

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Моделювання компонентів керування МЕМС зі зворотними зв'язками з використанням Matlab / Simulink

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СКСМ-17-1
Колосов А.А.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність

123 – Комп'ютерна інженерія

(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма Спеціалізовані комп'ютерні системи
(повна назва освітньої програми)

Керівник: проф. Литвинова Є.І.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри АПОТ


(підпис)

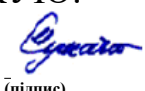
Чумаченко С.В.
(прізвище, ініціали)

2021 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Спеціалізовані комп'ютерні системи
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри 
(підпис)
“01 ” 09 2021 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентові Колосову Артему Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання компонентів керування МЕМС зі зворотними зв'язками з використанням Matlab/Simulink

затверджена наказом по університету від " 12 " 11 2018 р. № 1626 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 15.12.2021

3. Вихідні дані до роботи

Математичний процесор MATLAB

Програмний пакет Simulink

ПД-регулятори

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1 Аналіз предметної області та постановка завдання дослідження

2 Технології побудови замкнених систем автоматичного регулювання

3 Математична модель системи регулювання температурного режиму

4 Створення Simulink-моделі замкненої системи регулювання температурного режиму

5 Моделювання моделі системи регулювання температурного режиму

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

ілюстрацій (слайдів) 20 слайдів

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	01.09.2021 - 02.09.2021	
2	Аналіз предметної області	03.09.2021 - 15.09.2021	
3	Аналіз джерел з проблемної галузі	16.09.2021 - 01.10.2021	
4	Аналіз технології побудови замкнених систем автоматичного регулювання	02.10.2021 - 15.10.2021	
5	Створення Simulink-моделі МЕМС-сенсору температури	16.10.2021 - 30.10.2021	
6	Розробка математичної моделі системи регулювання температури	01.11.2021 - 14.11.2021	
7	Моделювання в системі Matlab/Simulink	15.11.2021 - 18.11.2021	
8	Оформлення пояснювальної записки	19.11.2021 - 29.11.2021	
9	Оформлення графічного матеріалу	30.11.2021 - 07.12.2021	
10	Перевірка виконаного проекту керівником	08.12.2021 - 15.12.2021	

Дата видачі завдання 01 вересня 2021 р.

Студент



(підпис)

Керівник роботи



(підпис)

проф. Литвинова Є.І.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 70 сторінок, 29 рисунків, 9 джерел за переліком посилань.

МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ, ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК, ПІД-РЕГУЛЯТОР, РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, MATLAB SIMULINK

В кваліфікаційній роботі розглянуто процедури моделювання систем автоматичного регулювання зі зворотними зв'язками з використанням математичного пакету Matlab Simulink.

Об'єктом дослідження є системи автоматичного регулювання температурних режимів у приміщенні. Предметом дослідження є моделі мікромеханічних температурних сенсорів та способів регулювання температури в середовищі Matlab Simulink.

Розроблено та проаналізовано математичну модель регулювання температури в приміщенні з використанням ПІ-регулятора. Здійснено моделювання математичної моделі системи регулювання температури зі зворотними зв'язками в середовищі Matlab Simulink.

ABSTRACT

The explanatory note contains 70 pages, 29 figures, 9 sources by the list of references.

MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, FEEDBACK, PID CONTROLLER, TEMPERATURE CONTROL, MATHEMATICAL MODELING, MATLAB SIMULINK

In the qualification work the procedures for modeling automatic control systems with feedback using the mathematical package Matlab Simulink are considered.

The object of the research is a system of automatic temperature control. The subject of the research is the models of micromechanical temperature sensors and methods of temperature control in the Matlab Simulink environment.

A mathematical model of room temperature control using a PI controller has been developed and analyzed. The mathematical model of the temperature control system with feedback in the Matlab Simulink environment has been simulated.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП.....	8
1 СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЗІ ЗВОРОТНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ	10
1.1 Класифікація систем автоматичного управління	10
1.2 ПІ- та ПІД-регулятори в системах автоматичного регулювання...15	
1.3 Системи автоматичного регулювання температури	23
1.4 Постановка завдання дослідження.....	30
2 ТЕМПЕРАТУРНІ МЕМС-СЕНСОРИ В СИСТЕМАХ РОЗУМНОГО БУДИНКУ.....	31
2.1 Класифікація та типи температурних МЕМС-сенсорів	31
2.2 Типи температурних сенсорів та їх застосування в системах розумного будинку.....	34
2.3 Математична модель системи регулювання температурним режимом у приміщенні.....	39
3 МОДЕЛЮВАННЯ ЗАМКНЕНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ В MATLAB SIMULINK.....	47
3.1 Моделювання компонентів МЕМС зі зворотними зв'язками в Matlab Simulink	47
3.2 Створення Simulink-моделей інтеграторів зі зворотними зв'язками в системі регулювання температури.....	56
3.3 Створення Simulink-моделі замкненої системи регулювання температурного режиму	60
3.4 Результати поведінкового моделювання	62
ВИСНОВКИ.....	68
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	69
ДОДАТОК А Графічна частина кваліфікаційної роботи.....	71

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

АСР – автоматична система регулювання

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ВС (Embedded System) – вбудована система

ДТ – датчик температури

ІС – інтегральна схема

МЕМС (Microelectromechanical systems) – мікроелектромеханічні системи

МСТ – мікросистемна техніка

ОУ – об'єкт управління

П-регулятор – пропорційний регулятор

ПІ-регулятор – пропорційно-інтегральний регулятор

ПД-регулятор – пропорційно-диференційний регулятор

ПІД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор

РТ – регулятор температури

САПР – система автоматизації проектування

САР – система автоматичного регулювання

ТЗ – технічне завдання

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

Matlab Simulink – інтерактивний інструмент (Програмне забезпечення) для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем

MST (Micro System Technology) – мікросистемні технології

NCD (Nonlinear Control Design) – нелінійні системи управління

SoC (System-on-a-Chip) – система на кристалі.

ВСТУП

Мікроелектромеханічні системи (МЕМС) є одним із прогресивних напрямків мікросистемної техніки (МСТ), який разом із нанотехнологіями вважаються у всьому світі революційними, що визначають тенденції розвитку сучасного виробництва електронної техніки. [1]. Швидкий розвиток МЕМС-технологій багато в чому пояснюється їх ключовими перевагами - мініатюрністю, функціональністю, надійністю, малим енергоспоживанням, простотою інтегрування, затребуваністю практично всіма ринками електроніки. МЕМС знаходять найширше застосування як у засобах масового попиту, таких як електронні системи автомобілів та споживча техніка, така як стільникові телефони, ноутбуки, нетбуки та інші пристрої, так і в складних приладах спеціального призначення, що виробляються невеликими партіями: медичному обладнанні, військовій та аерокосмічній техніці, промислових АСУ, апаратурі моніторингу метеоумов.

Результатом даних досліджень є реалізація моделювання компонентів керування МЕМС зі зворотними зв'язками, з використанням Matlab/Simulink.

В даний час для проектування і дослідження компонентів керування МЕМС та систем автоматичного управління широко використовуються засоби Matlab, що представляє собою інтегрований засіб розробки, моделювання, апаратної реалізації та тестування систем управління на всіх етапах проектної діяльності. Matlab представляє має інтерактивне середовище розробки алгоритмів та сучасний інструмент аналізу даних і дозволяє на порядок скоротити час вирішення типових завдань та спрощує розробку нової техніки та алгоритмів. При цьому активно використовується програмний пакет Matlab Simulink, що дозволяє здійснювати Design – розробку моделей об'єкту управління та регуляторів, Implementation – реалізацію алгоритмів управління системи, Test and verification – перевірку коректності роботи та якості управління.

В даній кваліфікаційній роботі розглядаються процедури моделювання

компонентів управління МЕМС зі зворотними зв'язками на прикладі проектування та аналізу системи регулювання температурним режимом в приміщенні «розумного будинку» з використанням Matlab Simulink. В роботі проаналізовано ПІ- та ПІД регулятори в системах автоматичного управління, розглянуто температурні МЕМС-сенсори, що можуть бути використані в системах регулювання температурними режимами, отримано математичну модель системи регулювання температури у заданому приміщенні, розроблено Simulink-модель замкненої системи регулювання теплових параметрів з використанням ПІ-регулятора. Проведено поведінкове моделювання розробленої системи в середовищі Matlab Simulink.

1 СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЗІ ЗВОРОТНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ

1.1 Класифікація систем автоматичного управління

У самому широкому розумінні управління являє собою сукупність різноякісних впливів на об'єкт управління, в результаті яких досягається в тій чи іншій ступеня мета суб'єкта. При цьому в якості об'єкта управління можуть виступати: соціальні, економічні, технічні, біологічні та інші процеси.

У процесі управління завжди присутні три складові: суб'єкт управління або структура управління об'єктом, в залежності від розв'язуваної задачі, сам об'єкт управління і середовище. Розглянемо приклад: керування автомобілем, який в даному випадку є об'єктом управління, водій (чоловік) - суб'єкт управління, середа - навколишнє оточення навколо автомобіля (включає: дорожнє покриття, погоду, світлофори, дорожню розмітку, інші транспортні засоби тощо). водій, впливаючи на органи управління (рульове колесо, педаль газу і гальма, важіль коробки передач) надає керуючий вплив на автомобіль, що утворює прямий зв'язок, а через органи чуття сприймає «поведінку» автомобіля і навколишнє оточення - зворотний зв'язок. У процесі управління автомобілем водій розмірюючи мета управління, інформацію про самому автомобілі і інформацію від зворотного зв'язку приймає рішення про подальше керування дії [1].

Сукупність об'єкта управління і пристрою управління, взаємодія яких призводить до поставленої мети управління, називається системою управління. Система управління - це можливість цілеспрямованого впливу на механізми, виробничі і економічні процеси в інтересах суспільства.

Техніка управління базується на теорії зворотного зв'язку і аналізі лінійних систем; вона включає в себе також основні положення теорії ланцюгів і теорії зв'язку. Цьому вона не обмежується тільки якоїсь однієї технічної дисципліною, а в рівній мірі може бути застосована до авіації, хімічної технології, механіки, екології, будівництва, електротехніки. Дуже часто, наприклад, система управління включає в себе елементи електричної, механічної і хімічної природи. Більш того, у міру більш глибокого розуміння динаміки бізнесу, соціальних і політичних процесів буде підвищуватися і здатність управління цими процесами.

Система управління - це з'єднання окремих елементів в певну конфігурацію, що забезпечує задані характеристики. В основі її аналізу лежить теорія лінійних систем, що припускає наявність причинно-наслідкових зв'язків між елементами. Зв'язок між входом і виходом - це, по суті, перетворення одного сигналу (причини) в інший (наслідок), причому часто з посиленням потужності.

Управління інженери часто використовують зворотний зв'язок при проектуванні систем управління. Наприклад, в автомобілі з круїз-контролем швидкості автомобіля знаходиться під постійним контролем і подається назад в систему, яка регулює потужність двигуна відповідно. Там, де є регулярна зворотний зв'язок, теорії управління можна використовувати для визначення того, як система реагує на таку зворотний зв'язок.

На сьогодні відбувається поступове, але неухильне переміщення все більшої кількості функцій регулювання, управління і контролю від людини до машин та устаткування (на сьогодні, головним чином, комп'ютеризованого). Ядро сучасної технології автоматизації в великій мірі складають технології управління без зворотного зв'язку (по незамкнутому контуру) і зі зворотним зв'язком (по замкнутому контуру). Хоча обидві області фактично ідентичні в постановці цілей, між ними є зовсім різні в основних принципах виконання завдань. Технологія управління зі зворотним

зв'язком зазвичай заснована на більш технічно розвинених принципах, хоча це може призводити до більш високих витрат на проектування і обладнання.

У розімкнутій системі управління для отримання бажаної реакції об'єкта зазвичай використовується регулятор або виконавчий пристрій, в розімкнутій системі зворотний зв'язок відсутній. У розімкнутій системі для безпосереднього управління об'єктом застосовується спеціальне виконавчий пристрій, а зворотний зв'язок відсутній.

На відміну від розімкнутої, в замкнутій системі проводиться вимірювання дійсного значення вихідного сигналу, яке потім порівнюється з його бажаним значенням. Виміряне значення виходу називають сигналом зворотного зв'язку. Замкнута система прагне підтримати задане співвідношення між двома змінними шляхом порівняння функцій від цих змінних і використання їх різниці в якості керуючого сигналу. Найчастіше різниця між заданим значенням вихідної змінної і її дійсним значенням посилюється і використовується для впливу на об'єкт управління, в результаті чого ця різниця постійно зменшується. Принцип зворотного зв'язку лежить в основі аналізу і синтезу систем управління.

У замкнутій системі проводиться вимірювання вихідної змінної і його результат у вигляді сигналу зворотного зв'язку порівнюється з еталонним вхідним сигналом, що несе інформацію про заданому значенні вихідної змінної.

У зв'язку зі зростаючою складністю об'єктів управління і бажанням домогтися оптимальних показників якості, за останнє десятиліття різко підвищилася роль автоматичного управління. До того ж у багатьох випадках виникає необхідність враховувати взаємний вплив вихідних змінних один на одного, що неминуче відбивається на структурі системи.

Розглянемо типову функціональну схему замкнутої системи управління (рис. 1.1). На функціональних схемах за допомогою блоків відображають елементи системи управління з зазначенням виконуваних ними функцій, а також зв'язку між цими елементами. За допомогою пристрою, що задає,

виробляється бажане значення вхідної величини $x(t)$, яке надходить на один з входів суматора, на інший вхід суматора по ланцюгу негативного зворотного зв'язку подається виміряний за допомогою датчика дійсне (виміряне) значення вихідної величини $y_{\text{вим}}(t)$. На виході суматора утворюється сигнал помилки (відхилення) $\varepsilon(t)$, який є різницею між заданим і дійсним значеннями параметрів: $\varepsilon(t) = x(t) - y_{\text{вим}}(t)$. Керуючий пристрій в залежності від величини і знака помилки виробляє сигнал управління $u(t)$. Цей сигнал подається на виконавчий пристрій, що формує керуючий вплив на об'єкт управління.

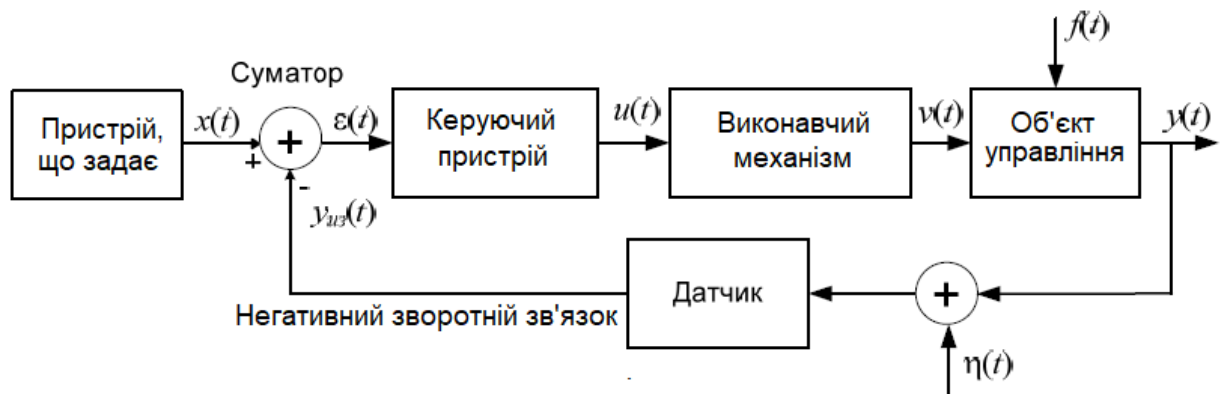


Рисунок 1.1 – Типова функціональна схема замкнутої системи управління

При дії зовнішніх збурень $f(t)$ вихідна величина $y(t)$ об'єкта починає відхилятися від бажаного значення $x(t)$, на вході керуючого пристрою формується сигнал помилки $\varepsilon(t)$, і керуючий пристрій видає таке управління $u(t)$, щоб звести цю помилку до нуля або до конструктивно можливого мінімуму. До жаль, процес вимірювання супроводжується шумом $\eta(t)$, що ускладнює розрахунок управління $u(t)$. Крім того, зворотний зв'язок бореться з тими збуреннями, які вже подіяли на об'єкт, тому при часто мінливих впливах ефективність замкнутої системи управління знижується.

Завданням замкнутих систем автоматичного регулювання (САР) є підтримання регульованої (вихідної) величини в заданому відношенні до

вхідного сигналу. Це співвідношення порушується під час перехідного режиму, який виникає під дією сил, що збурюють

Розрізняють такі види систем автоматичного регулювання:

- системи автоматичної стабілізації, в яких регульована величина повинна залишатися незмінною (відповідно до незмінним вхідним сигналом), незалежно від зміни збурюючих сил;

- системи програмного регулювання, в яких регульована величина, змінюється по заздалегідь відомій програмі в часі (відповідно до змінення в часі вхідного сигналу по заздалегідь відомій програмі);

- системи, що стежать, в яких задане значення регульованої величини залежить від значення іншої (вхідної) величини процесу, закон зміни якої заздалегідь не відомий;

- системи екстремального регулювання - система, в якій регулятор підтримує оптимальне для зміни умов значення регульованої величини

Системи автоматичного регулювання (САР) застосовуються для регулювання окремих параметрів (температура, тиск, рівень, витрата тощо.) в об'єкті управління. У сучасних системах автоматичного управління (САУ) системи автоматичного регулювання є підсистемами САУ і їх застосовують для регулювання різних параметрів при управлінні об'єктом або процесом. Принцип дії будь-якої САР полягає в тому, щоб виявляти відхилення регульованих величин, що характеризують роботу об'єкта або протікання процесу від необхідного режиму і при цьому впливати на об'єкт або процес так, щоб усувати ці відхилення.

Для здійснення автоматичного регулювання до регульованого об'єкту підключається автоматичний регулятор, що виробляє керуючий вплив на регулюючий орган. Це керуючий вплив виробляється регулятором в залежності від різниці між поточним значенням регульованої величини (температури, тиску, рівня рідини і т. Д.), Яка вимірюється датчиком, і бажаним її значенням, що встановлюються задатчиком. Регульований об'єкт і автоматичний регулятор разом утворюють систему автоматичного

регулювання. Основною ознакою САР, є наявність головної зворотного зв'язку, по якій регулятор контролює значення регульованого параметра.

1.2 ПІ- та ПІД-регулятори в системах автоматичного регулювання

Пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори (ПІД-регулятори) широко застосовуються для управління промисловими процесами [2]. Приблизно 95% операцій із замкнутим контуром в промисловій автоматизації використовують ПІД-регулятори. PID позначає «Пропорційно-інтегрально-диференціальна складова». Ці три контролери об'єднані таким чином, що він створює керуючий сигнал (рис.1.2).

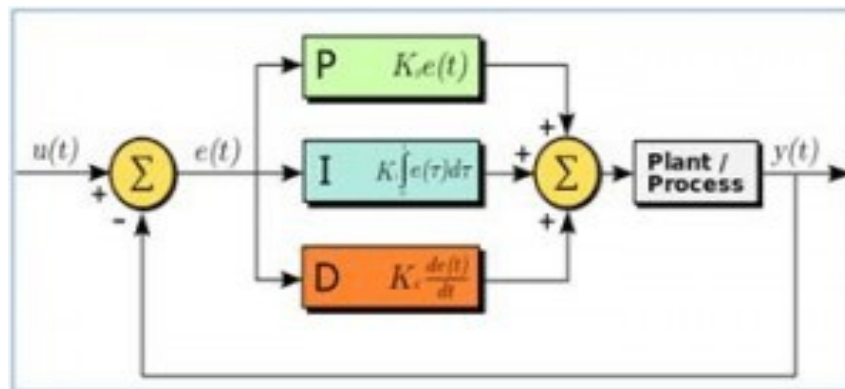


Рисунок 1.2 – Структура ПІД-регулятора

В якості контролера зворотного зв'язку він забезпечує вихід управління на бажаних рівнях. ПІД-регулювання здійснювалося за допомогою аналогових електронних компонентів, перед виходом мікропроцесорів. Але сьогодні все ПІД-контролери обробляються мікропроцесорами. Програмовані логічні контролери також мають вбудовані налаштування ПІД-регулятора. Завдяки гнучкості і надійності ПІД-регуляторів, вони традиційно використовуються в системах управління технологічним процесом.

При використанні недорогого простого контролера можливі тільки два стану управління, наприклад, повністю ВКЛ або повністю ВИКЛ. Він

використовується для налаштувань з обмеженням контролю, в якому ці два стани управління досить для цілей управління. Однак характер цього контролю обмежує його використання і, отже, замінюється ПІД-контролерами.

ПІД-регулятор підтримує вихід таким чином, що між змінної процесу і заданої точкою / бажаним виходом з допомогою операцій замкнутого контуру є нульова помилка. ПІД використовує три основних поведінки управління, які пояснюються нижче.

Пропорційний або П-регулятор (рис.1.3) дає вихід, який пропорційний поточній помилці $u(t) = k \cdot e(t)$. Він порівнює бажану або задану точку з фактичним значенням або значенням процесу зворотного зв'язку. Отримана помилка множиться на пропорційну константу, щоб отримати вихід. Якщо значення помилки дорівнює нулю, то вихід цього контролера дорівнює нулю.

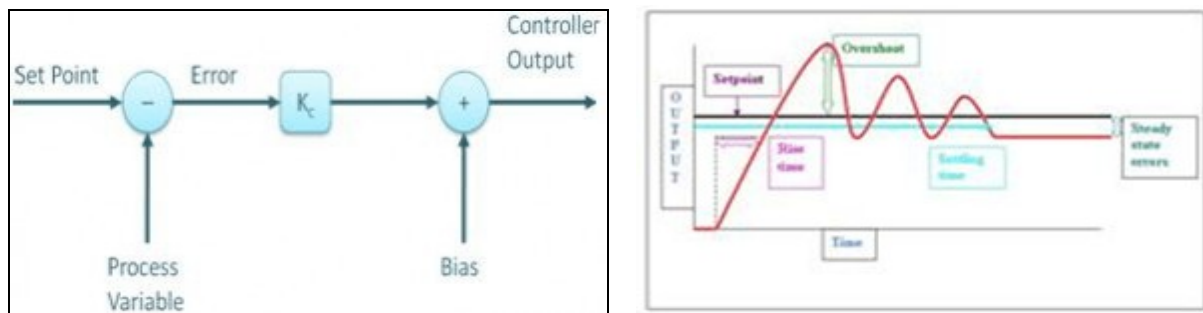


Рисунок 1.3 – Структура та принцип роботи П-регулятора

Цей контролер вимагає зміщення або ручної скидання при використанні окремо. Це відбувається тому, що він ніколи не досягає стану стійкого стану. Він забезпечує стабільну роботу, але завжди підтримує постійний помилку. Швидкість реакції зростає при збільшенні пропорційної константи K_p .

Через обмеження П-контролера, де завжди існує зсув між змінної процесу і заданим значенням, необхідний І-контролер, який забезпечує необхідні дії для усунення помилки усталеного стану. Він інтегрує помилку

протягом періоду часу, поки значення помилки не досягне нуля. Він містить значення для кінцевого пристрою управління, при якому помилка стає рівною нулю (рис. 1.4).

Інтегральне управління зменшує його вихід, коли відбувається негативна помилка. Він обмежує швидкість реакції і впливає на стабільність системи. Швидкість реакції збільшується за рахунок зменшення інтегрального посилення K_i .

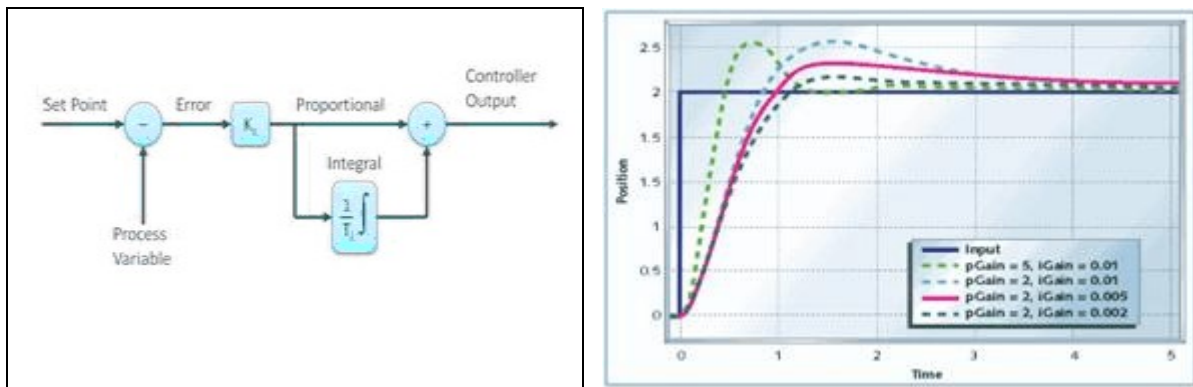


Рисунок 1.4 – Структура та принцип роботи ПІ-регулятора і

Формалізація цієї дії призводить до управління, в якому керуючий

вплив - сума двох компонентів:

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

На рис 1.3, коли коефіцієнт посилення І-контролера зменшується, помилка усталеного режиму також продовжує зменшуватися. У більшості випадків контролер ПІ використовується, зокрема, коли потрібна висока швидкість відповіді.

При використанні ПІ-регулятора вихід І-контролера обмежений деяким діапазоном для подолання інтегральних умов, коли інтегральний вихід зростає навіть при нульовому стані помилки через нелінійність на установці.

І-контролер не може передбачити майбутню поведінку помилки. Тому він реагує нормально після зміни заданого значення. Д-контролер долає цю

проблему, чекаючи майбутнього поведінки помилки. Його вихід залежить від швидкості зміни похибки за час, помножене на постійну похідною. Це дає початок запуску для виходу, тим самим збільшуючи системний відгук.

Проблема застосування інтегрального управління полягає в тому, що в процесі регулювання керуючий вплив робить помітні коливання навколо шуканого постійного значення. Для вирішення цієї проблеми в керуючий вплив додають ще один компонент, який пригнічує інтегральне управління при значних коливаннях сигналу помилки, залишаючи його дію тільки на малих і тривалих помилках. Цей компонент - диференціальне управління, яке входить як третій доданок:

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{d}{dt} e(t)$$

На рис. 1.5 відповідь контролера Д більше, в порівнянні з контролером ПІ, а також час встановлення вихідного сигналу зменшується. Це покращує стабільність системи за рахунок компенсації фазового запізнювання, викликаного І-контролером. Збільшення похідного посилення збільшує швидкість реакції.

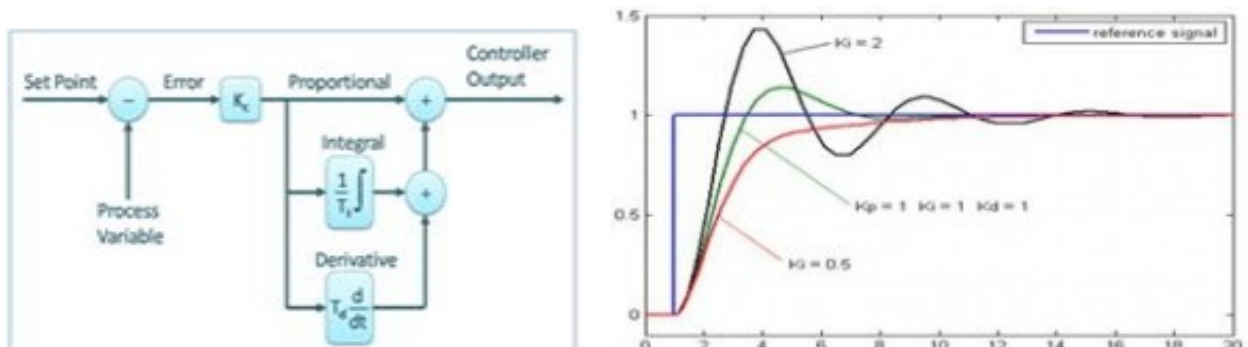


Рисунок 1.5 – Структура та принцип роботи Д-регулятора

Перед початком роботи ПІД-регулятора він повинен бути налаштований на динаміку контрольованого процесу. Дизайнери дають значення за замовчуванням для параметрів П, І, Д, і ці значення не можуть

дати бажану продуктивність, а іноді призводять до нестабільності і повільним характеристикам управління. Розроблено різні методи настройки для настройки ПД-регуляторів і вимагають від оператора великої уваги для вибору найкращих значень пропорційних, інтегральних та диференціальних коефіцієнтів. Деякі з них наведені нижче.

Метод проб і помилок: це простий спосіб налаштування ПД-регулятора. Поки система або контролер працюють, ми можемо налаштувати контролер. У цьому методі спочатку потрібно встановити значення K_i і K_d в нуль і збільшити пропорційний коефіцієнт (K_p), поки система не досягне коливальної поведінки. Як тільки він осцилює, відрегулюйте K_i (інтегральний термін), щоб коливання зупинилися і, нарешті, відрегулювали K_d , щоб отримати швидкий відгук.

Технологічна крива технологічного процесу: це метод настройки з відкритим циклом. Він виробляє відповідь, коли до системи застосовується крок введення. Спочатку ми повинні вручну вводити деякі дані управління в систему і записувати криву відповіді. Після цього нам потрібно розрахувати нахил, нерухоме час, час наростання кривої і, нарешті, підставити ці значення в рівняння П, І і Д, щоб отримати значення коефіцієнта посилення ПД.

ПД-регулятор складається з трьох членів, а саме пропорційного, інтегрального і диференціального. Об'єднана робота цих трьох контролерів дає стратегію управління процесом контролю. ПД-регулятор управляє змінними процесу, такими як тиск, швидкість, температура, витрата і т. Д. У деяких додатках використовуються ПД-регулятори в каскадних схемах, де для досягнення контролю використовуються два або більше ПД.

На рис. 1.6 показана технічна структура ПД-регулятора. Він складається з блоку PID, який дає свій висновок для обробки блоку. Процес/установка складається з кінцевих пристроїв управління, таких як виконавчі механізми, регулюючі клапани та інші керуючі пристрої для управління різними процесами промисловості/установки. Сигнал зворотного

зв'язку від технологічної установки порівнюється з вхідним сигналом $u(t)$, і відповідний сигнал помилки $e(t)$ подається на алгоритм ПІД-регулювання. Згідно пропорційним, інтегральним і диференціальних розрахунками в алгоритмі, контролер виробляє комбінований відповідь або керований вихід, який застосовується до пристроїв управління установкою.

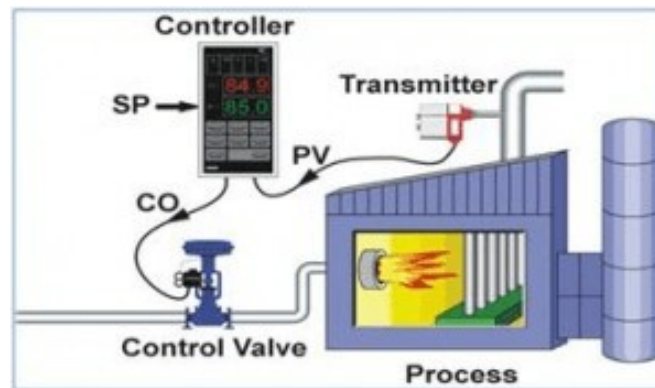


Рисунок. 1.6 – Технічна структура ПІД-регулятора

ПІД-регулятори застосовуються повсюдно в індустріальній і побутовій техніці. Вони є невід'ємною частиною таких пристроїв як частотні перетворювачі для керування двигунами, температурні контролери (термостати), системи кондиціонування тощо.

Широкий модельний ряд з різними робочими характеристиками дозволяє практично необмежено застосовувати контролери температури з ПІД-регулятором в промисловості. Пристрої можуть інтегруватися в автоматичні системи управління, в тому числі спільно з ПЛК і ПК.

Термоконтролер застосовуються для управління різними технологічними процесами, пов'язаними з температурною обробкою в енергетиці, металургії, хімічній промисловості, харчовому виробництві та багатьох інших. Можливість підключення різних термодатчиків дозволяє контролювати як високотемпературні процеси, так і негативні значення температур, що дозволяє застосовувати термоконтролер з ПІД-регулятором не тільки при виробництві, а й для контролю перевезення та зберігання

продуктів і матеріалів, а також для контролю мікроклімату будівель і приміщень.

Температурні контролери з можливістю ПІД-регулювання можуть вирішувати кілька завдань одночасно:

- забезпечення зворотного зв'язку в системах контролю температури;
- індикація поточного рівня контрольованих параметрів;
- регулювання і підтримка температури та інших фізичних величин в автоматичних системах;
- одночасне управління нагріванням і охолодженням;
- модульне виконання для збору інформації від декількох датчиків температури і управління декількома пристроями.

В окремих моделях можуть бути реалізовані додаткові можливості застосування для розширення функціоналу.

ПІД-регулювання, що використовується термоконтролером, дозволяє більш точно управляти рівнем температури і задавати необхідне значення уставки. Різні варіанти виконання ПІД-регуляторів температури можуть мати додаткові переваги:

- великий вибір підключаються датчиків температури;
- низька похибка роботи;
- наявність індикатора для відображення результатів вимірювання, значення уставки і робочих станів;
- зручне програмне забезпечення для налаштування і управління;
- кілька режимів регулювання, включаючи можливість автоматичного управління роботою;
- різні керуючі виходи;
- можливість монтажу в шафу управління і на DIN-рейку і багато інших.

При використанні пропорційного режиму роботи ПІД-регулятора термоконтроллера необхідно враховувати появу статистичної помилки, що

впливає на стабілізацію значення температури. Вплив статистичної помилки на роботу знижується при використанні інших режимів ПДД-регулювання.

Обмеженням у використанні окремих моделей контролерів температури з ПДД-регулюванням може стати несумісність з окремими видами термодатчиків і відсутність необхідних виходів для підключення обладнання. Це необхідно враховувати при підборі конкретної моделі контролера для роботи в конкретних умовах.

Температурний контролер з ПДД-регулятором формує сигнал зворотного зв'язку для виконавчого обладнання на основі інформації, що надходить від підключеного датчика температури. Сигнал управління складається з трьох величин: пропорційної, що інтегрує і диференціює, що розраховуються на підставі вхідного сигналу.

1. Пропорційна величина показує відхилення поточної величини контрольованої температури від заданого значення уставки. Чим більше відхилення, тим більше вихідний сигнал.

2. Інтегральна величина визначає інтеграл зміни відхилення значень за часом.

3. Дифференціююча величина показує швидкість зміни відхилення.

Робота ПДД-регулятора в залежності від термоконтроллера може відбуватися в різних режимах:

– ПДД-регулювання, при якому керуючий сигнал складається з суми всіх трьох величин;

– ПІ-регулювання - сума пропорційної і інтегрує величин;

– ПД-регулювання - сума пропорційної і диференціює величин;

– П-регулювання, при якому для формування вихідного сигналу розраховується тільки пропорційна величина.

Регулювання може здійснюватися в ручному або автоматичному режимах, а також за заданою програмою, якщо це передбачено контролером.

В якості виконавчого обладнання використовуються нагрівач і охолоджувач, або пристрої для подачі гарячого теплоносія або хладоагента.

Багатоканальні термконтролери можуть здійснювати одночасне керування нагрівальними і охолоджуючими процесами за двома і більше вихідних каналах управління.

1.3 Системи автоматичного регулювання температури

В останні роки питання енергозбереження є одним з першочергових. Це проявляється у використанні енергозберігаючих технологій та пристроїв. Під терміном "Розумний будинок" часто мають на увазі сучасні будівлі (офіси, будинки, квартири) в які впроваджені різні системи автоматизації, такі як освітлення, мікроклімат, комунікаційні системи, безпеку. Однією з основних завдань даної системи є підвищення комфорту мешканців та економія ресурсів за рахунок автоматичного регулювання температурних режимів [3].

Існує велика кількість методів автоматичного регулювання температури: метод розміщення полюсів, методи, засновані на використанні логарифмічних частотних характеристик, на базі фільтра Калмана і багато інших. Всі вони класифікуються за призначенням, принципом дії, конструктивним особливостям, виду використовуваної енергії, характеру зміни регулюючого впливу тощо.

За принципом дії вони поділяються на регулятори прямої і непрямой дії. Регулятори прямої дії не використовують зовнішню енергію для процесів управління, а використовують енергію самого об'єкта управління (регульованої середовища). Прикладом таких регуляторів є регулятори тиску. В автоматичних регуляторах непрямой дії для його роботи потрібне зовнішнє джерело енергії.

За родом дії регулятори поділяються на безперервні та дискретні. Дискретні регулятори, в свою чергу, поділяються на релейні, цифрові і імпульсні.

По виду використовуваної енергії вони поділяються на електричні

(електронні), пневматичні, гідравлічні, механічні та комбіновані. Вибір регулятора по виду використовуваної енергії визначається характером об'єкта регулювання і особливостями автоматичної системи. В сучасних системах управління використовуються цифрові програмні регулятори.

Згідно із законом регулювання вони поділяються на однопозиційні, двохпозиційні і трипозиційні. Типові регулятори: інтегральні – скорочено І, пропорційні – скорочено П, пропорційно-інтегральні – ПІ, пропорційно-диференціальні – ПД, і пропорційно-інтегрально-диференціальні – ПІД. Двопозиційні регулятори знайшли широке поширення, завдяки своїй простоті і малої вартості.

За призначенням регулятори поділяються на спеціалізовані (наприклад: регулятори рівня, тиску, температури тощо.) і універсальні з нормованими вхідними та вихідними сигналами, придатні для управління різними параметрами.

По виду виконуваних функцій поділяються на регулятори автоматичної стабілізації, програмні, коригувальні, регулятори співвідношення параметрів та інші.

Незважаючи на розвинені сучасні методи проектування складних регуляторів, переважна більшість промислових систем управління засновані на П, ПД, ПІ і ПІД регуляторах (близько 90 - 95%). Регулятори цього типу дуже добре зарекомендували себе в практичних завданнях. ПІД регулятор застосовується в інерційних системах з відносно малим рівнем перешкод вимірювального каналу. Перевагою ПІД регулятора є швидкий вихід на режим, точне утримання заданого параметра (наприклад, температури) і швидка реакція на впливи. ПІД регулятор може економити до 35% потужності виконавчого механізму.

Існують різні способи реалізації ПІД-регулятора на базі різних мікроконтролерів з використанням різних мов програмування. У нашому випадку Arduino дає можливість зробити це простіше і дешевше - використовуючи бібліотеку PID з вбудованою функцією PID (), що реалізує

ПД регулятор.

Один із способів вибору коефіцієнтів для ПД-регулятора є експеримент з реальним об'єктом. Процес настройки ПД регулятора за експериментальними правилами інтуїтивний і спроби налаштувати регулятор без початкового наближеного розрахунку коефіцієнтів можуть виявитися марними. Грунтуючись на огляді існуючих методик налаштування можна зробити висновок, що методи Циглера-Нікольса і Чину, Хронса, Ресвіка найбільш виправдані для експлуатації в промислових умовах.

Після розрахунку коефіцієнтів регулятора бажано зробити його налаштування. Налаштування можна виконати на основі правил, які використовуються для ручного налаштування. Ці правила отримані з досвіду, теоретичного аналізу і чисельних експериментів. Вони зводяться до наступного: збільшення пропорційного коефіцієнта збільшує швидкодію і знижує запас стійкості; зі зменшенням інтегральною складовою помилка регулювання з плином часу зменшується швидше; зменшення постійної інтегрування зменшує запас стійкості; збільшення диференціальної складової збільшує запас стійкості і швидкодію.

Сформульовані вище правила справедливі тільки поблизу оптимального налаштування регулятора. Далеко від нього ефекти можуть бути іншими. При регулюванні теплових процесів налаштування тільки за правилами може зайняти неприпустимо багато часу.

Розглянемо управління температурою повітря в кімнаті. Виділяються три діапазону температур: нижче 20°C - повітря підігрівається; від 20°C до 24°C - дій ніяких не потрібно, це зона комфорту; вище 24°C - повітря охолоджується (подається сигнал на охолодження). Наприклад, необхідно підтримувати температуру на рівні 22°C . У розглядається тільки регулювання температури при нагріванні. Є об'єкт регулювання (температура повітря), цифровий датчик, що вимірює цю температуру. Датчик повідомляє значення температури мікроконтроллеру по зворотному зв'язку. Мікроконтролер обчислює необхідність регулювання температури за

допомогою нагрівання або охолодження.

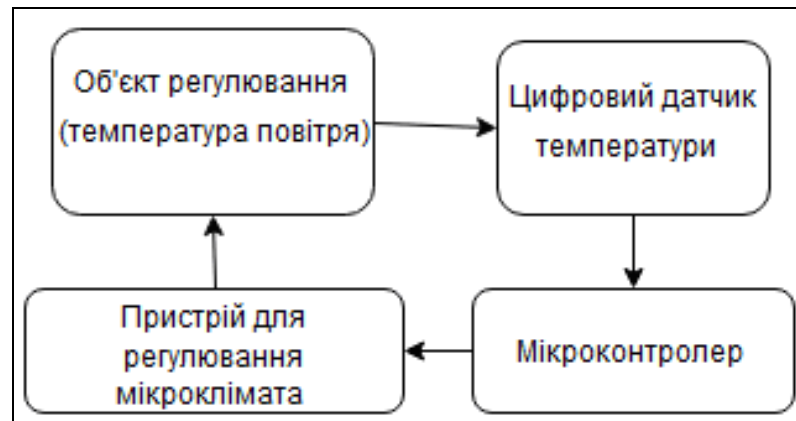


Рисунок 1.7 - Структурна схема системи для регуляції температури

Таким чином, є вхідні дані - поточна температура і температура, до якої необхідно нагріти об'єкт. На виході необхідно отримати значення потужності $u(t)$, яке необхідно передати на пристрій, що нагріває. Для реалізації функції регулювання необхідно використовувати ПД-регулятор, закон якого представлений формулою (1.1) :

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt}. \quad (1.1)$$

де $u(t)$ - результуючий вихідний керуючий вплив;

P - пропорційність складова;

I - інтегральна складова;

D - диференціальна складова;

$e(t)$ - поточна помилка (відхилення температури від заданого значення).

Різниця між поточною і заданою температурою $e(t)$ множиться на змінний коефіцієнт K_p , який настраюється, та видає потужність, яку треба видати в даний момент часу. Це пропорційна складова. Вона працює в момент появи неузгодженості – тобто моментально відгукується на

поведінку об'єкта. Якщо об'єкт почав нагріватися, потужність починає знижуватися. Якщо температура перевищує заданий поріг, нагрівач відключається. В реальних умовах ефект від впливу проявляється з запізненням, так як на об'єкт впливає не тільки нагрівач, а й навколишнє середовище: розігрітий нагрівач остигає, віддаючи тепло кімнаті, тому, як тільки вимикається потужність, він відразу починає остигати. Використання тільки пропорційною складовою регулятора призводить до коливань температури близько заданого значення, і чим вище вплив навколишнього середовища, тим сильніше ці коливання.

Щоб компенсувати зовнішні впливи на нагрівач, додають інтегральну складову. Вся неузгодженість, яка була в системі, накопичується в інтеграторі (повітря перегрівается - сума зменшується, повітря недостатньо нагрітий - сума збільшується). І накопичений інтеграл, зі своїм коефіцієнтом, дає свою «прибавку-убавку» до потужності. В результаті такого підходу, при стаціонарному процесі, через деякий час інтеграл підбирає такий внесок в суму з потужністю, який компенсує втрати навколишнього середовища, і коливання зникають – інтеграл стає стабільним, тому величина видаваної потужності стає постійною. Причому так як при цьому тримається потрібна температура, неузгодженість відсутня, пропорційна складова не працює взагалі.

Для компенсації впливу затримок між впливом і реакцією системи, в систему додається диференціальна складова. Просто пропорційний регулятор дає потужність весь час, поки температура не досягне потрібної точки. Пропорційно-диференційний регулятор починає знижувати потужність, що подається, раніше, ніж температура досягла потрібної точки (так як неузгодженість зменшується, є наявність негативної похідною, що зменшує вплив). Це дозволяє мінімізувати перегрів при великих переходах.

Експеримент проводився в такий спосіб. Для макета була зроблена кімната – фанерний короб. Нагрівалося повітря в цьому коробі. Використовувався нагрівач з регульованою потужністю. Для проведення

експерименту використовувався мікроконтролерний ПІД-регулятор на платі Arduino. В Arduino використовувалася функція PID () з бібліотеки PID. Заданий (бажане) значення температури $T_{\text{зад}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$. Значення регульованої температури відображалося на комп'ютері для збереження і подальшої побудови графіків.

Далі був виконаний попередній розрахунок коефіцієнтів регулятора за методом Циглера-Нікольса. Для цього, на початку, коефіцієнтам K_i і K_d були призначені нульові значення. Потім поступово збільшувався K_p до критичної позначки $K_c = 12$, при якому виникають автоколивання. На рис. 1.8 графіку 1 відповідає $K_p = 1$, графіку 2 - $K_p = 4$, графіку 3 - $K_p = K_c = 12$.

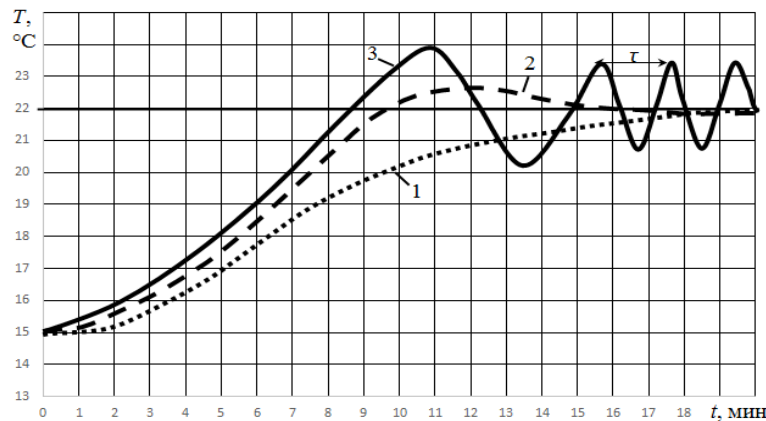


Рисунок. 1.8 – Приклад підбору коефіцієнта K_p

Далі був виміряний період автоколивань $\tau = 102 \text{ с}$, а після розраховані значення коефіцієнтів K_p , K_i і K_d : $K_p = 0,60 * K_c = 7,2$, $K_i = 2,0 * K_p / \tau = 0,14$, $K_d = K_p * \tau / 8 = 91,8$, яким відповідає графік 2 на рис. 1.8.

Потім, експериментально в районі обчислюваних значень були підібрані коефіцієнти, щоб забезпечити необхідний перехідний процес. З фіксованими значеннями K_p був обраний коефіцієнт K_i , потім з підібраними фіксованими значеннями K_i і K_p підбирався K_d . В результаті був отриманий набір коефіцієнтів, який забезпечував перехідний процес, представлений графіком зміни температури під номером 3 (рис. 1.9). Цьому графіку

відповідають коефіцієнти $K_p = 7,2$, $K_i = 0,06$, $K_d = 108$. На рисунку графіка 1 відповідають коефіцієнти $K_p = 12$, $K_i = 0$, $K_d = 0$.

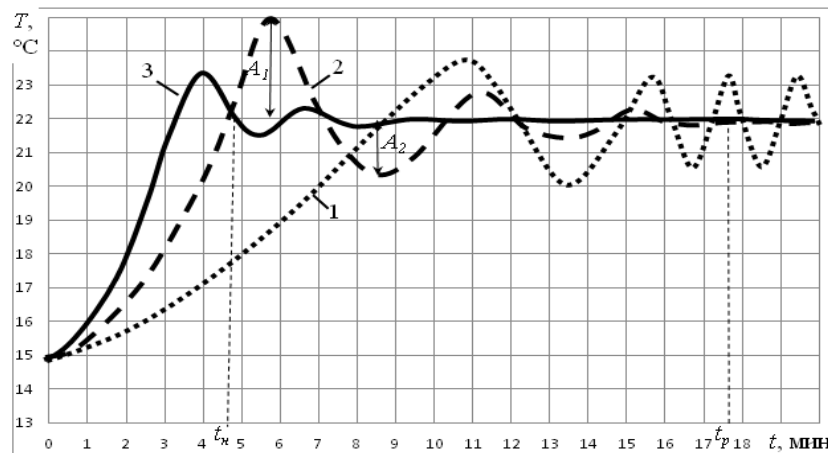


Рисунок 1.9 – Приклад підбору коефіцієнтів K_p , K_i та K_d

Якість регулювання оцінювалося за характеристиками перехідного процесу: перерегулювання, час наростання, час перехідного процесу, ступінь загасання. Що наведено на рис.4, де t_n – час наростання; t_p – час перехідного процесу; A_1 – перше п перерегулювання; A_2 – друге п перерегулювання; $d = A_1/A_2$ – ступінь (декремент) загасання перехідного процесу (відношення першого перерегулювання до другого). Графік 3 (рис. 1.8) відповідає кращим показникам якості регулювання: $t_n = 200$ с, $t_p = 540$ с, $A_1 = 1,3$ °C, $A_2 = 0,55$ °C, $d = A_1 / A_2 = 1,3 / 0,55 = 2,36$.

Експеримент був реалізований за допомогою пристрою Arduino Uno на базі мікроконтролера ATmega328. Arduino – це відкрита програмована апаратна платформа для роботи з різними фізичними об'єктами. Вона включає в себе все необхідне для комфортної роботи з мікро контролером.

Для реалізації необхідного модуля ПД регулювання були використані наступні модулі: датчик температури, нагрівальний елемент, а також Arduino Uno. Датчик температури передавав дані безпосередньо на Arduino Uno, а він в свою чергу обробляв їх і видавав бажане значення на нагрівальний елемент. Нагрівальний елемент в залежності від значення, яке посилається на нього,

змінює потужність нагрівання від 0 до 100 відсотків. Після чого цикл повторюється заново.

1.4 Постановка завдання дослідження

Метою кваліфікаційної роботи є розробка процедур моделювання MEMC-компонентів в системах регулювання зі зворотними зв'язками з використанням математичного пакету Matlab Simulink.

Об'єктом дослідження є MEMC-компоненти в системах регулювання температури з використанням ПІД-регуляторів

Предметом дослідження є моделі мікромеханічних систем зі зворотними зв'язками в середовищі Matlab Simulink.

До завдань дослідження входять:

- 1) аналіз класифікації систем автоматичного регулювання з ПІД-регуляторами;
- 2) аналіз загальної структури мікросистеми зі зворотними зв'язками;
- 3) розробка моделі системи регулювання теплових параметрів;
- 4) побудова та моделювання моделі системи регулювання теплових параметрів в середовищі Matlab Simulink;
- 5) проведення експерименту в Matlab Simulink по підбору коефіцієнтів ПІ-регулятора в системі регулювання температури.

2 ТЕМПЕРАТУРНІ МЕМС-СЕНСОРИ В СИСТЕМАХ РОЗУМНОГО БУДИНКУ

2.1 Класифікація температурних МЕМС-сенсорів

Одним з головних об'єктів в МЕМС є сенсори. Сенсори є елементами багатьох систем – з їх допомогою отримують інформацію про параметри контрольованої системи або пристрою.

Сенсор – пристрій, що перетворює контрольовану фізичну величину (температуру, силу світла, частоту, тиск та інших величин) в електричний сигнал, зручний для вимірювання, передачі, зберігання, обробки, реєстрації, а іноді і для впливу їм на керовані процеси. Сенсор - це пристрій, що сприймає зовнішні впливи і реагує на них зміною електричних сигналів. Під зовнішнім впливом розуміється кількісна характеристика об'єкта, його властивість або якість, яку необхідно сприйняти і перетворити в електричний сигнал.

Призначенням сенсорів є перетворення фізичної величини (електричної або найчастіше неелектричної) в електричний сигнал, який може бути далі посилений, перетворений, а також виміряний за допомогою електронних пристроїв і / або переданий по лініях зв'язку.

Вихідними сигналами сенсорів можуть бути напруга, струм або заряд, що описуються такими характеристиками як амплітуда, частота, фаза або цифровий код.

Набір характеристик, що описують сигнал, називається форматом вихідного сигналу. Кожен сенсор характеризується набором вхідних параметрів (будь-якої фізичної природи) і набором вихідних параметрів.

Розвиток і вдосконалення сенсорів в значній мірі визначається досягненнями в галузі фізики, хімії, механіки, радіотехніки та інших наук. Особливе місце в розвитку сенсорів займають досягнення і можливості сучасних технологій. Принципи дії сенсорів можуть бути самими

різноманітними в залежності від фізичної природи вимірюваної величини, її абсолютного значення, необхідної точності перетворення тощо. Проте в переважній більшості випадків перетворення вхідних фізичних величин у відповідні вихідні сигнали пов'язано з перетворенням енергії, в тому числі перетворенням енергії одного виду в інший. Енергетичне уявлення принципу роботи вимірювальних перетворювачів, що базується на двох фундаментальних законах - закон збереження енергії і принципі оборотності, стало передумовою для створення основ загальної теорії вимірювальних перетворювачів і їх уявлення у вигляді пасивних чотириполіусників зі сторонами різної фізичної природи [4].

За принципом перетворення енергії розрізняють активні (генераторні) і пасивні (параметричні) сенсори, що відрізняються способами формування сигналу і схемами підключення.

Активний сенсор генерує власний електричний сигнал і не вимагає додаткового джерела енергії і у відповідь на зміну зовнішнього впливу на його виході завжди з'являється електричний сигнал. Активні сенсори інакше називають генераторними: у них в результаті зовнішнього впливу, на виході з'являється різниця електричних потенціалів, які є безпосередньо вихідним сигналом. Прикладом активних сенсорів є термопари.

Пасивний сенсор для своєї роботи вимагає джерело зовнішньої енергії, яку називають сигналом збудження. При формуванні вихідного сигналу пасивний сенсор тим чи іншим способом діє на сигнал збудження. Оскільки такі сенсори змінюють свої характеристики у відповідь на зміну зовнішнього впливу, їх іноді називають параметричними.

У пасивних сенсорах, відбувається зміна їх параметрів, які моделюють сигнали збудження, і ця модуляція несе в собі інформацію про зміну зовнішньої дії. Наприклад, термістори є температурно-чутливими резисторами. Самі по собі термістори не виробляють ніяких електричних сигналів, але при проходженні через них електричного струму (сигналу збудження), їх опір може бути визначено по зміні струму і падіння напруги

на них. Значення опору відображає вимірювану температуру, яка може бути знайдена по відомим залежностям. Прикладом активних датчиків є резистивний тензодатчик, чиє електричний опір залежить від величини його деформації. Прикладами активних сенсорів є радар і лідар, якими вимірюється затримка в часі між випромінюванням і реєстрацією повернутого сигналу, таким чином визначаючи розміщення, швидкість і напрямок руху об'єкта.

За кількістю величин, які сприймаються та перетворюються, сенсори поділяються на одномірні сенсори, які оперують з одною вхідною величиною, та n-мірні (багатовимірні) сенсори, що сприймають кілька (n) вхідних величин.

Сенсори можуть перебувати в безпосередньому контакті з об'єктом, тобто розташовуватися на поверхні або всередині об'єкта або не мати безпосереднього зв'язку з ним. Сенсори, які не перебувають у безпосередньому зв'язку з об'єктом, називають безконтактними. У таких сенсорах обмін енергією між сенсором та об'єктом може здійснюватися за допомогою магнітного поля, ультразвуковим сигналом. До безконтактних також відноситься більшість оптичних та інфрачервоних сенсорів, наприклад інфрачервоні термометри і подібні сенсори. Контактні сенсори - це сенсори, які вимагають прямого контакту зі збудником.

Принцип вимірювання температури полягає у передачі невеликої порції теплової енергії від об'єкта вимірювання до сенсора, який перетворює теплову енергію в електричний сигнал. Коли контактний сенсор температури розташовують всередині об'єкта, температуру якого необхідно виміряти, або на його поверхні, між об'єктом дослідження і сенсором відбувається передача тепла за рахунок явища теплопередачі. При такому принципі вимірювання чутливий елемент сенсору або розігрівається або охолоджується. У безконтактних сенсорів так само як і у контактних відбувається охолодження або нагрівання чутливого елемента, але передача тепла відбувається за допомогою випромінювання.

Безконтактні сенсори використовуються для швидкого вимірювання температури об'єктів, коли встановлення контактних датчиків є неможливим, або є багато об'єктів дослідження, температуру яких необхідно визначити. Наприклад для визначення ефективності опалювальної системи у домі або багатоповерховому будинку шляхом вимірювання температури всіх батарей шляхом встановлення контактних сенсорів займе набагато більше часу, чим вимірювання пірометром, який має безконтактний сенсор температури.

Залежно від вибору точки відліку сенсори можна розділити на абсолютні і відносні. Абсолютний сенсор визначає зовнішній сигнал в абсолютних одиницях, що не залежать від умов проведення вимірювань, тоді як вихідний сигнал відносного сенсору в кожному окремому випадку залежить від відносної точки відліку і може трактуватися по-різному.

Прикладом абсолютного сенсору є термістори. Так, у сенсорів з терморезисторним чутливим елементом електричний опір безпосередньо залежить від абсолютної температури за шкалою Кельвіна. Прикладом відносного сенсора є термопара, оскільки сигнал на його виході є функцією градієнта температури на провідниках термопари, тому визначити конкретну температуру з вихідним сигналом датчика можна тільки щодо відомої базової точки відліку.

Сенсори температури призначені для неперервного вимірювання та контролю температури на поверхні чи у середовищі твердих тіл, у рідких та газоподібних середовищах (пар, вода, сипучі матеріали, хімічні реагенти).

2.2 Типи температурних сенсорів та їх застосування в системах розумного будинку

Температурні сенсори, що застосовуються в системах розумного будинку відносяться до найбільш часто використовуваних датчиків. Температурні сенсори використовуються всіма типами обладнання, яке знаходиться у домі: персональні комп'ютери, кухонна техніка, кондиціонери та домашні термостати та інше обладнання.

Зазвичай використовується два основних методи вимірювання температури: рівноважний та прогнозований.

При рівноважному методі вимірювання температури самі вимірювання проводять тоді, коли між досліджуваним об'єктом і чутливим елементом сенсора встановиться теплова рівновага, іншими словами коли температура досліджуваного об'єкта і сенсора буде однаковою. При використанні методу прогнозування під час вимірювання температури значення температури визначають за швидкістю зміни температури чутливого елемента і не потрібно чекати, доки наступить теплова рівновага.

При використанні рівноважного методу для вимірювання температури теоретично, потрібно нескінченно довгий час для досягнення абсолютної температурної рівноваги між об'єктом дослідження і датчиком. Оскільки зазвичай вимірювання температури проводять з заданою точністю, то у більшості випадків вважають, що за інтервал від 5 до 10 постійних часу настає квазірівноважний стан, взявши до уваги, що перехідний процес встановлення температури сенсора, як правило, відповідає експоненціальній характеристиці .

Типовий контактний сенсор складається з таких компонентів:

- чутливого елемента;
- виводів, якими можуть бути пластинки або провідники, а за наявності комутаційної головки вони під'єднуються до відповідних терміналів;
- захисного корпусу – спеціальної оболонки чи покриття, що захищає чутливий елемент від оточуючого середовища.

Типовий безконтактний оптичний датчик температури, складається з таких частин:

- чутливого елемента, що реагує на електромагнітне випромінювання;
- опорної конструкції з низькою теплопровідністю;
- герметичного корпусу, заповненого інертним газом (аргоном або азотом) чи сухим повітрям;

- захисного віконця, прозорого для випромінювання досліджуваного діапазону хвиль.

Температура, що вимірюється сенсорами, може виступати на виходах як аналоговий лінійний сигнал (струм або/та напруга), як цифровий код або бути логічним сигналом «увімкнено»/«вимкнено». При використанні логічного сигналу на виході сенсорів температури, застосовують сенсориреле і розглядають як реле контролю температури.

Найбільш поширеними типами температурних сенсорів є:

- термістори (рис. 2.1);
- резистивні датчики температури (RTD) (рис. 2.2);
- термопари (рис. 2.3).

Сенсор температури термістор – це чутливий резистор, що змінює свій активний електричний опір зі зміною температури. Як правило, термістори виготовляються з напівпровідникового керамічного матеріалу, такого як кобальт, марганець або оксид нікелю і покриваються склом. Вони являють собою невеликі герметичні плоскі диски, які порівняно швидко реагують на будь-які зміни температури. Термістори є термоперетворювачами опору. Принцип роботи одних і других сенсорних компонентів полягає у зміні опору провідника, або у разі термістора – опору напівпровідника від температури.

Термістори випускаються у вигляді стрижнів, трубок, дисків, шайб і бусинок (рис.2.1); розміри яких знаходяться у діапазоні від декількох мкм до декількох см. Для систем розумного будинку на їх основі розроблено системи та пристрої дистанційного і централізованого вимірювання і регулювання температури, протипожежної сигналізації та теплового контролю, температурної компенсації різних елементів електричного кола.

Термістори існують двох типів: РТС (з позитивним температурним коефіцієнтом) та NTC (з негативним температурним коефіцієнтом). Опір РТС термістора зі зростанням температури збільшується. А опір NTC термістора, навпаки, зі збільшенням температури зменшується, і цей тип є типом термісторів, що найчастіше використовується.



Рисунок 2.1 – Термістори

Перевагами термісторів є велика швидкість реагування зміни температури, їх точність, низька вартість. Цей прилад є точним та зручним у використанні сенсором будь-яких температурних змін.. Мають вищий опір в діапазоні від 2,000 до 10,000 ом. Набагато більша чутливість (~ 200 ом/°C) у межах обмеженого діапазону температур до 300°C.

Температурні сенсори RTD виконані з металу резистори, які змінюють свій опір в залежності від температури. RTD мають кращу довготривалу стабільність і точність у порівнянні з іншими стандартними типами сенсорів температури, при цьому їх діапазон вимірюваних температур варіюється від -200°C до +850°C. Вони дуже стабільні, і щодо легко можна реалізувати схему узгодження сигналів. Для створення RTD використовують дорогі метали, RTD коштують дорожче, ніж датчики інших типів. RTD-сенсори (термоперетворювачі опору) виготовлені з рідкісних металів, наприклад, платини, чий електричний опір змінюється відповідно до зміни температури.

Резистивний детектор температури має позитивний температурний коефіцієнт і на відміну від термісторів забезпечує високу точність вимірювання температури. Однак у них слабка чутливість. Pt100 є найбільш широко доступним датчиком зі стандартним значенням опору 100 Ом при 0°C. Основним недоліком є висока вартість.



Рисунок 2.2 – Резистивний датчик температури

Резистивні температурні сенсори мають переваги: широкий діапазон температур від -200 до 650°C , забезпечують високий вихід струму падіння, а також, більш лінійні характеристики у порівнянні з термопарами та термоопорами.

Термопари зазвичай використовуються для вимірювання вищих температур і ширших температурних діапазонів. Використання сенсорів температури – термопар обумовлено точністю та роботою у широкому діапазоні температур від -200°C до 2000°C . Термопара виготовляється із двох різнорідних металів, зварених разом, що дає ефект різниці потенціалів від температури. Від різниці температур між двома спаями утворюється напруга, яка використовується для вимірювання температури. Різниця напруг між двома спаями називається "ефект Зеебека". Величина напруги, що генерується, залежить від типу металу. Практичні застосування ефекту Зеебека використовують два різнорідні метали, які з'єднані на одному кінці і розділені на іншому. Температуру з'єднання можна визначити за напругою на розімкнених кінцях проводів.

Існують різні типи термопар. Певні комбінації стали популярними, і вибір комбінації залежить від різних факторів, що включають вартість, доступність, хімічні властивості і стабільність. Для різних застосувань найкраще підходять різні типи і їх зазвичай вибирають на основі необхідного діапазону температур і чутливості.

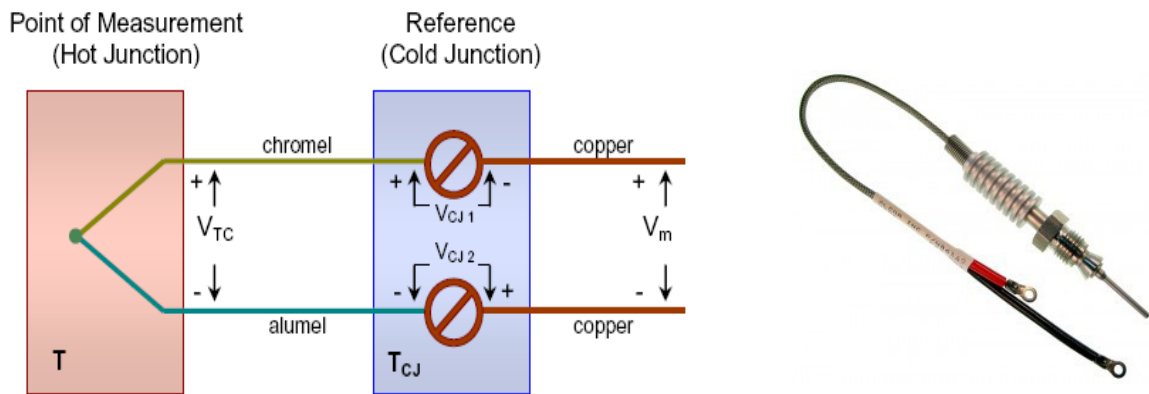


Рисунок 2.3 – Температурний сенсор – термопара

Сенсори температури бувають одноблочними або двоблочними. Двоблочний сенсор, який застосовується частіше що трапляється частіше, він складається з двох функціональних частин: датчика і перетворювача (актюатора). В залежності від того, для яких вимірів призначений контактний сенсор, і наскільки дійсним буде результат вимірювання, на практиці застосовують сенсори, що побудовані на трьох різних типах чутливих елементів: термісторах; термоперетворювачах опору; термоелектричних перетворювачах.

Термоперетворювачі опору виготовляють із міді або платини; вони відзначаються високою точністю (до $0,1^{\circ}\text{C}$), стабільністю показів, наближеністю характеристики до лінійної, взаємозамінністю.

2.3 Математична модель системи регулювання температурним режимом у приміщенні

Регулювання температури у контурі опалення і у опалювальному приміщенні дозволяє заощаджувати за даними, запозиченим із різних джерел, в житлових приміщеннях 7–8% енергоресурсів, а нежитлових приміщеннях – до 50–60% [5].

Основним принципом регулювання температури – підтримання оптимального температурного режиму, що може бути описаний

математичною моделлю та графіками залежності температури води, що подається в мережу, від температури зовнішнього повітря. Тільки за рахунок ретельнішої підтримки температурного графіка, яке може забезпечити автоматичний регулятор температури в приміщенні, вдається знизити витрати газу до 5%.

Для підтримки температури повітря на заданому рівні система опалення повинна виділяти до приміщення певну кількість тепла. Для цього необхідно отримати тепло та передати його приміщенню. Внаслідок цього система опалення складається з трьох основних елементів:

- пристрої для отримання тепла (генератор тепла);
- пристрої для транспортування тепла від місця отримання його до опалювального приміщення (теплопроводів);
- пристрої, що забезпечує передачу приміщенню підведеного до нього тепла (нагрівальних приладів).

Регулювання відпустки тепла у системах тепlopостачання здійснюється у джерелах тепла, центральних теплових пунктах, а безпосередньо у споживача регулювання, як правило, не здійснюється. У водяних системах тепlopостачання зазвичай проводиться так зване якісне регулювання подачі тепла. Воно полягає у зміні температури теплоносія відповідно до прийнятого температурного графіка.

Існує кілька ступенів регулювання кліматичних умов в опалювальному приміщенні:

- встановлення регулятора з постійною температурою;
- встановлення регулятора з температурою за графіком;
- встановлення регулятора за датчиком кімнатного повітря та за графіком одночасно;
- встановлення регулятора за температурою зовнішнього повітря, за графіком, за програмою з роздільним керуванням контурами системи опалення.

Важливим чинником щодо енергозбереження є інерційність системи

опалення.

Питання моделювання процесів теплообміну у різних середовищах розглядаються, наприклад, в [5], проте аналіз цих публікацій показує, що не приділяється увага питанням теплообміну всередині приміщень. У зв'язку з цим стає актуальним завдання розробки математичної моделі системи регулювання температури всередині приміщення. Метою регулювання є зниження витрат енергоресурсів на опалення за рахунок проектування автоматичного регулятора температури у приміщенні та контуру опалення.

Для досягнення мети необхідно розробити математичну модель системи регулювання температури в приміщенні та структурну схему системи управління, провести чисельні дослідження.

Розробимо як об'єкт управління модель кімнати, яка обмежується внутрішніми стінами і перекриттями, що складають контур, а також зовнішньою стіною з вікном. У кімнаті є джерела тепла. Приріст теплової енергії відбувається за рахунок опалювальних приладів, а її спад за рахунок поглинання стін, теплообміну із суміжними приміщеннями (коридор, сходи, тамбур), випромінювання у зовнішнє середовище через вікно та зовнішню стіну. Крім того, необхідно враховувати перенесення повітряних мас за рахунок вентиляції, щілин у віконних рамах та дверях (так званої інфільтрації).

Вихідні параметри для моделювання наступні. Приміщення, що обігривається, має розміри 4,5х3,5х3м. Огороджувальна конструкція має цегляну стіну товщиною 640мм з внутрішньою вапняною штукатуркою. Товщина штукатурки 15 мм. Коефіцієнти теплопровідності: для внутрішньої вапняної штукатурки $\lambda = 0,6$ ккал/м год. град; для цегляної кладки на важкому розчині $\lambda = 0,7$ ккал/м год. град.

Опір теплопереходу R_v для внутрішніх поверхонь стін, підлог, а також стель, що мають гладку поверхню становить $0,133 \text{ м}^2 \text{ год град/ккал}$. Опір теплопереходу для поверхонь, що торкаються безпосередньо із зовнішнім повітрям (зовнішні стіни, безгорищні покриття та інші) складає $0,05 \text{ м}^2 \text{ год}$

град/ккал [6].

Опір теплопереходу R_v для внутрішніх поверхонь стін, підлог, а також стель, що мають гладку поверхню, становить $0,133 \text{ м}^2 \text{ год град/ккал}$.

Опір теплопереходу для поверхонь, що стикаються безпосередньо із зовнішнім повітрям (зовнішні стіни, безгорищні покриття тощо) становить $0,05 \text{ м}^2 \text{ год град/ккал}$ [6]. Питома теплоємність повітря $C_v = 1,005 \text{ кДж/кг К}$. У приміщенні встановлено радіатор із п'яти секцій. Поверхня нагрівання однієї секції для цього типу радіатора становить $0,254 \text{ м}^2$ [6].

Температура в приміщенні повинна підтримуватись на рівні 20°C .

Для підтримки у приміщеннях стабільної температури необхідно безперервно компенсувати опаленням кількість тепла, що втрачається. Основні тепловтрати приміщень складаються з тепловтрат через окремі огорожі, що визначаються за формулою:

$$Q = F_{\text{OK}} \cdot \frac{1}{R_{\text{OK}}} (t_{\text{B}} - t_{\text{H}}), \quad (2.1)$$

де Q – тепловтрати через огорожу в ккал/год.;

F_{OK} – площа огорожувальної конструкції в м^2 ;

R_{OK} – опір теплопередачі конструкції огороження в $\text{м}^2 \text{ год } ^\circ\text{C} / \text{ккал}$;

t_{B} – температура повітря в приміщенні, $^\circ\text{C}$; t_{H} – температура зовнішнього повітря, $^\circ\text{C}$.

Тепловіддача нагрівального приладу Q може бути визначена з виразу:

$$Q = k_{\text{ПР}} \cdot F_{\text{ПР}} (t_{\text{ПР}} - t_{\text{H}}), \quad (2.2)$$

де $k_{\text{ПР}}$ – коефіцієнт теплопередачі нагрівального приладу в $\text{ккал/м}^2 \text{ год } ^\circ\text{C}$;

$F_{\text{ПР}}$ – площа поверхні нагрівального приладу м^2 ;

$t_{\text{ПР}}$ – середня температура теплоносія в приладі.

Середня температура теплоносія в приладі визначається за формулою:

$$t_{\text{ПР}} \approx \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (2.3)$$

де t_1 і t_2 - температура теплоносія відповідно в подавальному та зворотному трубопроводі.

Температура теплоносія в подавальному та зворотному трубопроводі залежить від температури зовнішнього повітря та температурного графіка теплової мережі, і може бути визначена за опалювальним графікам.

Для будинкового опалення використовується графік 95/70, де в чисельнику вказана температура теплоносія в трубопроводі, що подається, а в знаменнику – температура теплоносія у зворотному зв'язку .

Аналіз регулювання температури повітря в приміщенні, що обігрівается, можна описати диференціальним рівнянням. Щоб спростити аналіз процесу, уявимо собі такий ідеальний процес, коли приміщення, що обігрівается або будинок - однорідне тіло, температура якого під всіма точками однакова.

Теплова енергія, що підводиться до приміщення Q , витрачається на нагрівання самого приміщення $Q_{\text{ПР}}$ та на покриття витрати теплової енергії через огорожувальні конструкції $Q_{\text{ОК}}$:

$$Q = Q_{\text{ПР}} + Q_{\text{ОК}}. \quad (2.4)$$

На основі (2.4) диференціальне рівняння теплового балансу приміщення, що обігрівается, має вигляд:

$$Q d\tau = G c_{\text{ПМ}} \frac{dt_{\text{ПМ}}}{d\tau} k + F_{\text{ОК}} \frac{t_{\text{ОК}}}{d\tau} \tau, \quad (2.5)$$

де F_{OK} – площа поверхні, що огороджують конструкцій; τ – час; $G_{ПМ}$ – маса приміщення; $c_{ПМ}$ – питома теплоємність; k_{OK} – коефіцієнт теплопередачі огороджувальних конструкцій; Δt_B – температурний напір, що визначається, як $\Delta t_B = t_B - t_H$, де t_B – температура повітря у приміщенні, t_H – температура зовнішньої середи. [6].

Перетворивши (2.5) отримано формулу:

$$\frac{Q}{k_{OK} \Phi_{OK}} + t_H = T_{ПМ} \frac{dt}{d\tau} + t_B, \quad (2.6)$$

де Q - теплова енергія, що підводиться до приміщення;

$T_{ПМ}$ - постійна часу опалювального приміщення, що визначається за формулою:

$$T_{ПМ} = \frac{G_{ПМ} c_{ПМ}}{k_{OK} \Phi_{OK}}. \quad (2.7)$$

Застосувавши операторний метод розв'язання диференціального рівняння отримано передавальну функцію опалювального приміщення:

$$W(p)_{ПМ} = \frac{\frac{Q}{k_{OK} \Phi_{OK}} + t_H}{T_{ПМ} p + 1}. \quad (2.8)$$

На підставі викладеного можна зробити такі висновки:

а) нагрівання та охолодження приміщень залежать не тільки від кількості тепла, що підводиться у приміщення, а також і від маси

приміщення;

б) постійна часу $T_{\text{пм}}$ у будівель тим більше, чим більша маса, теплоємність і чим менше теплопровідність їх внутрішніх та зовнішніх конструкцій (зовнішніх стін, перегородок, перекриття тощо);

в) зниження температури повітря в приміщенні після вимкнення опалення відбувається тим повільніше, чим вища температура зовнішнього повітря [6].

Структурна модель системи автоматичного регулювання температури представлена на рис. 2.4. Структурна модель системи складається з одного контуру, проте на виході контролюються 2 параметри: T_1 -температура в приміщенні, T_2 -температура в контурі опалення.

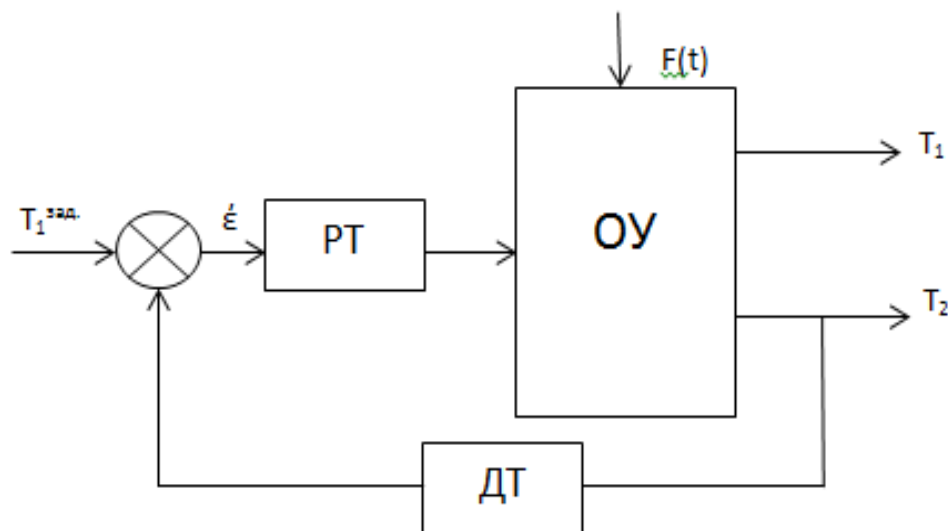


Рисунок 2.4 – Структурна модель системи автоматичного регулювання температури в приміщенні

Система регулювання температури містить компоненти: РТ – регулятор температури; ДТ – датчик температури, ОУ – об’єкт управління. В структурі сигнал $F(t)$ – вплив, що збуджує (температура зовнішнього середовища), T_1 – вплив, що задається, ϵ – статична помилка.

Принцип дії системи автоматичного регулювання температури полягає

в тому, щоб при виявленні відхилення температури в приміщенні від заданого рівня змінювати встановлене значення температури води в контурі опалення.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ЗАМКНЕНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ В MATLAB SIMULINK

3.1 Моделювання компонентів МЕМС зі зворотними зв'язками в Matlab Simulink

Проведений аналіз літературних джерел в області математичного забезпечення МЕМС дає змогу стверджувати, що практично відсутні моделі для опису об'єкта та самого процесу автоматизованого проектування, відсутні постановки задач для системного рівня проектування та не приділено належної уваги розробці математичних моделей, які враховують специфіку та особливості автоматизованого багаторівневого проектування мікроелектромеханічних систем. Найчастіше, розробляючи МЕМС, використовують такі програмні системи: Abaqus, MEMCAD, IntelliCAD, Solidis, Ansys, Simulink, Saber, SUGAR ver. 5.0, NODAS та ін. Наведені системи проектування МЕМС та їх компоненти, включаючи компоненти із зворотними зв'язками, мають ряд недоліків, зокрема: виконують проектування лише окремих процедур із загального процесу проектування та їх важко інтегрувати в єдину систему автоматизованого проектування (САПР); відсутня інформація про закладені в них математичні моделі та їх адекватність і точність; відсутні засоби для вбудовування власних математичних моделей.

В даний час Matlab є одним з головних інструментів для вирішення широкого спектру наукових і прикладних завдань, в таких областях як: моделювання об'єктів та розробка систем управління та регулювання, проектування комунікаційних систем, обробка сигналів та зображень, вимірювання сигналів та тестування, фінансове моделювання тощо.

Matlab представляє собою інтегрований засіб розробки, моделювання, апаратної реалізації та тестування систем управління на всіх етапах проектної діяльності. Matlab представляє має інтерактивне середовище

розробки алгоритмів та сучасний інструмент аналізу даних і дозволяє на порядок скоротити час вирішення типових завдань та спрощує розробку нової техніки та алгоритмів.

Система імітаційного моделювання Simulink є компонентом інтегрованого середовища інженерних розрахунків Matlab компанії The MathWorks. Simulink поєднує в собі наочність аналогових машин і точність цифрових обчислювальних машин. Simulink забезпечує користувачеві доступ до всіх можливостей пакета Matlab, в тому числі до великої бібліотеки чисельних методів.

Пакет Simulink дозволяє здійснювати дослідження (моделювання у часі) поведінку мікроелектромеханічних систем. Утворення чисельної моделі досліджуваної системи здійснюється шляхом графічного складання у спеціальному вікні схеми з'єднань елементарних візуальних блоків, що містяться в бібліотеках Simulink. Кожний блок фактично являє собою математичну програму. Лінії з'єднання блоків перетворюються на зв'язки між цими програмами, які дозволяють визначити послідовність виклику програм і пересилання інформації. У результаті такого складання утворюється обчислювальна програмна модель, яку прийнято називати Simulink-моделлю або S-моделлю, і яка зберігається у файлі з розширенням .mdl. Такий процес утворення обчислювальних програм прийнято називати візуальним програмуванням [6].

Використання Simulink є особливо зручним при моделюванні систем, які складаються із з'єднаних певним чином окремих функціональних пристроїв, поведінка яких описується відомими залежностями. Тоді схема з'єднань візуальних блоків у вікні блок-схеми S-моделі збігається з реальними зв'язками між цими пристроями. Ця обставина суттєво спрощує програмний аналіз і синтез систем управління.

Розширення системи Matlab Simulink характеризується простотою і наочністю використання при моделюванні різних пристроїв і систем, в тому числі і електротехнічних (рис. 3.1). У Simulink використовується візуально-

орієнтований підхід, коли готові блоки за допомогою миші переносять з бібліотеки в вікно документа Simulink і з'єднують лініями входи і виходи цих блоків. В результаті створюється S-модель, тобто Simulink-модель, яка запускається натисканням кнопки Run.

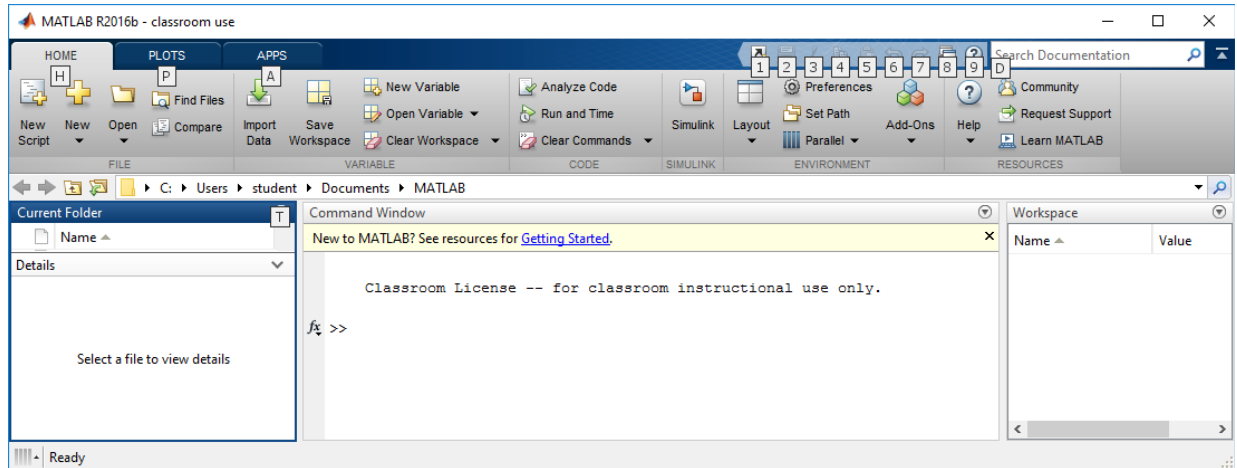


Рисунок 3.1 – Головне вікно системи Matlab Simulink

Бібліотека Simulink є набором різних візуальних блоків. Для доступу до них необхідно натиснути кнопку Simulink Library на панелі інструментів MATLAB. При цьому з'являється вікно браузера (оглядача, навігатора, програми перегляду) бібліотеки, представлене на рис. 3.2.

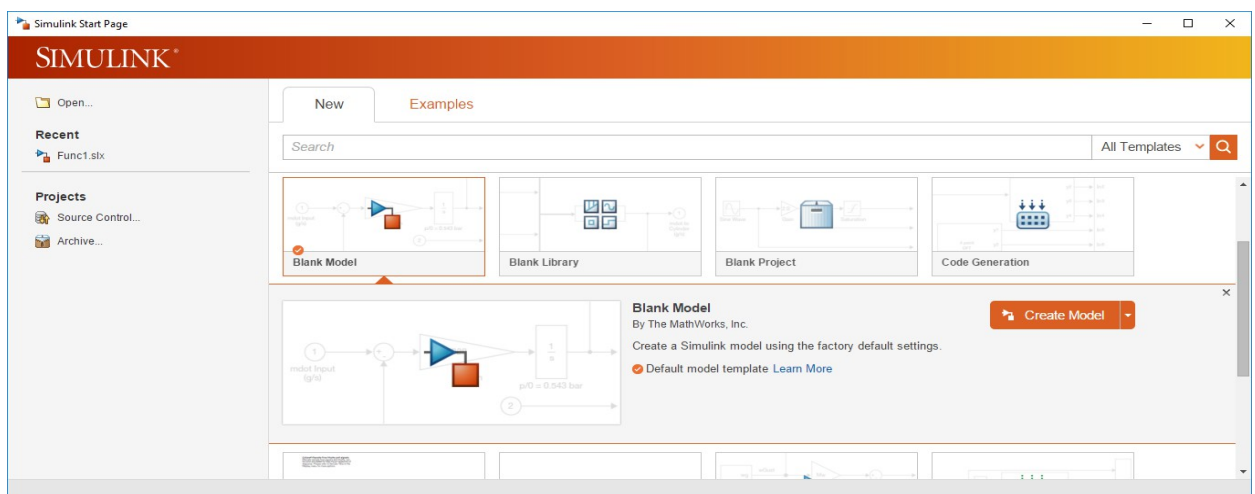


Рисунок 3.2 – Simulink Library Browser

Вікно браузера бібліотеки містить елементи (рис 3.3):

- заголовок, з назвою вікна - Simulink Library Browser;
- панель інструментів з ярликами найбільш часто використовуваних команд;
- вікно коментаря для виведення повідомлення про обраний блок;
- список розділів бібліотеки, реалізований у вигляді дерева;
- вікно вмісту розділу бібліотеки (список вкладених розділів бібліотеки або блоків).

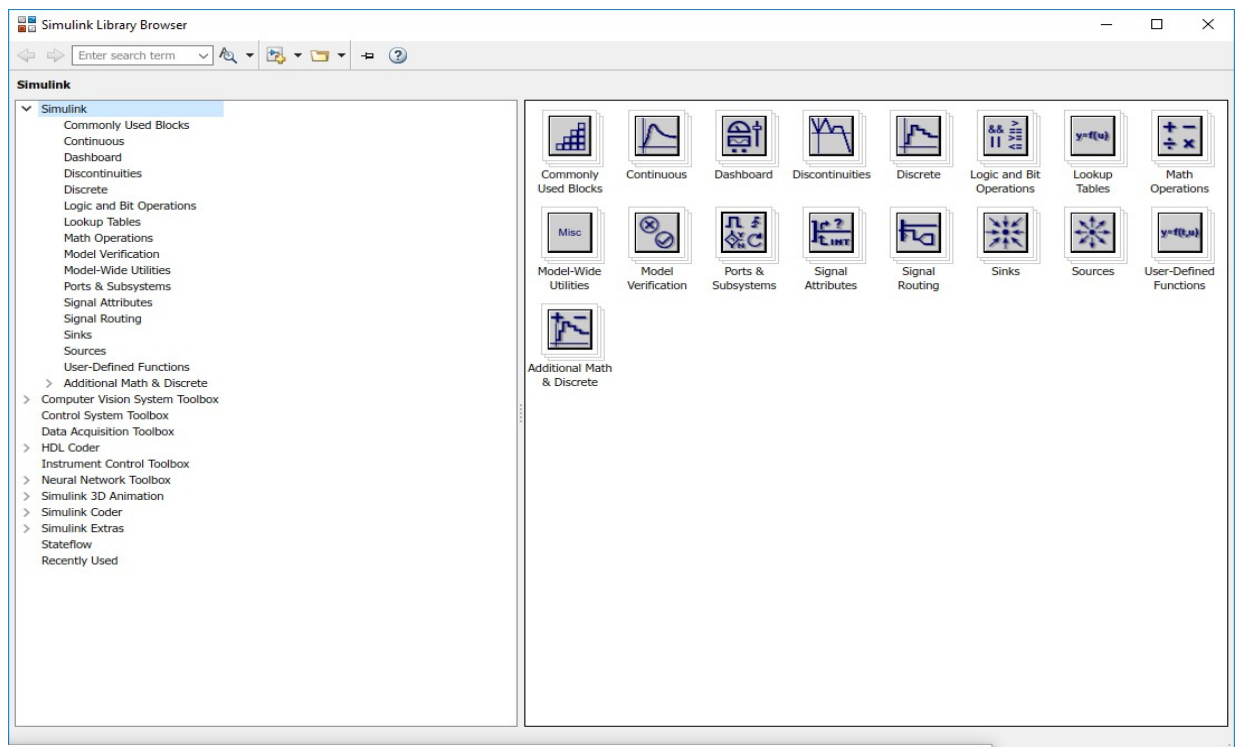


Рисунок 3.3 – Вікно браузера бібліотеки

Процес побудови S-моделі включає в себе компоновку моделі і завдання необхідних параметрів.

Компонування полягає у виборі з бібліотек Simulink необхідних блоків, їх розміщення у вікні браузера бібліотеки і їх з'єднання між собою. Далі для

кожного блоку встановлюються відповідні параметри, що відповідають вимогам, що моделюється.

На рис 3.4 представлено перелік задач по проектуванню систем автоматичного управління: Design – розробка моделей об'єкту управління та регуляторів, Implementation – реалізація алгоритмів управління системами, Test and verification – перевірка коректності роботи та якості управління.

Розробка систем керування починається з моделювання. Динаміка об'єкта управління може бути описана по-різному із застосуванням інструментів MathWorks: у вигляді диференціальних рівнянь, дискретних різницевих рівнянь, цифрових автоматів та алгоритмів, написаних формальними мовами. Будь-яка модель може бути представлена візуально у вигляді схеми зі складових блоків у середовищі Simulink, що дозволяє використовувати найбільш відповідний підхід до моделювання кожної підсистеми об'єкта управління.

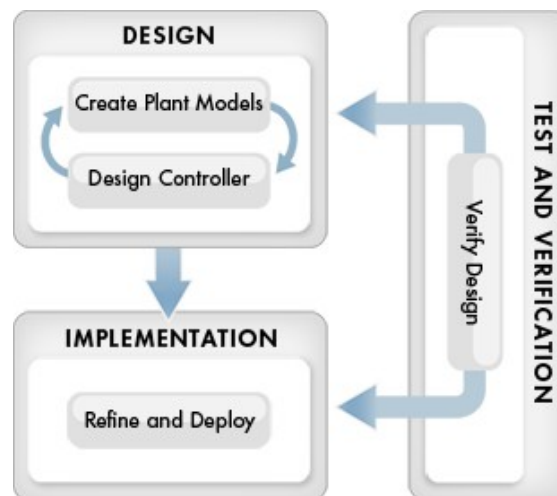


Рисунок 3.4 – Задачі щодо проектування систем управління, розв’язувані в Matlab

Якщо не відомі фізичні принципи роботи об'єкта управління, можна використовувати засоби для ідентифікації динамічних систем у Matlab, що дозволяє будувати моделі за результатами вимірів, отриманих від реального об'єкта. Ідентифікація систем у Matlab дозволяє швидко та візуально

отримати моделі об'єктів керування без детального знання їх структури та принципів роботи.

Системою моделювання був обраний емулятор Simulink. Розширення системи Matlab Simulink характеризується простотою і наочністю використання при моделюванні різних пристроїв і систем, в тому числі і електротехнічних.

Більшість об'єктів управління є фізичними системами, які складаються з типових елементів, пов'язаних конструктивно і функціонально. Середовище Simulink у Matlab підтримує побудову моделей систем на основі моделей стандартних механічних, електричних, електромагнітних, гідравлічних, пневматичних та теплотехнічних компонентів (наприклад, ідеальної пружини, електродвигуна тощо). Такий підхід дозволяє ефективно створювати моделі складних систем, які структурно та функціонально відповідають реальним об'єктам управління. У разі використання нестандартних компонентів можна доповнити бібліотеку фізичних компонентів новими елементами, які можуть бути задані у вигляді системи диференціальних рівнянь та з'єднанням інших компонентів.

Моделі фізичних об'єктів у бібліотеці компонентів містять такі фізичні параметри, наприклад, як маса, електричний опір, переріз трубопроводу тощо. Ці параметри можуть бути невідомі для конкретних компонентів в об'єкті управління.

У Simulink вбудований засіб Simulink Design Optimization, який дозволяє за експериментальними даними, отриманими в результаті вимірювань реального об'єкта, підібрати фізичні параметри моделі для узгодження результатів моделювання та вимірювань.

При розробці систем автоматичного регулювання актуальним завданням є використання таких алгоритмів управління, які включали будь-яку функцію, що обмежує вихідний сигнал. Вихідний сигнал регулятора повинен мати обмежену амплітуду принаймні з двох причин: по-перше, амплітуда вихідного сигналу не може перевищувати діапазон цифро-аналогового перетворювача на виході комп'ютера; по-друге, робочий

діапазон виконавчого механізму завжди обмежений, клапан не можна відкрити більше ніж на 100%, на двигун не можна подавати необмежений струм і напругу. Таким чином, існують нелінійності, які слід враховувати явно. У системах управління виробничими процесами часто використовуються регулюючі клапани (для теплоносія), які є нелінійністю типу насичення, коли верхня і нижня межі відповідають повністю відкритому або повністю закритому положенням (рис. 3.5).

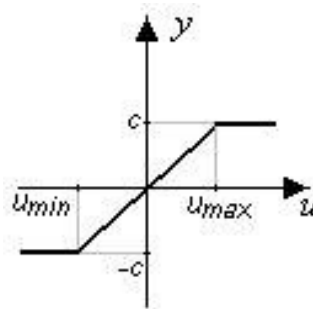


Рисунок 3.5 – Статична характеристика нелінійного елемента типу «насичення»

Рівняння нелінійного елемента типу насичення представлено формулою:

$$\bar{u} = \begin{cases} M u_{\min}, & \text{при } u < u_{\min} \\ \frac{1}{N} u, & \text{при } u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \\ 0 u_{\max}, & \text{при } u > u_{\max} \end{cases} \quad (3.1)$$

Інтегральне насичення є ефектом, який спостерігається, коли ПІ- або ПІД-регулятор протягом тривалого часу має компенсувати помилку, що лежить за межами діапазону керованої змінної, оскільки вихід регулятора обмежений, помилку складно привести до нуля.

Якщо помилка керування тривалий час зберігає знак, величина інтегральної складової регулятора стає дуже великою. Це зокрема відбувається, якщо керуючий сигнал обмежений настільки, що розрахунковий вихід регулятора відрізняється від реального виходу

виконавчого механізму. Так як інтегральна частина стає рівною нулю лише через деякий час після того, як значення помилки змінило знак, інтегральне насичення може призвести до великого перерегулювання.

Розглянемо як об'єкт управління модель кімнати, яка обмежується внутрішніми стінами та перекриттями, що становлять контур, а також зовнішньою стіною з вікном. У кімнаті є джерела тепла. Приріст теплової енергії відбувається за рахунок опалювальних приладів, а її спад за рахунок поглинання стін, теплообміну із суміжними приміщеннями (коридор, сходи, тамбур), випромінювання у зовнішнє середовище через вікно та зовнішню стіну. Крім того, необхідно враховувати перенесення повітряних мас за рахунок вентиляції дверей, так званої, інфільтрації [7].

Величина інтегральної складової ПІ-регулятора пропорційна площі, обмеженою перехідною характеристикою u і заданим значенням u^* . Якщо помилка $e = u^*(t) - u(t)$ позитивна, інтегральний член зростатиме; інакше він зменшується. Поки керуючий сигнал необмежений, насичення відсутнє. Якщо керуючий сигнал обмежений, реакція стає повільнішою і інтегральна частина збільшується, поки помилка не змінить знак при u^* . Однак навіть після зміни знака помилки керуючий сигнал $t=t_1$ залишається великим і позитивним протягом тривалого часу, що призводить до значного перерегулювання $u(t)$.

Отже, поліпшення якості функціонування системи автоматичного регулювання необхідно враховувати наявність обмежень, що пов'язані з нелінійностями у системі. Завдання синтезу системи з обмеженнями як нерівностей на керуючий вплив можна вирішити трьома методами:

- принцип максимуму;
- динамічне програмування;
- інженерні методики.

Принцип максимуму спрямовано на визначення програмного раціонального управління. Завдання оптимального управління зводиться до пошуку таких управлінь, що задовольняють обмеженням, які одночасно з переводом об'єкта (системи) з одного положення в інше забезпечують екстремум обраного функціоналу якості. Принцип максимуму – необхідна та

достатня умова оптимальності лише для лінійних об'єктів. Для загального випадку нелінійних об'єктів є лише необхідним. Це означає, що з його допомогою знаходиться не оптимальне управління, а деяка звужена група допустимих управлінь. Знаходження група допустимих управлінь повинно проводитись далі, наприклад, перебором.

Динамічне програмування, поряд з принципом максимуму, є основним математичним методом, за допомогою якого визначається оптимальне управління. На відміну від принципу максимуму, який формулюється таким чином, що виявляється орієнтованим насамперед на визначення оптимального управління у вигляді оптимальної програми, динамічне програмування дозволяє визначити оптимальне управління тільки у формі синтезуючої функції. Вирішення задач синтезу оптимальних систем за допомогою динамічного програмування чисельними методами потребує обсягу обчислювальної техніки з великим обсягом оперативної пам'яті.

При огляді існуючих інженерних методик було виділено 3 методики:

- методика розрахунку налаштувань регулятора;
- методика умовного інтегрування;
- методика із компенсацією інтегрального насичення.

За першою методикою експрес-метод розрахунку налаштувань ПІ-регулятора дозволяє безпосередньо визначати налаштування системи з урахуванням необхідного обмеження на максимальну величину регулюючої дії. В основу цього методу покладено формули для розрахунку параметрів динамічного налаштування ПІ-регулятора для відпрацювання сигналу, що задає шляхом повної компенсації більшої постійної часу.

Так як максимальна величина переміщення регулюючого органу пропорційна коефіцієнту посилення регулятора, то для обмеження величини максимального регулюючого впливу при відпрацюванні автоматичної системи регулювання (АСР) впливають необхідно зменшити коефіцієнт посилення регулятора. Для визначення параметрів пропорційної складової регулятора використовуються номограми.

Суть другої методики умовного інтегрування полягає в наступному: поки помилка досить велика, її інтегральна частина не потрібна для

формування сигналу, що управляє, а для управління досить пропорційної частини. Інтегральна частина, яка використовується для усунення стаціонарних помилок, необхідна лише в тих випадках, коли помилка невелика. При умовному інтегруванні ця складова враховується остаточному сигналі, тільки якщо помилка вбирається у певного порогового значення.

У разі великих помилок ПІ-регулятор працює як пропорційний регулятор. Вибір порогового значення активізації інтегрального члена – далеко ще не тривіальне завдання. В аналогових регуляторах умовне регулювання можна виконати за допомогою діода Зінера (обмежувача), який підключається паралельно з конденсатором в ланцюзі зворотного зв'язку операційного підсилювача в блоці блоку регулятора. Така схема обмежує внесок інтегрального сигналу.

Третя методика розробки систем автоматичного управління з компенсацією інтегрального насичення полягає у виконанні двокрокової процедури.

1. Розробити систему автоматичного регулювання, припускаючи, що лінеаризована модель адекватно відображає динаміку реальної замкненої системи.

2. Додатковий нелінійний зворотний зв'язок розробляється з метою поліпшення реакції до тих пір, поки не будуть виконані необхідні вимоги до системи.

Для більш детального розгляду існуючих алгоритмів компенсації інтегрального насичення були складені моделі серед візуального програмування Simulink пакету MatLab. Результатом даних досліджень є реалізація моделювання компонентів керування МЕМС зі зворотними зв'язками, з використанням Matlab/Simulink.

3.2 Створення Simulink-моделей інтеграторів зі зворотніми зв'язками в системі регулювання температури

У Simulink використовується візуально-орієнтований підхід, коли готові блоки за допомогою миші переносять з бібліотеки в вікно документа

Simulink і з'єднують лініями входи і виходи необхідних блоків. В результаті сформована Simulink-модель, яка запускається натисканням кнопки Run.

Нижче розглянуто Simulink-моделі, що реалізують різні алгоритми використання зворотного зв'язку та можуть бути використані в системах регулювання температурним режимом у приміщенні [7].

Simulink-модель за першим алгоритмом. У регуляторі використовується інтегратор з фіксатором вихідного сигналу. Схема включає фіксацію вихідного сигналу інтегратора на певному максимальному рівні (рис.3.6).

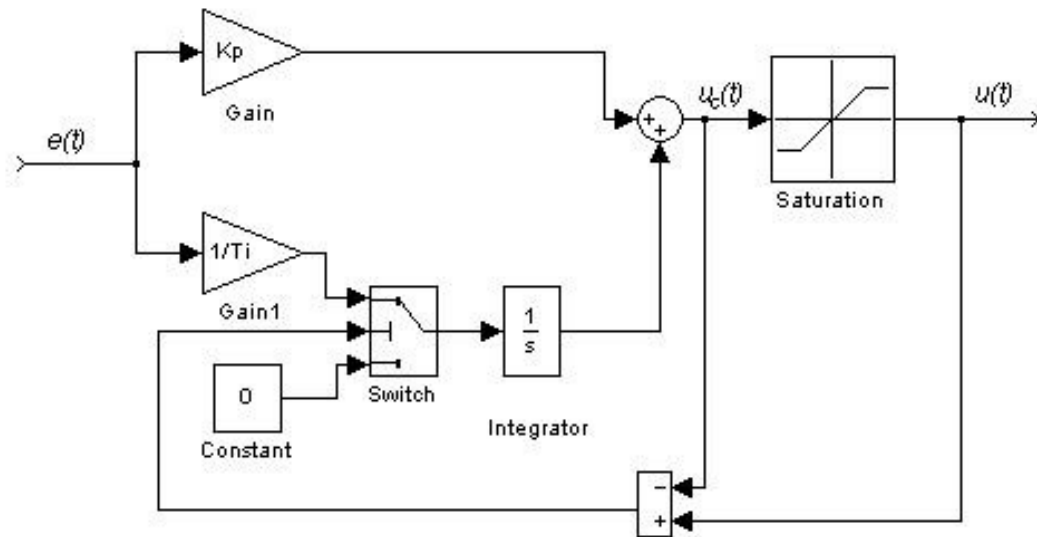


Рисунок 3.6 – Simulink-модель регулятора з фіксацією вихідного сигналу інтегратора

Simulink-модель за другим алгоритмом. Вимкнення інтегратора під час насичення. Схема містить відключення входу інтегратора при насиченні виконавчого механізму (рис. 3.7).

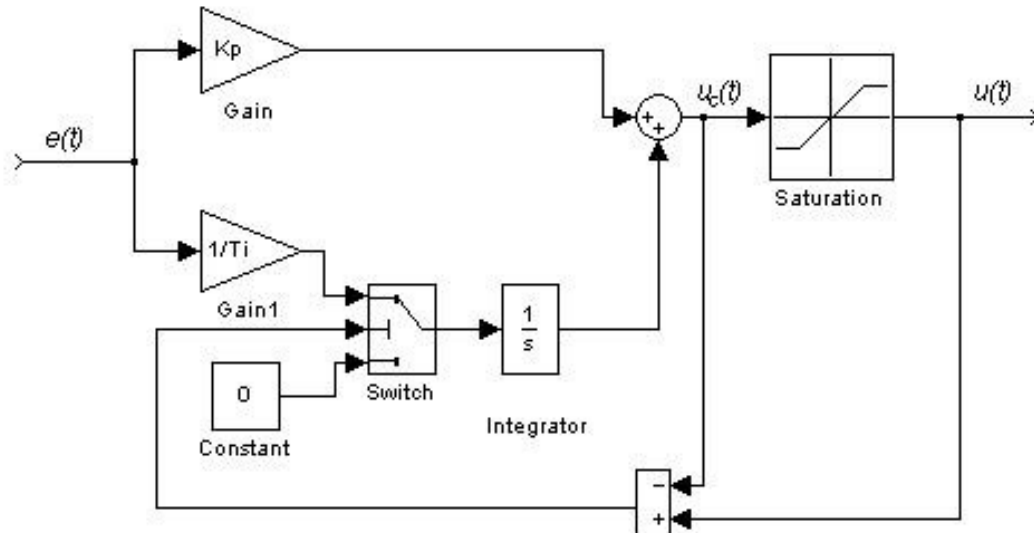


Рисунок 3.7 – Simulink-модель регулятора відключення входу інтегратора при насиченні виконавчого механізму

Simulink-модель за третім алгоритмом представляє собою схему нелінійної корекції. Регулятор складається із звичайного інтегратора в прямому ланцюзі та нелінійності типу зони нечутливості у ланцюгу зворотного зв'язку інтегратора (рис. 3.8).

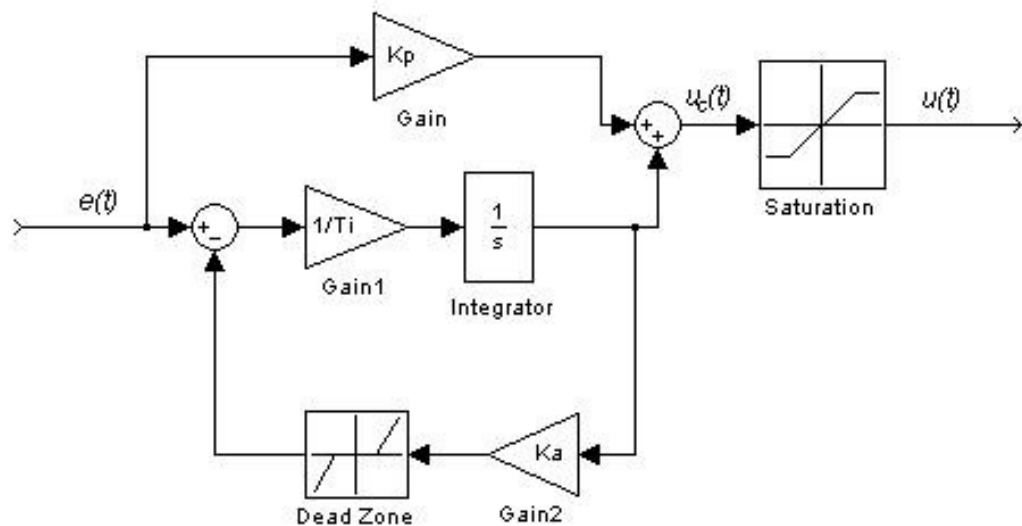


Рисунок 3.8 – Simulink-модель регулятора з корекцією нелінійності

Simulink-модель за четвертим алгоритмом використання зворотного зв'язку в режимі насичення. Схема включає додатковий зворотний зв'язок, який зменшує вхідний сигнал інтегратора пропорційно до помилки насичення e_s (рис. 3.9). На вхід інтегратора подається сигнал e_Q , який обчислюється за формулою:

$$e_Q = (-u_c + u) \mathcal{K}_Q = e_s \mathcal{K}_Q. \quad (3.2)$$

В даній моделі застосовується П-регулятор, так як в зворотному зв'язку встановлена пропорційна ланка.

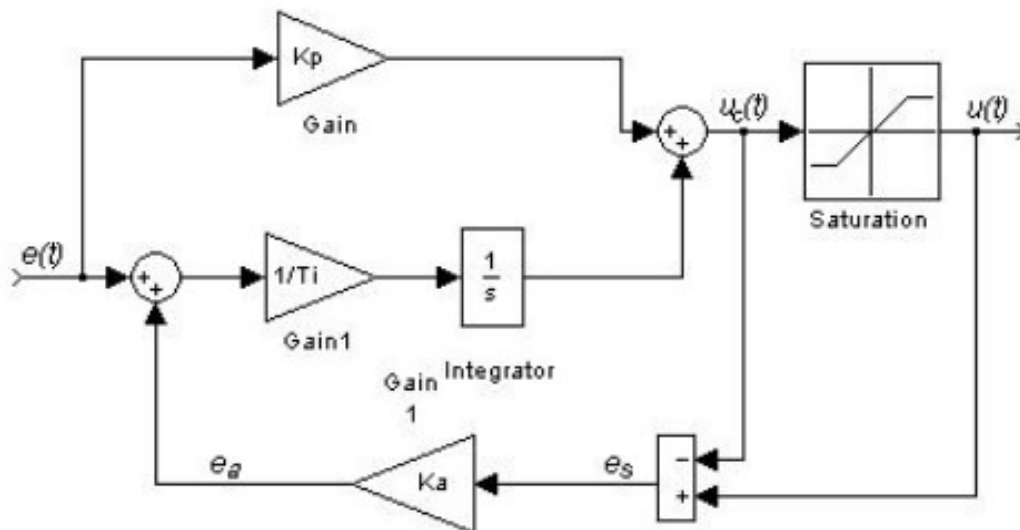


Рисунок 3.9 – Simulink-модель регулятора з додатковим зворотним зв'язком

Simulink-модель за п'ятим алгоритмом зворотного зв'язку насичення. На вхід інтегратора подається сигнал e_Q (рис. 3.10), який обчислюється за формулою:

$$e_Q = (-u_c + u) \frac{K_Q}{T_Q s + 1} = e_s \frac{K_Q}{T_Q s + 1}. \quad (3.3)$$

В даній моделі застосовується ПІ-регулятор, так як в зворотному зв'язку застосована аперіодична ланка першого порядку, що представляє собою послідовне з'єднання пропорційної та інтегруючої ланки.

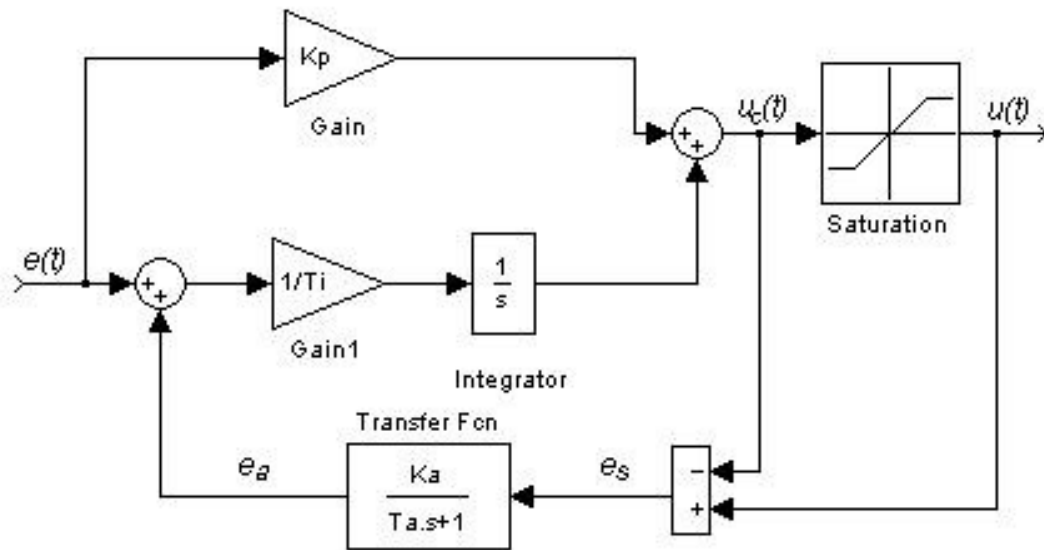


Рисунок 3.10 – Simulink-модель регулятора із зворотним зв'язком насичення

3.3 Створення Simulink-моделі замкненої системи регулювання температурного режиму

При створенні Simulink-моделі системи регулювання температурного режиму запровадимо деякі спрощення. Будемо вважати, що температура суміжних приміщень збігається з температурою приміщення, а температури теплоносія та зовнішнього середовища не залежать від часу. Принцип дії системи автоматичного регулювання температури полягає в тому, щоб при виявленні відхилення температури в приміщенні від заданого рівня змінювати встановлене значення температури води у контурі опалення.

Розглянемо роботу алгоритмів компенсації інтегрального насичення на прикладі системи автоматичного регулювання температурним режимом в приміщенні будинку, при використанні теплоносія у вигляді гарячої води.

Спрощена Simulink-модель системи автоматичного регулювання представлено на рис 3.11. Для реалізації системи регулювання температури у приміщенні було обрано структуру з ПІ-регулятором.

Simulink-модель складається з основних блоків: Step, ПІ-регулятора, що містить Блок Transfer Function, Actuator і Scope. Step є вхідним блоком, що формує зовнішній вхідний сигнал, який представляє собою одиничну ступінчасту функцію. Зазначений сигнал передається по лінії в напрямку, визначеному стрілкою, в блок безперервної передачі. Блок Transfer Function змінює вхідний сигнал і виводить новий сигнал в напрямку, який визначається лінією, в Actuator і далі в осцилограф Scope. Блок Scope - осцилограф, який використовується для відображення перехідного процесу вихідного сигналу.

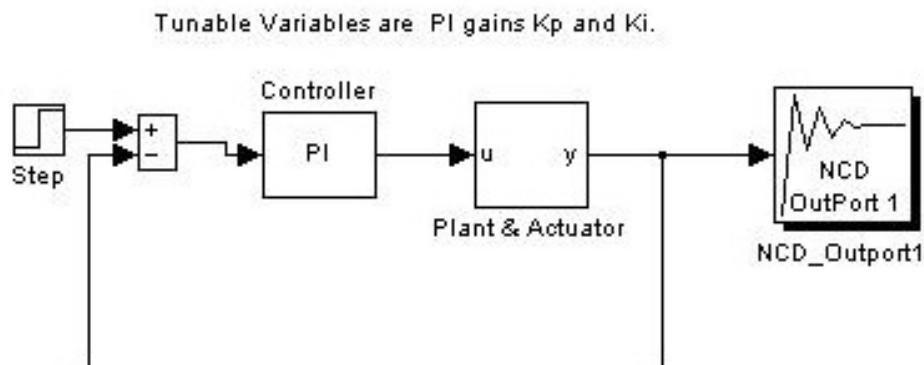


Рисунок 3.11 – Simulink-модель системи регулювання температурним режимом у приміщенні

Деталізована Simulink-модель замкненої системи регулювання температурним режимом у приміщенні приведено на рис. 3.12. В Simulink-моделі у блоках Constant і Constant1 задані температурні параметри. У блоку Constant встановлена температура повітря приміщення 24 °С, що відповідає

температурі повітря в приміщенні

Для системи регулювання температурним режимом було визначено оптимальні налаштування ПІ-регулятора для лінійної САР.

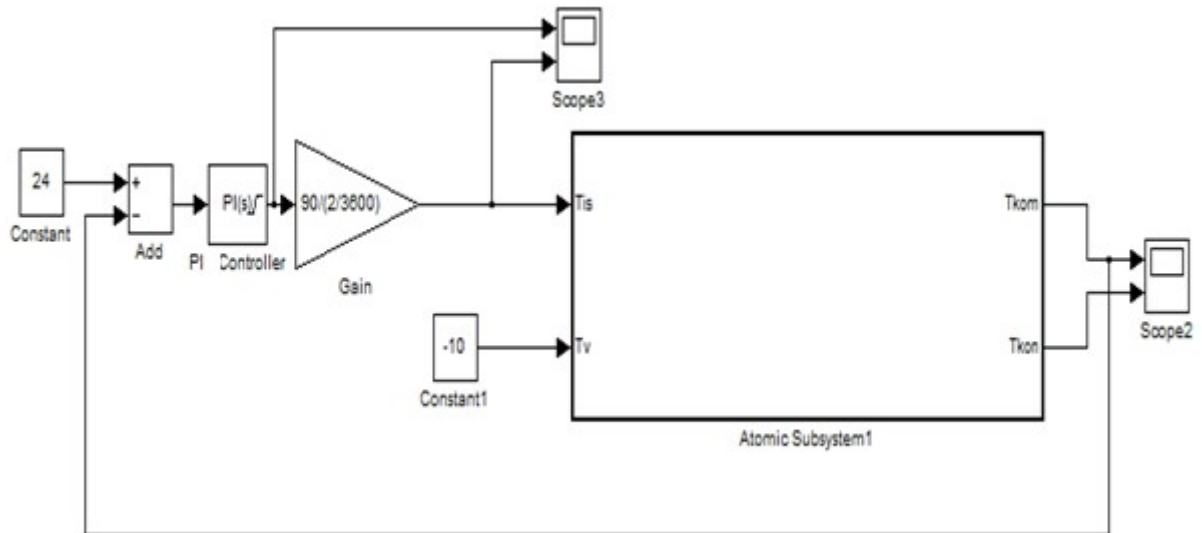


Рисунок 3.12 – Деталізована Simulink-модель замкненої системи регулювання температурним режимом у приміщенні

3.4 Результати поведінкового моделювання

Після того, як сформована Simulink-модель в середовищі Matlab, запускається процес проходження вхідного сигналу через компоненти системи регулювання температури за допомогою натискання кнопки Run.

У блоку NCD (Nonlinear Control Design) було встановлено область допустимих значень перехідного процесу. До перехідного процесу каналом завдання-вихід пред'являлися певні вимоги:

Було визначено максимальне перерегулювання для забезпечення досліджуваної якості перехідного процесу при максимальній температурі перехідного процесу в приміщенні $t_{\text{Вmax}}$ та оптимальній температурі у сталому режимі $t_{\text{Вуст}}$:

$$\sigma = \frac{t_{B\max} - t_{B\text{уст}}}{t_{B\text{уст}}} \cdot 100\% , \quad (3.4)$$

$$\sigma = \frac{30 - 24}{30} \cdot 100\% = 20\% .$$

Час наростання складає $t_{\text{нар}} = 350$ с., а тривалість перехідного процесу $t_{\text{пн}} = 600$ с. Перед моделюванням було встановлено початкові значення параметрів регулятора. У меню Optimization вказано змінні, що потрібно оптимізувати. Перехідний процес в системі регулювання температури до та після оптимізації представлений на рис. 3.13.

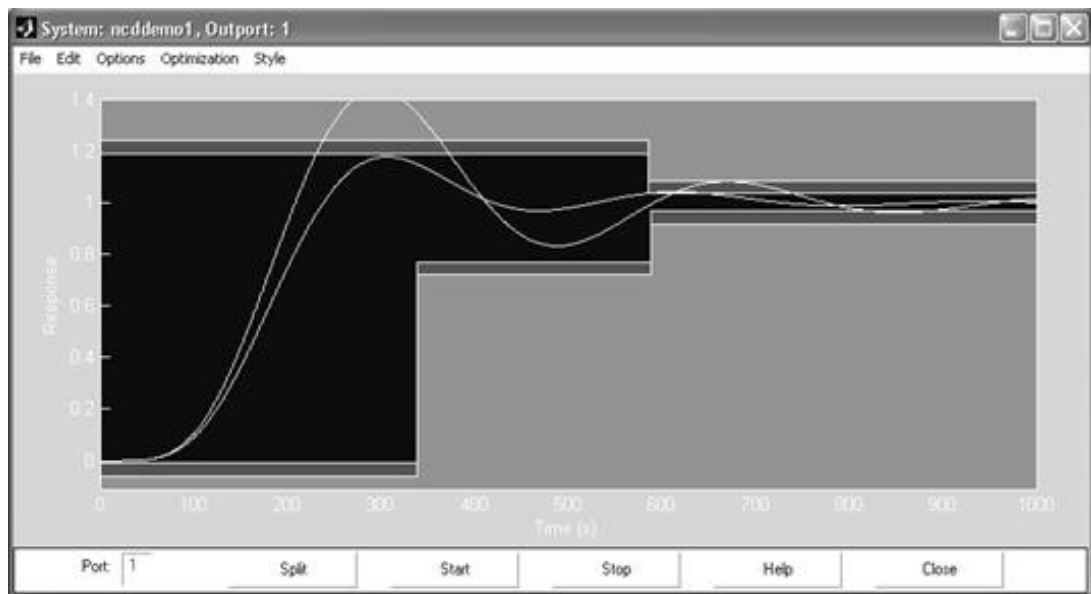


Рисунок 3.13 – Перехідний процес в системі регулювання температури

Далі були введені обмеження на керуючу величину та була доповнена система алгоритмом компенсації інтегрального насичення. Для визначення чисельних значень параметрів з 3, 4 алгоритмів і з 5 алгоритму було використано пакет NCD Blockset, в якому для вирішення цього завдання

використовуються процедури нелінійної оптимізації з обмеженнями з пакету Optimization Toolbox.

Після знаходження налаштувань в середовищі Simulink була змодельована система автоматичного регулювання температури теплоносія з обмеженнями на керуючу величину, також було проведено порівняння роботи алгоритмів компенсації інтегрального насичення на прикладі АСР. Результати математичного моделювання представлені на рис. 3.14 і 3.15. На рисунку 3.14 Перехідний процес по каналу завдання-вихід демонструє перехідний процес з ПІ- регулятором.

На рис.3.14 було отримано криві перехідних процесів в системі управління температурним режимом по каналу «сигнал завдання регулювання – вихідний сигнал»: 1 – АСР без механізму компенсації інтегрального насичення; 2 – АСР із механізмом компенсації інтегрального насичення за четвертим алгоритмом; 3 - АСР з механізмом компенсації інтегрального насичення за п'ятим алгоритмом; 4 – АСР з механізмом компенсації інтегрального насичення за третім алгоритмом.

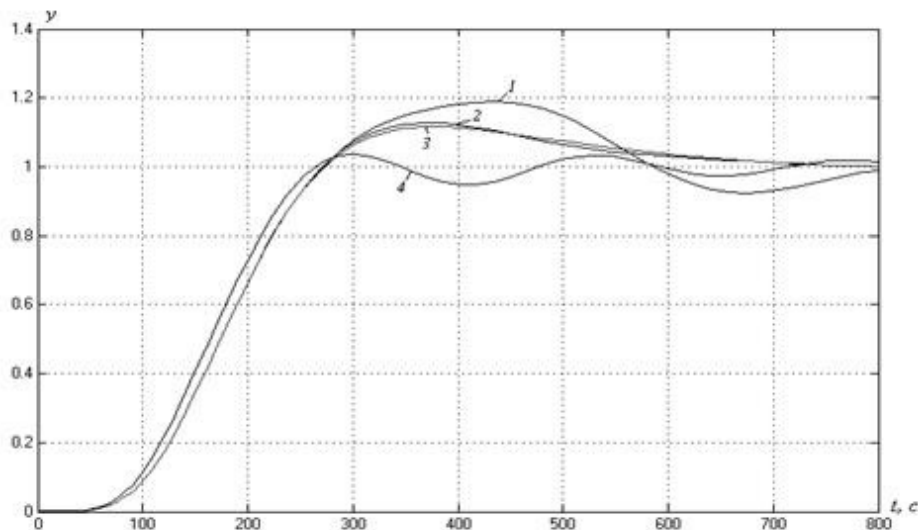


Рисунок 3.14 – Перехідний процес по каналу завдання-вихід

На рис. 3.15 представлено криві перехідних процесів регулювання температури по каналу «збурювання (вплив зовнішньої температури) – вихідний сигнал: 1 - АСР без механізму компенсації інтегрального насичення; 2 – АСР із механізмом компенсації інтегрального насичення за четвертим алгоритмом; 3 - АСР з механізмом компенсації інтегрального насичення за п'ятим алгоритмом; 4 – АСР з механізмом компенсації інтегрального насичення за третім алгоритмом.

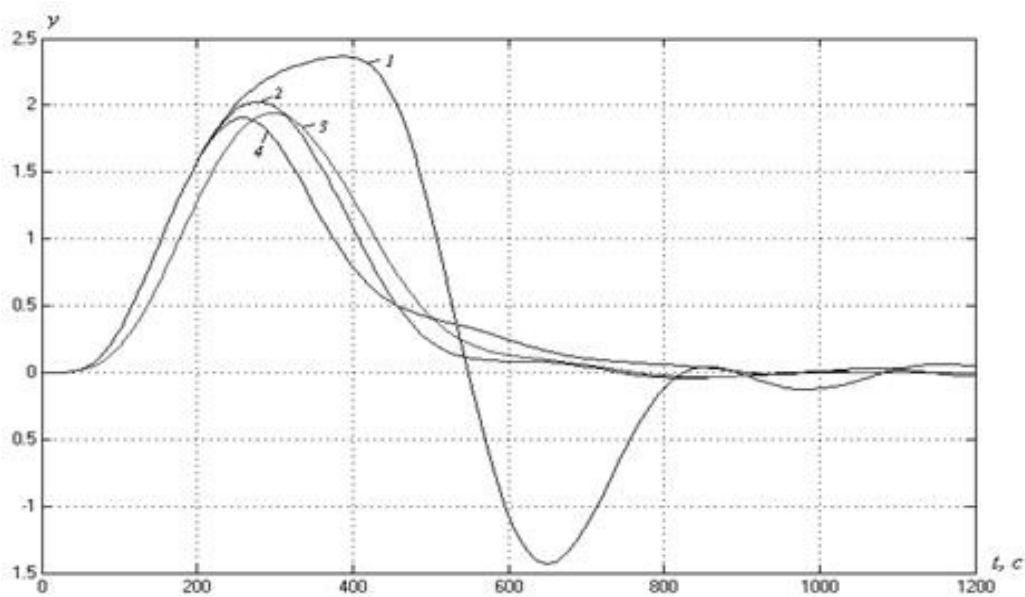


Рисунок 3.15 – Перехідний процес по каналу збурювання-вихід

На рисунку 3.16 представлено перехідні процеси температурного режиму при відсутності використання ПІ-регулятора в Simulink-моделі системи регулювання температури.

Перший графік показує зміну температури, а другий – зміну температури теплоносія. Як видно з графіків, показники температури в приміщенні та контурі опалення досить великі і досягають $+30^{\circ}\text{C}$, що веде до перевитрати газу.

На рис.3.17 представлено графіки перехідних процесів регулювання температурного режиму з використанням ПІ-регулятора в режимі насичення в замкненій системі регулювання температури

Як видно з температурних залежностей, при використанні ПІ-регулятора в режимі насиченні було отримано графіки перехідного процесу системи регулювання температурного режиму, на якому показано обмеження температури до $+24^{\circ}\text{C}$, що відповідає запропонованій замкнутій Simulink-моделі системи.

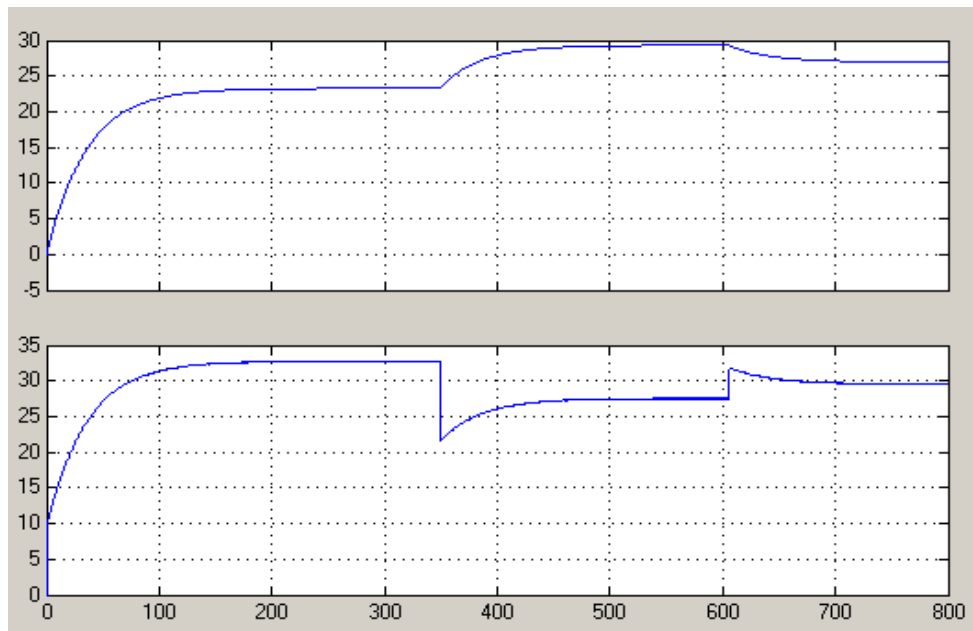


Рисунок 3.16 – Перехідні процеси температурного режиму у приміщенні при відсутності ПІ-регулятора в системі регулювання температури

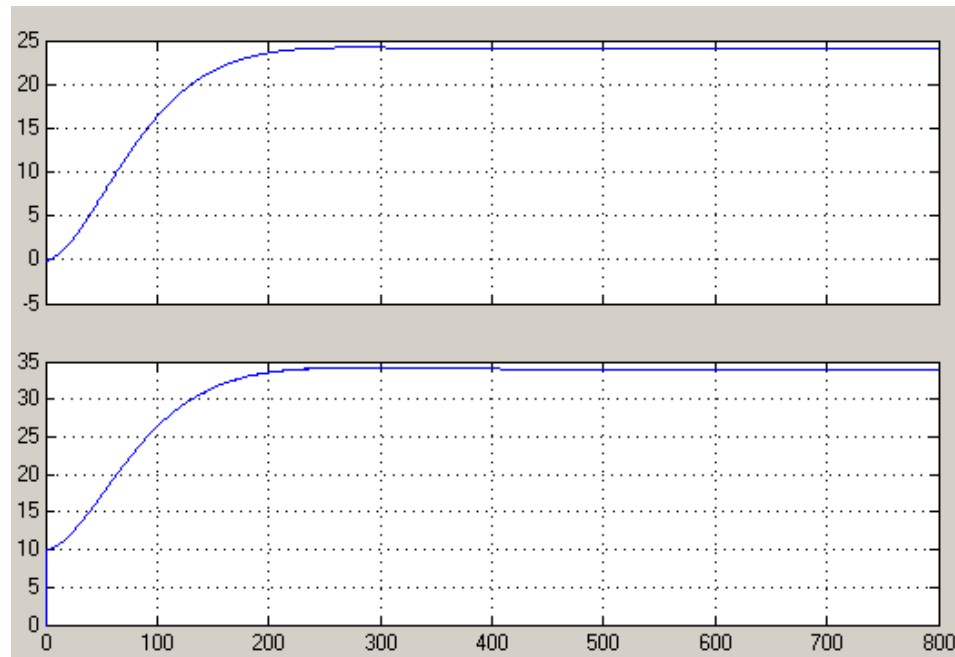


Рисунок 3.17 – Перехідні процеси регулювання температурного режиму при наявності ПІ-регулятора.

З проведених досліджень та аналізу отриманих перехідних процесів можна зробити наступні висновки:

– якщо регулятор не враховує насичення виконавчого механізму, то при досягненні керуючого впливу обмежень збільшується час регулювання $T_{\text{РЕГ}}$, динамічна похибка $\Delta_{\text{ДИН}}$ та перерегулювання σ .

- якщо в систему автоматичного регулювання ввести алгоритм обліку обмежень, то значно підвищується якість регулювання:

а) по каналу завдання-вихід – зменшився час регулювання в 1,37 разів, з використанням четвертого та п'ятого алгоритмів, в 2,42 рази для третього алгоритму;

б) зменшилося перерегулювання для четвертого алгоритму та для п'ятого алгоритму, для третього алгоритму перерегулювання відсутнє;

в) по каналу збурювання-вихід – зменшився час регулювання 1,8, 1,6 та 1,46 з використанням четвертого, п'ятого та третього алгоритмів відповідно;

г) зменшилася динамічна похибка з використанням четвертого, п'ятого та третього алгоритмів відповідно.

Використання алгоритмів компенсації інтегрального насичення мають певні переваги:

- реалізація методу не вимагає потужних обчислювальних засобів;
- значно покращується якість регулювання в системі.

При розробці систем автоматичного регулювання слід враховувати наявність деяких нелінійностей та використовувати алгоритми обліку обмежень залежно від доступних технічних засобів автоматизації, складності процесу та технологічних вимог щодо нього.

Перспективним є використання методів компенсації інтегрального насичення в системах автоматичного керування, що самоналаштовуються, з використанням алгоритмів адаптації та ідентифікації [6].

ВИСНОВКИ

На сьогодні відбувається поступове, але неухильне переміщення все більшої кількості функцій регулювання, управління і контролю від людини до машин та устаткування. Ядро сучасної технології автоматизації в великій мірі складають технології управління зі зворотним зв'язком (по замкнутому контуру). Технологія управління зі зворотним зв'язком зазвичай заснована на більш технічно розвинених принципах, хоча це може призводити до більш високих витрат на проектування і обладнання.

В кваліфікаційній роботі розглянуті особливості побудови розімкнених та замкнутих систем автоматичного регулювання. Для автоматичного регулювання запропоновано використовувати ПД-регулятори. Перевагою ПД регулятора є швидкий вихід на режим, точне утримання заданого параметра (наприклад, температури) і швидка реакція на впливи. ПД регулятор може економити до 35% потужності виконавчого механізму. Розглянуті способи налаштування ПД-регуляторів для систем регулювання температури.

Проаналізовані різні типи температурних МЕМС-сенсорів та їх застосування в системах автоматичного регулювання температури в розумному будинку. Складена математична модель регулювання температурним режимом в приміщенні.

Для моделювання системи регулювання температурних режимів у приміщеннях запропоновано використовувати систему Matlab/Simulink. Створена Simulink-модель замкнутої системи регулювання температури на основі ПД-регулятора.

При проведенні поведінкового моделювання отримані графіки залежностей, що підтверджують отримані математичні моделі системи регулювання температури.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Моделирование систем управления в Simulink: уч. пособ. / В.А. Богомолов, А.Г. Гурко, В.И. Клименко и др. – Харьков: ХНАДУ, 2018. – 220 с.
2. . Ловейкін В.С. Мехатроніка: навчальний посібник / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич, Ю.В. Човнюк – К.: НУБіП України, 2012. – 357 с.
3. Филиппенко И.В. Встроенная система регулирования температуры в “умном доме” / И.В. Филиппенко, С. Э Кондрюков, Г. К. Кулак // Радіоелектроніка та інформатика – 2017. – №3. – С. 23-27.
4. Волков Ю.В. Датчики для измерений при производстве электрической и тепловой энергии: учебное пособие / Ю.В. Волков – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2019. – 89 с.
5. Борисевич А. В. Теория автоматического управления: элементарное введение с применением MATLAB – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 200 с.
6. Ханнанова В.Н. Математическая модель системы регулирования температуры внутри помещения / В.Н. Ханнанова // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №18. – С. 309-313.
7. Климов К.В. Проектирование системы автоматического регулирования температуры в помещении при помощи программного пакета MATLAB / А.Н Шушура, К.В. Климов // Зб. доп. V Всеукраїнської науково-технічної конф. молодих вчених «Інформаційні управляючі системи та комп'ютерний моніторинг» (ІУС КМ - 2014), Донецьк, 22-23 квітня 2014 р. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. – С. 613-618.
8. Ковриго Ю.М. Математическое моделирование систем автоматического регулирования с учетом ограничений на управление в пакете Matlab / Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко, И.А.Полищук // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2007. – №2. –

С. 21-28.

9. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК: учебное пособие / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона-Век, 2008. – 368 с.