

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

ХМІЛЬ ІГОР ВІТАЛІЙОВИЧ

АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ОПАЛЕННЯ, ВЕНТИЛЯЦІЇ ТА
КОНДИЦІОНУВАННЯ НА ОСНОВІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ/AUTOMATIC
CONTROL OF HEATING, VENTILATION, AND AIR CONDITIONING SYSTEMS BASED
ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Спеціальність 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Випускна кваліфікаційна робота за ступенем вищої освіти "бакалавр"

Виконав студент групи АКІТ-41
Хміль І.В.

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

Дипломну роботу допущено до захисту:
"___" _____ 20__ р.

Завідувач кафедри
_____ А.І.Сегін

Тернопіль 2026

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"

Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін
“ _____ ” _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Хмілю Ігорю Віталійовичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Автоматичне керування системою опалення, вентиляції та кондиціонування на основі штучних нейронних мереж/ Automatic Control of Heating, Ventilation, and Air Conditioning Systems Based on Artificial Neural Networks.
керівник роботи д.т.н., Возна Н.Я.

затверджені наказом по університету від 01.12.2025 р №894

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи: 10.05.2025р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Система опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC) як об'єкт автоматичного керування.

2. Теплотехнічні параметри приміщення, характеристики теплообмінника та виконавчих механізмів системи HVAC.

3. Сенсори температури, вологості та параметрів повітряного середовища, що використовуються в системах HVAC.

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Провести аналіз існуючих методів моделювання та керування системами HVAC

2. Розроблення математичної моделі системи HVAC

3. Виконати моделювання та аналіз роботи системи у програмному середовищі

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Відкрита математична блок-схема системи регулювання температури в приміщенні
2. Блок-схема методології для моделювання
3. Блок-схема алгоритму навчання зворотного поширення

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Возна Н.Я.		
2	Возна Н.Я.		
3	Возна Н.Я.		

7. Дата видачі завдання 28 листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд існуючих рішень	01.12.2025р. – 15.01.2026р.	
2	Моделювання та аналіз системи HVAC	16.01.2026р. – 15.03.2026р.	
3	Розроблення та дослідження системи керування HVAC	01.05.2026р. – 25.05.2026р.	

Студент _____ Хміль І.В.
(підпис)

Керівник роботи _____ д.т.н., Возна Н.Я
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Хміль І.В. Автоматичне керування системою опалення, вентиляції та кондиціювання на основі штучних нейронних мереж. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна (наукова) програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

У роботі розглянуто питання моделювання та розробки системи автоматичного керування системою опалення, вентиляції та кондиціювання повітря (HVAC). Проведено аналіз сучасних підходів до математичного моделювання та керування HVAC-системами, досліджено особливості їх функціонування, а також методи побудови моделей динамічних об'єктів із суттєвою інерційністю та нелінійністю.

Розроблено математичну модель системи HVAC, модель теплообмінника та модель приміщення, на основі яких побудовано передавальну функцію та структурну схему системи. Для опису нелінійної поведінки об'єкта розроблено нейромережеву модель типу NARX, яка забезпечує ідентифікацію динамічних процесів та прогнозування станів системи. Виконано синтез ПД-регулятора та реалізовано відмовостійку систему керування для підвищення надійності функціонування HVAC-системи.

Проведено імітаційне моделювання розробленої системи у середовищі MATLAB/Simulink та виконано аналіз її динамічних характеристик. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого підходу щодо підтримання заданих параметрів мікроклімату, підвищення якості керування та зменшення енергетичних витрат. Розроблені моделі та алгоритми можуть бути використані під час проєктування та модернізації сучасних систем HVAC у житлових, адміністративних і промислових будівлях.

ANNOTATION

Khmil I.V. Automatic Control of Heating, Ventilation, and Air Conditioning Systems Based on Artificial Neural Networks. - Manuscript.

Doctoral studies for the education level «Bachelor'» with the title 151 Automation and Computer-Integrated Technologies. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2025.

The thesis addresses the problem of modeling and developing an automatic control system for a Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) system. An analysis of modern approaches to mathematical modeling and control of HVAC systems has been carried out, and the features of their operation, as well as methods for constructing dynamic models of systems with significant inertia and nonlinear behavior, have been investigated.

A mathematical model of the HVAC system, a heat exchanger model, and a room model have been developed. Based on these models, the transfer function and structural scheme of the system were obtained. To describe the nonlinear behavior of the controlled object, a NARX-type neural network model was developed, providing dynamic system identification and state prediction. A PID controller was designed, and a fault-tolerant control system was implemented to improve the reliability of HVAC system operation.

Simulation modeling of the developed system was carried out in the MATLAB/Simulink environment, and its dynamic characteristics were analyzed. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed approach in maintaining the required indoor climate parameters, improving control quality, and reducing energy consumption. The developed models and control algorithms can be applied in the design and modernization of modern HVAC systems for residential, commercial, and industrial buildings.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ.....	10
1.1 Методи моделювання та проектування системи HVAC	10
1.2 Моделювання нейронних мереж.....	14
1.3 Типи керування системою HVAC.....	20
1.4 Метод межі стабільності.....	27
2. МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ HVAC	32
2.1 Математична модель системи HVAC	32
2.2 Математична модель теплообмінника	34
2.3 Аналіз продуктивності моделі	38
2.4 Проектування моделі NARX	41
3. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ HVAC...	48
3.1 Моделювання та результати для моделювання	48
3.2 Моделювання та результати для контролерів.....	52
3.3 Моделювання та результати для надійності FTC	54
ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	63

					ДП.АКІТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ		
Змн.	Арк.А	№ докум.№	ПідписПі	Дата			
Розроб.	Хміль І.В.				Автоматичне керування системою опалення, вентиляції та кондиціювання на основі штучних нейронних мереж		
Перевірив.	Возна Н.Я.						
Консульт.	Возна Н.Я.						
Н. Контр.	Возна Н.Я.						
Затверд.	Сегін А.І.						
					Літ.	Арк.	Акрушів
					ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-41		

ВСТУП

Актуальність роботи. Актуальність зумовлена зростанням вимог до енергоефективності сучасних будівель, необхідністю забезпечення комфортних умов перебування людей у приміщеннях та постійним підвищенням вартості енергетичних ресурсів. Системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC) є одними з найбільших споживачів енергії в житлових, комерційних та промислових об'єктах. Ефективність їх роботи безпосередньо впливає на енергоспоживання будівель, рівень комфорту користувачів та експлуатаційні витрати.

Сучасні HVAC-системи характеризуються складною динамікою, значною інерційністю, наявністю часових затримок та нелінійних залежностей між параметрами процесу. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки адекватних математичних моделей та ефективних алгоритмів керування, які дозволять забезпечити стабільну роботу системи за різних умов експлуатації. Особливої актуальності набуває використання методів математичного моделювання та нейромережевих технологій, зокрема моделей типу NARX, які дозволяють описувати складні нелінійні процеси та підвищувати якість керування системами HVAC.

Метою роботи є розробка та дослідження математичної моделі системи HVAC, а також створення ефективної системи автоматичного керування на основі математичних та нейромережевих методів моделювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих методів моделювання та керування системами HVAC;
- дослідити математичні моделі, що використовуються для опису теплових процесів у системах кондиціонування повітря;
- проаналізувати можливості нейромережевих моделей для ідентифікації динамічних систем;
- розробити математичну модель системи HVAC;

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		7

- побудувати нейромережеву модель типу NARX для опису нелінійної поведінки системи;
- розробити структуру системи автоматичного керування HVAC;
- виконати моделювання та аналіз роботи системи у програмному середовищі;
- провести оцінювання ефективності запропонованих методів керування.

Об’єктом дослідження є процес функціонування систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC).

Предметом дослідження є математичні та нейромережеві методи моделювання систем HVAC, а також алгоритми автоматичного керування температурними режимами в приміщеннях.

Методи дослідження.

У роботі використано методи аналізу та узагальнення науково-технічної літератури для дослідження сучасних підходів до моделювання та керування HVAC-системами; методи математичного моделювання для побудови моделей теплообмінника, приміщення та системи HVAC в цілому; методи теорії автоматичного керування для синтезу та аналізу ПІД-регулятора і дослідження стійкості системи; методи нейромережевого моделювання для розроблення моделі NARX та ідентифікації нелінійної динаміки об’єкта; методи імітаційного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink для дослідження динамічних характеристик системи та оцінювання ефективності запропонованих алгоритмів керування.

Практичне значення одержаних результатів.

Практична значущість роботи полягає у можливості використання розроблених моделей та алгоритмів під час проектування й налаштування сучасних систем HVAC. Отримані результати дозволяють підвищити точність підтримання заданих параметрів мікроклімату, зменшити енергоспоживання обладнання та покращити якість автоматичного керування. Розроблені моделі можуть бути використані для дослідження, модернізації та оптимізації систем

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		8

кондиціонування повітря в житлових, адміністративних та промислових будівлях.

Апробація. Хміль І. Створення ефективної системи автоматичного керування HVAC. – Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ-2026), Тернопіль, 2026. – 237-239 с.

					ДП.АКІТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1 Методи моделювання та проектування системи HVAC

Термін «опалення, вентиляція та кондиціонування повітря (HVAC)» охоплює широкий спектр обладнання, від газової плити до великого та складного комплексу обладнання, необхідного для великих висотних будівельних комплексів. Центральне управління також відповідно варіюється від регулювання гнота газової плити ручним колесом до складної комп'ютеризованої системи управління. Це було відзначено Роджером[11].

Суть аналізу системи управління полягає в тому, щоб забезпечити та полегшити вимірювання її виходу та вжити коригувальних заходів щодо значень, які відхиляються від заданого значення. Це, в свою чергу, вимагає наявності датчика. Першим важливим кроком у машинобудуванні, який, у свою чергу, ознаменував промислову революцію, стала розробка парової машини. Проблемою, з якою зіткнулися інженери в той час, було як контролювати швидкість двигуна без втручання людини. З різних спроб, найбільш успішним було використання канонічного маятника, застосованого Джеймсом Ваттом у 1769 році в його конструкції кульового регулятора, показаного на рисунку (2.1). Системи HVAC розраховані на задоволення набору проектних умов, які вибираються для створення максимальних навантажень. Оскільки ці умови переважають лише протягом кількох годин щороку, обладнання HVAC має працювати більшу частину часу з меншою за номінальну потужність. Функція системи управління полягає в регулюванні потужності обладнання відповідно до навантаження. Автоматичне управління, на відміну від ручного, є кращим як для точності, так і для економічності; людина як контролер не завжди є точною і дорогою.

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

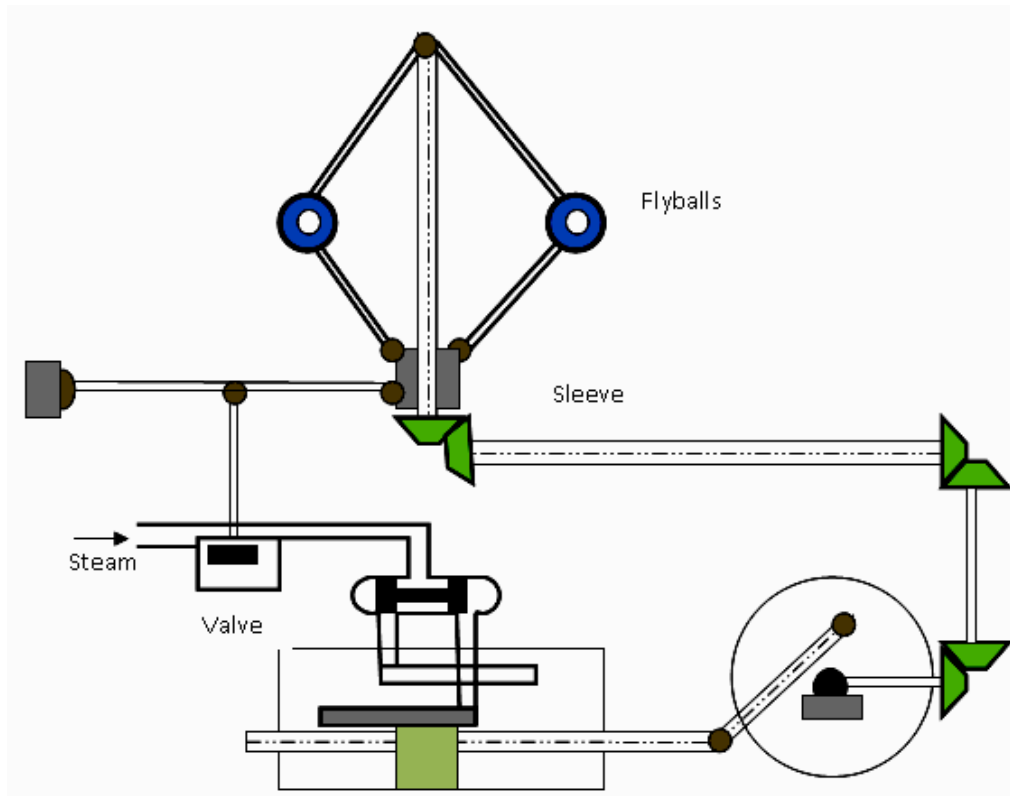


Рисунок 1.1 - Відцентровий регулятор швидкості Ватта (Roland, 2001).

Правильно спроектована, експлуатована та підтримувана автоматична система управління є точною та забезпечить економічно вигідну роботу системи HVAC.

На жаль, багато систем працюють погано, тому що проектувальники знехтували важливістю створення керованих систем HVAC та забезпечення добре спроектованих систем управління. Можна розробити хороші системи HVAC та засоби управління за прийнятною ціною. Тому, щоб створити повну систему управління, важливо спочатку побудувати модель, а потім контролер. Існує багато різних типів систем управління, які застосовуються до системи HVAC, кожна з унікальним дизайном моделювання. Цей розділ описує короткий огляд різних моделей та контролерів.

Відмінності в застосуванні та меті моделей призвели до багатьох різних структур моделей. Оскільки моделі використовуються як основа для подальших рішень, знання про них повинні бути представлені в зручній формі. Модель не повинна бути занадто складною; тим не менш, вона повинна

					ДП.АКІТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		11

давати достатній і точний опис системи. Моделі можна класифікувати як лінійні або нелінійні. Реальні моделі, однак, зазвичай є комбінацією обох, у пропорціях, визначених вимогами застосування з одного боку, і знаннями про процес і наявними даними з іншого боку [11].

Моделювання є основою практичних методів. Джордж сказав, що першим кроком у моделюванні є визначення поведінки системи[7]. Не існує єдиної найкращої моделі системи керування; деталі в моделі повинні відповідати поведінці, що вивчається.

1.1.1 Математична модель

Модель - це математичне твердження, яке описує важливі взаємозв'язки між входом і виходом системи або її компонентів. Математичне моделювання є дуже корисним, а також дуже компактным способом опису або представлення знань які ми маємо про процес або систему.

Параскевопулос проілюстрував визначення математичної моделі процесу або системи, відоме як ідентифікація системи[20]. Математична модель процесу або система, у більшості випадків, необхідна для розробки її контролера. Це також необхідно для розробки адаптивних, FTC та надійних систем керування. Юкай сказав, що ідентифікована модель системи буде використовуватися в управлінні.

Ідентифікація передбачає абстрагування математичних моделей з даних. Дані збираються шляхом спостереження за даним процесом або системами. Процес або система може бути описана кількома моделями, починаючи від обов'язково дуже детальних і складних мікроскопічних моделей до тих, що є настільки спрощеними, як макроскопічні моделі, що полегшують розуміння загальних характеристик продуктивності системи. Однак складні мікроскопічні моделі вимагають багато часу для визначення і вони в основному використовуються для детального контролю продуктивності системи.

Параскевопулос згадав кілька типів математичних моделей для опису систем[20]. Найбільш популярними є наступні:

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

- Диференціальні рівняння. 3. Імпульсна характеристика.
- Передавальна функція. 4. Рівняння стану.

Кожна з цих чотирьох моделей має переваги та недоліки над іншими. Зоран та ін. виявили, що більш складні математичні моделі забезпечують більш точний опис поведінки системи. Тому існує неминуча різниця між фактичною системою установки та її математичною моделлю. Ця різниця називається “невизначеність моделі”.

Існують в основному два способи визначення математичної моделі системи: шляхом реалізації відомих законів природи або шляхом експериментів над процесом. А популярним підходом до отримання моделі є поєднання обох способів. Математичні моделі можуть бути розрізнені як параметричні та непараметричні моделі. Параметричні моделі очевидно, включають параметри. Наприклад, коефіцієнти диференціальних або різницевих рівняння, рівняння стану та передавальні функції. Непараметричні моделі не містять параметрів і зазвичай є графічними представленнями, такими як Ніквіста або Боде діаграми передавальної функції або імпульсної характеристики [25].

1.1.2 Модель "чорної скриньки"

Моделювання "чорної скриньки" або експериментальне моделювання - це метод розробки моделей на основі даних процесу. Оскільки фізичне моделювання зазвичай займає дуже багато часу, "чорна скринька" моделювання є популярним методом для отримання уявлення про загальну (вхід/вихід) поведінку процесу. Розроблені моделі зазвичай використовуються для прогнозування майбутніх значень процесу або в додатках керування процесом. Аспекти емпіричного моделювання - це дані попередня обробка, складність моделі, лінійність моделі та екстраполяція моделі. Таким чином, різні методи моделювання "чорної скриньки" або емпіричного моделювання, такі як часткові найменші квадрати моделювання, моделювання часових рядів, моделювання нейронних мереж, нечітке моделювання та нейро-нечітке моделювання, варто відвідати. Браян і Бен пояснюють загальні кроки для

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		13

моделювання процесів і основними фазами моделювання є: системний аналіз, проектування моделі та аналіз моделі. Рисунок 1.2 показує етапи моделювання, які найчастіше використовуються при проектуванні моделі "чорної скриньки".

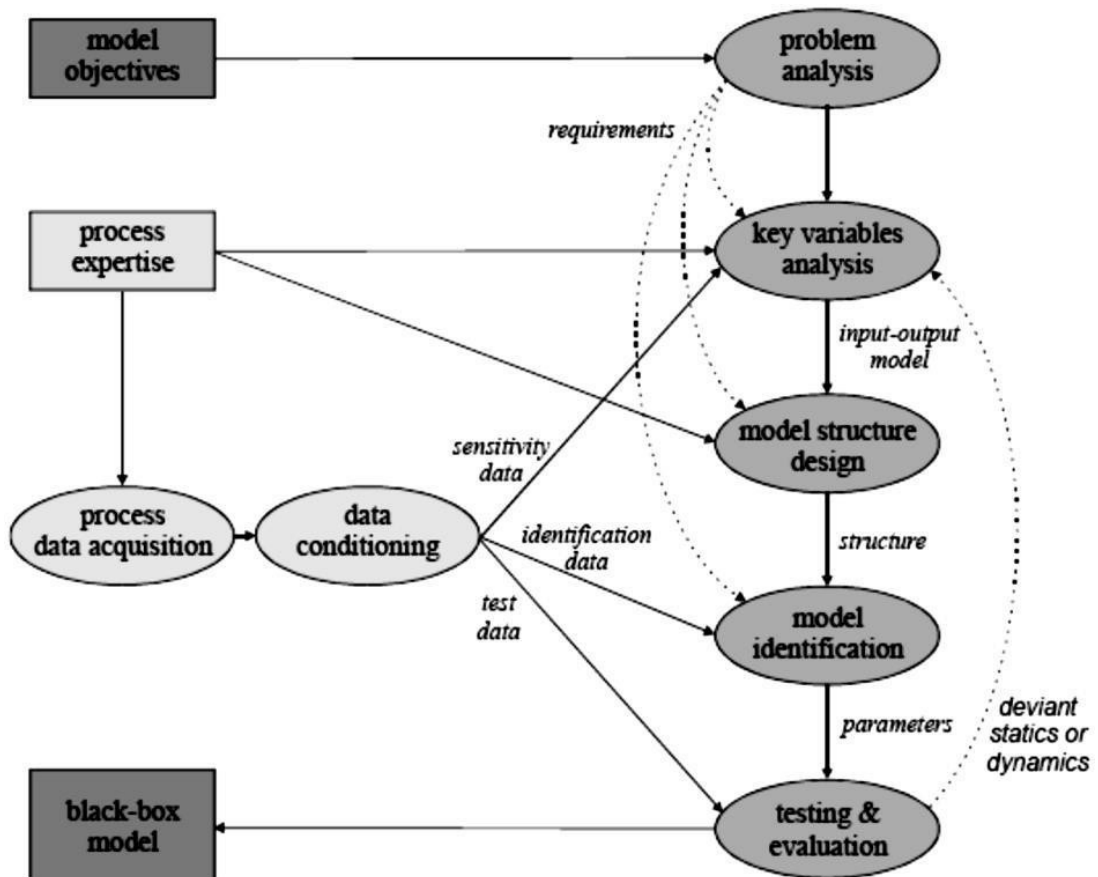


Рисунок 1.2 - Етапи моделювання для моделювання «чорної скриньки»[23].

1.2 Моделювання нейронних мереж

Нейронні мережі — це набори взаємопов'язаних штучних нейронів, які дуже спрощено імітують деякі логічні функції мозку. Після навчання вони можуть представляти будь-яку алгебраїчну нелінійність. Таке навчання передбачає представлення достатніх прикладів бажаної поведінки вхід/вихід; значною мірою вони можуть представляти лише існуючі явища, що генерують дані, за допомогою емпіричних еквівалентів.

Медскер і Джейн сказали, що класичні моделі нейронних мереж це Perceptron розроблений Розенблаттом. Perceptron це одношарова адаптивна мережа прямого зв'язку одиниць порогової логіки, яка має певну здатність до навчання.

Ще однією важливою ранньою моделлю нейронної мережі є Adaline, яка є одношаровою лінійною мережею, що використовує дельта-правило навчання. Перцептрон і Adaline були розроблені в першу чергу для класифікації образів. Структура прямого зв'язку одношарової нейронної мережі з прихованим шаром показана на рисунку 1.3.

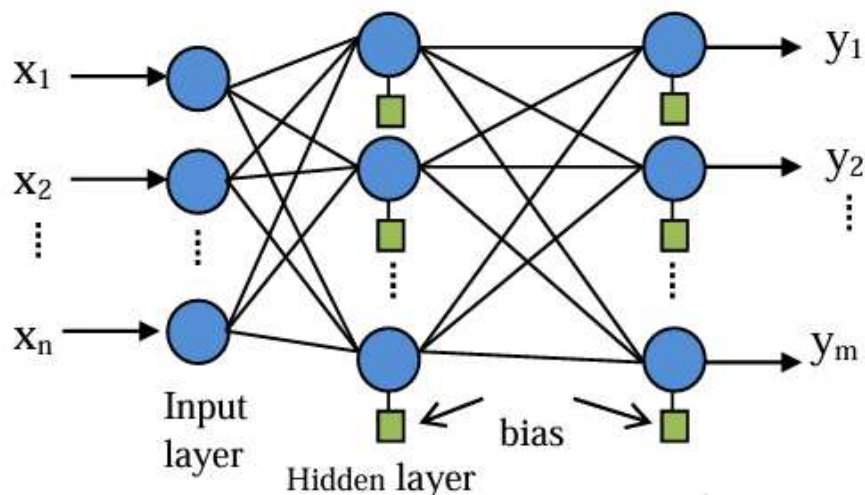


Рисунок 1.3 Структура моделі нейронної мережі з прихованим шаром.

Нейрони зазвичай згруповані в підмножини, які називаються шарами, в яких зазвичай усі процесорні блоки мають однакове зміщення і передавальну функцію. Серед різних архітектур, запропонованих для нейронних мереж, багатошарова мережа прямого зв'язку найчастіше використовується для динамічного моделювання та застосувань керування процесами.

Типова нейронна мережа прямого зв'язку має один вхідний шар (зазвичай з ідентичною передавальною функцією. Таким чином, вона лише розподіляє вхідні дані до нейронів з наступного шару), один вихідний шар і один або кілька

прихованих шарів. Багатошарова модель нейронної мережі показана на рисунку 1.4. Michael показав, що зростаюча складність системи HVAC призвела до розробки нелінійних моделей. Гібридною альтернативою цим складним, нелінійним моделям є лінійна модель у поєднанні з можливістю навчання нейронних мереж, що допомагає системі справлятися з реальними нелінійностями.

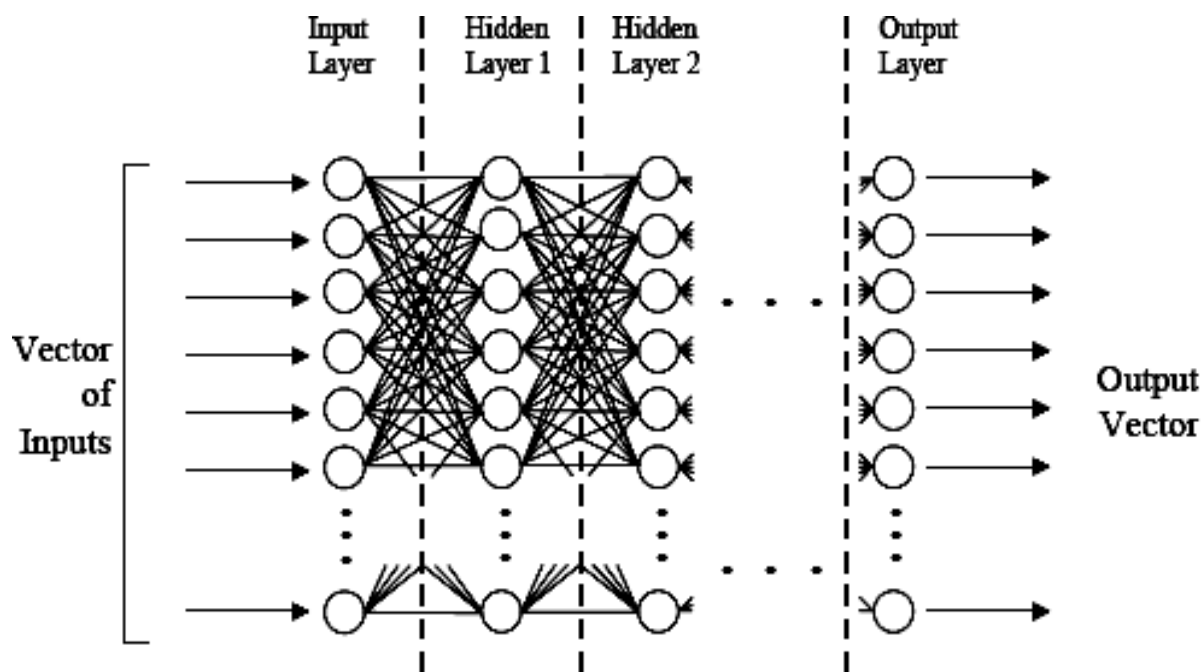


Рисунок 1.4 Структура багаторівневої нейронної мережі.

Омід і Девід виявили, що побудова моделі нейронної мережі не обов'язково вимагає стільки знань, як підхід з перших принципів або статистичний підхід; лише фундаментальне розуміння процесу. Для кращого вирішення проблеми нелінійності в реальних задачах була розроблена модель NARX, що охоплює можливості нелінійної моделі разом із гнучкістю нейронних мереж.

1.2.1 Модель NARX

Нелінійна авторегресія з екзогенними входами (NARX), також відома як рекурентні нейронні мережі NARX, мають потужні можливості представлення

[5]. Завдяки цій особливості вона часто добре підходить для моделювання складних і нелінійних процесів, таких як ті, що зазвичай зустрічаються в промисловості опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC). Оскільки NARX є відносно новою технологією для систем HVAC, більшість сучасних практикуючих інженерів не мають чіткого розуміння її основ і не усвідомлюють, як її можна інтегрувати в сучасні будівельні системи. Це дослідження проведе будь-якого зацікавленого інженера через NARX основи термінології технологій. Він також відповість на важливе питання про те, як NARX побудовано і чому вони мають здатність вивчати закономірності. До цього часу багато обчислювальних застосувань моделей NARX (NARXM) у передових дослідницьких областях підтвердили, що NARXM можна практично використовувати для апроксимації будь-якої нелінійної залежності між вхідними та вихідними змінними з певною мірою точності [30]. Нещодавно NARXM були успішно застосовані як для ідентифікації системи, так і для управління в теплових системах HVAC [1]. Крім того, NARXM були впроваджені для прогнозування навантаження на охолодження/обігрів та споживання енергії в будівлях [1].

Усі динамічні мережі мають динаміку лише на вхідному шарі або пряму мережі. Нелінійна авторегресійна мережа з екзогенними входами (NARX) є рекурентною динамічною мережею, з петлями зворотного зв'язку, що охоплюють кілька шарів мережі. Модель NARX базується на лінійній моделі ARX, яка зазвичай використовується в моделюванні часових рядів. Зв'язок між входом, виходом і майбутнім виходом є:

$$y(t) = g(u^{t-1}, y^{t-1}) + v(t), \dots \dots \dots (1.1)$$

Де u^{t-1} і y^{t-1} відповідно представляють минулий вхід і вихід, $y(t)$ представляє майбутній вихід, g - це нелінійне відображення, яке представляє модель, і адитивний член $v(t)$ гарантує, що наступний вихід $y(t)$ не буде точною функцією минулих даних.

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Функцію g знаходиться з рівняння 1.1 в межах сімейства функцій. Давайте параметризуємо це сімейство функцій за допомогою скінченновимірної вектора параметрів θ наступним чином:

$$y(t/0) = g(u^t, y^t, \theta), \quad (1.2)$$

Параметр функції g зі скінченно вимірним вектором θ зазвичай є наближенням. Тепер сімейство структури моделі рівняння 1.2 є просто занадто загальним. Визначальним рівнянням для моделі NARX є:

$$y(t) = f(u(t - D_u), \dots, u(t - 1), y(t - D_y), \dots, y(t - 1)) \quad \dots \quad (1.3)$$

Де $u(t)$ та $y(t)$ представляють вхід і вихід мережі в момент часу t , D_u та D_y є порядком входу та виходу, а функція f є нелінійною функцією. Коли функція f може бути апроксимована багат шаровим персептроном, отримана система називається рекурентною нейронною мережею NARX. Модель NARX має вхід нульового порядку та одновимірний вихід, тобто, ті мережі, які мають зворотний зв'язок лише з виходу. Однак немає жодної причини чому наші результати не можуть бути поширені на мережі з вищими порядками входу. Таким чином, робота мереж NARX з нульовим порядком входу визначається як:

$$y(t) = \Psi(u(t), (t - 1), y(t - D)) \dots \dots \dots (1.4)$$

Де функція Ψ є відображенням, що виконується багат шаровим персептроном (MLP), як показано на рисунку 1.5. Вагові зв'язки на малюнку можна регулювати або фіксувати, щоб відповідати призначеному застосуванню. З точки зору системи, краще перевести рівняння у форму простору станів. В цій формі можна досліджувати та виводити якобіан.

Оскільки стани дискретно-часової динамічної системи завжди можна пов'язати з елементами одиничної затримки в реалізації системи, ми можемо описати таку мережу у наступній формі простору станів:

$$x_i(t+1) = \begin{cases} \Psi(u(t), X(t)), & i = 1 \\ x_{i-1}(t), & i = 2, \dots, D \end{cases}, \quad (1.5)$$

i

$$y(t) = x_1(t+1), \quad (1.6)$$

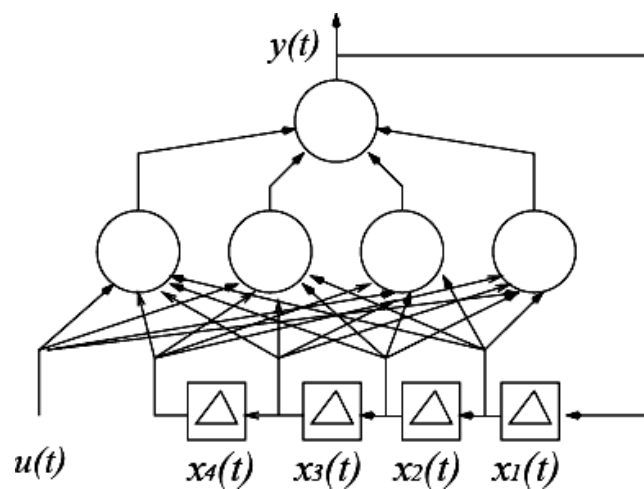


Рисунок 1.5 - А NARX-модель з чотирма затримками виходу.

NARX-мережі не застраховані від проблеми довготривалих залежностей. Якобіан простору станів відображення (з рівняння 1.5) задається як:

$$J_x(t+1.1) = J_x(t+1.1) = \nabla_{X(t)} X(t+1) = \begin{pmatrix} \frac{d\Psi(t)}{dx_1(t)} & \dots & \frac{d\Psi(t)}{dx_1(t)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}. \quad (1.7)$$

Якщо Якобіан на кожному часовому кроці має всі власні значення всередині одиничного кола, тоді стани мережі будуть у зведеному атрактивному

наборі деякого гіперболічного атрактора, і, таким чином, система буде надійно зафіксована в цей час. Як і з будь-якою іншою рекурентною нейронною мережею, це означає, що $\lim_{n \rightarrow \infty} J_x(t, n) = 0$. Таким чином, NARX-мережі будуть також страждати від зникаючих градієнтів і проблеми довготривалих залежностей.

Цей розділ, в основному про моделювання, описує найважливіші та функціонально ефективні моделі, які можна використовувати для ідентифікації та проектування системи HVAC. Оскільки системи HVAC мають чіткі параметри, математична модель буде обрана як метод ідентифікації установки. Математична модель часто є методом вибору через її точність і однозначність у представленні системи. Дана модель використовується при проектуванні нашої установки.

Спочатку розробляється математична модель (ідентифікація основної моделі установки), і потім внутрішня модель (ідентифікація другорядної моделі установки). Через величезні нелінійності в системі HVAC, нелінійна модель «чорної скриньки» буде обрана як ідентифікація метод внутрішньої моделі установки. Існує кілька типів нелінійних моделей «чорної скриньки». Враховуючи, що система HVAC має чисте запізнення та високу інерцію, обрано модель NARX, завдяки її динамічним і рекурентним особливостям, тобто регресор не залежить від параметрів. Про проектування та реалізацію цих двох моделей буде розказано в деталях у третьому розділі.

1.3 Типи керування системою HVAC

Найпростішим контролером, застосованим до системи HVAC, був контролер увімкнення/вимкнення контролер, як досліджено експериментально[17]. Tsien пояснив переваги цього типу контролера: він дешевший і продуктивніший, тоді як Лейт показав недоліки, такі як якість керування, що поступається спостерігається в більшості інших контролерів.

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Високоєфективне керування в галузі систем HVAC виходить за рамки контролера On/Off, як класичний контролер і контролер, стійкий до помилок (FTC).

1.3.1 Класичний контролер

Багато завдань керування в системах HVAC були успішно вирішені за допомогою дуже простої аналогової технології з використанням класичної теорії керування. Ця теорія добре узгоджувалася з технологією свого часу. Існує два основних типи класичних контролерів: компенсатор і PID.

PID-контролер - це трикомпонентний контролер, який має довгу історію в автоматичному керуванні системами HVAC, починаючи з початку минулого століття. Нещодавно його було застосовано до систем HVAC, таких як адаптивні контролери, каскадні контролери та оптимальні контролери. Його також було використано в надійних контролерах, таких як Sliding Mode Control, SMC та H_2 / H_∞ контролери, а також інтелектуальні контролери, такі як Fuzzy контролери, контролери на основі нейронних мереж, відмовостійкі контролери, прямі інверсні контролери (DIC), генетичний алгоритм контролер та гібридні CMAC-PID контролери. У дипломній роботі викладено найважливіші та найактуальніші цілі дослідження щодо цих контролерів.

1.3.2 Налаштування ПД-регулятора методом спроб і помилок

Стратегія налаштування полягає в тому, щоб налаштувати контролер для найкращої реакції на зміну навантаження, потім використовувати одну з заданих точок. Існує багато типів стратегій налаштування, найпростіша з них це метод спроб і помилок, але цей тип є повільним.

Пао сказав, що налаштування методом спроб і помилок може займати надзвичайно багато часу; для налаштування ПД-регулятору потрібно багато годин, щоб досягти сталого стану[22]. Налаштування методом спроб і помилок вимагає від користувача спостереження за реакцією контуру на попередню подію, або зміну заданої точки, або зміну навантаження, а потім вирішити, яке

					ДП.АКІТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		21

налаштування параметр (або параметри) слід змінити, в якому напрямку. Гарольд пояснює карту налаштування методом спроб і помилок; тоді як на рисунку 1.6 зображено реакцію на зміну заданої точки для різних комбінацій пропорційного та інтегрального налаштування[7].

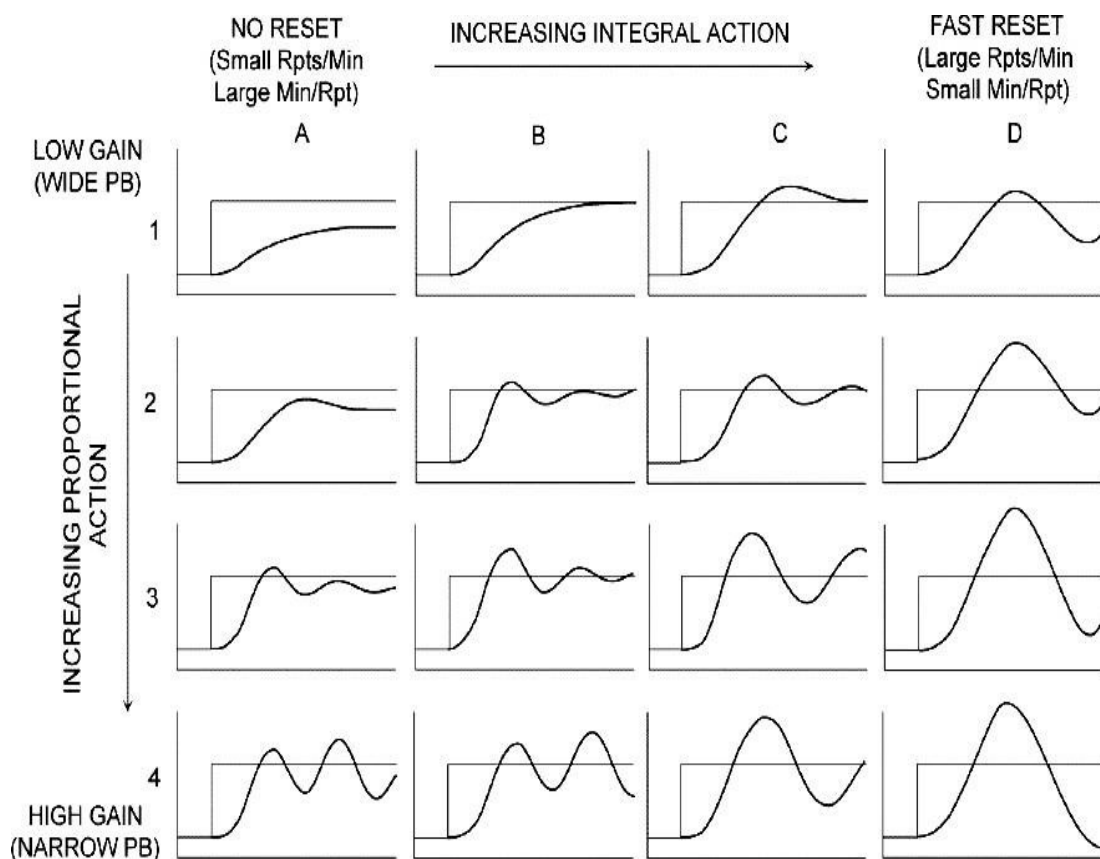


Рисунок 1.6 - Карта налаштування для пропорційного та інтегрального ефектів.

Графік у верхньому лівому куті (графік A1) відображає замкнутий контур реакцію на зміну заданого значення, коли контролер налаштовано з дуже низьким коефіцієнтом підсилення (широка пропорційна смуга) і без інтегральної дії. Якщо інтегральну дію неможливо вимкнути, то лівий стовпець представляє мінімальну інтегральну дію, найбільше можливе значення для хвилин на повтор, або найменше можливе значення для повторів на хвилину. Графік A1 показує перезаглушену реакцію (без коливань), що призводить до

значного відхилення в усталеному стані від заданого значення. Метод спроб і помилок регулює коефіцієнт підсилення до тих пір, поки не буде показана бажана реакція на задане змiну значення. Ця реакція повинна починатися з невеликого перерегулювання і швидко затухати до усталених умов. У міру збільшення коефіцієнта підсилення (пропорційна смуга зменшується), переміститься вниз по лівій стороні карти налаштування. У верхньому лівому куті графіка ми будемо підтримувати низький коефіцієнт підсилення. Цього разу, ми збільшимо швидкість інтегральної дії від дуже повільної (або відсутньої) до швидкої інтегральної дії. Ми робимо це, зменшуючи кількість хвилин на повтор або збільшуючи кількість повторів на хвилину. Реакція процесу така, ніби її повільно згинали вгору, поки помилка не зменшиться до нуля. Це зображено на графіку B1 на рисунку 2.6.

Якщо швидкість інтегральної дії збільшити ще більше, хвіст кривої згинається вгору так швидко, що виникає перерегулювання (графік C1). Ще більше збільшення інтегральної дії призведе до дуже небажаної осциляції контуру, як показано на графіку D1. Таким чином, ми можемо стверджувати, що збільшення швидкості реакції інтегральної дії є рухом у дестабілізуючому напрямку.

Оскільки додавання похідної має стабілізуючий ефект, ми можемо збільшити коефіцієнт підсилення та/або збільшити швидкість інтегральної реакції, обидва з яких мають дестабілізуючий ефект. Однак, більший коефіцієнт підсилення та/або швидша інтегральна дія спричинять більшу дію керування у відповідь на збурення навантаження, і, отже, зменшать максимальне відхилення від заданої точки, а також зменшать час встановлення.

1.3.3 Компенсатор

Контролер використовується для компенсації поганих характеристик установки, такий контролер називається компенсатором, а процедура вибору контролера, і процедура вибору контролера, щоб усунути недоліки установки (такі як покращення стабільності, продуктивності та надійності), називається

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

компенсацією із замкнутим контуром. Ашіш стверджував, що класичні методи керування для проектування систем керування з одним входом, системи керування з одним виходом, засновані на характеристиках їх частотної відповіді, значною мірою покладаються на компенсацію із замкнутим контуром[26].

Компенсація із замкнутим контуром поділяється Сераджі на два типи: каскадна (або послідовна) компенсація, в якій контролер ($h(s)$) розміщується послідовно з установкою, як показано на рисунку 1.7

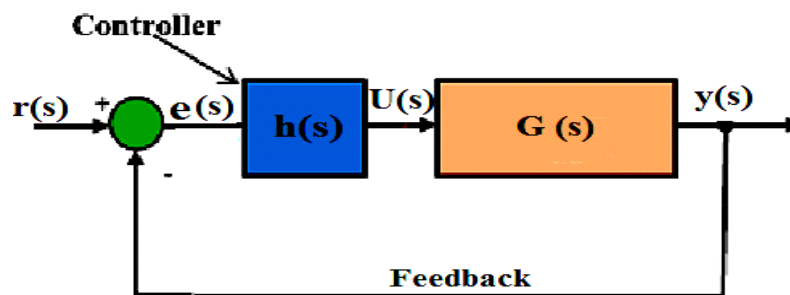


Рисунок 1.7 - Каскадний (або послідовний) компенсатор з установкою $G(s)$.

Компенсація зворотного зв'язку (або паралельна), в якій контролер ($h(s)$) розміщується в шляху зворотного зв'язку $G(s)$ (рисунок 1.8). Каскадна та компенсація зворотного зв'язку представляють собою два альтернативи для досягнення однакових характеристик із замкнутим контуром.

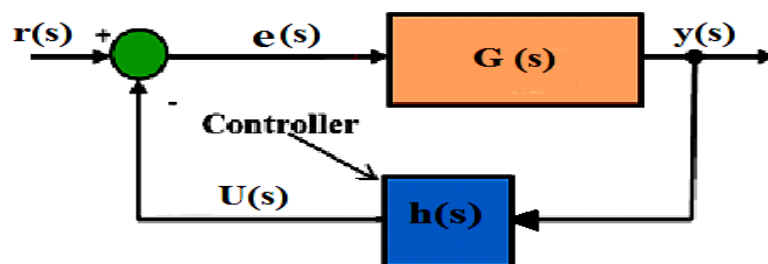


Рисунок 1.8 - Система із замкнутим контуром з установкою $G(s)$ та контролером зворотного зв'язку $h(s)$

Широко використовуваний компенсатор з передавальною функцією
$$h(s) = \frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{s}$$
, де k_d , k_p та k_i – константи, називається пропорційно-інтегрально-похідним (ПІД) компенсатором. ПІД-компенсатор зазвичай буває двох типів: компенсатор затримки, який завжди має негативний фазовий кут, тобто фазове зволікання. І компенсатор випередження, який завжди має позитивний фазовий кут, тобто фазове зволікання.

Щоб поєднати бажані властивості компенсаторів випередження та затримки, іноді краще використовувати компенсатор, який має як фазове зволікання на низьких частотах, так і фазове зволікання на високих частотах. Такий компенсатор називається компенсатором випередження-затримки.

1.3.4 Налаштування ПІД-регулятора методами Циглера-Ніколса

ПІД-регулятор має гнучкість одночасного налаштування трьох параметрів: а саме параметрів K_p , T_i та T_d . Це дозволяє ПІД-регулятору задовольнити проектні вимоги в багатьох практичних випадках, що робить ПІД-регулятор найчастіше зустрічним контролером на практиці. Відповідні значення параметрів K_p , T_i та T_d ПІД-регулятора можна вибрати методом спроб і помилок. Зазвичай це складне завдання, навіть у випадках, коли інженер-конструктор має великий досвід у цій галузі. Щоб полегшити визначення відповідних значень параметрів K_p , T_i та T_d , навіть у випадках, коли математична модель для керованої системи недоступна, Циглер та Ніколс, цитовані Ченгом, запропонували наступні два досить прості та практично корисні методи[5].

1.3.5 Метод перехідної характеристики

У цьому випадку система, що знаходиться під контролем, збуджується одиничною ступінчастою функцією. Це форма перехідної характеристики системи розімкнутого контуру може мати загальний вигляд, показаний на рисунку 1.9. У цьому випадку ми вводимо параметри t_d = час затримки та t_r = час

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

наростання. Прагнучи досягти коефіцієнта демпфування ζ близько 0,2 (що відповідає перерегулюванню близько 25%), значення параметрів K_p , T_i та T_d ПІД-регулятора вибираються відповідно до таблиці 1.1.

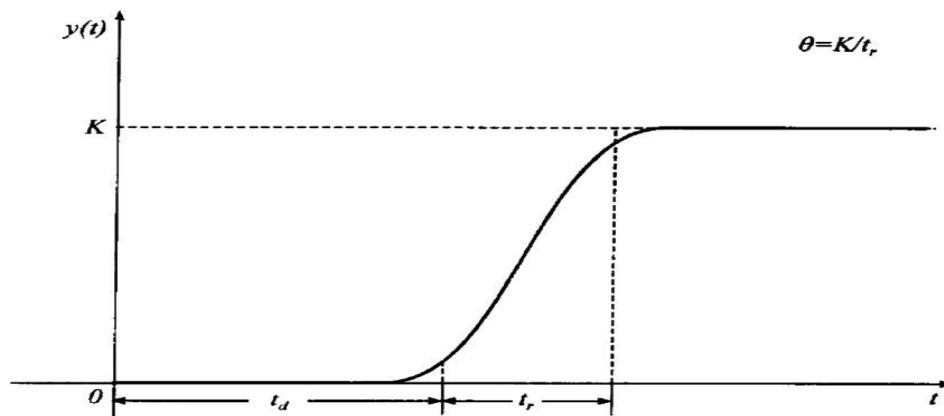


Рисунок 1.9 - Метод перехідної характеристики.

Корисно зазначити, що тут передавальну функцію системи, що знаходиться під контролем, можна наблизити наступним чином [20]:

$$G(s) = K \left[\frac{e^{-t_d s}}{1 + t_r s} \right]. \quad (1.8)$$

Крім того, при використанні таблиці 1.1, передавальна функція ПІД-регулятора $G_c(s)$ стає:

$$\begin{aligned} G_c(s) &= K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] = 1.2 \frac{t_r}{t_d} \left[1 + \frac{1}{2T D_s} + 0.5 T d_s \right] = \\ &= 0.6 t_r \left[\frac{(s + 1/t_d)^2}{s} \right]. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Тобто, ПІД-регулятор має полюс в початку координат і подвійний нуль в $s = -1/t_d$.

Controller		K_p	T_i	T_d
Proportional	P	$0.5\tilde{K}_p$	∞	0
Proportional–integral	PI	$0.45\tilde{K}_p$	$\tilde{T}/1.2$	0
Proportional–integral–derivative	PID	$0.6\tilde{K}_p$	$\tilde{T}/2$	$\tilde{T}/8$

Рисунок 1.10 - Значення параметрів K_p , T_i і T_d з використанням перехідної характеристики

1.4 Метод межі стабільності

На даному етапі починається з керування системою лише пропорційним регулятором (рисунок 1.10). Коефіцієнт K_p поступово збільшується, поки не буде досягнуто стійких коливань (рисунок 1.11). У цей момент ми відзначаємо значення параметра K_p , позначене як $\dot{K}_p$, а також значення відповідного періоду коливань, позначене як $\tilde{T}$. Тоді, параметри K_p , T_i і T_p ПІД-регулятора вибираються відповідно до таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Значення параметрів K_p , T_i і T_p з використанням межі

Контролер	Позначення	K_p	T_i	T_d
Пропорційний	P	$\frac{t_r}{t_d}$	∞	0
Пропорційно-інтегральний	PI	$0.9 \frac{t_r}{t_d}$	$\frac{t_d}{0.3}$	0
Пропорційно-інтегрально-диференціальний	PID	$1.2 \frac{t_r}{t_d}$	$2t_d$	$0.5t_d$

стабільності Ziegler–Nichols Метод [31].

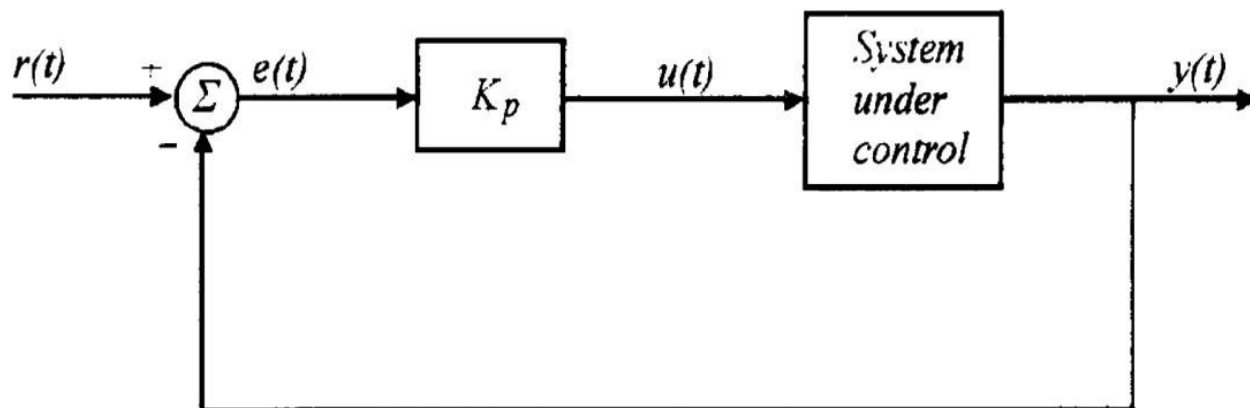


Рисунок 1.11 Система із замкненим контуром із пропорційним регулятором.

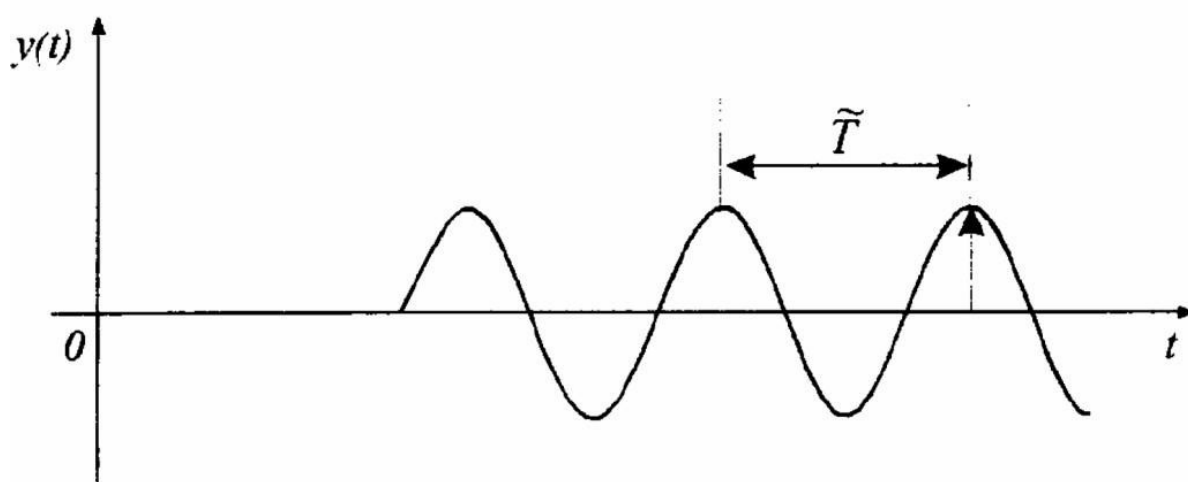


Рисунок 1.12 - Незатухаючі коливання з періодом $\tilde{T}$.

Для даного випадку, і при використанні таблиці 1.2, передавальна функція ПД регулятора описується співвідношенням:

$$G_S(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_{is}} + T_d s \right) = 0.6 K_p \left(\frac{1}{0.5 T} + \frac{T}{8} s \right). \quad (1.10)$$

Тобто, ПД-регулятор має полюс в початку координат і подвійний нуль при $S = -4/\tilde{T}$.

1.4.1 Відмовостійке керування (FTC)

З початку 70-х років виявлення та ізоляція несправностей (FDI) використовується як інструмент для управління несправностями на технологічних установках. FDI може вирішити деякі проблеми, але здається очевидним, що, окрім виявлення та ізоляції несправності, схема FDI не вживає коригувальних дій для вирішення проблеми (або принаймні зменшення наслідків несправності). Якість і показники безпеки можуть досягти тривожних рівнів, коли присутня несправність, навіть якщо її виявлено за допомогою FDI. FDI сама по собі не підтримує роботу системи на необхідному рівні продуктивності, але потрібне втручання людини, щоб усунути несправність та її наслідки [21].

Система відмовостійкого керування (FTCS) перевіряє надмірність для підвищення надійності системи керування, будь то хімічний процес, тепловий процес, електричні двигуни, або навігаційна система. Надмірністю потрібно керувати, щоб система продовжувала правильну роботу за наявності несправності. Отже, якщо компоненти в системі розвинули несправність, система зможе її витримати. Це важливо для підвищення надійності системи. Система відмовостійкого керування складається з основної моделі та внутрішньої моделі. FTC показано як блок-схему взаємозв'язку на рисунку 1.12. Де $G(s)$ - позначає установку; $G_p(s)$ - позначає модель установки; а $K(s)$ - коефіцієнт посилення датчика. Номінальне керування забезпечується контролером $G_c(s)$.

Відповідні сигнали $R(s)$, $e(s)$, $u(s)$, $Y(s)$, $y_s(s)$ і $f(s)$ позначають вхідну команду, помилку, сигнал керування, фактичний вихід, вихід датчика зворотного зв'язку, модель об'єкта вихід і залишок, що вказує на несправність, відповідно. $K(s) = 1$ позначає справний стан датчика; $K(s) = 0$ позначає відмову датчика; і $0 < K(s) < 1$ позначає погіршення стану датчика. Припускаючи, що модель об'єкта є точною, тобто $G_p(s)$ несправність датчика відсутня, тобто $K(s) = 1$, тоді внутрішній контур зовсім не впливає на контролер. Зауважте, що вхід контролера в цьому випадку є.

					ДП.АКІТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$e(s) = R(s) - y_s(s). \quad (1.11)$$

Оскільки $f(s) = 0$.

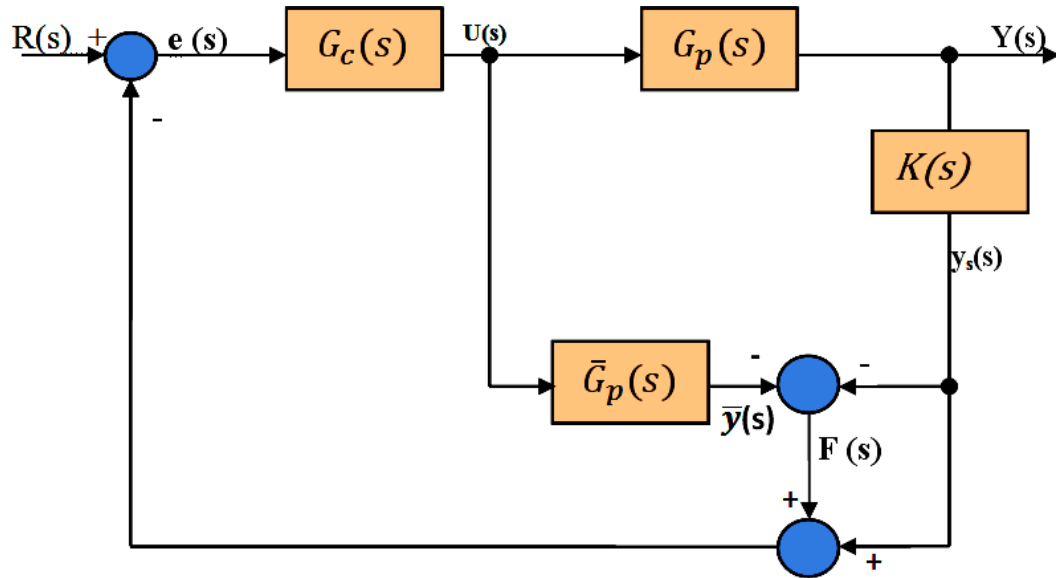


Рисунок 1.12 - Блок-схема структури FTCS.

Таким чином, номінальна продуктивність системи залежить виключно від контролера $G_c(s)$. Коли несправність датчика, тобто $0 < K(s) < 1$ або відмова датчика, тобто $K(s) = 0$, тоді $e(s)$ стає.

$$e(s) = R(s) - y_s(s) - f(s). \quad (1.12)$$

і

$$f(s) = y(s) - y_s(s) \quad (1.13)$$

Підставляючи 1.13 в 1.12, можна показати, що:

$$e(s) = R(s) - y(s). \quad (1.14)$$

Рівняння 1.14 показує, що вхід контролера залежить від вихідних даних моделі установки що еквівалентно фактичному виходу. Гласс та ін. провели експериментальне дослідження, і їхні результати показали, як контроль кінцевого пристрою залежить від наявності несправності, і як відновлення і реконфігурація керуючої дії здатні впоратися з наслідками відмови[7]. Багато системи управління схильні до несправностей або збоїв.

Вихід з ладу важливих компонентів, таких як приводи або датчики, може призвести до незадовільної роботи, зниження доступності, аварійного відключення або навіть значної шкоди для установки, людей і навколишнього середовища. Це зумовило зростаючий інтерес до вивчення аспектів безпеки систем управління.

Після вибору методу ідентифікації системи HVAC за допомогою математичного моделювання (основна модель або реальна модель установки), ми переходимо до вибору вторинної або внутрішньої моделі, в даному випадку моделі NARX, з причин, зазначених вище. Потім слід вибрати контролер, після огляду літератури з управління HVAC, і виходячи з бажаних властивостей системи HVAC (велика теплова інерція (починати раніше, зупиняти раніше), чисте запізнення за часом і нелінійна поведінка, невизначені внутрішні та зовнішні збурення фактори). Виходячи з цих особливостей, ми повинні вибрати між лінійним контролером, представником традиційного ПІД-регулятора, і нелінійним контролером, щоб мати справу з переліченими властивостями HVAC. Відмовостійкий контролер типовий для нелінійної поведінки і має характеристики для роботи з вищезазначеними властивостями системи HVAC. Існує багато різних сучасних альтернатив класичному контролеру, які розрізняються такими методами налаштування, як було згадано раніше. Три таких, дуже точних і високопродуктивних контролери включають ті, у яких ПІД-регулятор налаштований методом проб і помилок, компенсатор і налаштування за методом Циглера-Ніколса. Вони також можуть покращити управління HVAC системою.

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ HVAC

Моделі часто використовуються в науці та техніці. Поняття моделі відноситься до сутностей, що варіюються від математичних описів процесу до копії фактичної системи. Застосування моделей в інженерії можна знайти в дослідженнях і розробках. Цей тип моделі використовується для інтерпретації знань або вимірювань. Моделі для дослідницьких цілей повинні базуватися на фізичних принципах, оскільки вони забезпечують більше розуміння узгодженості, щоб зрозуміти важливість певних спостережуваних явищ.

Існує три основні етапи моделювання; аналіз системи, розробка моделі та аналіз моделі. Другий етап моделювання - це процедура формулювання динамічних ефектів системи, які будуть враховані в математичних рівняннях. Динамічна поведінка може бути охарактеризована динамічними реакціями системи на маніпульовані вхідні дані та збурення. Інше моделювання, яке буде використано в цьому дослідженні, - це модель NARX (нелінійна авторегресія з екзогенним входом), яка може представляти великий клас нелінійні системи. Модель пов'язує прогнозований вихід із сукупністю минулих вхідних даних-вихідні дані.

2.1 Математична модель для системи HVAC

Математична модель — це не просто математичне співвідношення. Це дуже особливе відношення, яке дозволяє здійснювати аналіз системи, тобто можливість визначати реакцію системи на будь-яке збудження. Загалом, існує два способи розробки математичної моделі для будь-якої системи: шляхом впровадження відомих законів природи або шляхом експериментів над процесом. Ми будемо діяти за першим методом, щоб отримати математичну модель для HVAC, яка включає в себе блок обробки повітря (систему нагрівання/охолодження) і кімнату кондиціонування повітря. Ці дві частини проілюстровано на рисунку 1.1. Коли температура кондиціонованого

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

середовища відхиляється від бажаної температури (T_r), відкривається регулюючий клапан, дозволяючи охолодженій воді (G_w) текти. Визначення параметрів системи та змінних наведено нижче: M_h - це якість теплообмінника (блоку обробки повітря) АНУ, (кг); M_r - це повітря якість кімнати кондиціонування повітря, (кг); G_a і G_w - це потік повітря та холодної води (або гарячої води) відповідно, (кг/с); C_w і C_h - це питомі теплоємності води та теплообмінника відповідно, (кДж/кг $^{\circ}\text{C}$); T_m - температура суміші свіжого повітря, ($^{\circ}\text{C}$); T_l - температура після теплообмінника, ($^{\circ}\text{C}$); T_h - температура поверхні теплообмінника, ($^{\circ}\text{C}$); T_{win} і T_{wout} - температури води, що подається до теплообмінника, і води, що виводиться з теплообмінника, відповідно, ($^{\circ}\text{C}$). Кімната Q , T ззовні: є збуреннями всередині теплового навантаження; і зовнішньої температури відповідно є неконтрольованими (вхідний сигнал збурень для процесу).

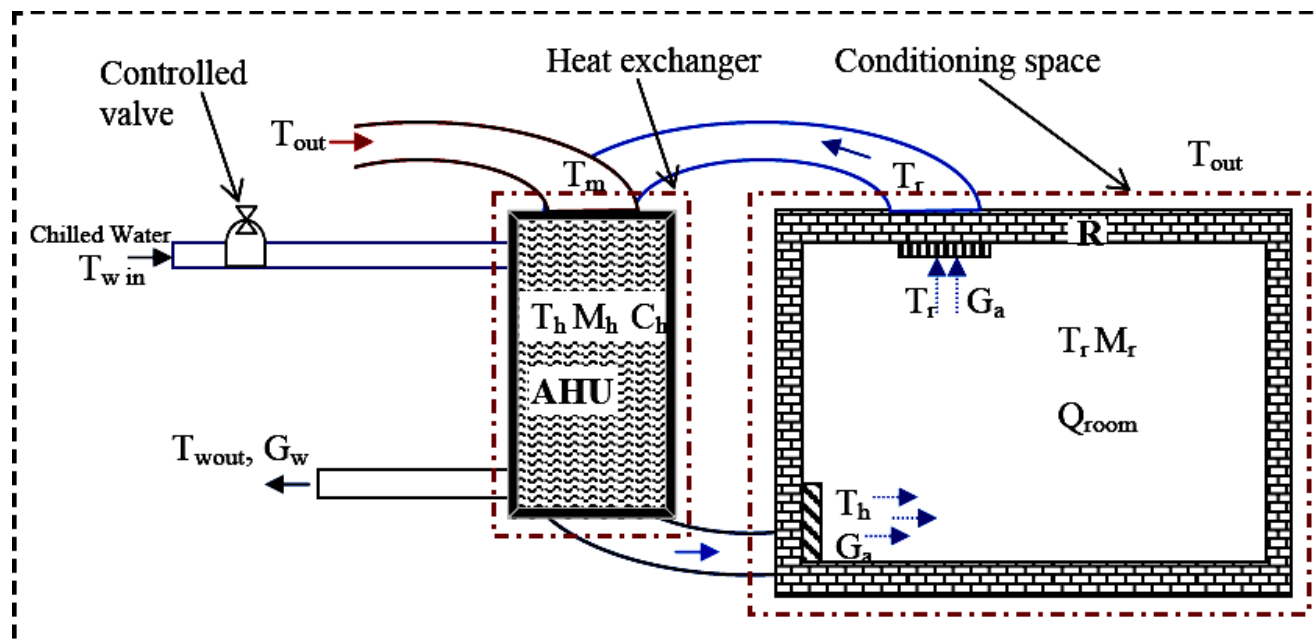


Рисунок 2.1 - Система кондиціонування повітря в приміщенні.

Адіабатичне змішування свіжого та зворотного повітря, якщо немає теплопередачі від повітроводів до навколишнього середовища, процес змішування є адіабатичним, що близько наближене ізольованими повітроводами. Рівняння, що описують цей процес, включають повітряний баланс маси та енергетичний баланс, відповідно:

$$\frac{G_r}{G_{ou}} = \frac{T_m}{T_r} - \frac{T_{ou}}{T_m}, \quad G_r (T_r - T_m) = G_{ou} T_m - T_{ou}$$

$$T_m = \frac{G_r T_r + G_{ou} T_{ou}}{G_{ou} + G_r}, \quad (2.1)$$

де T_m - температура змішування свіжого та зворотного повітря (С⁰) G_r , G_{ou} є відповідно, подають свіжі потоки повітря (кг/с).

2.2 Математична модель теплообмінника

Записується наступне рівняння теплового балансу для теплообмінника (АНУ) на основі закону збереження енергії (рівняння теплового балансу). (Швидкість накопичення тепла) = (Швидкість надходження тепла) – (Швидкість віддачі тепла):

$$M_h C_h \frac{dth}{dt} = G_a C_a (T_m - T_1) - G_w C_w (T_{wout} - T_{win}) \quad (2.2)$$

$$M_h C_h \frac{dth}{dt} = G_a C_a (T_m - T_1) - G_w C_w (T_{wout} - T_{woun})$$

$$M_h C_h S T_1 (s) + G_a C_a T_1 (S) = G_a C_a T_1 + G_w (S) C_w (T_{win} - T_{woun})$$

$$T_1 (S) (M_h C_h S + G_a C_a) = G_a C_a + G_w (S) C_w (T_{win} - T_{woun})$$

$$T_1 (S) = \frac{G_a C_a T}{m} + G_w (S) C_w (T_{win} - T_{wout})$$

$$T_1(S) = \frac{C_w}{M_h} \left(\frac{T_{wout}}{c_h} S + \frac{G_a}{C_w} + G_w \right)$$

$$\frac{Tr(S)}{T_{ou} + Q_{room}} = \frac{G_a \frac{C_a}{c_a}}{M_r} = \frac{G_a C_a}{M_r C_a} S + \frac{1}{R} \frac{T_r}{T_s} (S)$$

$$T.F. = G(S) = G_1(S) \times G_2(S) = \frac{K_1}{S+1} \frac{K_2}{S_1} \quad (2.3)$$

					ДП.АКІТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		34

Тут температура повітря, що подається в приміщення, дорівнює температурі обробленого повітря. Представляється передавальна функція теплообмінника (рівняння 2.3) у вигляді блоку діаграмної моделі, як показано на рисунку 2.2

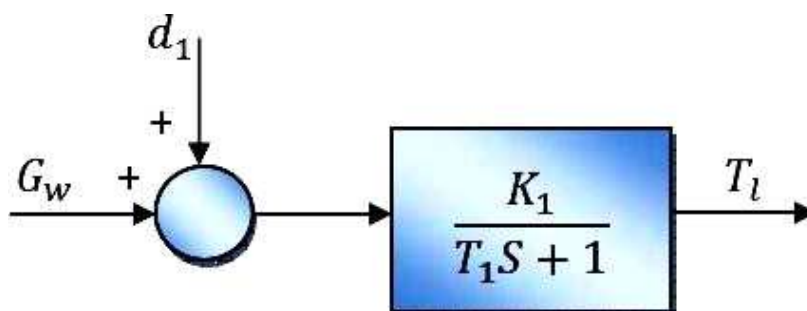


Рисунок 2.2 - Блок-схема моделі теплообмінника.

2.2.1 Модель простору кондиціонування

Припустимо, для моделі регулювання температури простору кондиціонування, що: простір є герметичним і немає прямого теплообміну між внутрішніми та зовнішніми частинами; температура в просторі приблизно рівномірна; теплоємністю дверей, вікон та будь-яких інших об'єктів у цьому середовищі можна знехтувати. І рівняння теплового балансу подібне до рівняння теплообмінника. Тут температура повітря, що подається в приміщення, дорівнює температурі обробленого повітря (АНУ), і $T_s = T_l$. Тут припустимо, що питома теплоємність повітря в системі кондиціонування приміщенні дорівнює питомій теплоємності припливного повітря, і $C_r = C_a$:

$$\frac{T_r}{T_{ou}}(S) = \frac{G_a C_a}{M_r C_a} S + G_a C_a + 1. \quad (2.4)$$

$$\frac{T_r}{T_{ou}}(S) = \frac{G_a C_a}{M_r C_a} S + G_a C_a + 1 \quad G_2(S) = Tr + G_2(S) = K_2. \quad (2.5)$$

2.2.2 Перетворення Лапласа для рівняння за нульової початкової умови

					ДП.АКІТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		35

Можна представити передавальну функцію простору кондиціонування (рівняння 2.5) за допомогою блоку діаграмної моделі, як показано на рисунку 2.3.

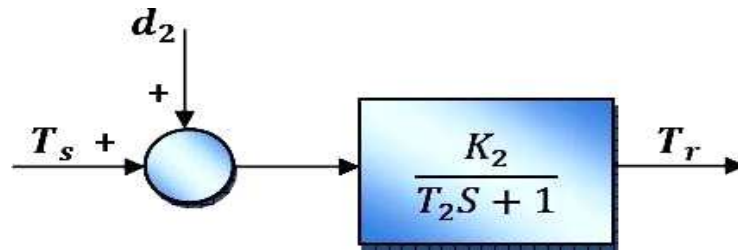


Рисунок 2.3 - Блок-схема моделі простору кондиціонування.

Передавальну функцію всіх компонентів можна отримати з рівнянь 2.3 і 2.5

$$T.F. = G(s) = G_1(s) \times G_2(s) = \frac{K_1 K_2}{(T_2 S + 1)(T_1 S + 1)}. \quad (2.6)$$

Блок-схему моделі системи HVAC можна представити в каскадному вигляді для теплообмінника та кондиційованого простору, як показано на рисунку 2.4

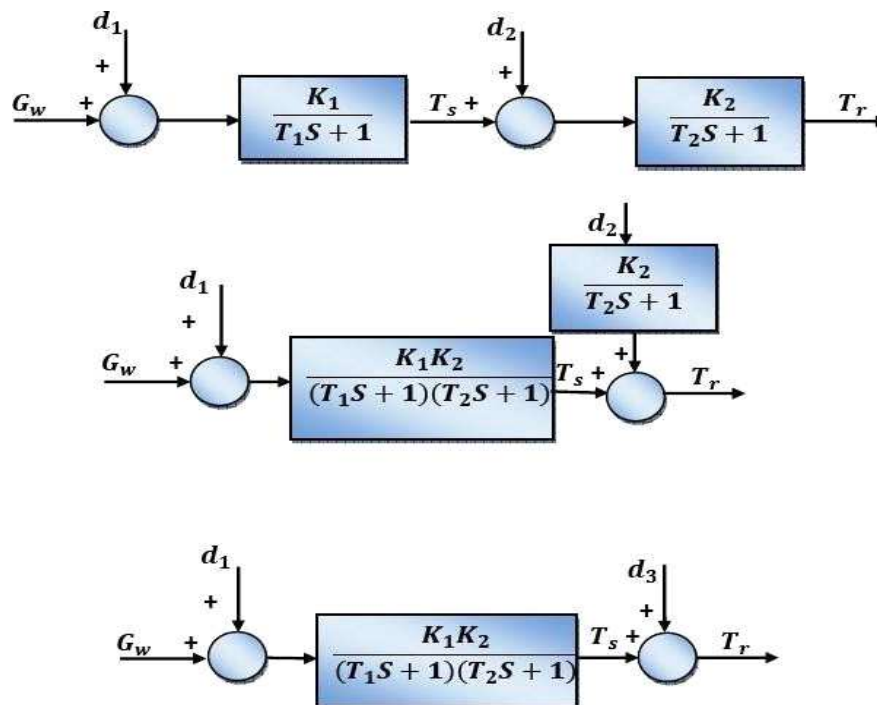


Рисунок 2.4 - Відкрита математична блок-схема системи регулювання температури в приміщенні.

Де збурення визначається з формули:

$$d_3 = d_2 \frac{K_2}{(T_2 S + 1)}. \quad (2.7)$$

Параметри для моделі в рівнянні (3.6) потребують уточнення; для цього спочатку ми припускаємо, що кондиціоноване приміщення має розміри 10м x 8м x 4.5м. Навколишнє повітря має питому теплоємність $C_a = 1.0$ кДж/кг $^{\circ}\text{C}$ і щільність 1.2 кг/м [10].

Виходячи з критерію в галузі опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, кількість вдихів у приміщенні з кондиціонером і розрахунок припливного повітря становить $C_a = 1.08$ kg/s, тепловий опір стіни становить $1/R = 0.2$ kW/ $^{\circ}\text{C}$ і температурна похибка подачі холодної води та зворотної води до теплообмінника влітку становить $T_{win} - T_{wout} = -5$ $^{\circ}\text{C}$.

Зрештою, параметри середнього процесу, теплообмінника, розраховуються як наступні: $K_1 = -19.35$ $^{\circ}\text{C}$ s/kg, $T_1 = 30$ s. Параметри приміщення з кондиціонером розраховуються як наступні: $K_2 = 0.4$ $^{\circ}\text{C}$ s/kg, $T_2 = 338$ s. Отже, на рисунку 2.4 контрольований об'єкт (передавальна функція $G(s)$) може бути виражена як:

$$T.F = G(s) = \frac{19.35}{30s + 1} \times \frac{0.4}{338s + 1} = \frac{7.74}{10140s^2 + 368s + 1}. \quad (2.8)$$

Тому загальний вигляд передавальної функції (рівняння 2.7) є:

$$G(S) = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{T_r}{G_v} = \frac{7.74}{(30S + 1)(338S + 1)} = \frac{7.74}{10140S^2 + 368s + 1}$$

$$G(s) = k \frac{9.8 \times 10^{-5}}{s^2 + 0.036s + 9.8 \times 10^{-5}}. \quad (2.9)$$

де k — коефіцієнт посилення установки

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.3 Аналіз продуктивності моделі

Після того, як модель визначено передавальною функцією, є можливість отримати більше інформації про поведінку математичної моделі (процесу) з розімкнутим контуром, нас цікавить поведінка виходу, коли вхідні сигнали змінюються. Ця інформація можна отримати аналітичним розв'язком моделі шляхом аналізу стабільності, перехідного відгуку та похибки в усталеному стані.

2.3.1 Бажані технічні характеристики

На основі стандартів ASHRAE для промислового кондиціонування повітря, щодо розміру приміщення для кондиціонування, час реагування для досягнення бажаної температури всередині є різним від 2,5 до 3,5 хв., тому ми беремо середнє значення часу встановлення, яке становить $T_S = 3$ хв.[27]. Щоб вибрати максимальний перерегулювання (яке не повинно перевищувати) з контролю літератури, це заплутана задача, оскільки література з систем керування, на відміну від вибору стандарту максимального перерегулювання, тому ми підемо на компроміс між екстремістськими міркуваннями щодо різниці. Рональд сказав, що максимальне перерегулювання 10% є загальноприйнятним, тоді як Пао прийняв емпіричне налаштування Коена-Куна (коефіцієнт загасання в чверть відгуку (тобто 50% макс. перерегулювання)), щоб отримати найбільший пропорційний коефіцієнт для повільної реакції системи. Тому, виходячи з цих екстремістських думок, максимальне перерегулювання становить. Макс. $OV=30\%$. Інші параметри цілі продуктивності, такі як час піку та час наростання, мають відношення до T_S і % OS. Час піку $T_P = 54,18$ сек. = 0,903 хв. і час наростання $T_r = 38,94$ сек. = 0,65 хв. Для статичної продуктивності нам потрібна нульова усталена похибка, щоб подолати різницю температур всередині приміщення, яка є наслідком великого об'єму простору для кондиціонування.

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.3.2 Стабільність моделі

Визначення стабільності для лінійних систем можна перекласти наступним чином: критерій: лінійна система керування є нестабільною, якщо будь-які корені її характеристичного рівняння знаходяться на уявній осі або праворуч від неї. В іншому випадку система є стабільною. Передавальна функція об'єкта має вигляд: $G(s) = \frac{7.74}{10140s^2 + 368s + 1} = \frac{0.00076}{(s+0.033)(s+0.00296)}$.

Корені характеристичного рівняння $\Delta(s)$ дорівнюють (-0.033) і (-0.00296) . Таким чином, згідно з визначенням стабільності, об'єкт є стабільним.

2.3.3 Перехідна характеристика

Бажані характеристики відстежувальної системи будь-якого порядку можуть бути визначені з точки зору перехідної характеристики на одиничний ступінчастий вхідний сигнал. Оскільки передавальна функція моделі об'єкта для системи HVAC, другого порядку, і криві перехідних процесів для системи другого порядку показують ряд значних характеристик. Продуктивність моделі оцінюється з точки зору обчислення цих характеристик наступним чином.

Час встановлення T_c :

$$G(s) = Y(s) = \frac{7.74}{10140s^2 + 368s + 1} \Rightarrow Y(s) = R(s) \frac{7.74}{10140s^2 + 368s + 1}.$$

Виконавши обернене перетворення, отримуємо перехідну характеристику:

$$y(t) = 7.74 - 8.49e^{\frac{-t}{338}} + 0.754e^{\frac{-t}{30}}. \quad (2.10)$$

$$y(t) \rightarrow \infty = 7.74$$

$$y(t) = 7.74 \times 0.98 = 7.58 y(t)$$

перетворення часу на $T_s = 1630 \text{ sec} = 22.6$ хвилин.

					ДП.АКІТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Корисним параметром для опису перехідної характеристики системи керування є час встановлення. Це час, необхідний для того, щоб крива реакції досягла і залишалася в межах діапазону певного відсотка (зазвичай 5% або 2%) від кінцевого значення. Підставивши $y(t) = 7.58$ в рівняння 3.10 і розв'язавши відносно часу, t , знаходимо час встановлення $T_s = 1630$ сек. = 22.6 хв.

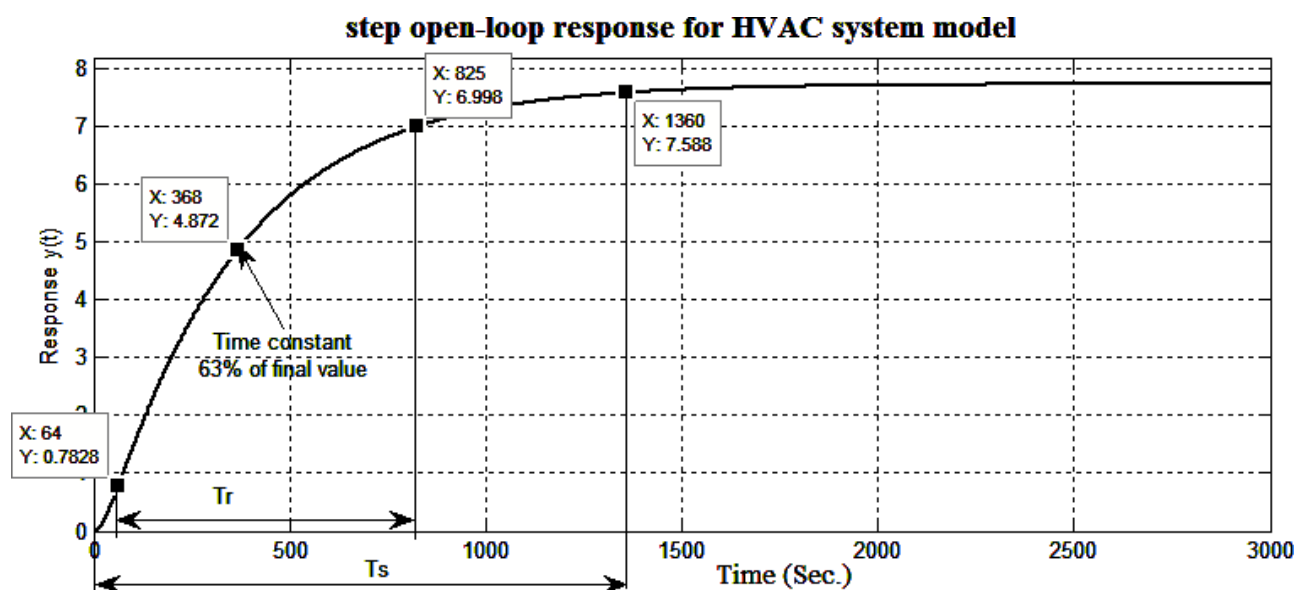


Рисунок 2.5 - Перехідна характеристика моделі розімкнутого контуру.

Часова константа або, в термінах HVAC, теплова часова константа, яка є часом необхідним для досягнення температурою кондиціонованого приміщення 63,2% нової температури. Теплова часова константа залежить від масової витрати охолодженої води, масової витрати подачі повітря та об'єму кондиціонованого приміщення. Часова константа є показником того, як швидко вихід приходить до рівноваги після стрибкоподібної зміни вхідного сигналу. Часову константу можна виразити в будь-яких зручних одиницях часу, таких як секунди, хвилини тощо. Для промислового процесу контролю, зазвичай, найзручніше виражати T в хвилинах. З рівняння 2.10 часова константа - це час, необхідний для того, щоб стрибова реакція зросла до 63% свого кінцевого значення $y(t) = 0,63 \times y(t \rightarrow \infty) = 4,87$, Нехай $y(t)$ у рівнянні 2.10 і розв'язуючи

для часу, t , ми знаходимо постійний час T , що дорівнює $T = 368 \text{ сек.} = 6,13 \text{ хв.}$
Часову константу також можна оцінити за полюсами характеристичного рівняння

$\Delta(s) \in (-0,033) \text{ і } (-0,00296)$. Можна сказати, що полюси розташовані в точці, оберненій до часової константи.

Час наростання є показником того, як швидко система реагує на стимул. Для коливальних або недозатухаючих систем це час, коли реакція досягає кінцевого значення, у першу чергу. Для передемпфированих систем це час, необхідний для відповіді, щоб перейти від 10% до 90% кінцевого значення. Час наростання визначається шляхом розв'язання рівняння 2.10 з різниці в часі при

$$y(t) = 0.9 \times y(t) = 6.96 \text{ і } y(t) = 0.1 \times y(t \rightarrow \infty) = 0.774. \text{ Отже, } T_r = 63.5 - 824.2 = 760.7 \text{ сек.} = 12.68 \text{ хв.}$$

2.3.4 Похибка усталеного режиму e_{ss}

Похибка усталеного режиму є специфікацією часової області. Це не динамічна специфікація, але це важливий критерій продуктивності. У багатьох циклах (але не у всіх) бажана нульова похибка усталеного режиму, тобто значення контрольованої змінної має зрештою вирівнятися на заданому значенні. Похибка усталеного режиму для моделі об'єкта з розімкнутим контуром становить

$$e_{ss}(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} SR(s) [1 - G(s)], \quad (2.11)$$

де $R(s) = 1/s$

Рівняння 2.11 пов'язує похибку усталеного режиму з вхідним сигналом і типом $G(s)$.

2.4 Проектування моделі NARX

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Мета проектування моделі полягає в побудові відповідної ідентифікаційної моделі (рисунок 2.3), яка при подачі того ж вхідного сигналу (u), що й на установку (математичну) модель, а також як нелінійна авторегресійна модель із зовнішніми входами (NARX), генерує вихід $\hat{u}$, який наближає u . Однак на практиці неможливо отримати ідеальну модель. Тоді рішення полягає у виборі θ у рівнянні (2.6) таким чином, щоб обчислені значення були якомога ближчими до виміряного виходу u . Щоб отримати точне значення θ для моделі NARX, ми діємо згідно з блок-схемою, показаною на рисунку 2.6

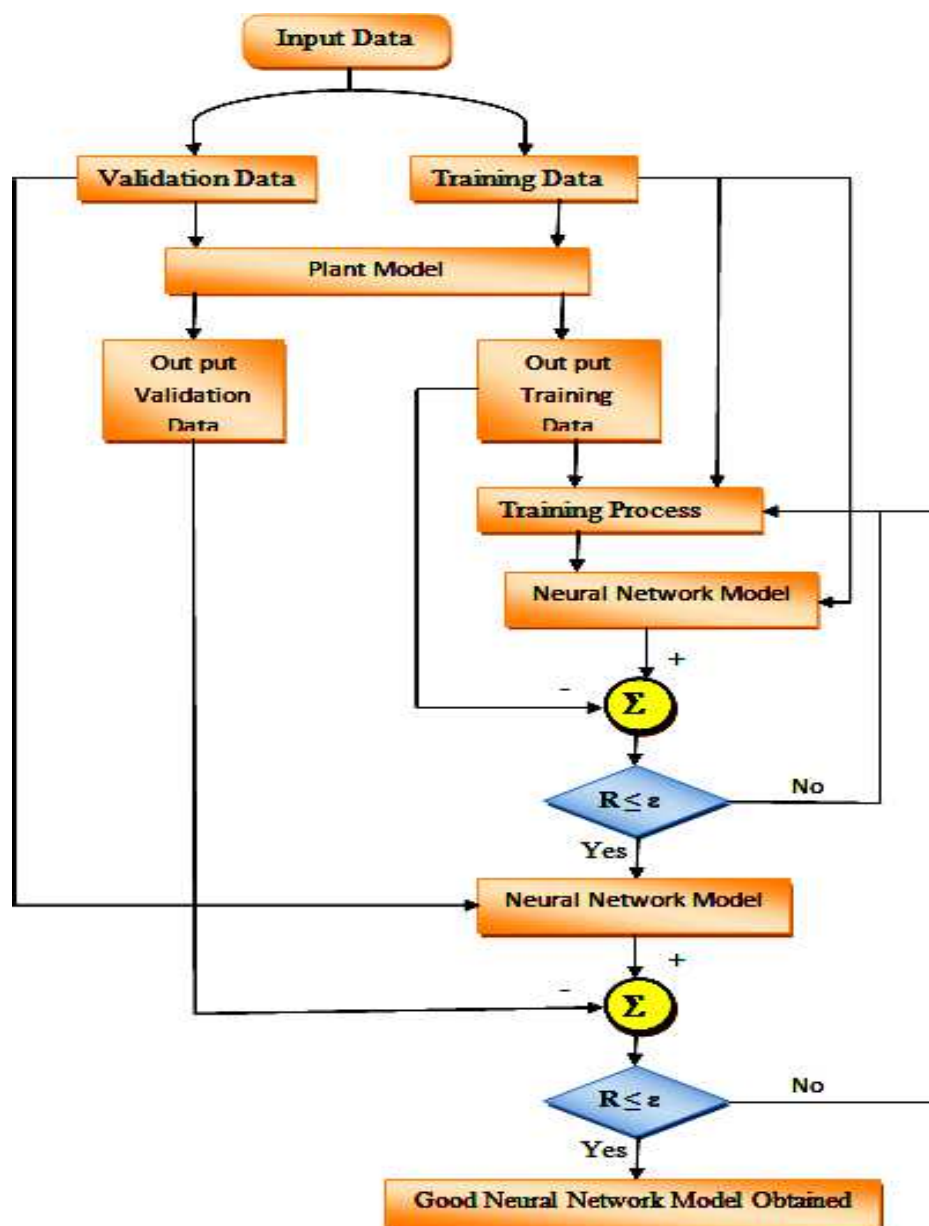


Рисунок 2.6 - Блок-схема методології для моделювання.

2.4.1 Набори вхідних/вихідних даних

Навчальний сигнал вхідного виходу має бути обраний для вибірки в широкому діапазоні вхідних даних системи, і тому набір даних для навчання та перевірки складався з восьми тисяч, чотири тисячі для кожного навчання та перевірки. Набір вхідних даних вибрано випадковим чином в діапазоні від -4,1 до 6 кг/сек . перегрітої пари. Ці значення забезпечують повне збудження положення клапана, дозволяючи мережі розпізнавати поведінку системи. Коли на математичну модель подається набір вхідних/вихідних даних, відповідь показана на рисунку 2.7, одна для навчання, а інша для перевірки.

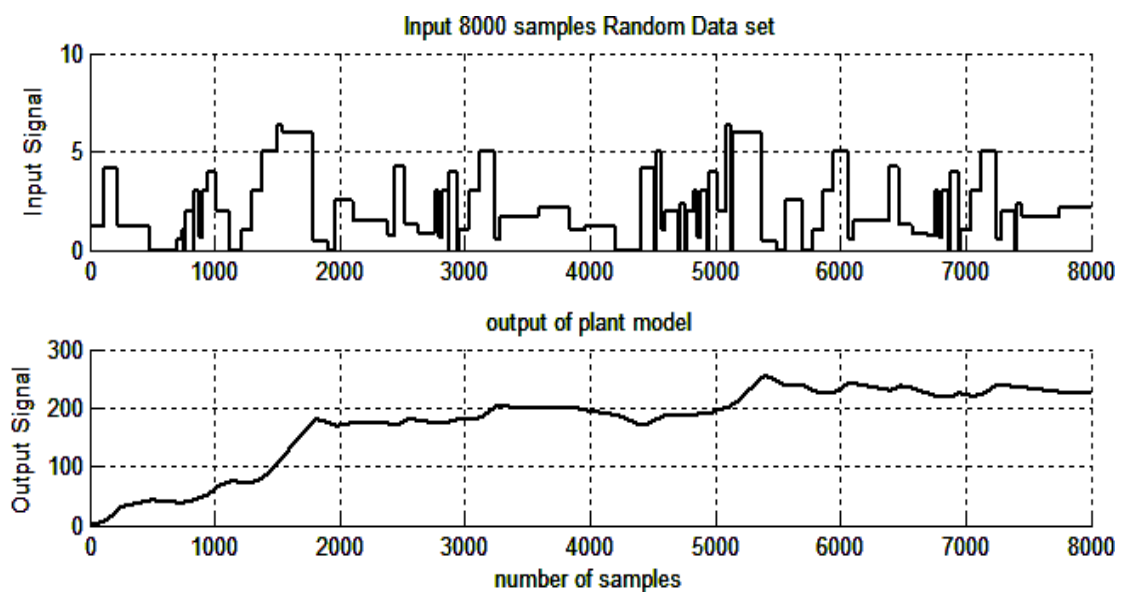


Рисунок 2.7 - Набір вхідних і вихідних даних, використаний у навчанні.

Навчання моделі NARX є найбільш трудомістким завданням у розробці додатку NARX. Дуже важко визначити, який алгоритм навчання буде працювати найшвидше для даної задачі, оскільки успіх залежатиме від багатьох факторів, включаючи складність задачі, кількість точок даних у навчальному наборі, кількість ваг і зміщень у мережі та цільову похибку. Тому навчання зворотного поширення, засноване на ітераційному градієнтному алгоритмі призначене для мінімізації середньоквадратичної похибки між виходами прямого поширення NARX і бажаним виходом. Найбільш використовуваним алгоритмом навчання є зворотне поширення (мережі прямого поширення).

Алгоритм навчання зворотного поширення, проілюстрований на рисунку 2.8, обрано.

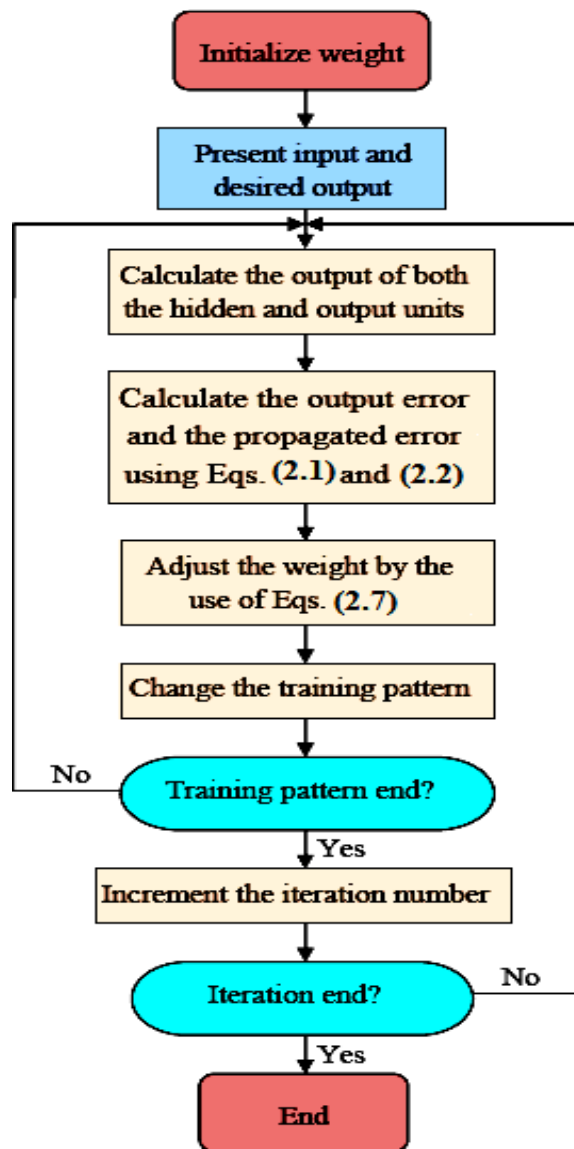


Рисунок 2.8 - Блок-схема алгоритму навчання зворотного поширення.

Навчання NARX включає процес коригування ваг (w) і терміну зсуву (b) по всій мережі, доки вона не поводитись якомога ближче до продуктивності цілі, зазначеної на рисунку 2.9 (e).

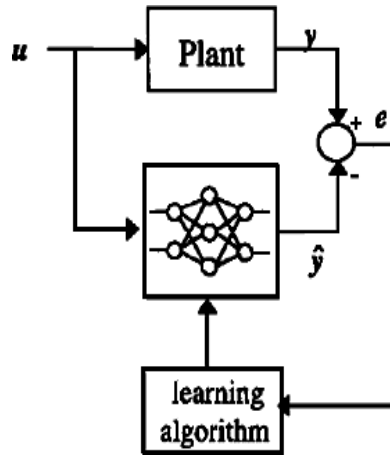


Рисунок 2.9 - Схематична діаграма процесу навчання.

Під час кожної ітерації навчання обчислюється сума квадратів похибок (SSE), щоб перевірити, чи вихід мережі, отриманий в результаті коригування ваги, менший за критеріальне значення α . Критеріальне значення - це максимально допустима SSE для кожної нової ваги мережі, вибраної досить малою, щоб бути прийнятною для цієї мети. Таким чином, умовою для добре навченої мережі є те, що:

$$SSE = \sum_{i=1}^N [u(t) - \hat{u}(t)]^2 < \alpha. \quad (2.12)$$

Щоб обчислити середньоквадратичну похибку (MSE) для регресії: $MSE = \text{сума (SSE)}/\text{довжина (ітерація)}$. Результат алгоритму навчання моделі NARX рослини шляхом ітерацій є показано на рисунку (2.10), де значення α вибрано як 1×10^{-10} .

Результат навчання продуктивності таким чином отриманий, показує значну перевагу над цільовим значенням (α).

Рисунок 2.10 - Середньоквадратична похибка через 1000 ітерацій.

Навчання проводиться шляхом застосування 4000 вибірових вхідних сигналів до моделі та перевірки вихідних даних. Як показано на рисунку 2.11, модель відображає навчальний набір. Однак можуть виникнути проблеми через надмірне пристосування. Тому, перевірочні тести повинні бути виконані на отриманій моделі.

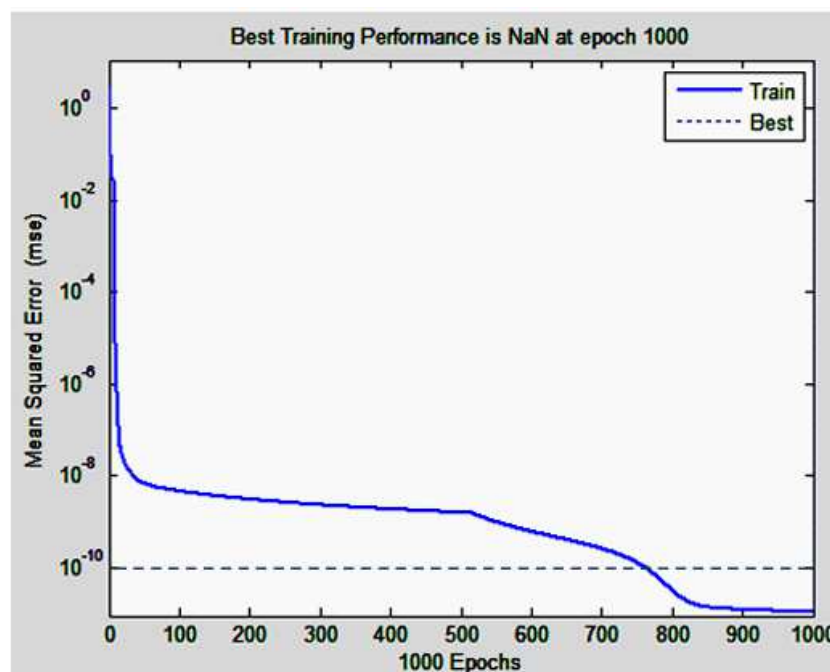
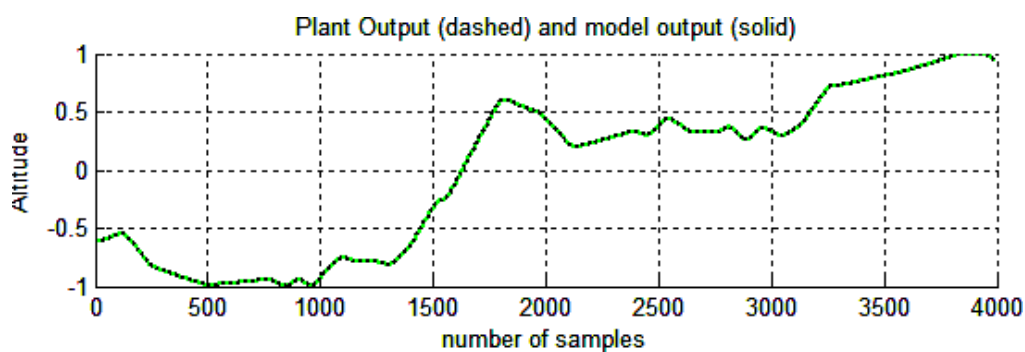


Рисунок 2.11 - Вихідні дані для рослини та моделі для 4000 випадкових сигналів.

2.4.2 Перевірка моделі

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		46

Наступним кроком після ідентифікації є перевірка моделі. Цей крок призначений для тестування чи є оцінена модель достатньо хорошою для її передбачуваного використання (щоб перевірити, чи модель може добре відповідати тестовим даним чи ні).

Ми застосовуємо вхідні сигнали з набору даних валідації. Вихід $\hat{y}$ моделі порівнюється з виходом установки y для обчислення залишків (e), як показано на рисунку 2.6.

Набір даних вхід-вихід, отриманий як з установки, так і з моделі, порівнюється і показано на рисунку 2.12.

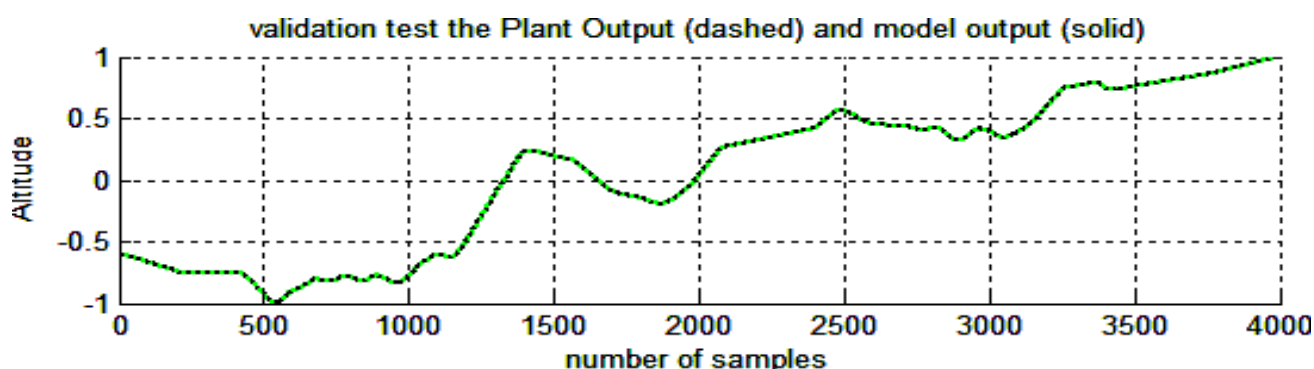


Рисунок 2.12 Перевірка моделі за допомогою набору даних валідації.

Рисунок (2.12) показує, що модель відповідає набору валідації, і ми можемо сказати в межах довірчих інтервалів, що дає нам сильний сигнал про те, що модель є прийнятною.

У математичному моделюванні нашої системи HVAC використовується тепловий баланс рівняння. Потім представляється процедура, якої було дотримано для побудови математичної моделі з фізичних параметрів теплообмінника та кондиціонування простору. Після цього досліджується математична модель, аналізуючи її продуктивність; щоб порівняти результат дослідження з бажаною специфікацією продуктивності, модель демонструє дуже повільну продуктивність і високу сталу похибку. Тим часом, модель NARX, яка є одним із типів моделей "чорної скриньки", була реалізована за допомогою штучних нейронних мереж. Вісім тисяч пар вхідних-вихідних

даних (набір вхідних даних вибрано випадковим чином) використовуються для навчання та валідації. Використовуючи нейронну мережеву панель інструментів із програмного забезпечення MATLAB, завдання моделювання виконується за допомогою алгоритму навчання зворотного поширення. Однак отримання мережевої (NARX) моделі, яка відповідає критерію навчання, не обов'язково означає, що ми отримали правильну модель, оскільки можуть бути випадки перенавчання або недонавчання. З цієї причини проводяться валідаційні тести щоб перевірити, чи може модель дійсно представляти HVAC.

Застосовуючи валідаційні тести, модель NARX може пройти або не пройти тест на відповідність. Невеликий мережевий шар, прихований лише в десяти нейронах, був знайдений занадто адекватно і динамічно моделює систему HVAC. Модель NARX тепер готова до використання для керування програмами.

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ HVAC

У цьому розділі буде представлено результат моделювання установки та розробки контролерів за допомогою SIMULINK, одного з інструментів MATLAB. За допомогою SIMULINK ми можемо легко будувати моделі з нуля, розробляти та покращувати існуючі моделі. Симуляції є інтерактивними, тому ми можемо змінювати параметри установки та отримувати відповіді в реальному часі. За допомогою SIMULINK ми можемо вийти за межі ідеалізованих лінійних моделей, щоб досліджувати більш реалістичні нелінійні моделі та інші аспекти реальних явищ. Роблячи це, ми підтверджуємо валідацію розробленої системи FT-керування в системі HVAC, порівнюючи відмовостійкий та класичні ПД-регулятори, як показано в моделюваннях.

3.1 Моделювання та результати для моделювання

Для досягнення поставлених цілей щодо поведінки системи HVAC у цій роботі, обов'язково необхідно створити реальну модель установки (модель NARX), подібну до теоретичної моделі установки (математичної). Результати навчання та валідації, отримані за допомогою цієї реальної системи, повинні відображати наші поставлені цілі. Модель, обрана в другому розділі цієї роботи, і чия розробка та реалізація детально описані в третьому розділі, буде змодельована в цьому розділі, щоб показати, як ми отримуємо результати, які очікуємо.

Ваги як для прихованого шару, так і для вихідного шару спочатку рандомізовані в околицях значень -0.5 і $+0.5$ перед навчанням. Занадто багато прихованих нейронів можуть призвести до небезпеки перенавчання, тоді як занадто мало нейронів спричиняють недонавчання. З цієї причини ми обрали десять нейронів у прихованих нейронних шарах, як пізніше було

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		49

виявлено в структурі нашої реальної моделі. Навчання показує хороші результати, коли використовуються десять прихованих нейронів і 4000 зразків вхідних даних використовуються як навчальний набір.

Застосовується навчальний набір як вхідний сигнал до моделі та перевіряємо вихід. Помилка результатів виводу між установкою (математичною моделлю) та моделлю (NARX) становить показано на рисунку 3.1

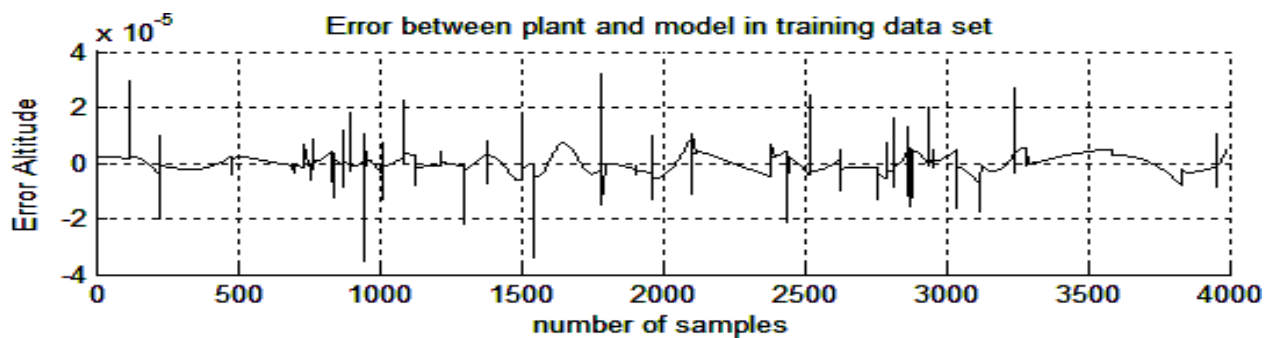


Рисунок 3.1 - Помилка набору навчальних даних.

Як показано на рисунку 3.1, похибка незначна ($e(s) = 0$). Тому робиться висновок, що модель відповідає набору навчальних даних.

3.1.1 Результат валідації

Небезпека перенавчання або недонавчання може зашкодити результатам підгонки моделі. Здійснюється протидія цій можливості, проводячи валідаційні тести, щоб забезпечити та встановити правдивість результатів навчання.

Щоб отримати результат валідації, необхідно розрахувати статистику залишків. Спочатку ми повинні застосувати вхідний сигнал з набору валідаційних даних до моделі (тобто NARX). Вихідні дані ($\hat{y}(s)$ рисунок 2.9) моделі порівнюються з вихідними даними установки (математичної моделі) ($y(s)$) для обчислення залишків $e(s)$ або $F(s)$ у рівнянні (2.17). Набір вихідних даних помилок між установкою та моделлю показано на рисунку 3.2.

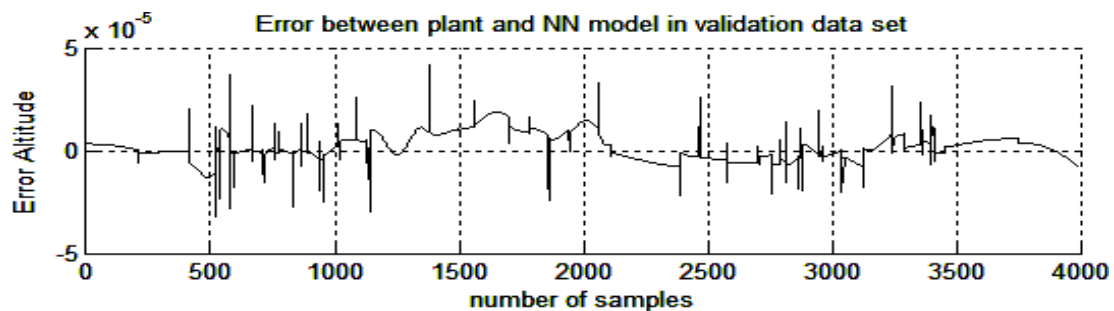


Рисунок 3.2 - Помилка набору валідаційних даних.

Рисунок 3.2 чітко показує, що вихідні дані моделі відповідають фактичним вихідним даним, даючи нам достатньо інформації для встановлення якості та функціональної надійності нейронної мережі.

3.1.2 Результат моделювання структури

Архітектура мережі (NARX) містить два шари з гіперболічним тангенсом ($\tanh$) функцією активації та один вихідний шар з функцією активації purelin . Приховані шари складаються з десяти нейронів, а вихідний шар складається з одного нейрона, оскільки система має лише один вихід. Архітектура мережі проілюстрована на рисунку 3.3, 3.4 та 3.5

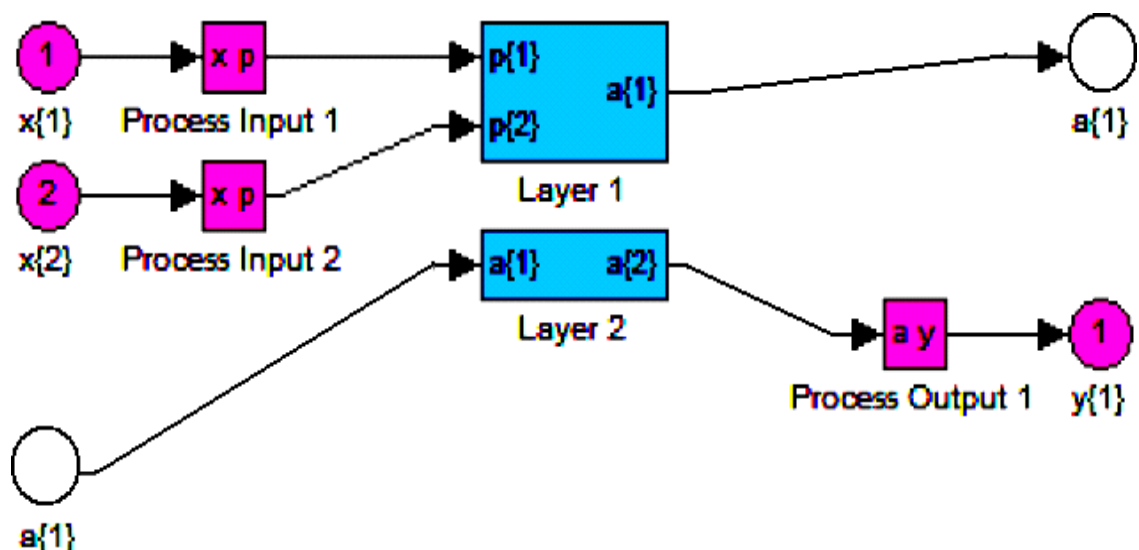


Рисунок 3.3 - Структура моделі NARX.

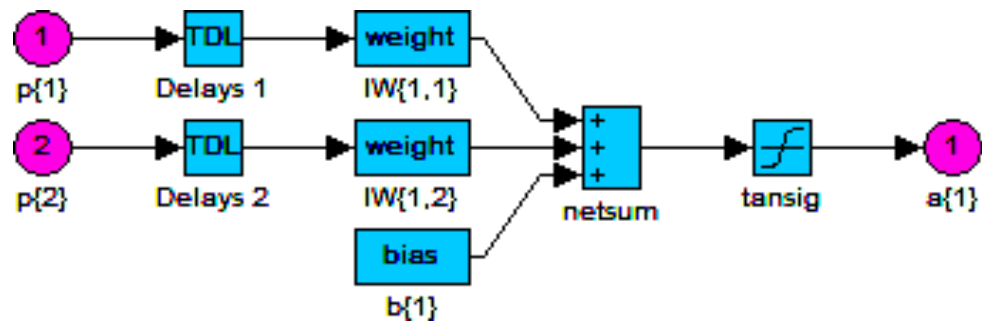


Рисунок 3.4 - Структура шару 1.

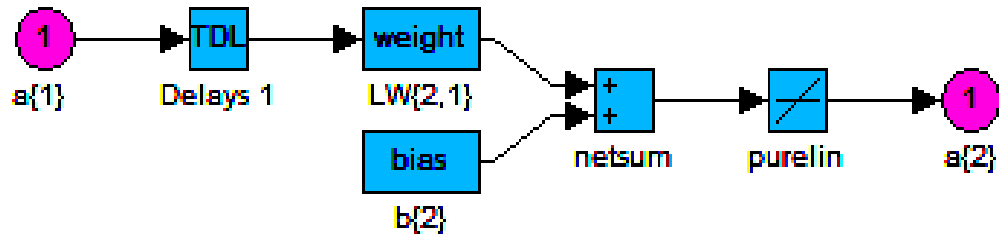


Рисунок 3.5 - Структура шару 2.

Вага кожного нейрона коригується під час ітерації зворотного поширення. Нейрон ваги показані на рисунку 3.6. Завдання кожного нейрона полягає в отриманні входів x_i , і помножити кожен вхід x на відповідну вагу w з потоку даних ваги w_i . Цей нейрон підсумовує зважені входи, додає член зміщення b , а потім обробляє суму через сигмоїдальну функцію f для отримання скалярного виходу y .

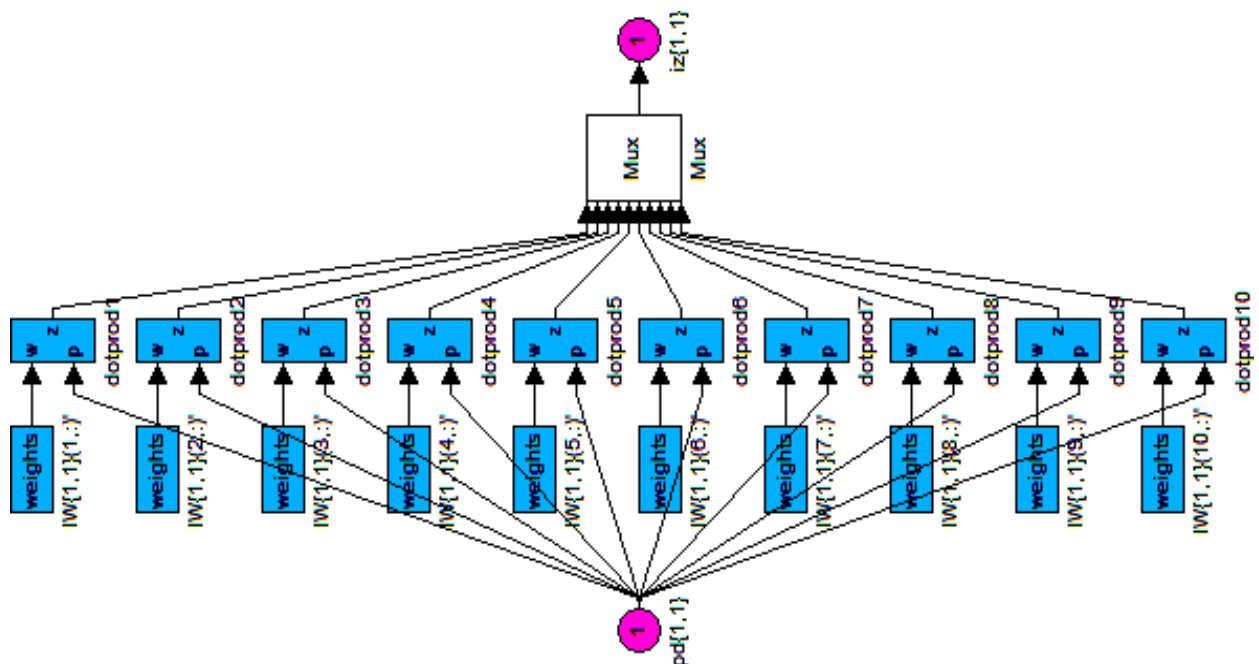


Рисунок 3.6 - Структура нейронів

3.2 Моделювання та результати для контролерів

Функція контролера в HVAC система полягає в підтримці комфортних умов у приміщенні протягом визначеного періоду часу. Це досягається за допомогою добре розробленої системи управління. Ретельно розроблений контролер є життєво важливим, якщо необхідно досягти прийнятної продуктивності з точки зору комфорту та енергоефективності має бути досягнуто. Алгоритми управління, які тут розглядаються, - це PID і FTC.

3.2.1 Порівняння між трьома типами класичного контролера

Програма MATLAB, яка використовується для порівняння класичних контролерів, налаштованих методом проб і помилок, компенсатора та ПІД-регулятора, налаштованого методом Циглера-Ніколса, і ми будемо перехідні характеристики для цих контролерів, починаючи з еталонного значення температури 20 С (температура всередині кондиціонованого приміщення). Як видно на рисунку 3.7, ПІД-регулятор, налаштований методом проб і помилок, є швидшим (час наростання близько 0,5 хв, а час встановлення менше 3 хв) і має нульову похибку у сталому стані. Очевидно, що ПІД-регулятор, налаштований методом проб і помилок, має оптимальну продуктивність. Тоді як інші контролери мають задовільну продуктивність, вони досягають бажаної специфікації продуктивності в третьому розділі. Компенсатор має найвищий перерегулювання 26%, а ПІД-регулятор, налаштований методом Циглера-Ніколса, отримує найбільшу похибку в усталеному стані, як показано на рисунку 3.7

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

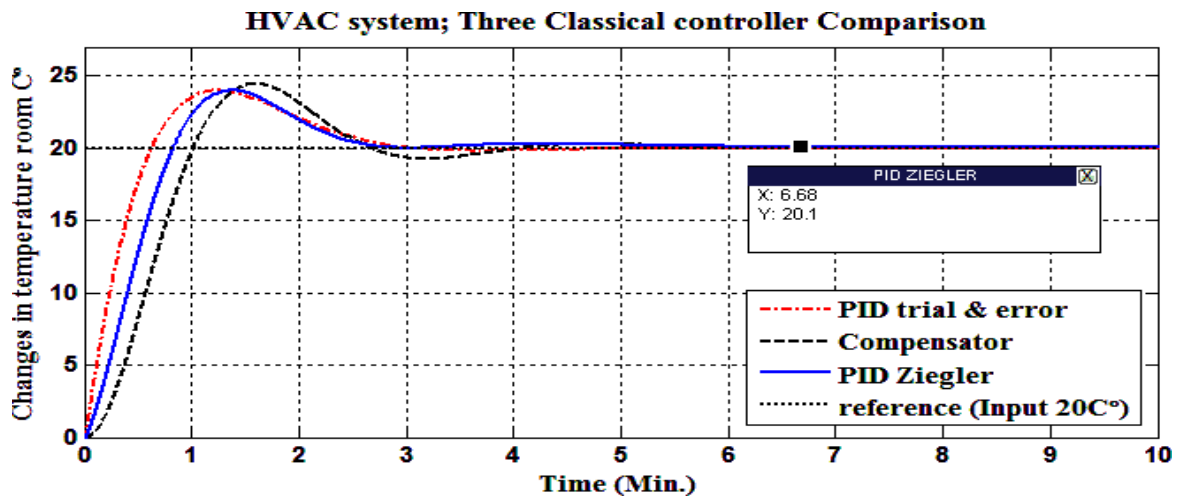


Рисунок 3.7 - Порівняння між трьома типами класичного управління.

3.2.2 Моделювання та результати для продуктивності FTC

З рисунку 3.7 легко помітити, що контролери не функціонують належним чином оскільки кондиціонована температура не повертається до еталонного сигналу (20 °C) в реальному часі, оскільки для кожного нового налаштування температури кондиціонування контролеру потрібен час встановлення більше 2 хвилин і час наростання більше 0,5 хвилини. Причина для цього спостереження полягає в тому, що ефективний і дієвий механізм зворотного зв'язку не був впроваджений. Рішенням цієї проблеми є додавання внутрішньої моделі до архітектури системи ПІД-регулятора (FTC), щоб забезпечити бажану надійність і швидшу реакцію відстеження із замкнутим контуром, як показано на рисунку 3.8. На рисунку зображено порівняння між трьома класичними типами та FTC.

В подальшому потрібно зосередити свою увагу на покращенні реакції системи на зміни температури кондиціонування, щоб похибка в усталеному режимі прагнула до нуля, і щоб система мала час наростання менше 1 хвилини та час встановлення менше 3 хвилин. Нагадаємо, що FTC є найбільш стабільним з усіх типів контролерів, з перерегулюванням менше 10% °C.

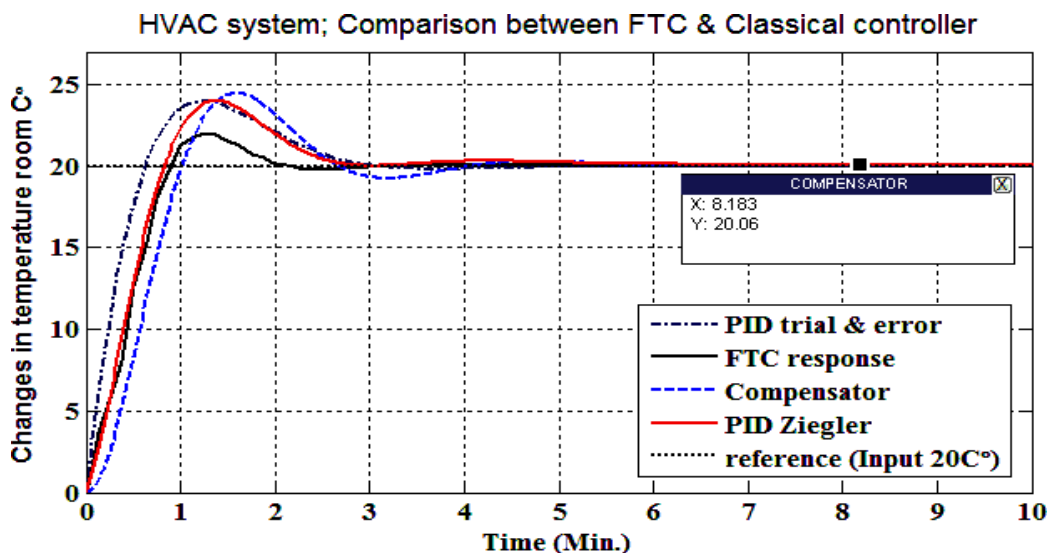


Рисунок 3.8 Результати моделювання для порівняння між класичними контролерами та контролерами FTC.

3.3 Моделювання та результати для надійності FTC

Щоб оцінити надійність FTC, ми порівнюємо традиційний PID з FTC, моделюючи функціонування кожного з них.

Моделювання (1) порівняння PID, налаштованого методом проб і помилок, і FTC контролер. Параметри PID налаштовуються методом проб і помилок. Налаштування виконується наступним чином: $K_p=2.0199$, $K_i = 0.04$ і $K_d = 30.063$. Однак, PID-нейронний контролер (FTC) має внутрішній контур зворотного зв'язку, який покращує реакцію контролера. Порівняння криві традиційного PID-контролю та FTC показані на рисунку 3.9.

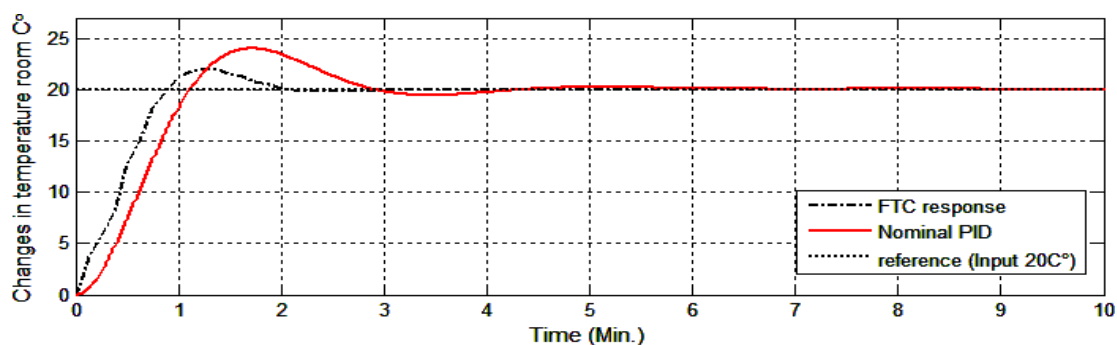


Рисунок 3.9 - Порівняння вихідних даних між FTC та PID.

На рисунку 3.9 підтверджується, що продуктивність системи керування FT краща, ніж у традиційної системи керування PID. FT система керування виробляє вихідні дані (реагує) швидше і є більш стабільною. При додаванні внутрішньої моделі (NARX) до структури PID виникає відхилення в загальному процесі системи. Таким чином, параметри PID необхідно змінювати вручну для досягнення відмінної продуктивності. Таким чином, приймаючи NARX у традиційній структурі PID, ми отримуємо контролер типу FTC. На рисунку 3.10 показана різниця у відповіді між традиційним PID і FTC.

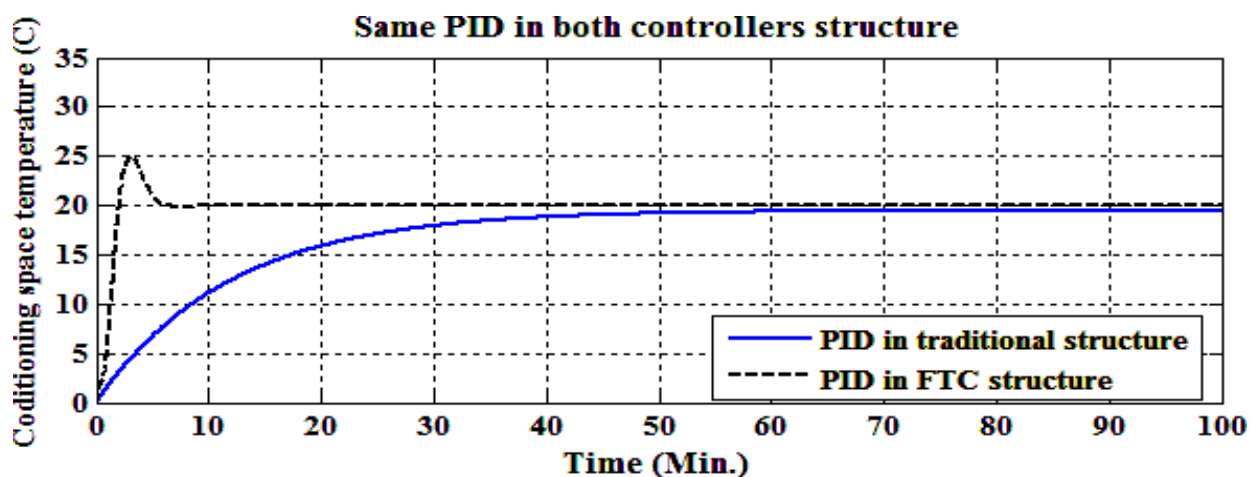


Рисунок 3.10 - PID модифікований, застосований до обох структур контролерів.

З рисунка 3.10 видно, що традиційний PID-контролер не відповідає вимогам до виконання своїх вимог як контролера системи HVAC, через повільну реакцію на кімнату налаштування температури (час встановлення більше 50 хвилин) і похибка в усталеному стані запас неприйнятний.

Щоб перевірити відхилення збурень до FT-керування в системі HVAC, ми збільшуємо вхідний збурюючий вплив керованого процесу на 0,1 в рампи на 0-й секунді, в той час як зберігаємо параметри контролерів такими ж, як і в Симуляції 1. Результати моделювання для традиційного PID-регулятора зі збуренням, номінального PID без збурення та FT регулятора зі

збуренням показано на рисунку 3.11. Зрозуміло, що вихід PID регулятора більший за бажану температуру, але вихід FTC залишається під контролем.

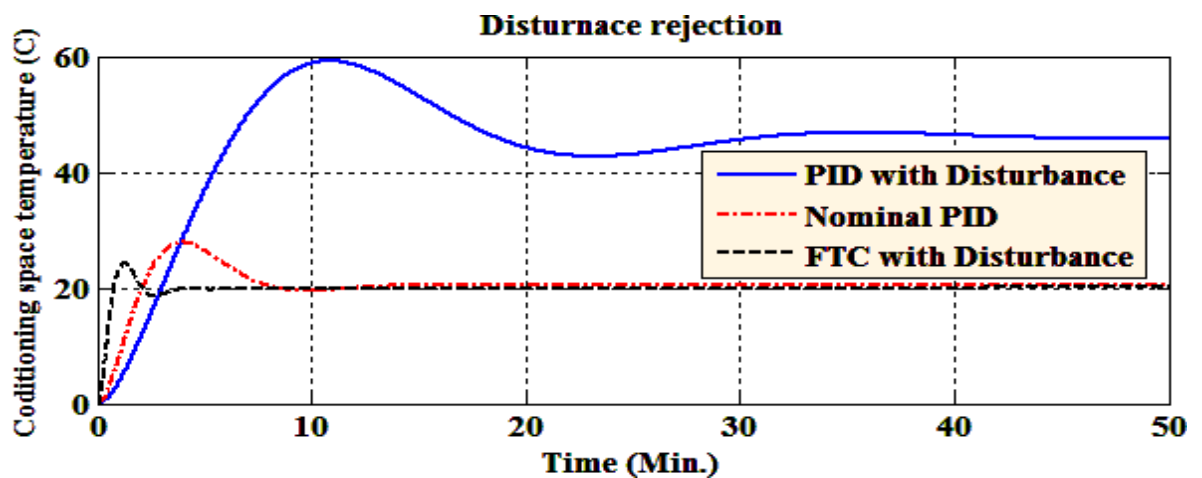


Рисунок 3.11 - Порівняння впливу раптового збурення на систему з номінальним PID.

Коли до керованого процесу на 500-й секунді застосовується збурення значення висоти 50, зберігаючи параметри контролерів такими ж, як і в симуляції з раптовим збуренням (вище), ми отримуємо результати моделювання традиційного PID регулятора зі збуренням, номінального PID без збурення та FT-регулятора з збурення, як показано на рисунку 3.12. Рисунок показує, що вплив поштовхів на ПІД-регулювання є більшим, ніж вихід FTC.

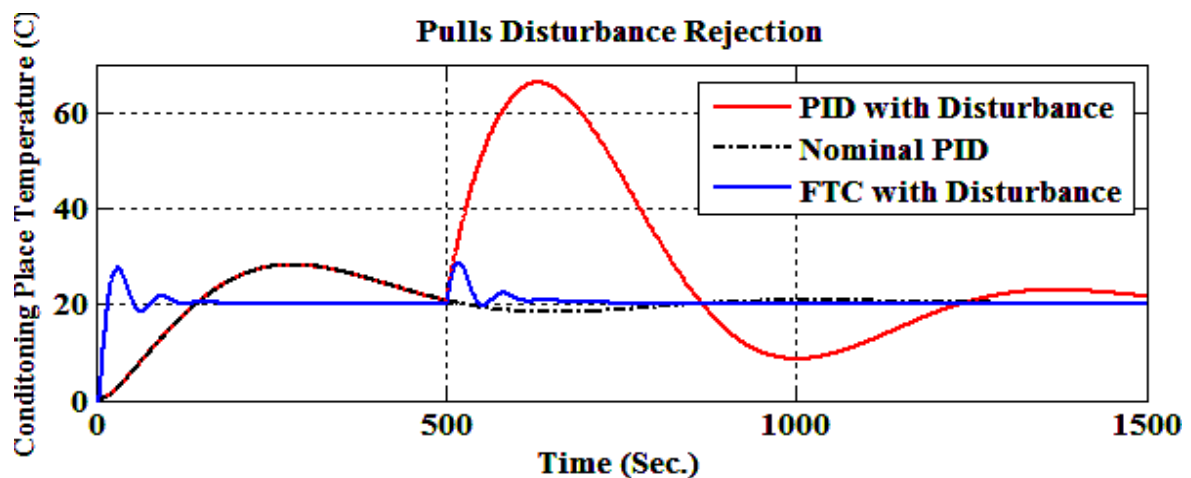


Рисунок 3.12 - Порівняння впливу збурень поштовхів на систему з номінальним ПІД.

Відхилення відмови датчика для FTC та ПІД-регулятора, щоб підтвердити відхилення погіршення датчика для FT-контролера, ми змінюємо коефіцієнт підсилення датчика до 0,5. тобто несправність датчика = 50% напіввідмова (коефіцієнт підсилення датчика = 1, коли датчик знаходиться в ідеальному стані). Рисунок 3.13 ілюструє отримані результати.

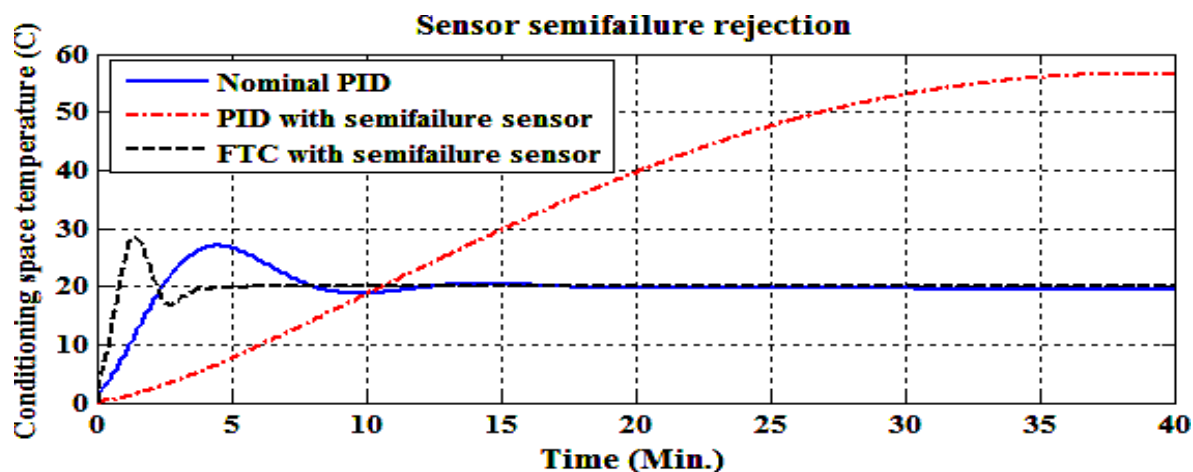


Рисунок 3.13 - Ефективність напіввідмови на ПІД та FTC.

Порівняльні криві традиційного ПІД-регулювання та FT-регулювання, коли датчик вийшов з ладу (коефіцієнт підсилення датчика = 0), показано на рисунку 3.14. Очевидно, що вихід FT системи керування не залежить від несправності датчика, тоді як немає контролю над технологічною системою в ПІД-регуляторі.

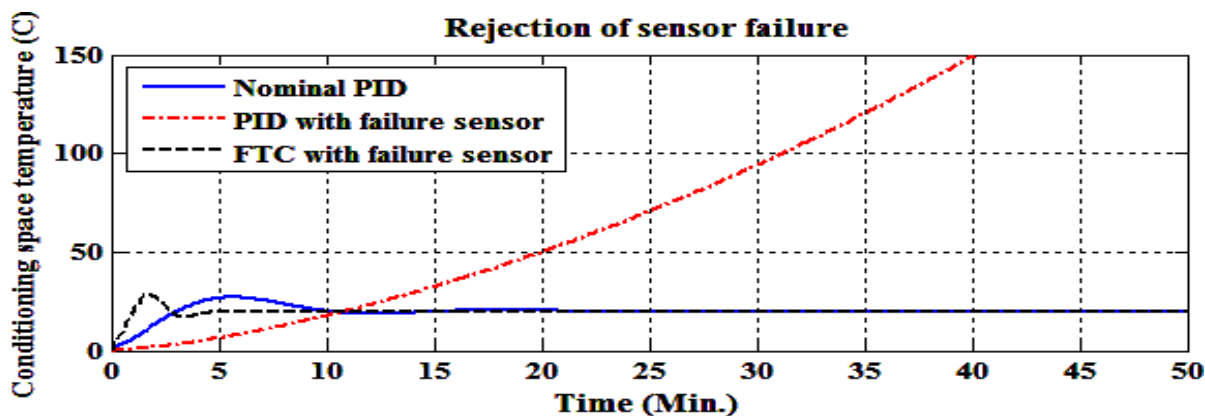


Рисунок 3.14 - Ефективність відмовостійкості ПІД- та FTC-регуляторів.

Придушення шумів для FTC та ПІД-регулятора, щоб перевірити нечутливість системи керування, застосовано шум (будь-який сигнал, що впливає на вихідний сигнал) на зворотний зв'язок датчика. Отже, нечутлива система керування шляхом відстеження еталонної траєкторії не повинна суттєво залежати від зовнішніх сигналів (шуму), щоб підтвердити нечутливість FT-керування в системі HVAC, застосовано синусоїдальний сигнал (частота 1,5 Гц) на зворотний зв'язок датчика. Згодом, немає коливань у вихідному сигналі, як показано на рисунку 3.15.

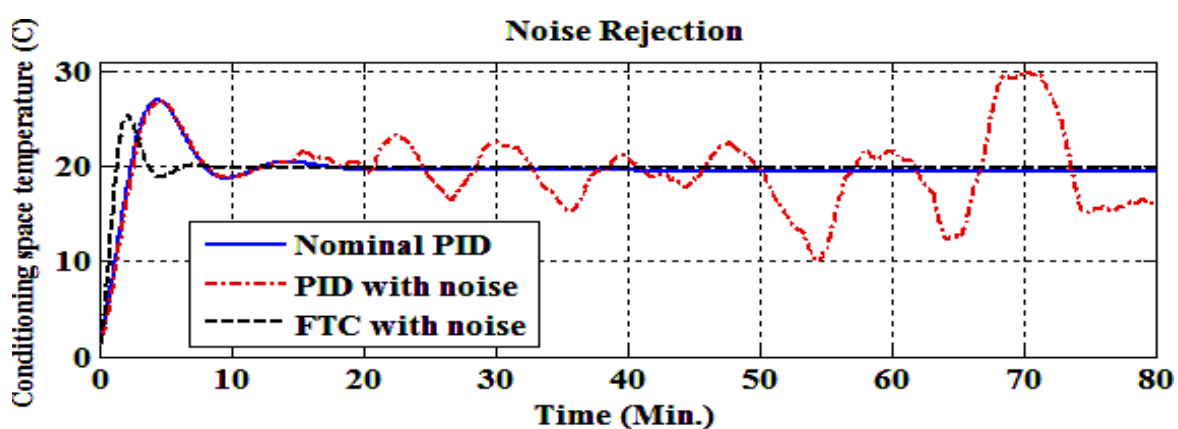


Рисунок 3.15 - Вплив шуму на ПІД та FTC контролери.

Рисунок 3.15 показує, що контролер FTC залишається стійким без ефективності тоді як ПІД втрачає контроль над системою (коливання вихідного сигналу збільшуються з часом). Система процесів (модель установки) дуже часто піддається варіаціям параметрів, які, в свою чергу, мають небажаний вплив на продуктивність системи. Ці варіації установки зазвичай пов'язані зі старінням компонентів, зміною навколишнього середовища, неминучими помилками в системі або моделі процесу (наприклад, у параметрах її передачі функції, установки) та іншими факторами. Щоб підтвердити чутливість до варіацій параметрів відхилення FT контролю в системі HVAC, параметри контрольованого процесу змінюються для моделювання. Коефіцієнт контрольованого процесу

зменшився до 50%, стає 0,0013 і характеристичне рівняння збільшилося вчетверо. Контрольований об'єкт $G(s)$ може виражатися як:

$$G(s) = \frac{0.0013}{4s^2 + 0.1906s + 0.0001}$$

На рисунку 3.16 оцінено різницю між FTC та PID

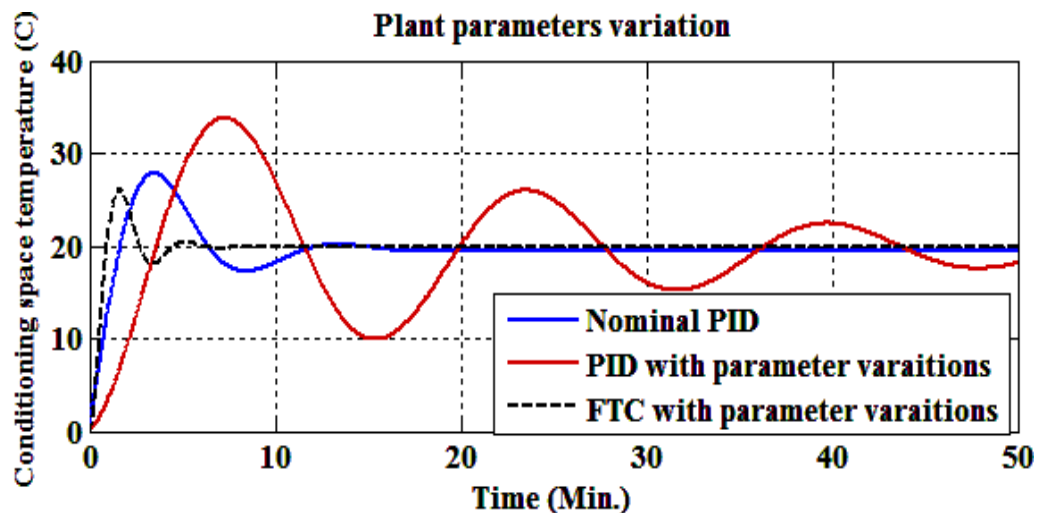


Рисунок 3.16 - Відхилення варіацій параметрів для FTC.

На рисунку 3.16 показано вплив на вихід через варіації параметрів. PID був уражений варіаціями параметрів, тоді як немає значної ефективності в FTC.

У цьому розділі представлено результати навчання, валідації та нейронної структури для моделі NARX показано на рисунках (3.1-3.6). На рисунках (3.1 і 3.2) показано дуже прийнятні результати навчання та результати валідації.

Представлено три класичні схеми керування, і їхню продуктивність було перевірено за допомогою комп'ютерного моделювання з використанням трьох типів, отриманих у попередньому розділі, які налаштовано трьома різними способами. Застосовуючи ці три контролери до системи HVAC, система може відстежувати задані еталонні температурні сигнали, як показано на рисунку (3.7).

					ДП.АКІТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		60

Щоб перевірити продуктивність FTC в умовах імітації навантаження охолодження/нагрівання; до системи HVAC було застосовано бажаний температурний сигнал. Порівнюючи продуктивність і надійність зі схемою керування PID, FTC показала кращу реакцію, де перерегулювання було зменшено, а також коливання на рисунках (3.8-3.9). Це пов'язано з надійною структурою схеми FTC, де сигнал зворотного зв'язку обчислюється та посилюється додатковою прямою моделлю (NARX) реальної установки (математичної моделі).

З обговорених результатів ми можемо зробити висновок, що схема керування PID є гарним вибором для контролю температури в приміщенні. Однак, щоб забезпечити надійність системи, схема керування FTC є кращим вибором.

					ДП.АКІТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання, пов'язане з моделюванням та аналізом системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC), а також розробкою ефективної системи автоматичного керування на основі математичних і нейромережевих методів.

1. Проведено аналіз сучасних методів моделювання та керування системами HVAC. Розглянуто особливості використання математичних моделей, моделей типу «чорної скриньки», а також сучасних підходів до побудови нейромережевих моделей динамічних систем. Проведений аналіз показав, що для опису складних нелінійних процесів, характерних для систем кондиціонування повітря, доцільним є застосування нейромережевих методів моделювання.

2. Досліджено основні принципи функціонування систем HVAC та виконано аналіз існуючих методів автоматичного керування. Розглянуто класичні підходи до налаштування ПІД-регуляторів, метод Циглера–Ніколса, метод перехідної характеристики та підходи до реалізації відмовостійкого керування.

3. Розроблено математичну модель системи HVAC, яка враховує особливості теплових процесів у приміщенні та теплообмінному обладнанні. На основі отриманої моделі побудовано структурну схему системи та визначено її основні динамічні характеристики. Проведений аналіз дозволив оцінити вплив вхідних параметрів на якість регулювання температурного режиму.

4. Для підвищення точності опису нелінійної поведінки системи було розроблено та досліджено нейромережеву модель типу NARX. Отримані результати підтвердили можливість ефективного використання даного підходу для ідентифікації динамічних процесів у системах HVAC та прогнозування зміни параметрів мікроклімату.

5. У середовищі MATLAB/Simulink виконано моделювання роботи системи та реалізовано алгоритми автоматичного керування. Проведено серію

					ДП.АКТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

експериментів для оцінювання ефективності розроблених моделей та регуляторів. Результати моделювання показали стійкість системи, прийнятну швидкодію та можливість підтримання заданих параметрів мікроклімату в умовах зміни зовнішніх впливів.

6. На основі проведених досліджень встановлено, що використання нейромережевої моделі NARX у поєднанні з автоматичними регуляторами дозволяє підвищити точність керування, покращити якість регулювання температури та забезпечити більш ефективне функціонування системи HVAC порівняно з традиційними підходами.

У результаті виконання дипломної роботи досягнуто поставленої мети, розроблено математичну та нейромережеву моделі системи HVAC, виконано аналіз їх характеристик, реалізовано систему автоматичного керування та підтверджено її працездатність шляхом комп'ютерного моделювання. Отримані результати свідчать про перспективність використання запропонованого підходу для підвищення ефективності, надійності та енергоефективності сучасних систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря.

					ДП.АКІТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ahmed O., Mitchell J., Klein S. Application of General Regression Neural Network (GRNN) in HVAC Process Identification and Control // ASHRAE Transactions. 1996.
2. Alla H., David R. Discrete, Continuous and Hybrid Petri Nets. Berlin : Springer-Verlag, 2004.
3. Ben-Nakhi A. E., Mahmoud M. A. Cooling Load Prediction for Buildings Using General Regression Neural Networks // Energy Conversion and Management. 2004.
4. Bubnicki Z. Modern Control Theory. Berlin : Springer-Verlag, 2005.
5. Chen S., Billings S. A., Grant P. M. Non-linear System Identification Using Neural Networks // International Journal of Control. 1990. Vol. 51, No. 6.
6. Coughanowr D. R. Process Systems Analysis and Control. 2nd ed. New York : McGraw-Hill, 1991.
7. Ellis G. Control System Design Guide. London : Academic Press, 2004.
8. Flynn D. Thermal Power Plant Simulation and Control. London : Institution of Electrical Engineers, 2003.
9. Gopal M. Control System Principles and Design. 2nd ed. Singapore : McGraw-Hill, 2002.
10. Goodwin G. C., Graebe S. F., Salgado M. E. Control System Design. Australia, 2000.
11. Haines R. W. Control Systems for Heating, Ventilating and Air Conditioning. 6th ed. New York : Springer, 2006.
12. Haines R. W., Lewis W. C. HVAC Systems Design Handbook. New York : McGraw-Hill, 2004.
13. Hordeski M. F. HVAC Control in the New Millennium. New York : Fairmont Press, 2001.
14. Invensys Building Systems. HVAC Controls Introduction. United States of America : Invensys Building Systems, 2001.

					ДП.АКИТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

15. Khalil H. K. Nonlinear Systems. New York : Macmillan Publishing Company, 1992.
16. Kreith F. Handbook of Thermal Engineering. Florida : CRC Press, 2000.
17. Leigh J. R. Control Theory. 2nd ed. London : Institution of Electrical Engineers, 2004.
18. Medsker L. R., Jain L. C. Recurrent Neural Networks. Washington : CRC Press, 2001.
19. Omidvar O., Elliott D. L. Neural Systems for Control. Elsevier Science & Technology Books, 1997.
20. Paraskevopoulos P. N. Modern Control Engineering. New York : Marcel Dekker, 2002.
21. Passino K. M., Yurkovich S. Fuzzy Control. California : Addison Wesley Longman, 1998.
22. Pao C. C. Process Control. Cambridge : Cambridge University Press, 2002.
23. Roffel B., Betlem B. Process Dynamics and Control. West Sussex : John Wiley & Sons, 2006.
24. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A. Process Dynamics and Control. New York : John Wiley & Sons, 1989.
25. Tsien H. S. Engineering Cybernetics. New York : McGraw-Hill, 1954.
26. Tewari A. Modern Control Design. Chichester : John Wiley & Sons, 2002.
27. Visioli A. Practical PID Control. 2nd ed. London : Springer-Verlag, 2006.
28. Wade H. L. Basic and Advanced Regulatory Control: System Design and Application. 2nd ed. ISA, 2004.
29. Wang S. K. Handbook of Air Conditioning and Refrigeration. 2nd ed. New York : McGraw-Hill, 2001.
30. Zaheer-uddin M., Tudoroiu N. Neuro-Models for Discharge Air Temperature System // Energy Conversion and Management. 2004.

					ДП.АКИТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

31. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum Settings for Automatic Controllers // Transactions of the ASME. 1942. Vol. 64.
32. Zhuang M., Atherton D. P. Automatic Tuning of Optimum PID Controllers // IEE Proceedings – Control Theory and Applications. 1993. Vol. 140, No. 3.
33. Zhu Y. Multivariable System Identification for Process Control. 2nd ed. Elsevier Science & Technology Books, 2001.
34. Karris S. T. Introduction to Simulink with Engineering Applications. Orchard Publications, 2006.
35. Komareji M., Stoustrup J., Rasmussen H. et al. Optimal Model-Based Control in HVAC Systems // American Control Conference. 2008.

					ДП.АКІТ.9702474.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		