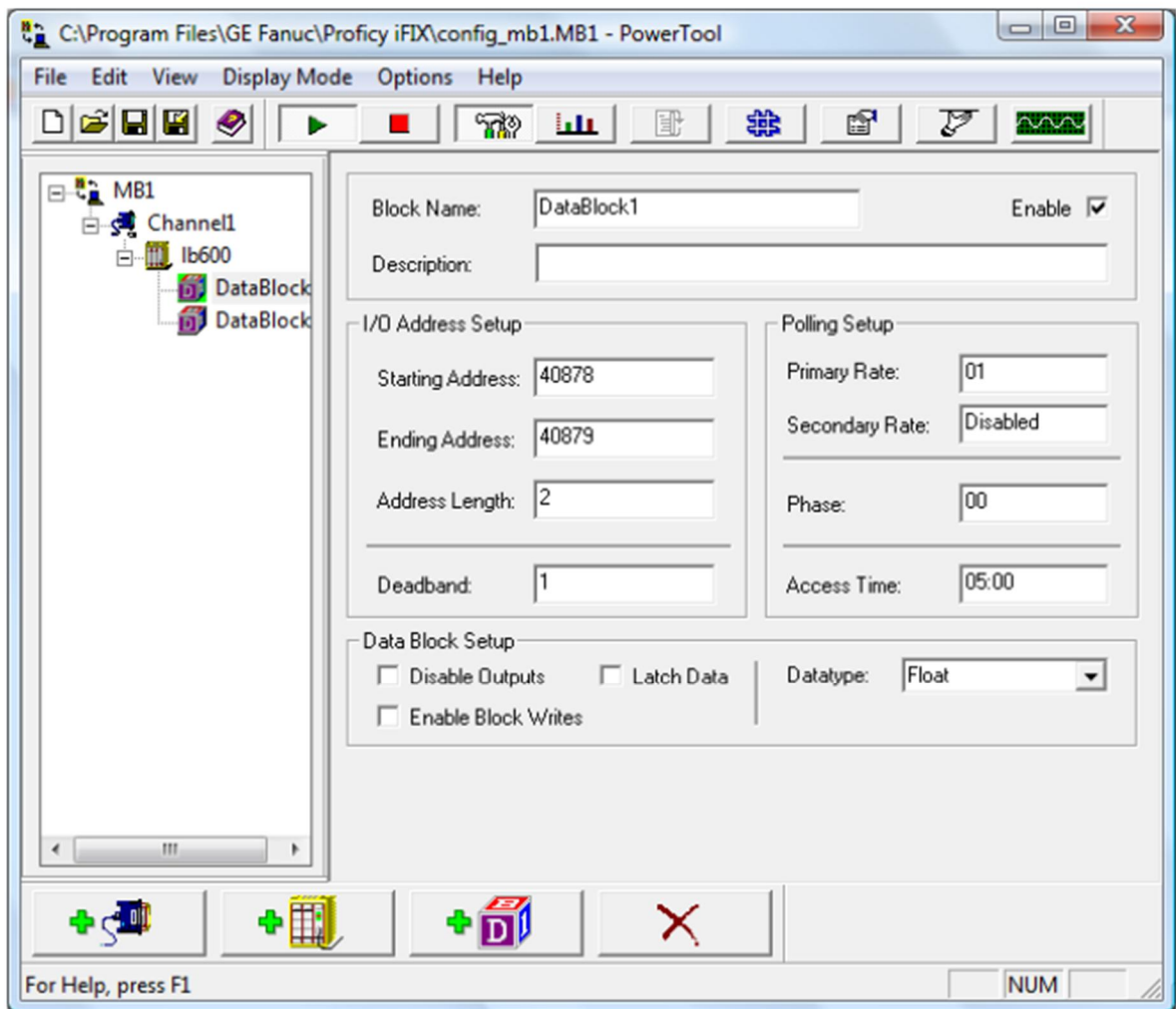


Рисунок 3.4 - Конфігурація драйвера MB1 для комунікації за стандартом Modbus.

На рисунку 3.5 наведено архітектуру та процес обміну даними програми iFIX із пристроями керування та виконавчими механізмами. Зв'язок із пристроями здійснюється через програмний драйвер. У системі iFIX створюється таблиця образу драйвера DIT (Driver Image Table).

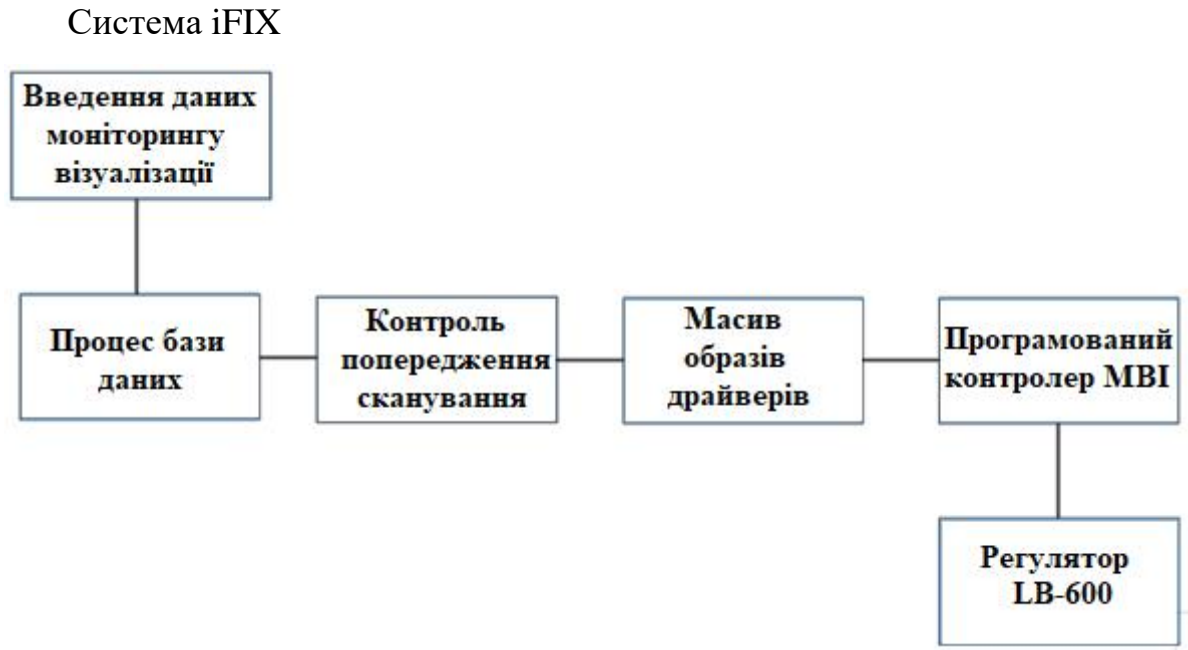


Рисунок 3.5 - Функціональна схема пакета iFIX.

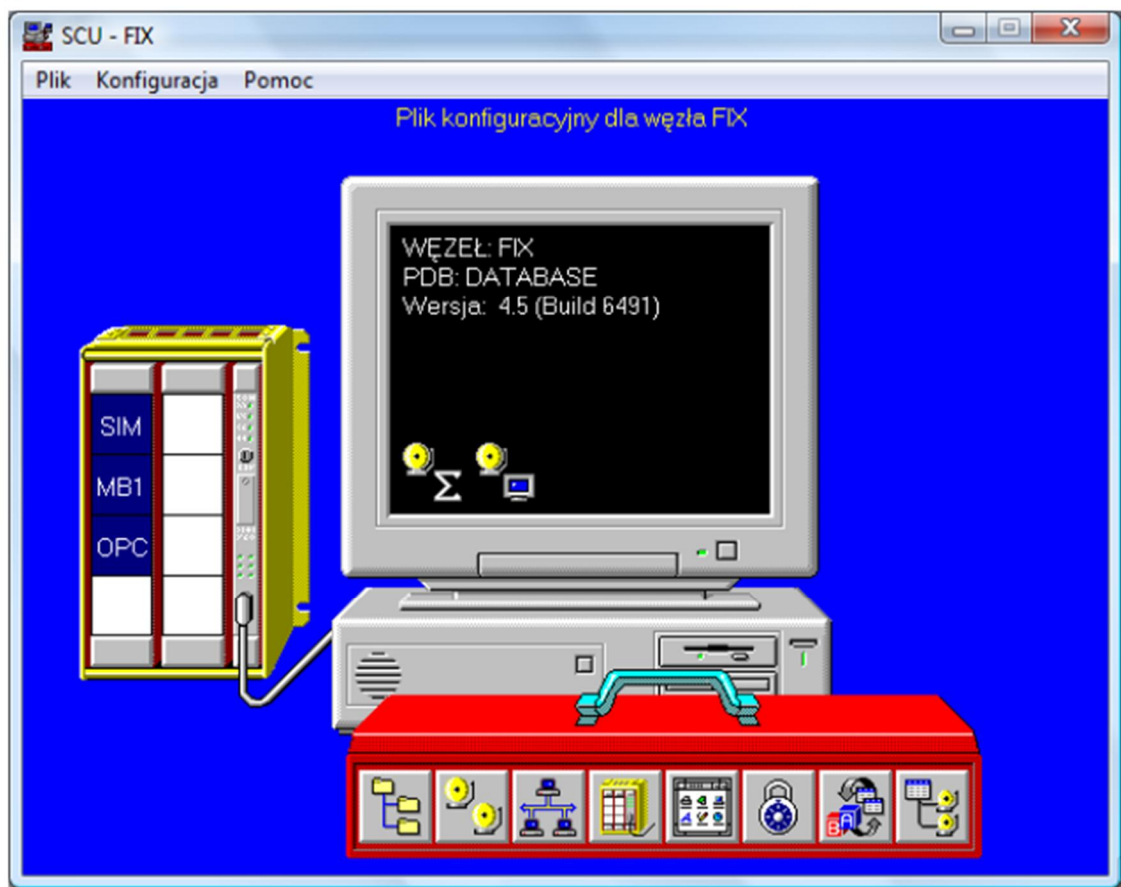


Рисунок 3.6 - Конфігурація програми iFIX для роботи у створеній системі.

Програма SAC (Scan, Alarm and Control) виконує опитування, генерує сигнали тривоги та керує процесом на основі даних, отриманих від драйвера. PDB (Process Data Base) - це процесна база даних, у якій зберігається поточна інформація про стан процесу та яка надає дані іншим застосункам пакета iFIX. Змінні з бази даних можуть бути використані для візуалізації технологічного процесу.

Регулятор LB-600

Мікропроцесорний регулятор LB-600 фірми LAB-EL є універсальним пристроєм, що використовується в промисловій автоматизації. Він забезпечує високу функціональність завдяки можливості конфігурації через вибір необхідних комбінацій вхідних і вихідних модулів. Пристрій підтримує широкий набір класичних і спеціалізованих алгоритмів керування.

Користувач може задати власну конфігурацію, яка визначає алгоритм регулювання. Завдяки програмуванню LB-600 можна адаптувати до конкретного технологічного процесу або використовувати для експериментального тестування нових алгоритмів керування, що робить його придатним також для навчальних цілей.

До основних модулів регулятора належать [23]:

- операторський модуль (передня панель) - має окремий процесор, який знімає навантаження з основного мікроконтролера, обробляючи клавіатуру та дисплей;

- центральний модуль - містить мікроконтролер, пам'ять і забезпечує обробку аналогових сигналів, зберігає змінні процесу та структуру алгоритму керування;

- модуль аналогових входів - підтримує до 10 аналогових каналів (до 30 при встановленні трьох модулів);

- модуль аналогових виходів - надає два незалежних гальванічно ізольованих виходи (напруга або струм);

- модуль дискретних входів/виходів - дозволяє підключення до 8 входів і 6 виходів.

Регулятор використовує набір функціональних блоків (рисунок 3.7), що називаються функторами. Кожен функціональний блок має від 1 до 4 входів і одне вихідне з'єднання. Функціональні блоки можуть реалізовувати різні обчислювальні або логічні операції, залежно від завдання керування.



Рисунок 3.7 - Функціональний блок регулятора LB-600.

Функтори організовано у вигляді матриці, де належність до певного шару визначає тип виконуваних функцій, а номер каналу — номер контуру регулювання.

Основні функції шарів:

- Шар 0 - встановлення загальних параметрів пристрою (дата, параметри зв'язку, вибір зовнішніх пристроїв, пароль користувача);
- Шар 1 - обробка аналогових входів, вибір одиниць вимірювання, порогів тривоги, фільтрація сигналів;
- Шар 2 - обробка двійкових входів;
- Шари 3–6 - виконання арифметичних і логічних операцій;
- Шар 7 - реалізація основних алгоритмів керування;
- Шар 8 - додаткові операції над аналоговими сигналами;
- Шар 9 - обробка аналогових виходів;
- Шар A - обробка двійкових виходів;
- Шар B - масштабування аналогових сигналів на входах і виходах.

3.2 Порівняльний аналіз дії регуляторів PID і МВС

Етап 1 – аналіз регуляторів із використанням спроектованої системи регулювання.

Ідентифікацію динаміки об'єкта, що імітує промисловий процес, проведено на основі реакції об'єкта на одиничний стрибок сигналу керування. На основі отриманої реакції об'єкта за допомогою пакета System Identification Toolbox, доступного в програмі Matlab, визначено наближений опис об'єкта (рисунок 3.8).

$$G_p(s) = \frac{0,77}{1 + 227,81 * s} e^{-20s}$$

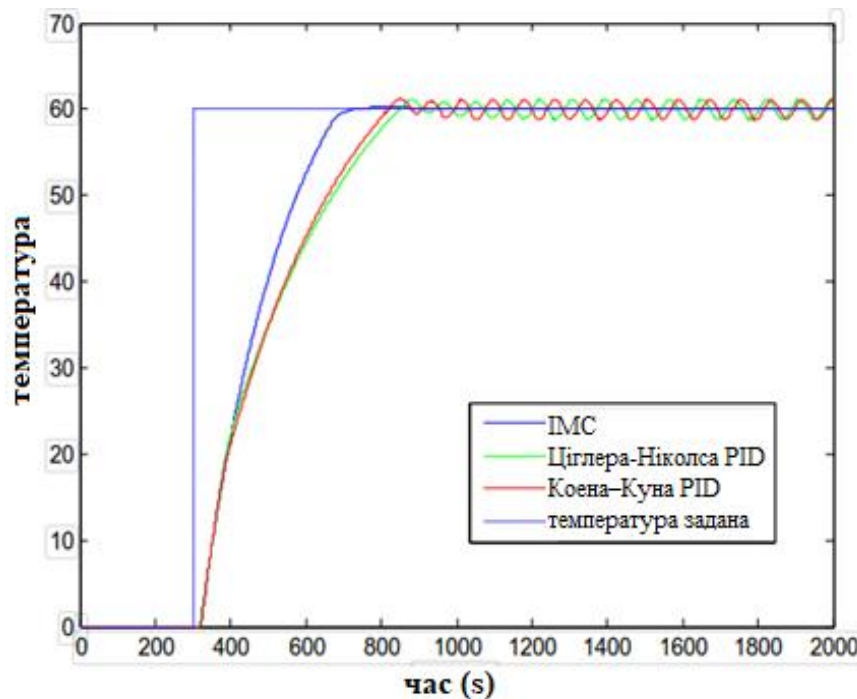


Рисунок 3.8 - Часові залежності систем регулювання типу PID при стрибку заданого значення.

Визначено параметри, що визначають якість регулювання, обчислені на основі часових залежностей з рисунка 3.8 (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 - Параметри якості регулювання

Регулятор	Ціглера-Ніколса PID	Коена-Куна PID	ІМС
-----------	---------------------	----------------	-----

IAE	126,3	124,3	95,3
-----	-------	-------	------

На рисунку 3.8 та в таблиці 3.1 показано роботу регулятора PID, параметри якого визначено трьома різними методами. Перший регулятор спроектовано з використанням методу Ціглера-Ніколса, на основі реакції об'єкта на одиничний стрибок сигналу керування. Другий - з використанням методу Коена-Куна. Третій регулятор спроектовано відповідно до принципу, описаного в [24], тобто методу, що базується на перетворенні структури регулятора типу ІМС у класичну структуру, яка не використовує модель об'єкта для розрахунку сигналу керування під час регулювання.

Аналізуючи графіки на рисунку 3.8, можна зазначити, що регулятор PID, параметри якого визначені на основі системи регулювання типу ІМС, характеризується найкоротшим часом регулювання та відсутністю перерегулювання. Правильність вибору параметрів PID-регулятора у цьому випадку підтверджує також значення інтегрального критерію якості регулювання (IAE). IAE (від англ. Integral of Absolute Error) - це інтегральний критерій якості регулювання, який показує, наскільки добре система автоматичного керування усуває відхилення вихідного сигналу від заданого значення з часом:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt, \quad (3.1)$$

$e(t)$ - миттєве значення похибки.

Регулятори, параметри яких визначено методами Ціглера-Ніколса та Коена-Куна, характеризуються коливаннями температури в перехідному процесі.

Також спроектовано регулятори типу PI, параметри яких було підібрано за зазначеними методами. І в цьому випадку дія регулятора, параметри якого визначено на основі структури типу ІМС, характеризується найменшим часом наростання та відсутністю коливань температури (рисунок 3.9).

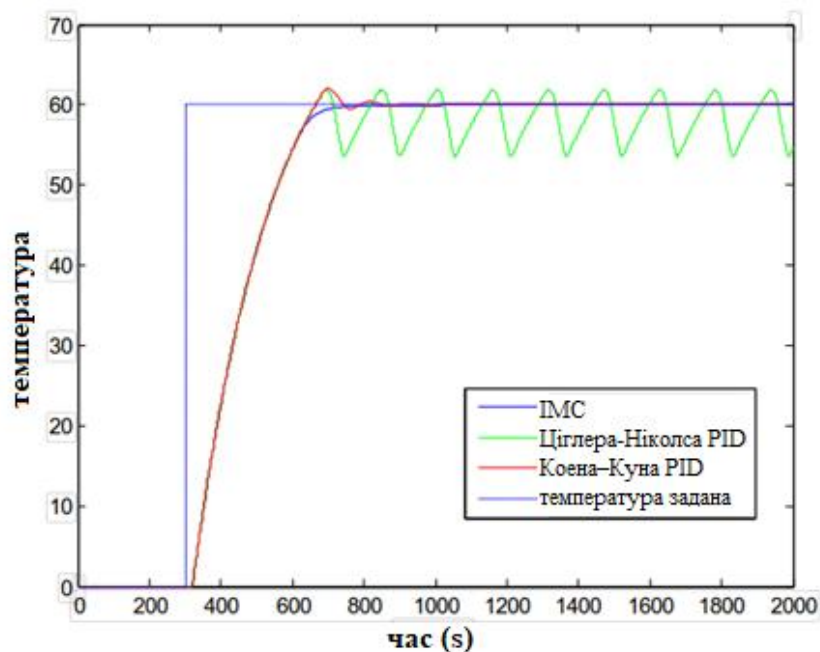


Рисунок 3.9 - Часові залежності систем регулювання типу PI при стрибку заданого значення.

Після цього порівняно реакції систем із регулятором PID (спроектованим на основі перетворення структури ІМС у класичну форму) та регулятором ІМС. На підставі рисунку 3.10 можна стверджувати, що відмінності в реакціях обох систем є незначними.

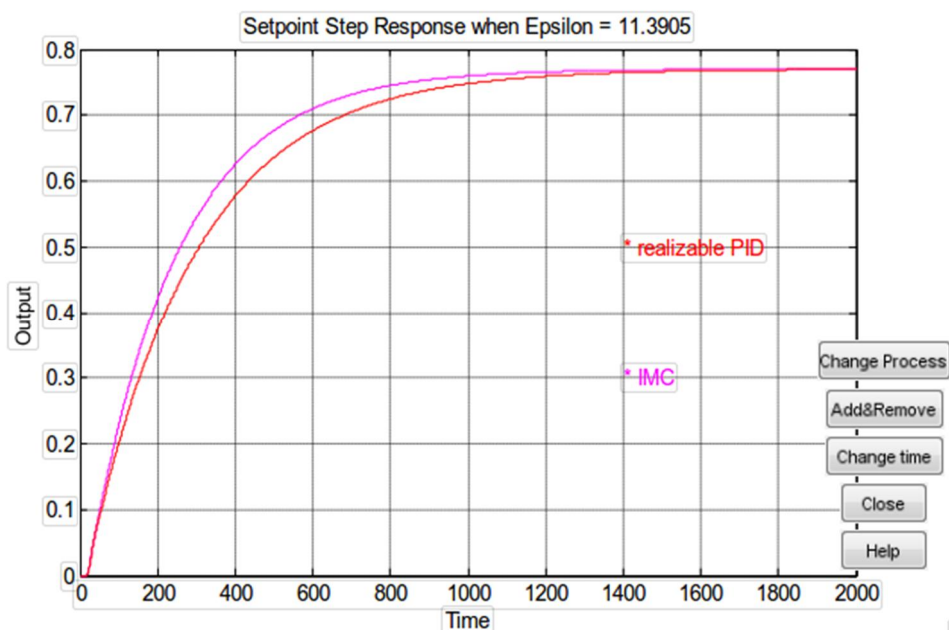


Рисунок 3.10 - Часові залежності реакції на стрибок заданого значення для регуляторів PID та ІМС.

На першому етапі аналізу також спроектовано двоконтурну структуру регулювання типу МФС. Модель процесу визначено із застосуванням передавальної функції зважування, описаної в теоретичній частині роботи. Відповідно до методу передавальної функції зважування можна записати нерівність (3.2):

$$|e^{-j20\omega} - 1| \leq |W(j\omega)|. \quad (3.2)$$

Передавальна функція, що задовольняє нерівність (3.2), описується рівнянням (3.3).

$$W(s) = \frac{30s}{15s+1} \quad (3.3)$$

На рисунку 3.11 наведено графік вибраної передавальної функції та лівої частини нерівності (3.2). На його основі можна стверджувати, що обрана форма передавальної функції задовольняє зазначену умову.

Використовуючи вибрану передавальну функцію, спроектовано структуру регулювання типу МФС. Роботу структур регулювання PID та МФС порівняно за допомогою реалізованої системи керування з використанням регулятора LB-600. Під час керування об'єктом із параметрами, ідентичними тим, що використовувалися під час проектування, показники якості регулювання мали подібні значення.

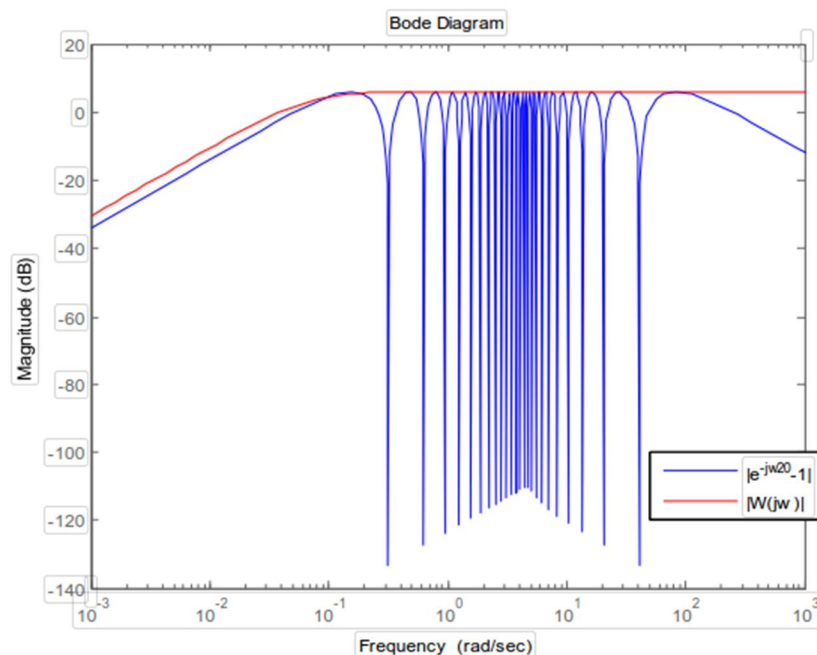


Рисунок 3.11 - Графік вибраної передавальної функції зважування.

Далі проведено порівняння роботи регуляторів PID та MFC при керуванні об'єктом зі зміненими параметрами. Через неможливість безпосередньої зміни характеристик реального об'єкта цей аналіз виконано у вигляді симуляцій у Matlab, без використання створеної експериментальної системи. Результати наведено на рисунку 3.12.

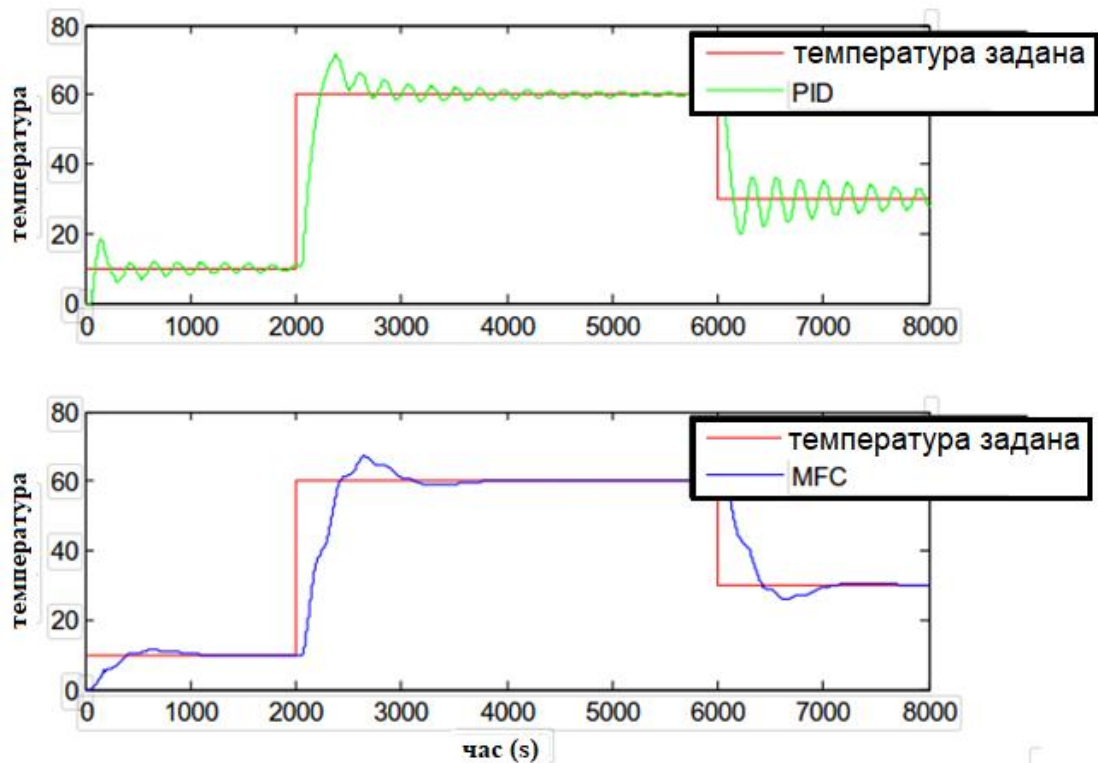


Рисунок 3.12 - Порівняння роботи регуляторів PID та MFC для модифікованих параметрів об'єкта.

З рисунка 3.12 видно, що після зміни динаміки об'єкта якість регулювання PID-регулятора істотно погіршилася. Спостерігаються небажані коливання з великою амплітудою температури. У випадку регулятора MFC коливання з'являються лише при стрибках заданої температури, однак вони мають меншу амплітуду, ніж у регулятора PID. Це пояснюється кращим пригніченням адитивних збурень на виході системи у структурі MFC.

Етап 2 – аналіз на основі моделі грибної ферми.

Другий етап аналізу регуляторів PID та ІМС проведено на основі даних, зареєстрованих під час вирощування печериць у виробничій залі. Для цього побудовано модель у вигляді рекурентної нейронної мережі на базі зібраних даних. На рисунках 3.13 і 3.14 подано графіки даних, використаних під час навчання та тестування моделі.

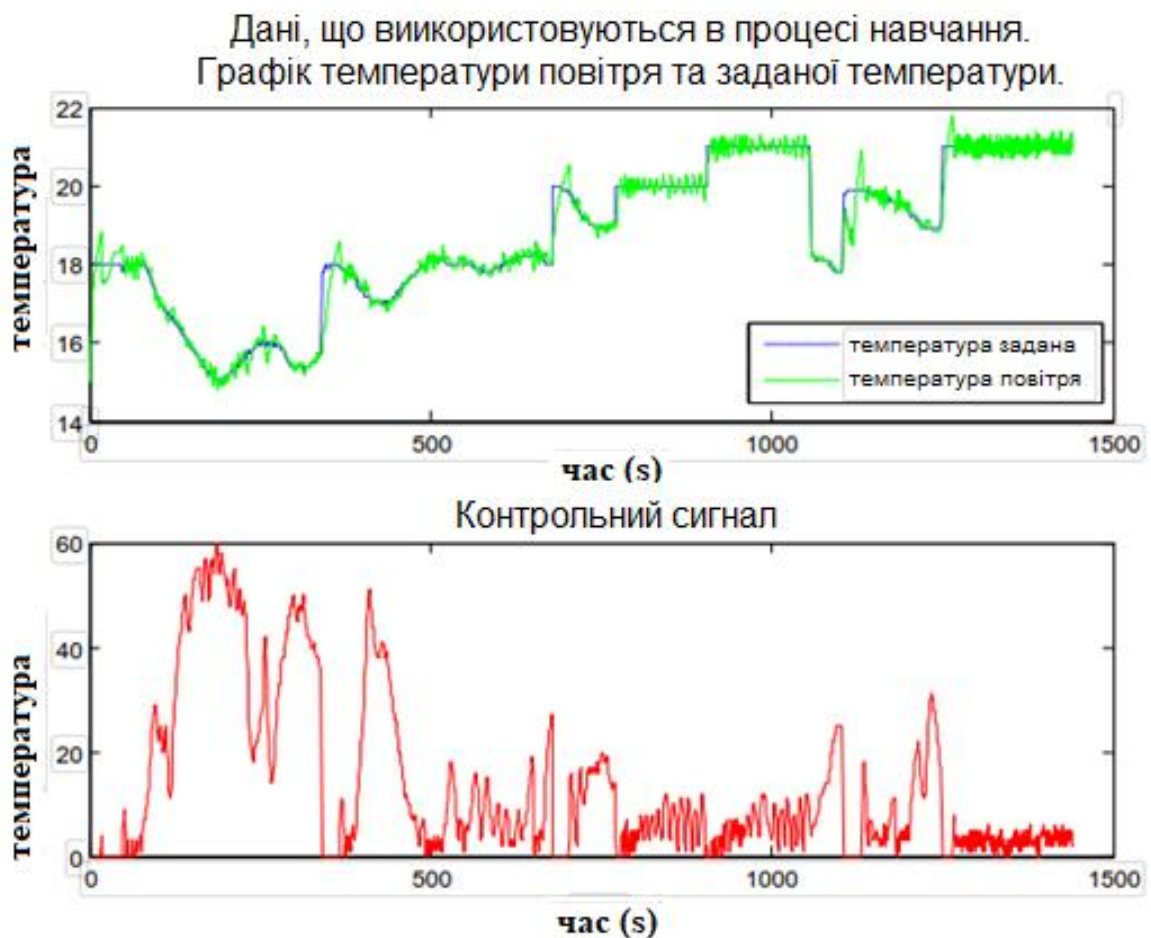


Рисунок 3.13 - Дані, використані під час навчання під час ідентифікації об'єкта.

Під час побудови моделі зали вирощування перевірено різні типи нейронних моделей, описані в теоретичній частині роботи. Експериментальні дані поділено на навчальний і тестовий набори. Нейрони прихованого шару

мали гіперболічну тангенсну функцію активації, а вихідний нейрон - лінійну функцію активації.

Дані навчальної та тестової вибірок були масштабовані до діапазону (-1; 1). Оптимальну кількість нейронів у прихованому шарі визначали шляхом поступового збільшення їх числа та порівняння середньоквадратичної помилки для навчальних і тестових даних.

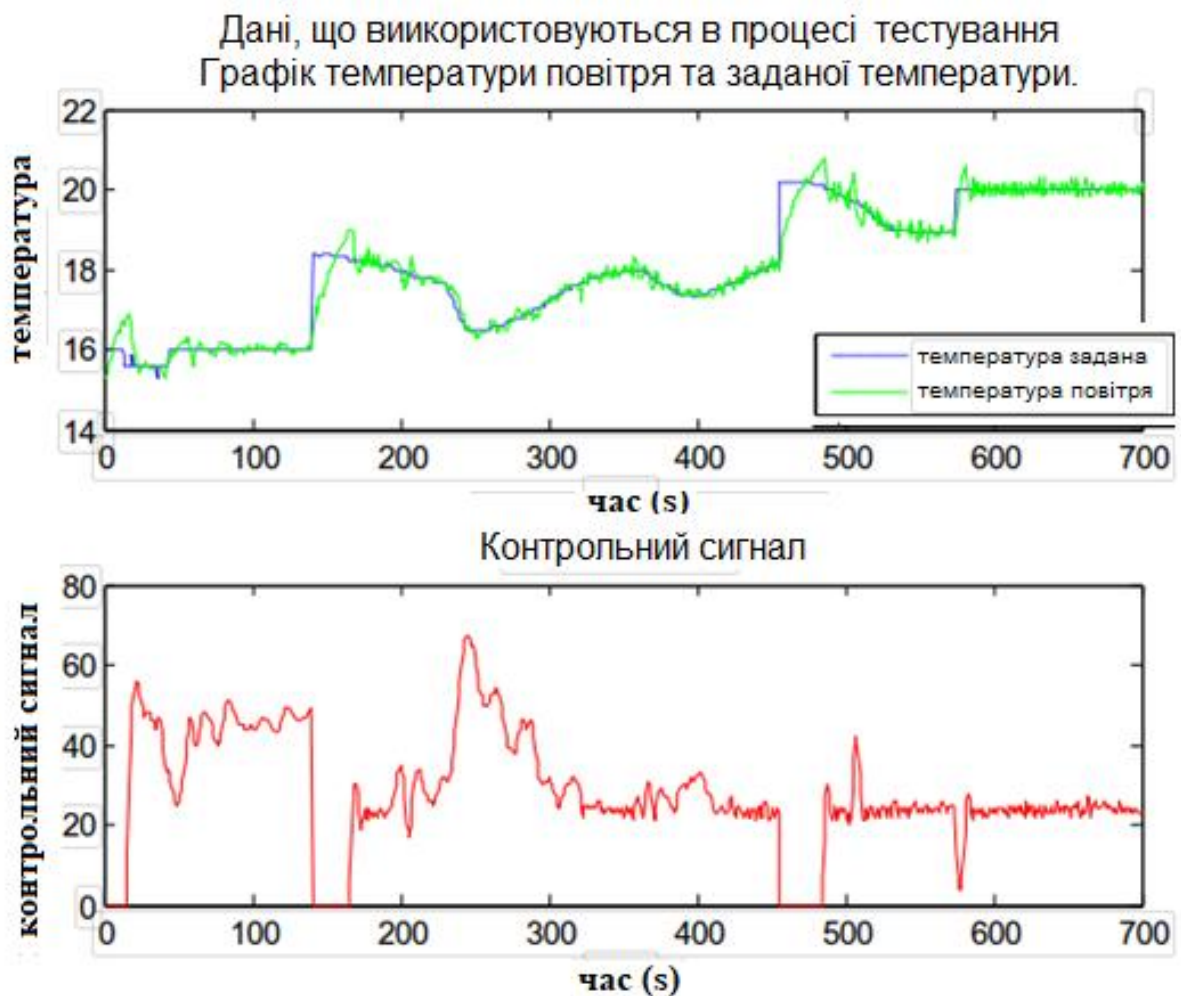


Рисунок 3.14 - Дані, використані під час тестування об'єкта.

Найбільш точну модель із мінімальною складністю отримано для мережі типу NARX. У вибраній моделі, використаній для порівняння регуляторів PID і ІМС, прихований шар містив 6 нейронів. Вхідний вектор складався із сигналів керування та виходу, затриманих на один і два часових кроки.

На рисунку 3.15 видно характерні перерегулювання температури під час зміни заданого значення. Їх можна усунути шляхом застосування допоміжного

фільтра. Застосування такого фільтра усуває перерегулювання, проте збільшує час наростання температури до заданої величини.

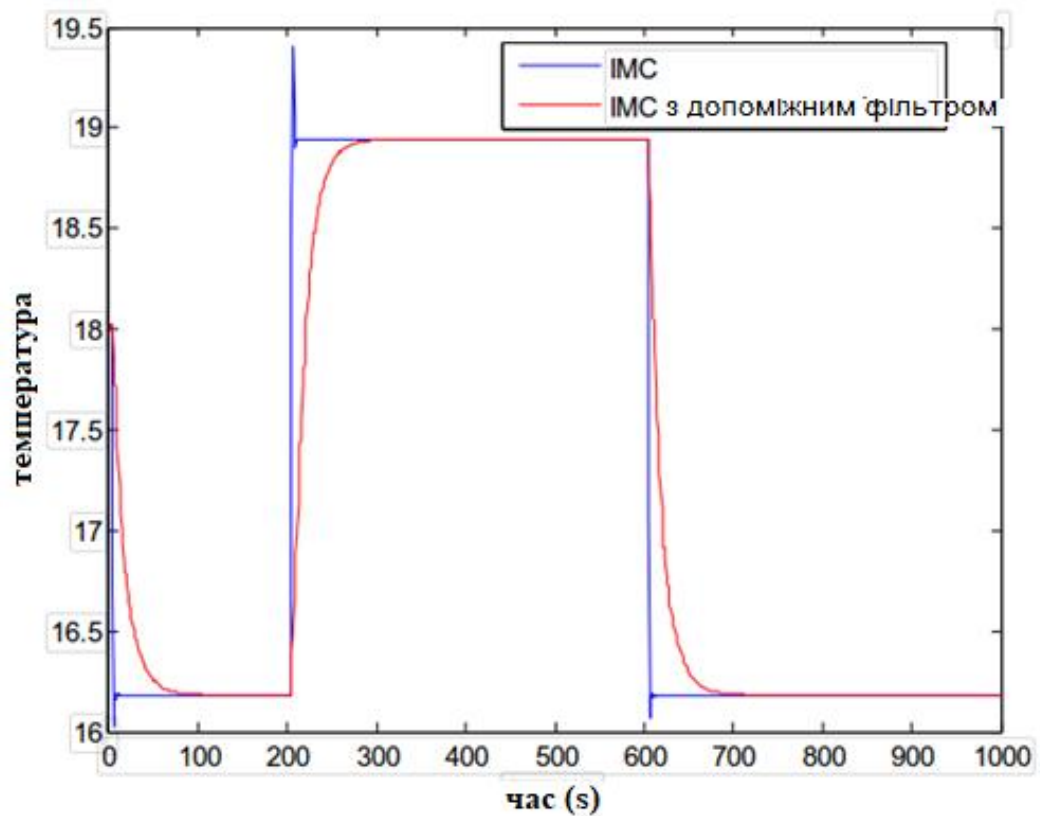


Рисунок 3.15 - Реакція спроектованого регулятора ІМС на стрибок заданої величини.

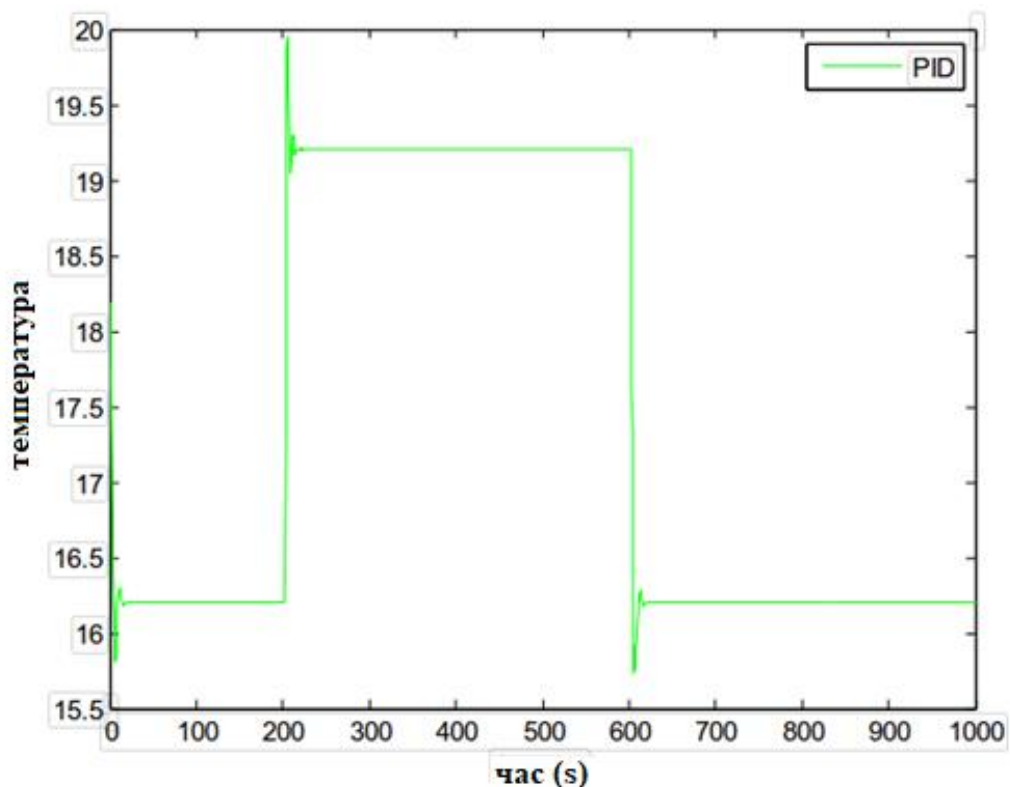


Рисунок 3.16 - Реакція спроектованого регулятора PID.

У випадку системи керування типу PID, параметри якої підібрані з урахуванням відповідного запасу за фазою та підсиленням, спостерігаються перерегулювання температури під час перехідного процесу.

3.3 Висновки до третього розділу

Сучасні обчислювальні пристрої дають змогу реалізовувати алгоритми керування з використанням моделі процесу в реальному часі. У роботі розглянуто дію класичного регулятора PID, який формує сигнал керування на основі похибки між заданим і фактичним значенням.

Застосування моделі динаміки об'єкта у структурі регулятора формує принцип керування на основі моделі процесу (Model Based Control). Такий підхід дозволяє прогнозувати поведінку системи та компенсувати вплив збурень ще до того, як вони позначаться на вихідному сигналі.

Регулювання типу MFC є більш стійким до похибок моделювання, оскільки ці похибки розглядаються як додаткові збурення, що підлягають пригніченню.

Для порівняння дії регуляторів можуть бути використані два параметри:

- вхідна чутливість S_r (здатність системи точно відтворювати задану траєкторію);
- вихідна (збурювальна) чутливість S_d (стійкість системи до зовнішніх збурень і рівень їх пригнічення регулятором).

У таблиці 3.2 наведено аналітичні вирази, що визначають вхідну та збурювальну чутливість для порівнюваних структур регулювання.

На основі параметрів, наведених у таблиці 3.2, можна зробити висновок, що кращі властивості пригнічення збурень у регулятора MFC пояснюються наявністю двох регуляторів у його структурі. Коригувальний регулятор у системі MFC забезпечує підвищену стійкість, що впливає з рівнянь збурювальної чутливості.

Таблиця 3.2 - Формули визначення вхідної та збурювальної чутливості

Параметр	Регулятор		
	PID	ІМС	MFC
S_r	$\frac{G_c * G_p}{1 + G_c * G_p}$	$\frac{G_c * G_p}{1 + G_c * (G_p - \tilde{G}_p)}$	$\frac{G_{c1} * G_p * (1 + G_c * \tilde{G}_p)}{(1 + G_{c1} * \tilde{G}_p) * (1 + G_{c2} * \tilde{G}_p)}$
S_d	$\frac{1}{1 + G_c * G_p}$	$\frac{1 - G_c * G_p}{1 + G_c * (G_p - \tilde{G}_p)}$	$\frac{1}{1 + G_{c2} * G_p}$

Для регулятора ІМС рівняння, що описують чутливості, мають подібний вигляд. Перевагою ІМС є використання моделі процесу під час регулювання.

Регулятори PID і ІМС є системами з одним ступенем свободи, тому під час налаштування потрібно шукати компроміс між швидкістю реакції на зміни заданого значення та стійкістю до збурень.

Регулятор МФС має два ступені свободи, що забезпечує найкращу якість регулювання серед розглянутих структур.

ВИСНОВКИ

У роботі реалізовано застосунок для керування температурою симульованого процесу. Програма використовує середовище Matlab для проєктування систем автоматичного регулювання. Для обміну даними в описаній системі застосовано комунікаційні стандарти OPC та MODBUS. На основі створеного застосунку проведено порівняльний аналіз різних структур систем регулювання.

Першою розглянутою системою є регулятор PID. Під час проєктування регуляторів цього типу прагнуть забезпечити високу якість регулювання та стійкість до збурень. Проте підбір параметрів PID-регуляторів за поширеними методами Ціглера – Ніколса та Коена – Куна не завжди дає оптимальний результат.

У роботі розглянуто методи регулювання, які активно використовують модель процесу у процесі керування. Структура регулювання типу ІМС може бути застосована для об'єктів, для яких можливо побудувати наближену обернену модель.

Регулятор типу ІМС можна також легко перетворити на структуру, що відповідає класичній системі регулювання. На основі перетвореної схеми можна визначити параметри регулятора PID. На підставі отриманих у дослідженні результатів можна зробити висновок, що метод налаштування параметрів регулятора PID на основі структури ІМС забезпечує найкращі результати серед усіх розглянутих у роботі способів налаштування.

Другим регулятором, розглянутим у порівняльному аналізі, є регулятор типу MFC. Це регулятор, який активно використовує модель процесу під час керування. У структурі MFC присутні два регулятори: один керує моделлю процесу, а другий - реальним об'єктом. Використання додаткового коригувального регулятора підвищує стійкість системи до збурень та покращує їх придушення. Головною перевагою регулятора MFC є його

двоконтурність, яка дозволяє незалежно налаштовувати регулятор на відтворення заданої траєкторії та пригнічення збурень.

Щоб задовольнити зростаючі вимоги до якості регулювання, необхідно шукати нові підходи до побудови систем керування. Прикладом ефективного рішення є методи, що активно використовують модель процесу під час формування керуючого сигналу. Такий підхід є альтернативою традиційним методам регулювання, забезпечуючи високу якість і стійкість системи до впливу зовнішніх факторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гоголюк П.Ф. Теорія автоматичного управління / П.Ф.Гоголюк, Т.М.Гречин // Навчальний посібник. – Львів: в-во НУ "Львівська політехніка", 2009. – 280 с.
2. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування. / М.Г. Попович, О.В. Ковальчук - К.: Либідь, 2007. - 656 с.
3. Клепач М.І. Теорія автоматичного керування. Навчальний посібник. / М.І. Клепач. - Рівне: НУВГП, 2007. – 206 с.
4. Сорока К.О. Теорія автоматичного керування. Навчальний посібник / К.О. Сорока – Харків, ХНАМГ, 2006 – 187 с.
5. Єрощенко С. А. Методичні вказівки з курсу «Теорія автоматичного регулювання». - Харків: ХНУРЕ, 2014. - 28 с.
6. Желдак Т.А. Нечіткі множини в системах управління та прийняття рішень :навчальний посібник /Т.А. Желдак, Л.С. Коряшкіна, С.А. Ус ; за редакцією С.А. Ус .– Дніпро: НТУ ДП, 2020. – 386 с.
7. Івахів О.В. Основи побудови систем керування з нечіткою логікою :навчальний посібник /О.Івахів, М.Наконечний. – Львів: Растр-7, 2017. – 129 с.
8. Коротка Л.І. Обчислювальний інтелект : теорія нечітких множин :навчальний посібник /Коротка Л.І., Зеленцов Д.Г., Науменко Н.Ю.,Ляшенко О.А., Солодка Н.О. - Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2020. – 161 с.
9. Rivera D. E., Flores M. E. Internal Model Control: Principles and Applications. - Oxford: EOLSS Publications, 2021. - 67 с.
10. Brosilow, C., Joseph, B. Techniques of Model-Based Control. - Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2002. - 376 с.
11. Ogawa H., Tanaka R., Murakami T., Ishida Y. Design of internal model control based on an optimal control for a servo system // Journal of Control Science and Engineering. - 2015. - Article ID 689767. - DOI: 10.1155/2015/689767.

12. Nath U. M., Sahu P. K., Panda R. C. Review on IMC-Based PID Controller Design Approach. - International Journal of Systems Science, 2023, Vol. 54(2), pp. 157–176.
13. Ningsih W., Putra E., et al. Performance Analysis of IMC-PID Controller on Pressure Control System. - Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems, 2024, Vol. 14(1), pp. 45–54.
14. Ranjan A., Patel S. Modified Internal Model Control for Nonlinear Processes. - Control Engineering Practice, 2023, Vol. 133, pp. 1–12.
15. Гарасимів В. М. Алгоритм налаштування коефіцієнтів ПД-регулятора із використанням методів нечіткої логіки / В. М. Гарасимів // Методи та прилади контролю якості. – 2020. – № 2 (45). – С. 102 – 108.
16. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування: підручник [2-ге вид.] / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – Київ : Либідь, 2007. – 656 с.
17. Huang Y., Yasunobu S. A general practical design method for fuzzy PID control from conventional PID control. / The Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, FUZZ IEEE 2000, vol. 2, 2000, P. 969 - 972.
18. Chen D. PI/PID Controller Design Based on Direct Synthesis and Disturbance Rejection / D. Chen, D. E. Seborg // Industrial & Engineering Chemistry Research. – August 2002. – Vol. 41, № 19. – P. 4807 – 4822.
19. Bequette B. W. Second-Order Behavior / B. W. Bequette // Process Control : Modeling, Design and Simulation. – Prentice-Hall Professional, 2003. – P. 138 – 147.
20. Субботін С.О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень: Навчальний посібник. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. – 341 с.
21. Програмування в автоматизованих системах управління технологічними процесами / Укл.: О.В. Степанець, С.Г. Батюк - К.: КПІ, 2016. - 28 с.
22. OPC Foundation - інформація про архітектуру Unified Architecture (OPC UA). Огляд стандарту, цілі, технічні характеристики. Електронний

ресурс. – Режим доступу: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua>

23. Офіційний сайт виробника LAB-EL: сторінка з описом LB-600 - універсального програмованого регулятора цифрового типу. Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://www.label.pl/po/rek600.html>

24. Arya P. P. A Modified IMC Design for Second Order Plus Time Delayed Processes / P. P. Arya // IFAC-PapersOnLine. – 2022. – Vol. 55, № 1. – P. 843 – 847.