

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та та роботехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

Другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Розроблення ПІД-регулятора температури теплообмінного апарату
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи АУТПм-22-1
Ратушний О.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма Автоматизоване управління
технологічними процесами
(повна назва освітньої програми)

Керівник Ромашов Ю.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2023р.

Я, як студент ХНУРЕ Ратушний О.В., розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Дата

04.01.2024

П.І.Б.

Ратушний О.В.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет АКТ

Кафедра КІТАР

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Тип програми Освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизоване управління технологічними процесами

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____

(підпис)

«03» 11 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Ратушному Олександр Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення ПІД-регулятора температури теплообмінного апарату

Затверджена наказом по університету від 3 листопада 2023р. № 1286 СТ

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____

3. Вихідні дані до роботи

ОС Windows

Мова програмування – Scilab

Інтерфейс графічний

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ.

4.2 Аналіз предметної області.

4.3 Аналіз конструкцій теплообмінних апаратів та їх процесів.

4.4 Аналіз вибору параметрів ПІД-регулятора.

4.5 Розробка математичної моделі теплообмінника

4.6 Комп'ютерне моделювання автоматизованого теплообмінного апарату.

4.7 Висновки.

4.8 Додатки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням формул, схем, комп'ютерних ілюстрацій

Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 10 с. формату А4.

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина	Ромашов Ю.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літератури за темою атестаційної роботи	03.11 – 07.11.23	Виконано
2	Аналіз конструкцій теплообмінних апаратів та їх процесів	07.11– 15.11.23	Виконано
3	Аналіз автоматизації теплообмінних апаратів	16.11 – 21.11.23	Виконано
4	Аналіз вибору параметрів ПІД-регулятора	22.11 – 30.11.23	Виконано
5	Розробка математичної моделі теплообмінника	30.11 – 15.12.23	Виконано
6	Комп'ютерне моделювання автоматизованого теплообмінного апарату	16.12– 28.12.23	Виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	30.12.23	Виконано
8	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk	12.01.24	Виконано
9	Подання роботи на рецензію	14.01.24	Виконано
10	Подання роботи на підпис зав. кафедри	20.01.24	Виконано
11	Подання атестаційної роботи в ЕК		Виконано

Дата видачі завдання 03.11.2023 р.

Студент _____ Ратушний О.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ проф. каф. КІТАР Ромашов Ю.В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 65 с., 29 рис., 12 джерел.

ПІД-РЕГУЛЯТОР, ТЕПЛООБМІННИЙ АПАРАТ, SCILAB.

Об'єктом дослідження в даній роботі є теплообмінний апарат.

Предмет дослідження – математична модель теплообмінного апарату як об'єкту автоматизації.

Метою роботи є розроблення підходу для представлення властивостей теплообмінника у вигляді об'єкту автоматизації за допомогою лінійного диференціального рівняння.

Розглянуто загальні відомості про процеси та конструкції теплообмінних апаратів. Розглянуто загальну інформацію про автоматизацію теплообмінних апаратів яка включає в себе використання різних систем управління та регулювання, які дозволяють забезпечити стабільну роботу та контроль температури, тиску та інших параметрів. Було розібрано будову та принцип дії а також які параметри необхідні ПІД-регуляторам, які дозволяють підтримувати стабільну температуру та інші параметри в межах заданих значень.

Моделювання проведено в програмі SciLab. Проведені тестові випробування показали, що програма працює правильно і всі команди відпрацьовуються з очікуваним результатом.

ABSTRACT

Explanatory note: 65 pp., 29 figures, 12 sources.

PID-CONTROLLER, HEAT EXCHANGER, SCILAB.

The object of research in this paper is a heat exchanger.

The subject of research is a mathematical model of a heat exchanger as an object of automation.

The purpose of the work is to develop an approach to represent the properties of the heat exchanger in the form of an automation object using a linear differential equation.

General information about the processes and designs of heat exchangers is considered. General information about the automation of heat exchange devices is considered, which includes the use of various control and regulation systems that allow for stable operation and control of temperature, pressure and other parameters. The structure and principle of operation were analyzed, as well as which parameters are necessary for PID regulators, which allow maintaining a stable temperature and other parameters within the set values.

The simulation was carried out in the SciLab program. The conducted tests showed that the program works correctly and all commands work with the expected result.

ЗМІСТ

Зміст.....	5
Перелік скорочень.....	7
Вступ.....	8
1 Теплообмінні апарати як об'єкти автоматизації.....	10
1.1 Загальні відомості про процеси та конструкції теплообмінних апаратів.....	10
1.2 Автоматизація теплообмінних апаратів	15
1.3 Визначення параметрів регуляторів.....	24
1.4 Постановка задачі дослідження.....	27
1.5 Висновки за розділом 1.....	28
2 Проектування ПІД-регулятора температури теплообмінного апарату.....	29
2.1 Загальний підхід щодо проектування ПІД-регулятора температури теплообмінного апарату.....	29
2.2 Математична модель теплообмінного апарату як об'єкту автоматизації.....	34
2.3 Визначення параметрів ПІД-регулятора температури теплообмінного апарату.....	36
2.4 Висновки за розділом 2.....	49
3 Комп'ютерне моделювання автоматизованого теплообмінного апарату.....	40
3.1 Комп'ютерне моделювання процесів в теплообмінному апараті.....	40
3.2 Ідентифікація теплообмінного апарату як об'єкту автоматизації.....	50
3.3 Дослідження впливу параметрів ПІД-регулятора на процеси в теплообмінному апараті.....	52
3.4 Висновки за розділом 3.....	57
4 Охорона праці.....	58
4.1 Вимоги до особистого робочого місця працівника.....	58

4.2 Небезпеки під час роботи з комп'ютерною технікою	59
Висновки	60
Перелік джерел посилань	61
Додаток А Абробація наукових результатів дослідження.....	63
Додаток Б Демонстраційний матеріал.....	81

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСР – автоматизована система регулювання;

ПІД-регулятор – пропорційно - інтегрально диференціальний регулятор;

MES – Manufacturing Execution Systems;

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition.

ВСТУП

Одна з основних причин удосконалення теплообмінників, є необхідність забезпечити мінімум споживаної потужності під час експлуатації, тому що це в загальних тенденціях спрямоване на зменшення викидів вуглекислого газу та зменшення навантаження на енергосистему [1, 3]. Один із основних способів надання удосконалення теплообмінників перебувають у стадії розробки та впровадження найдосконаліших систем автоматизації [4–6], оскільки ці системи фактично управляють процесами під час тривалої експлуатації. Проектування систем автоматизації будується в основному на основі математичного моделювання процесів, властивих для теплообмінників [7], тому принципово неможливо забезпечити покращену розробку дизайну без відповідного математичного забезпечення. Таким чином, це дослідження перебуває у поточних інтересах у зв'язку з угодою із загальними сучасними тенденціями вдосконалення теплообмінників.

Метою роботи є розроблення підходу для представлення властивостей теплообмінника у вигляді об'єкту автоматизації за допомогою лінійного диференціального рівняння.

Об'єктом дослідження в даній роботі є теплообмінний апарат.

Предмет дослідження – математична модель теплообмінного апарату як об'єкту автоматизації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз конструкцій теплообмінних апаратів та їх процесів;
- провести розробку математичної моделі теплообмінника;
- виконати комп'ютерне моделювання автоматизованого теплообмінного апарату;
- виконати експериментальні дослідження для підтвердження правильності теоретичних рішень;

– оформити пояснювальну записку згідно ДСТУ 3008:2015[1-3].

1 ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ ЯК ОБ'ЄКТИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Загальні відомості про процеси та конструкції теплообмінних апаратів

Теплообмінними пристроями називають установки, призначені для передачі тепла від одного робочого середовища до іншого. Робочими середовищами надалі ми називатимемо рідкі та газоподібні речовини, що беруть участь у теплообміні. При цьому речовину, яка має більш високу температуру і віддає тепло, називатимемо первинним робочим середовищем, а речовина, яка має нижчу температуру і сприймає тепло, – вторинним робочим середовищем.

У літературі зустрічаються й інші терміни для позначення робочих середовищ: теплоносій та теплопоглинач, гаряча та холодна рідини тощо. Це, звичайно, анітрохи не змінює сутності самих понять. Первинне робоче середовище в процесах нагрівання ми називатимемо також теплоносієм, а вторинне робоче середовище в процесах охолодження – охолоджуючим реагентом.

До категорії теплообмінних пристроїв за основними ознаками їх робочого процесу, крім підігрівачів і холодильників, можна віднести ще технологічні конденсаційні пристрої, призначені для зрідження парів будь-яких продуктів, які часто зустрічаються як елементи тепловикористовуючих установок, наприклад, у перегінних установках. Тут первинним робочим середовищем, або теплоносієм, є пари продуктів, що конденсуються, а вторинним середовищем, або охолоджуючим реагентом – вода, що поступово нагрівається або продукти, попередньо нагріваються в тій же установці (нерідко конденсатори перегінних установок є, таким чином, підігрівачами продуктів).

До загальних вимог, що висуваються до теплообмінних пристроїв, можна віднести такі:

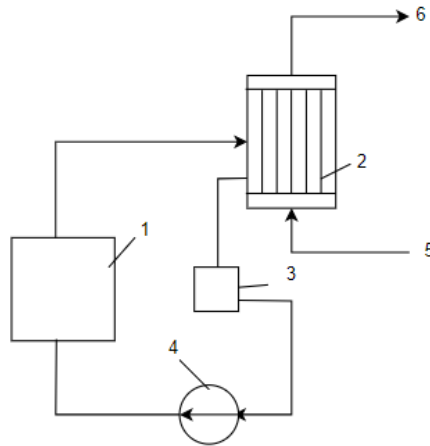
- дотримання умов технологічного режиму: з метою збереження високої якості продукту, що виробляється особливо важливо дотримання температурного режиму процесів;
- висока продуктивність і, отже, інтенсифікація теплообміну, яка досягається підвищенням коефіцієнтів теплопередачі та збільшенням середніх різниць температур;
- висока економічність, для якої першорядне значення має вибір теплоносіїв та їх параметрів, щоб використання цих теплоносіїв було пов'язане з мінімальними витратами палива. Дуже важливого значення набуває використання вторинних теплових ресурсів (відхідних газів, відпрацьованих або вторинних пар, гарячих вод та продуктів тощо);
- надійність та безпека пристроїв, що досягаються можливістю регулювання температурного режиму процесу, зручністю контролю, простотою догляду, дотриманням умов техніки безпеки;
- раціональне оформлення апаратури, тобто досягнення простоти конструкції, компактності пристроїв, економії металу, зручності монтажу, ремонту та експлуатації.

За основним технологічним призначенням слід розрізняти два види теплообмінних пристроїв: власне теплообмінники та реакційні апарати (реактори).

Теплообмінник надалі називатимемо пристрій для безперервної передачі тепла від потоку одного робочого середовища до потоку іншого. Схема пристрою для нагрівання рідкого продукту паром у теплообміннику наведена на рис. 1.1.

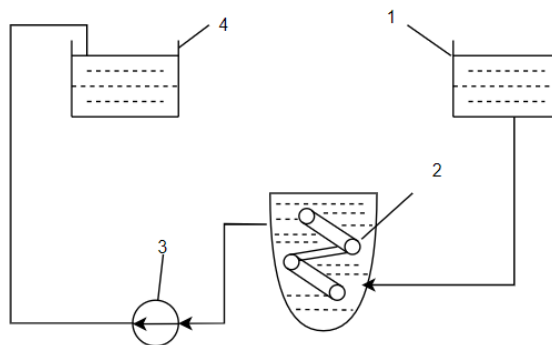
Характерною ознакою реактора є періодичний теплообмін між робочими середовищами. Схема пристрою для охолодження продукту водою реакційному апараті наведена на рис. 1.2. У реакторах зазвичай основним є здійснення того

чи іншого фізико-хімічного процесу за допомогою теплообміну, який являє собою, таким чином, допоміжний процес.



1 – паровий котел; 2 – теплообмінник; 3 – конденсатовідвідник; 4 – насос;
5 – вхід продукту; 6 – вихід продукту

Рисунок 1.1 – Схема приладу для нагрівання продукту в теплообміннику
[6]



1 – ємність для холодної води; 2 – реактор; 3 – насос; 4 – ємність для нагрітої води

Рисунок 1.2 – Схема приладу для охолодження продукту у реакторі [4]

Технологічне призначення теплообмінних пристроїв надзвичайно різноманітне, тому в промисловій практиці відзначається велика кількість типів і конструкцій теплообмінних пристроїв та апаратів. Незважаючи на це, можна виділити основні класи типових пристроїв і апаратів, тим більше що навіть апарати найрізноманітнішого призначення часто мають однакове конструктивне оформлення.

За видом теплових ресурсів теплообмінні пристрої діляться на пристрої, що використовують первинні теплові ресурси, і теплоутилізаційні пристрої.

Перші характеризуються застосуванням теплоносіїв або охолоджувальних агентів, що спеціально виробляються для використання в аналізованих теплообмінних апаратах.

Другі (утилізатори, рекуператори та регенератори) використовують тепло відхідних матеріальних потоків, так званих вторинними тепловими ресурсами. Використання останніх є найважливішим заходом у справі підвищення економічності промислових теплоустановок, і тому раціональне проектування та експлуатація утилізаційних пристроїв мають виключно важливе значення.

За способом обігріву та охолодження розрізняються такі; основні типові групи теплообмінних пристроїв:

- з паровим обігрівом;
- з обігрівом гарячими рідинами;
- з газовим обігрівом;
- з рідинним охолодженням;
- із газовим охолодженням.

Промислові теплоносії та охолоджуючі агенти з точки зору технічної та економічної доцільності їх застосування повинні мати наступні якості.

Бути термодинамічно сприятливими. Теплоносії та охолоджуючі агенти, що мають високу питому вагу і теплоємність, малу в'язкість, а також високе значення теплоти пароутворення, є найбільш сприятливими.

При цих якостях робочі середовища забезпечують досягнення достатньої інтенсивності теплообміну та зменшення вагових та об'ємних кількостей, необхідних для заданого теплового навантаження теплообмінного апарату.

Крім того, важливо, щоб теплоносії мали високі температури при одночасно малих тисках, що полегшує апаратне оформлення пристроїв.

Бути термічно стійкими і не надавати несприятливого впливу на матеріали апаратури. Теплоносії та охолодження агенти повинні бути хімічно стійкими і неагресивними навіть за досить тривалої дії високих температур. Дуже важливо, щоб робочі середовища по можливості не давали відкладень на поверхні теплообміну, оскільки відкладення призводять до зниження коефіцієнта теплопередачі та продуктивності теплового обладнання.

Бути дешевими і досить поширеними у вітчизняних ресурсах. Дорогі чи мало поширені речовини збільшують капітальні витрати та експлуатаційні витрати, що іноді призводить до явної недоцільності застосування тієї чи іншої речовини з економічної точки зору.

Таким чином, при виборі теплоносіїв і охолоджуючих агентів необхідно в кожному окремому випадку детально враховувати їх термодинамічні та фізико-хімічні властивості, а також техніко-економічні характеристики. У промисловості як теплоносії застосовують велику кількість речовин, з яких найбільшого поширення набули водяні пари, гаряча вода і газоподібні продукти згоряння палива. В окремих випадках застосовуються розплавлені солі та високо-киплячі рідини (мінеральні олії, органічні з'єднання, ртуть) або їх пари. Як охолоджувальні агенти найбільш поширені вода, повітря і водні розчини деяких солей (NaCl , CaCl_2 та ін) [5].

Особливе місце займають часто застосовувані в якості тепло-носіїв і охолоджуючих агентів напівпродукти, продукти і відходи виробництва, що використовуються, як зазначалося вище, як вторинні теплові ресурси. В цьому випадку внаслідок їх дешевизни перелічені вище вимоги, що пред'являються до

теплоносіїв і охолоджувальним агентам, мають відносно менше значення, основну роль відіграють питання, пов'язані з раціональним конструктивним оформленням відповідних утилізаційних пристроїв.

1.2 Автоматизація теплообмінних апаратів

Автоматизація виробничих процесів – основний напрямок, яким нині просувається виробництво в усьому світі. Все, що раніше виконувалося самою людиною, її функції, не лише фізичні, а й інтелектуальні, поступово переходять до техніки, яка сама виконує технологічні цикли та здійснює контроль над ними.

Метою автоматизації є підвищення продуктивності праці, покращення якості продукції, оптимізація управління, усунення людини від виробництв, небезпечних для здоров'я, підвищення надійності та точності виробництва, збільшення конвертованості та зменшення часу обробки даних.

Завдяки автоматизації, технологія теплообміну зробила крок далеко вперед. Висока якість регулювання, забезпечення безпеки перебігу реакцій, швидкість здійснення процесів та багато іншого дозволяють забезпечувати технічні засоби автоматизації.

Особливості регулювання температури.

Температура є показником термодинамічного стану системи та використовується як вихідна координата при регулюванні теплових процесів.

Динамічні характеристики об'єктів у системах регулювання температури залежать від фізико-хімічних параметрів процесу та конструкції апарату. Тому загальні рекомендації щодо вибору АСР температури сформулювати неможливо, і потрібен аналіз кожного конкретного процесу. До загальних особливостей АСР температури можна віднести значну інерційність теплових процесів та промислових датчиків температури. Оскільки завдання стабілізації температури ставиться практично у будь-якому теплообмінному апараті, одна з

основних цілей при проектуванні АСР температури – зменшення інерційності датчиків.

Основними напрямками зменшення інерційності датчиків температури є:

- підвищення коефіцієнтів тепловіддачі від середовища до чохла внаслідок правильного вибору місця встановлення датчика; при цьому швидкість руху середовища має бути максимальною; за інших рівних умов більш краща установка термометрів у рідкій фазі (порівняно з газоподібною), в парі, що конденсується (порівняно з конденсатом) тощо;
- зменшення теплового опору та теплової ємності захисного чохла в результаті вибору його матеріалу та товщини;
- зменшення постійного часу повітряного прошарку за рахунок застосування наповнювачів (рідина, металева стружка); у термоелектричних перетворювачів (термопар) робочий спай припаюється до захисного чохла;
- вибір типу первинного перетворювача; наприклад, при виборі термометра опору, термопари або манометричного термометра необхідно враховувати, що найменшу інерційність має термопара в малоінерційному виконанні, найбільшою – манометричний термометр [5].

Регулювання теплових процесів.

Передача теплової енергії є невід'ємною частиною більшості хіміко-технологічних процесів [6]. Різноманітність теплових процесів зумовила появу різних промислових пристроїв для їх реалізації, і, таким чином, сучасні теплообмінні апарати як об'єкти автоматизації можна поділити на основні групи:

- теплообмінники змішування;
 - кожухотрунні теплообмінники з незмінним агрегатним станом речовин (теплообмінники типу «газ – газ», «рідина – рідина»);
 - кожухотрунні теплообмінники, в яких хоча б у однієї речовини змінюється агрегатний стан (парогазові, парорідкісні теплообмінники, випарники та конденсатори);

– печі.

Автоматизація теплообмінників змішування.

У таких апаратах для створення необхідного температурного режиму використовують передачу енергії в результаті змішування двох і більше речовин з різними тепломістками. Завданням автоматизації буде стабілізація вихідної температури суміші T_3 (рис. 1.3) шляхом зміни витрати теплоносія F_1 , за умови, що основними збуреннями є витрата F_2 і температура сировини T_2 . Теплоємності постійні, тепло – втрати неконтрольовані. Для довідки, обурення – це така дія, яка прагне порушити взаємозв'язок між величиною, що задає і регулюється.

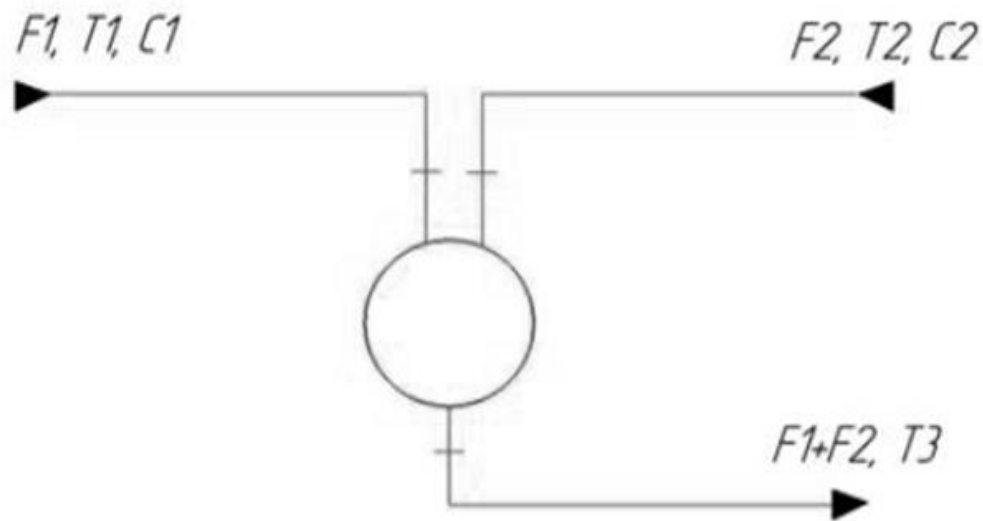


Рисунок 1.3 – Принципова схема теплообмінника змушування

Розглянемо кілька варіантів систем автоматизації теплообмінників змішування та проведемо їх порівняльний аналіз щодо якості процесів регулювання.

Перший варіант включає завдання стабілізації вихідної температури суміші T_3 , яка вирішується застосуванням одноконтурної замкнутої системи регулювання за допомогою витрати F_1 (рис 1.4).

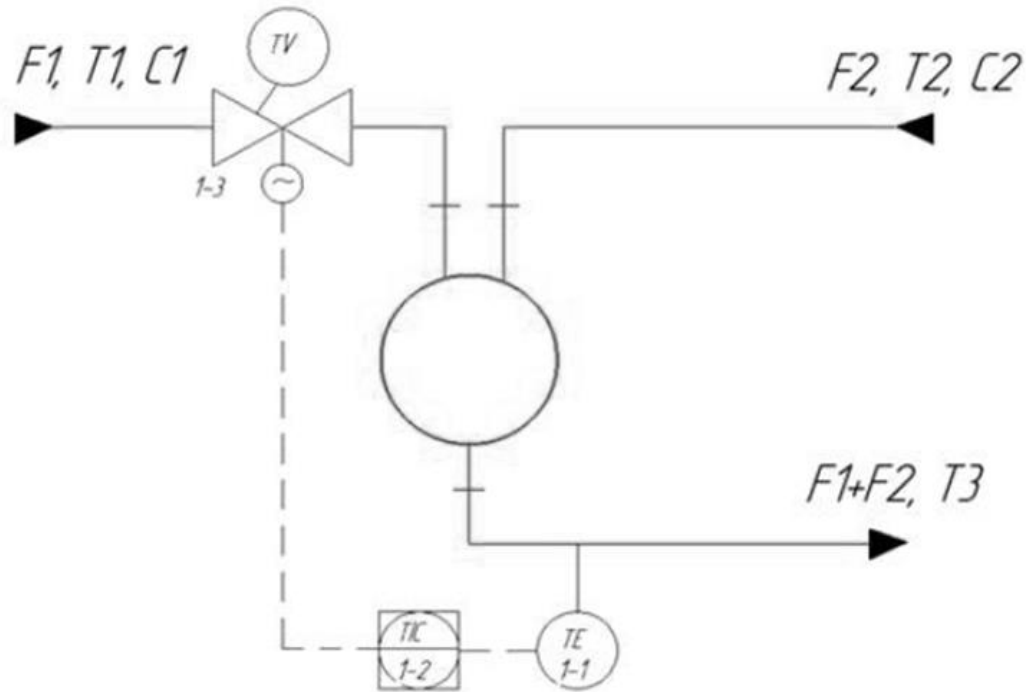


Рисунок 1.4 – Схема замкнутої АСР температури в теплообміннику

Вихідна температура вимірюється за допомогою датчика температури (поз. 1-1), сигнал передається на контролер (поз. 1-2), а потім з контролера на виконавчий механізм (поз. 1-3).

Другий варіант включає каскадну АСР температури з коригуючим сигналом по співвідношенню витрат F_1 і F_2 . Така система дозволяє прибирати основні обурення за витратою та забезпечує інваріантність регульованої температури суміші.

Третій варіант є комбінованою АСР температури, яка дозволяє прибирати основні обурення F_2 і T_2 , вводячи коригувальні сигнали по них (рис. 1.5).

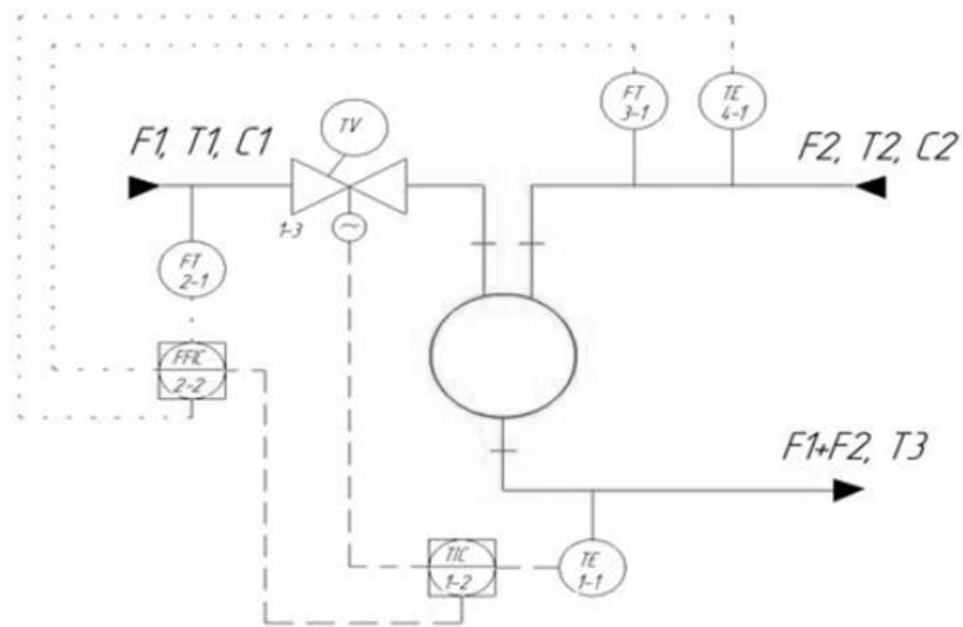


Рисунок 1.5 – Застосування комбінованої АСР температури

Спочатку вимірюються сигнали температури $T2$ (поз. 4-1) і співвідношення витрат (поз. 2-1, 3-1). Потім вони подаються на пристрій, що компенсує контролера (поз. 2-2), і далі сигнал з контролера надходить на виконавчий механізм (поз. 1-3).

З розглянутих прикладом систем автоматизації найкращу якість регулювання забезпечують два останні варіанти. У разі приладової реалізації систем другий варіант кращий, оскільки його найлегше виконати на серійних промислових регуляторах. При використанні цифрової обчислювальної машини або мікропроцесорної техніки реалізація будь-якої з цих систем не становить труднощів [6].

Автоматизація кожухотрубчастих теплообмінників.

Як приклад будемо розглядати теплообмінники з агрегатним станом речовин, що змінюється. У даних об'єктах основною особливістю є те, що при

постійному тиску і відсутності переохолодження конденсату при нагріванні температура рідкої і парової фаз однакова, і по ній не можна судити про інтенсивність процесу теплообміну в апараті. У такому разі основним стабілізуючим параметром є рівень рідкої фази [4].

Завдання автоматизації змінюватиметься залежно від призначення апарата. Якщо теплообмінник призначений для нагрівання речовини до заданої температури, завданням регулювання є стабілізація температури технологічного потоку за рахунок зміни подачі пари. У випарниках чи конденсаторах, де відбуваються трохи інші процеси, завдання зводиться до підтримки матеріального балансу з технологічного потоку.

Ознайомимося з принциповою схемою парорідкісного теплообмінника, а разом з нею і з першим варіантом автоматизації таких апаратів (рис. 1.6).

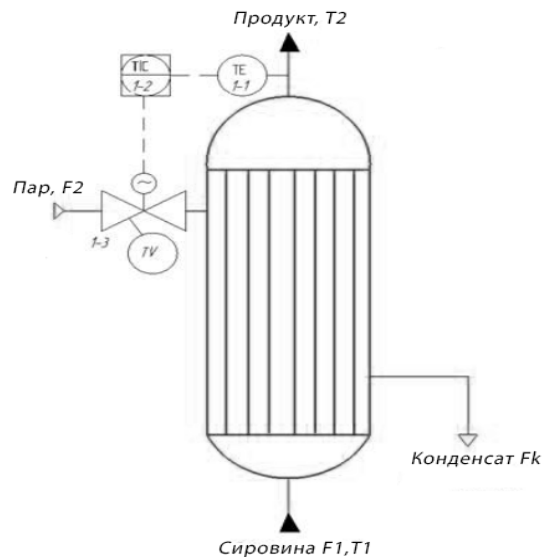


Рисунок 1.6 – Принципова схема автоматизації парорідкісного теплообмінника

У такому варіанті одноконтурна замкнута АСР температури при використанні ПІ – регулятора гарантує регулювання без статичної помилки,

проте через не врахування основних збурень F_1 , T_1 якість перехідного процесу може виявитися незадовільною.

Тому, другий варіант автоматизації включає каскадну АСР регулювання за співвідношенням витрат пари F_1 і рідинної сировини F_1 з корекцією по вихідній температурі T_2 . АСР такого виду досить легко реалізуються і часто застосовуються під час проведення теплообмінних процесів.

Автоматизація випарників та конденсаторів.

Як вихідний стабілізуючої координати, як говорилося раніше, в даних апаратах вибирають рівень рідини в апараті. До основних збурень відносять витрату і температуру технологічного потоку, температуру пари, що гріє, і тепловтрати.

На прикладі випарника розглянемо перший варіант автоматизації, який відрізняється простотою структури і включає дві одноконтурних АСР (рис. 1.7).

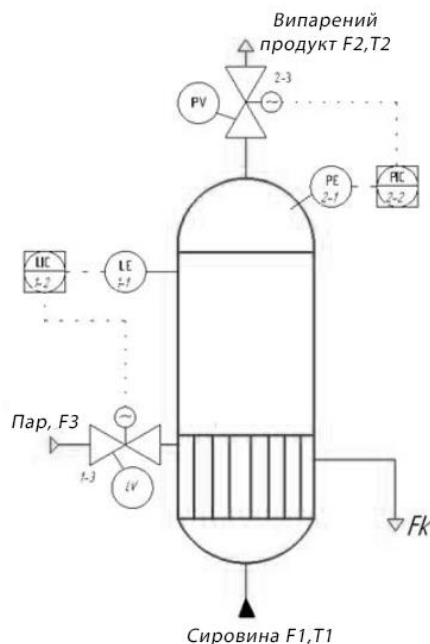


Рисунок 1.7 – Принципова схема автоматизації випарника

АСР рівня (поз. 1) забезпечує підтримку матеріального балансу в апараті з технологічного потоку. АСР тиску (поз. 2) служить для стабілізації тиску шляхом часткового компенсування збурень каналом тиск – рівень рідини.

Другий варіант автоматизації таких теплообмінників поєднує в собі каскадну систему регулювання співвідношення витрат пари, що гріє, і технологічного потоку з корекцією за рівнем рідини в апараті. АСР тиску також здійснює стабілізацію тиску (рис. 1.8).

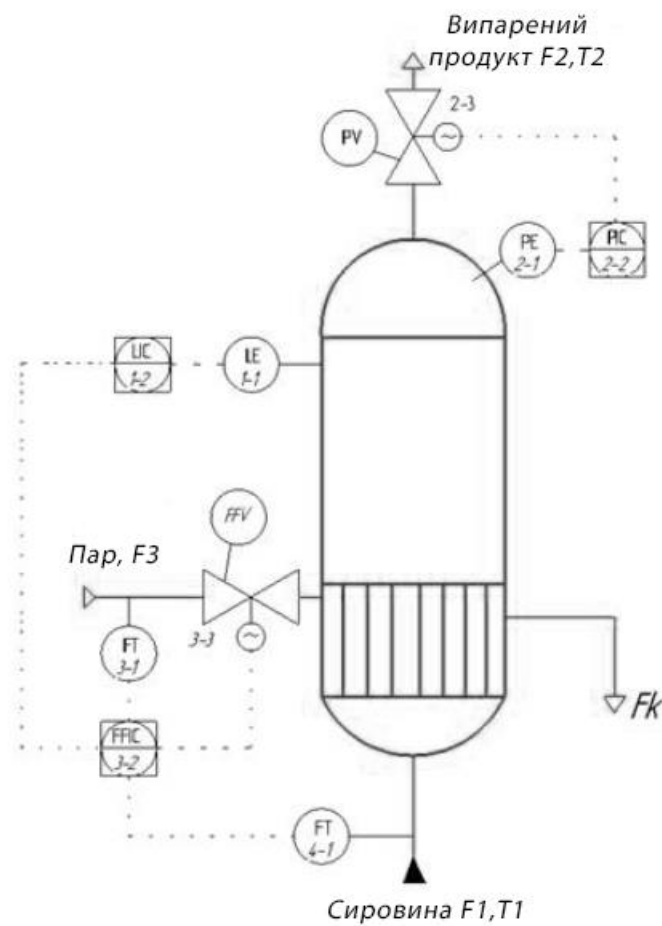


Рисунок 1.8 – Принципова схема автоматизації випарника із застосуванням каскадної АСР

Регулятор співвідношення (поз. 3) вводить статичну компенсацію, усуваючи обурення витрат рідини. Ця система регулювання набагато краща, оскільки обурення за цим параметром зустрічаються досить часто.

Завдання регулювання кожухотрубчастих теплообмінників з незмінним агрегатним станом речовин аналогічні розглянутим вище паровим теплообмінникам. Як регулюючих впливів вибирають вхідну температуру пари або її витрати F_3 .

В даний час системи автоматизованого управління активно використовуються на виробництві, в тому числі для здійснення теплообмінних процесів. При цьому такі процеси займають до 40% від усіх технологічних процесів у хімічній промисловості по всьому світу. Грамотне та ефективне вирішення завдань автоматизації апаратів, що реалізують теплообмін, дозволяє забезпечити працівників, замінюючи ручну працю, при цьому здійснювати економію технічних ресурсів підприємства, а також підвищувати якість сировини.

1.3 Визначення параметрів регуляторів

Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (ПІД) – пристрій для автоматичної підтримки в заданому інтервалі одного або кількох параметрів. Такі пристрої є універсальними, за допомогою ПІД-регуляторів можна реалізувати будь-які закони регулювання.

Вони враховують фактичну величину, задане значення, різницю значень та швидкість зміни контрольованих характеристик.

Регулятори такого типу широко застосовують у локальних системах управління промисловим обладнанням, централізованих АСУТП, у робототехніці. Пристрої дозволяють швидко повертати регульований параметр у

допустимий інтервал, точно утримувати величину і швидко реагувати на впливи, що збурюють.

Керуючий сигнал, що формується ПІД-регулятором, сума трьох складових, зображено на рис. 1.9:

- пропорційною;
- інтегральний;
- диференційною.



Рисунок 1.9 – Складові ПІД-регулятора [7]

Пропорційна складова формується виходячи з різниці заданої величини параметра та його фактичного значення. Чим більший відхилення характеристики, тим вище рівень пропорційного сигналу. Пристрої, що керують системою, лише за пропорційним законом називають П-регулятори, рисунок 2.4.

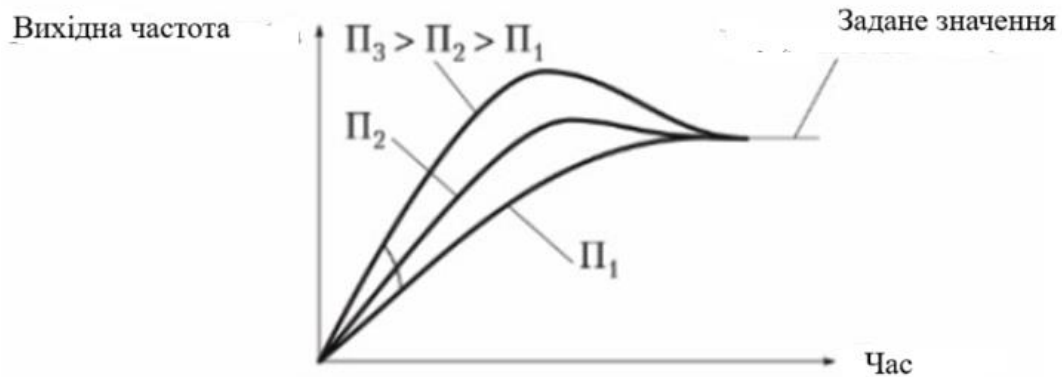


Рисунок 1.10 – Пропорційна складова ПІД-регулятора [7]

Основний недолік такого регулювання – статична помилка, що вказує на величину залишкового відхилення параметра. Пропорційні регулятори мають обмежену точність.

Для її усунення запроваджено інтегральну складову. Вона пропорційна інтегралу за часом відхилення величини контрольованої характеристики.

При відхиленні параметра пропорційна складова повертає його до попереднього значення. Рівень сигналу на виході прагне нуля, проте завдяки статичній помилці, регульований параметр не досягає заданої величини. Інтегральна компонента забезпечує компенсацію помилки та дозволяє повертати характеристику до заданих значень.

Пропорційно-інтегральне управління, яке зображено на рис. 1.11, має невисоку швидкодію і не підходить для регулювання динамічних систем. Накопичення та підсумовування помилок призводить до зростання керуючого сигналу. Система може піти в рознесення.

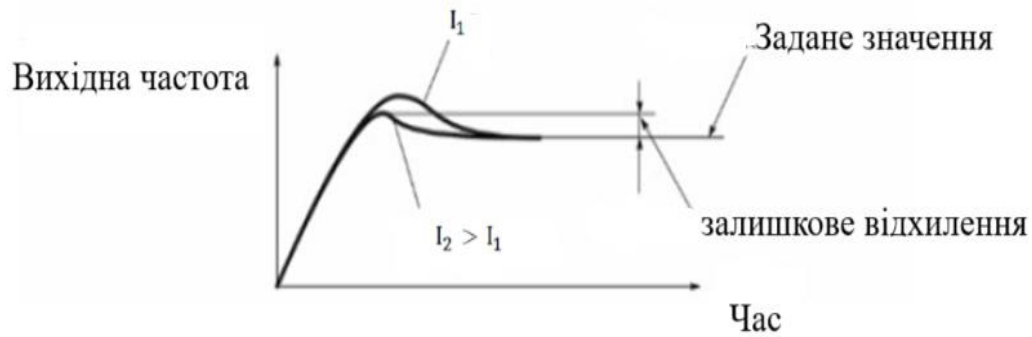


Рисунок 1.11 – Пропорційна-інтегральна складова ПІД-регулятора [7]

Для збільшення швидкодії конструкцію регулятора введена диференціальна складова, показано на рисунку 1.12. Вона збільшується та зменшується пропорційно швидкості зміни контрольованого параметра.

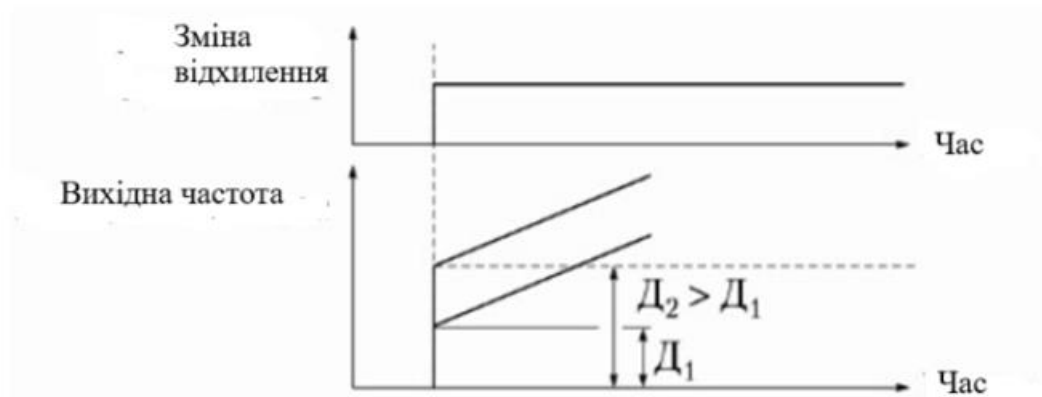


Рисунок 1.12 – Диференціальна складова ПІД-регулятора [7]

Таким чином, результуючий сигнал на виході ПІД-регулятора можна визначити з виразу:

$$\sum \frac{K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d de(t)}{dt}, \quad (1.1)$$

$$P(t) = K_p e(t); I(t) = K_i \int e(t) dt; \frac{K_d de(t)}{dt}. \quad (1.2)$$

де K_p , K_i , K_d – пропорційний, інтегральний, диференціальний коефіцієнти відповідно;

$e(t)$ – помилка неузгодженості.

За ними визначаються передавальні функції системи автоматичного регулювання та обчислюються її параметри:

- точність;
- швидкість регулювання;
- форма графіків перехідних процесів;
- інерційність;
- інші величини та функції.

При розробці ПІД-регуляторів та САР використовують обладнання, що імітує зміну контрольованих характеристик, вимірювальні прилади та ПК. Пристрої дозволяють визначити та аналізувати реакцію системи на впливи та більш точно підібрати коефіцієнти.

Насправді застосовується досвідчений підбір коефіцієнтів. ПІД-регулятори встановлюють на об'єкті, вводять коефіцієнти, отримані при розрахунку або стендових випробуваннях, налаштовують параметри на місці [7].

1.4 Постановка задач дослідження

Таким чином, для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні пункти:

- провести аналіз конструкцій теплообмінних апаратів та їх процесів;
- провести розробку математичної моделі теплообмінника;

- виконати комп'ютерне моделювання автоматизованого теплообмінного апарату;
- виконати експериментальні дослідження для підтвердження правильності теоретичних рішень;

1.5 Висновки

Теплообмінні апарати відіграють ключову роль у багатьох промислових і технічних процесах, де необхідна ефективна передача тепла між середовищами. Основні конструкції включають пластинчасті теплообмінники, трубчасті теплообмінники, реактори та інші види обладнання.

Автоматизація теплообмінних апаратів є важливим аспектом для забезпечення оптимального теплообмінного процесу та забезпечення безперебійної та ефективної роботи систем. Вона може включати в себе використання різноманітних сенсорів для вимірювання температури, тиску, обсягу рідини тощо, а також автоматизовані системи керування для регулювання робочих параметрів теплообмінних апаратів.

Теорія автоматичного управління та визначення параметрів регуляторів грає ключову роль у розробці ефективних систем автоматизації. Оптимально налаштовані регулятори можуть забезпечити стабільну та точну роботу теплообмінних апаратів, підтримуючи встановлені параметри та оптимізуючи енергоспоживання.

Узагальнюючи, автоматизація теплообмінних апаратів є важливим елементом сучасних технологій, спрямованих на підвищення ефективності та енергоефективності промислових процесів.

2 ПРОЕКТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРУ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛООБМІННОГО АПАРАТУ

Проектування ПІД-регулятора температури може виконуватись на різноманітних теоретичних основах з використанням різноманітних концепцій та методів.

Вибір теоретичних основ значною мірою визначає результат проектування ПІД-регулятора теплообмінного апарата, що буде призводити до різноманітної якості процесу регулювання температури.

Щоб мати представлення о якості проектування ПІД-регулятора необхідно розуміти на яких теоретичних основах виконується таке проектування.

Далі розглянемо теоретичні основи.

2.1 Загальний підхід щодо проектування ПІД-регулятора температури теплообмінного апарату

Теплообмінні апарати призначені для нагріву деякого середовища до заданої температури. Під час роботи теплообмінного апарату температури нагріву середовища, в загальному випадку змінюється у часі в силу природніх непостійних умов теплообміну та інших зовнішніх умов.

Введемо позначення температури підігріваємого середовища

$$T_{\text{пс}}(t), \quad (2.1)$$

де $T_{\text{пс}}$ – температура підігріваємого середовища;

t – час.

Підігріваєме середовище використовується в будь-якому технологічному процесі і щоб не руйнувати умови цього процесу, температура $T_{\text{пс}}$ повинна бути

в достатньо вузькому температурному інтервалі під час роботи теплообмінного апарату.

Саме для забезпечення заданої температури $T_{\text{пс}}$ під час тривалої роботи приходиться використовувати ПІД-регулятор щоб викоренити помилки при ручному управлінні.

Основна ідея ПІД-регулятора температури теплообмінного апарату.

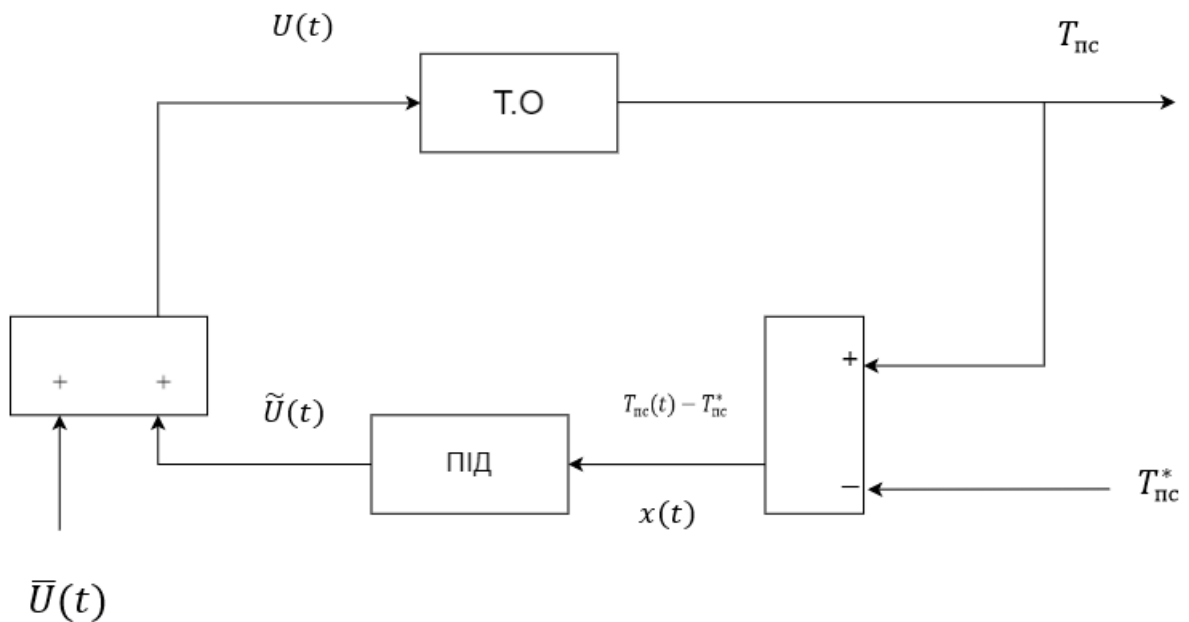


Рисунок 2.1 – Автоматичне регулювання теплообмінного апарату за допомогою ПІД-регулятора

де $\bar{U}(t)$ – задане управління;

$\tilde{U}(t)$ – корекція управління яка виробляється ПІД-регулятором.

$$\tilde{x}(t) = T_{\text{пс}}(t) - T_{\text{пс}}^* \quad (2.2)$$

де $\tilde{x}(t)$ – відхилення температури від заданого значення;

$T_{\text{пс}}^*$ – змінне значення температури.

$$U(t) = \bar{U}(t) + \tilde{U}(t), \quad (2.3)$$

де $\bar{U}(t)$ – задане розрахункове управління яке відповідає температурі $T_{\text{пс}}$.

$$\tilde{x}(t) \rightarrow \tilde{U}(t). \quad (2.4)$$

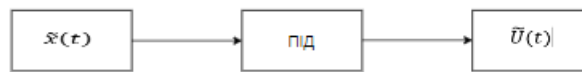


Рисунок 2.2 – ПІД-регулятор у вигляді динамічної ланки

$$\tilde{U}(t) = -k_p \tilde{x}(t) - k_i \int \tilde{x}(t) dt - k_d \frac{d\pi}{dt}, \quad (2.5)$$

де k_p , k_d , k_i – параметри ПІД-регулятора, характеризуючи пропорційну, інтегральну і диференціальну ланку.

Для проектування ПІД-регулятора температури теплообмінного апарату зводиться до визначення параметрів k_p , k_d , k_i цього регулятора, які будуть підтримувати цю температуру $T_{\text{пс}}^*$, біля її заданого значення з деякою допустимою похибкою.

Для проектування ПІД-регулятора температури необхідно мати модель яка буде зв'язувати температуру $T_{\text{пс}}$ з управлінням $U(t)$.

$$U(t) \rightarrow T_{\text{пс}}. \quad (2.6)$$

Теплообмінний апарат – це складна технічна система, стан якої визначається великою кількістю параметрів, які характеризують тепловий стан.

$$T_1(t), T_2(t), T_3(t), T_k(t) \dots T_n(t), \quad (2.7)$$

де $T_k(t)$ – параметр з номером k , характеризує температурний стан теплообмінного апарату.

n – число параметрів температурного стану теплообмінного апарату.

Математична модель теплообмінного апарату в загальному випадку представляють у вигляді системи диференціальних рівнянь.

$$\begin{cases} \frac{dT_k}{dt} = f_k(t, T_1, T_2, \dots, T_n; U), \\ T_k = T_{k0}, k = 1, 2, \dots, n, \end{cases} \quad (2.8)$$

де f_k – швидкість зміни параметра T_k – температурний стан теплообмінного апарата.

Побудова математичної моделі теплообмінного апарата зводиться до визначення функції f_k (2.8). Математична модель (2.8) представляє собою:

$$U(t) \rightarrow T_1(t), T_2(t) \dots T_n(t). \quad (2.9)$$

Очевидно що температура $T_{nc}(t)$ буде функцією параметрів (2.7)

$$T_{nc}(t) = f_k(T_1(t), T_2(t) \dots T_n(t)). \quad (2.10)$$

Яка має модуль теплообмінного апарату як об'єкт автоматизації у неявній формі:

$$U(t) \rightarrow T_1(t), T_2(t) \dots T_n(t) \rightarrow T_{\text{пс}}(t). \quad (2.11)$$

Модель (2.11) не зручна для визначення параметрів ПД-регулятора, тому приймаємо, що модуль теплообмінного апарату має вигляд:

$$a_1 \frac{d\tilde{x}}{dt} + a_0 \tilde{x} = b_0 U(t), \quad (2.12)$$

де $\tilde{x}(t) = T_{\text{пс}}(t)$ – загальноприйняте позначення регулюємої температури;

a_1, a_0, b_0 – параметри математичної моделі теплообмінного апарату як об'єкту автоматизації.

Параметри a_1, a_0, b_0 необхідно перетворити так, щоб спрощена математична модель (2.11) була узгоджена з деталізованою математичною моделлю (2.11). Спосіб визначення параметрів a_1, a_0, b_0 може бути різним в залежності від виду моделі (2.11). В загальному випадку логічно рекомендувати параметричну ідентифікацію на основі результатів ідентифікаційного моделювання теплообмінного апарату за допомогою деталізованої математичної моделі (2.11).

Припустимо, що маємо спрощену модель теплообмінного апарату (2.12), тоді для визначення параметрів ПД-регулятора маємо в (2.12) закони регулювання (2.2) (2.3) (2.5).

$$a_1 \frac{d\tilde{x}}{dt} + a_0 \tilde{x} = b_0 (\bar{U}(t) - k_p \tilde{x} - k_i \tilde{x} \int \tilde{x} dt - k_D \frac{d\tilde{x}}{dt}), \quad (2.13)$$

Після тотожних перетворень отримаємо:

$$(a_1 + b_0 k_D) \frac{d^2 x}{dt^2} + (a_0 + b_0 k_p) \frac{dx}{dt} + b_0 k_i x = b_0 U(t). \quad (2.14)$$

2.2 Математична модель процесів в теплообмінному апараті

Теплообмінний апарат – це складний технічний об’єкт автоматизації в якому має місце розвиток процесів. Моделювання теплообмінного апарату – це складна задача, та залежить від цілей дослідження.

При проектуванні систем автоматизації необхідно мати математичну модель теплообмінного апарату як об’єкту автоматизації.

Не існує узагальненого загальноприйнятого підходу до побудови математичної моделі в якому підхід до рівняння розглядається як узагальнення властивостей процесів властивих теплообмінному апарату.

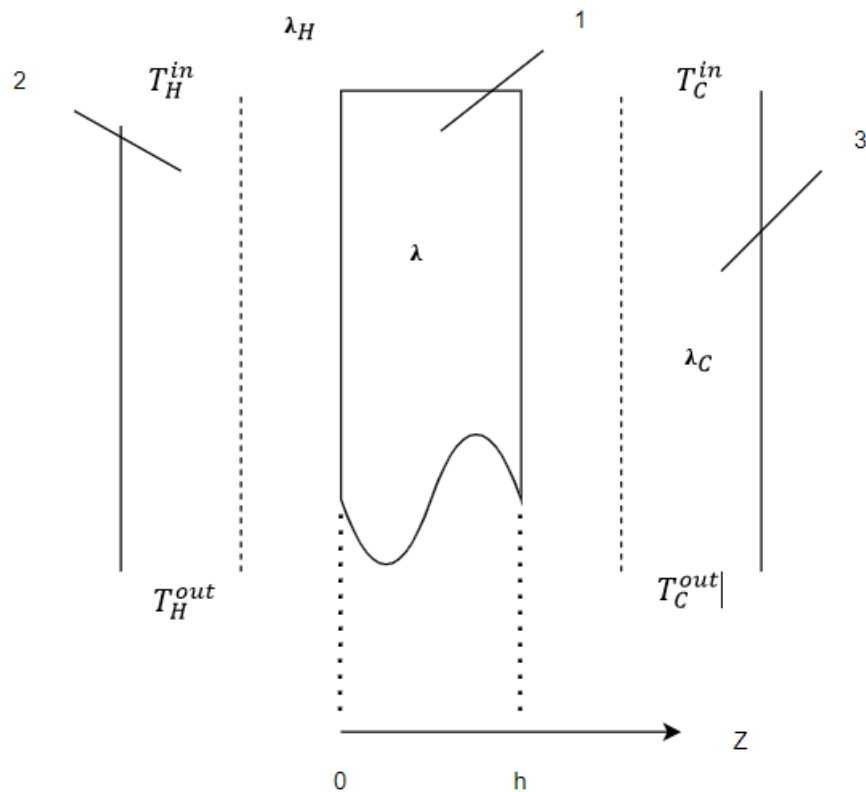


Рисунок 2.3 – Властивості процесів в теплообмінному апараті

де 1 – поверхність теплоносія;

2 – область теплоносія;

3 – область охолоджувача;

Λ – область поверхні теплообміну;

λ_H – область теплоносія;

λ_C – область охолоджувача;

$T_H^{in} - T_H^{out}$ – вхідна і вихідна температура теплоносія;

$T_C^{in} - T_C^{out}$ – вхідна і вихідна температура охолоджувача.

Процес передачі тепла через поверхню теплообміну виконується за рахунок теплопровідності. У наслідок теплопровідності маємо в області Λ поля температури і теплових потоків.

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \Lambda \frac{d^2T}{dz^2}, \quad (2.15)$$

де c, ρ, Λ – теплоємність, щільність та коефіцієнт теплопровідності;

Нехай Γ_H – частина границі Γ , яка взаємодіє з теплоносієм, а Γ_C – частина границі Γ , яка взаємодіє з охолоджувачем. Рівняння теплопровідності (2.15) необхідно розглядати також з урахуванням граничних умов, які визначають теплообмін на ділянці Γ_H та Γ_C , граничної поверхні Γ теплопередаючій стінці. Далі будемо розглядати граничні умови першого порядку.

$$T(z, t) = T_H^{in}(t), \quad z = 0, \quad (2.16)$$

$$T(z, t) = T_C^{in}(t), \quad z = h. \quad (2.17)$$

де $T_H^{in}(t), T_C^{in}(t)$ – задане значення температури теплоносія та охолоджувача.

В наслідок теплопровідності через теплообмінну поверхню до охолоджувача поступає тепло величина якого визначається тепловим потоком.

$$\rho_c = -\Lambda \frac{dT}{dz}, \quad z = h. \quad (2.18)$$

В наслідок теплового потоку (2.18) температура охолоджувача T_c^{in} буде збільшуватись на величину:

$$\Delta T_c = \frac{q_c A_c}{C_c \rho_c Q_c}. \quad (2.19)$$

де ΔT_c – змінюема температура охолоджувача;

A_c – площа поверхні теплообміну;

$C_c \rho_c Q_c$ – теплоємність, щільність, витрата охолоджувача.

В результаті будемо мати температуру охолоджувача:

$$T_c^{out} = T_c^{in} + \Delta T_c. \quad (2.20)$$

Таким чином маємо математичну модель процесів в теплообмінному апараті у вигляді (2.14) - (2.20).

2.3 Визначення параметрів ПД-регулятора температури теплообмінного апарату

У прийнятій моделі в якості x виступає величина T_c^{out} та в якості управління U виступає величина T_H^{in} .

$$\begin{cases} x = T_C^{out} \\ U = T_H^{in} \end{cases} \quad (2.21)$$

Далі приймемо що зв'язок між величинами (2.21) визначається співвідношенням які ми спростимо і представимо у вигляді:

$$\frac{dx}{dt} + a_0x = b_0U. \quad (2.22)$$

де a_0, b_0 – шукані параметри математичної моделі які визначили шляхом ідентифікації по результатам моделювання процесів теплопровідності.

Для визначення параметрів з (2.22) будемо використовувати результати моделювання процесу теплопровідності у вигляді:

$$\begin{cases} t = t_1, t_2 \dots, t_K \\ U = U_1, U_2 \dots, U_K \\ x = x_1, x_2 \dots, x_K \end{cases} \quad (2.23)$$

Представимо рівняння (2.22) у дискретному вигляді:

$$\frac{x_{k+1} - x_k}{\Delta t} + a_0x_k = b_0U_k. \quad (2.24)$$

Введемо нове позначення:

$$Ax_k + BU_k + x_{k+1} = 0. \quad (2.25)$$

Використовуємо метод найменших квадратів:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} (Ax_k + BU_k + x_{k+1})^2. \quad (2.26)$$

В результаті отримуємо систему лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{n-1} (Ax_k + BU_k + x_{k+1}) x_k \\ \sum_{k=1}^{n-1} (Ax_k + BU_k + x_{k+1}) U_k \end{cases} \quad (2.27)$$

Введемо позначення:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \sum_{k=1}^{n-1} (x_k^2), \quad a_{12} = \sum_{k=1}^{n-1} (x_k U_k), \quad a_{22} = \sum_{k=1}^{n-1} U_k^2, \\ b_1 &= \sum_{k=1}^{n-1} (x_{k+1} x_k), \quad b_{12} = \sum_{k=1}^{n-1} (x_{k+1} U_k). \end{aligned} \quad (2.28)$$

В результаті система лінійних рівнянь буде мати вигляд:

$$\begin{cases} a_{11}A + a_{12}B = b_1 \\ a_{11}A + a_{22}B = b_2 \end{cases} \quad (2.29)$$

Рішення системи рівнянь (2.29) приведе нас до математичної моделі (2.21).

2.4 Висновки

У цьому розділі було розібрано загальний підхід щодо проектування ПД-регулятора температури теплообмінного апарату. Визначена математична модель процесів в теплообмінному апараті, а також встановлено, що не існує узагальненого загальноприйнятого підходу до побудови математичної моделі в якому підхід до рівняння розглядається як узагальнення властивостей процесів властивих теплообмінному апарату. Після чого біло визначені параметри ПД-регулятора.

3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ТЕПЛООБМІННОГО АПАРАТУ

Математичне моделювання процесів в теплообмінному апараті достатньо складне, так що складно отримати точні рішення в аналітичному виді.

В загальному випадку для вивчення процесів в теплообмінному апараті доводиться використовувати наближені рішення за допомогою числових методів. Такий підхід призводить до великих об'ємів обчислення, для виконання яких зручно використовувати комп'ютер та відповідне програмне забезпечення.

Далі для комп'ютерного моделювання автоматизованого теплообмінного апарату будемо використовувати систему Scilab з вільним відкритим кодом призначеним для виконання наукових та інженерних розрахунків та моделювання.

3.1 Комп'ютерне моделювання процесів в теплообмінному апараті

Розглянута в підрозділі 2.2 математична модель процесів в теплообмінному апараті має вигляд:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\Lambda}{c\rho} * \frac{d^2T}{dz^2} = 1, \quad (3.1)$$

$$T(z, 0) = T^0, \quad (3.2)$$

$$\Delta T_C^{out} = T_c^{in}(t) - \Lambda \left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=h} * \frac{A_C}{C_C \rho_C Q_C}, \quad (3.3)$$

де T^0 – задана температура в початковий момент часу $t=0$, тобто $t_0 = 0$.

Для наближеного вирішення задачі (3.1) –(3.3) будемо використовувати метод прямих відомих як метод полудискретизації. Відповідно з цим методом розглянемо поле температури $T(z, t)$ у наперед заданих вузлах сітки з координатами:

$$\begin{cases} z_k = k\Delta z, & k = 0, 1, 2 \dots n, n + 1 \\ \Delta t = \frac{h}{n_h + 1} \end{cases} \quad (3.4)$$

де Δz – шаг сітки;

n_h – число вузлів сітки в середині інтервала $(0, h)$.

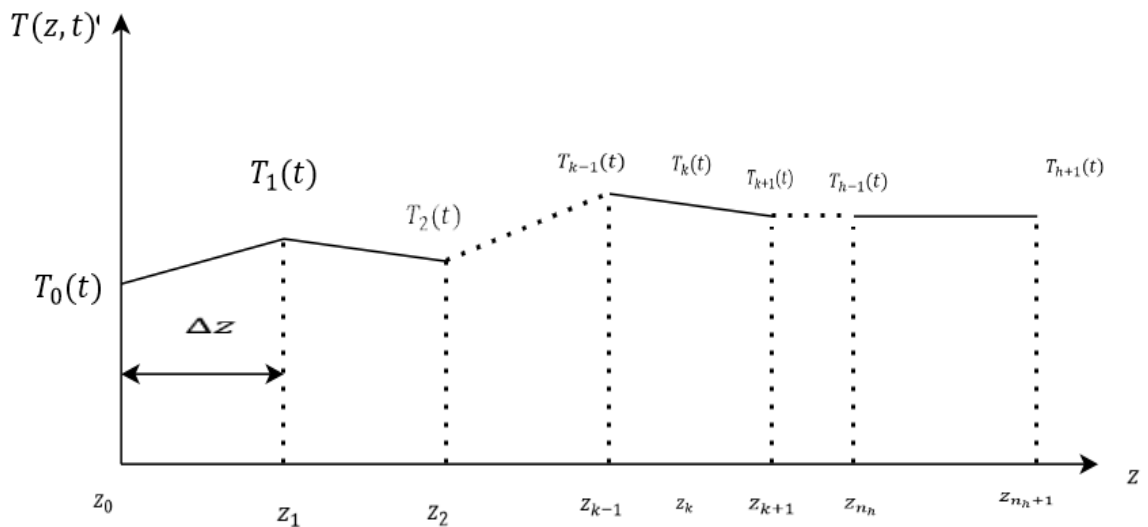


Рисунок 3.1 – Сітка, та вузлові значення температури

Сітка (3.1) дозволяє ввести до розгляду вузлові значення температури:

$$T_k(t) = T(z_k, t), \quad k = 0, 1, 2 \dots \quad (3.5)$$

де $T_k(t)$ – значення температури в точці $z=z_k$.

Далі в якості невідомої розглянемо вузлові значення (3.7).

Для визначення вузлових значень (3.7) у граничних вузлах $k = 0$ та $k = n_h + 1$.

В результаті ми отримуємо:

$$T_0(t) = T_h^{in}(t), \quad (3.6)$$

$$T_h(t) = T_c^{in}(t). \quad (3.7)$$

Для визначення вузлових значень у внутрішніх вузлах , $k = 0, 1, 2 \dots n_h$ будемо використовувати диференційне рівняння (3.1):

$$\frac{dT_k}{dt} = \frac{\Lambda}{c\rho} * \left. \frac{d^2T}{dz^2} \right|_{z=z_k}, \quad k = 0, 1, 2 \dots n_h. \quad (3.8)$$

Щоб встановити співвідношення (3.10) необхідно визначити похідну $\frac{d^2T}{dz^2}$ в точці $z=z_k$ будемо використовувати тільки наближені вузлові значення. Для цього запишемо такі наближені формули:

$$\left. \frac{d^2T}{dz^2} \right|_{z=z_k} = \alpha T_{k-1} + \beta T_k + \gamma T_{k+1}, \quad (3.9)$$

де α, β, γ – деякі числові параметри.

Щоб знайти параметри α, β, γ будемо використовувати ряди Тейлора:

$$T_{k+1} = T_k \pm \left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=z_k} \Delta z + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2T}{dz^2} \right|_{z=z_k} \Delta z^2 \pm \frac{1}{3!} \left. \frac{d^3T}{dz^3} \right|_{z=z_k} \Delta z^3 + \dots \quad (3.10)$$

Підставимо (3.11) в (3.10):

$$\begin{aligned} \left. \frac{d^2 T}{dz^2} \right|_{z=z_k} &= \alpha \left(T_k - \frac{dT_k}{dz} \Delta z + \frac{1}{2!} \frac{d^2 T_k}{dz^2} \Delta z^2 + \dots \right) + \beta T_k + \\ &+ \gamma \left(T_k + \frac{dT_k}{dz} \Delta z + \frac{1}{2!} \frac{d^2 T_k}{dz^2} \Delta z^2 + \dots \right) \end{aligned} \quad (3.11)$$

З рівняння (3.11) отримуємо співвідношення:

$$\alpha + \beta + \gamma = 0, \gamma - \alpha = 0, \frac{1}{2} (\alpha + \gamma) \Delta z^2 = 1. \quad (3.12)$$

У вигляді (3.12) вирішуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення α, β, γ :

$$\gamma = \alpha = \frac{1}{\Delta z^2}, \quad (3.13)$$

$$\beta = -\alpha - \gamma = \frac{2}{\Delta z^2}. \quad (3.14)$$

З урахуванням результатів (3.13) та (3.14) формула (3.19) прийме вигляд:

$$\frac{dT_k}{dt} = \frac{\Lambda}{c\rho} * \frac{T_{k-1} - 2T_k + T_{k+1}}{\Delta z^2}. \quad (3.15)$$

Введемо до розгляду такі вектори та матриці:

$$T = (T_1, T_2 \dots T_{n_h})^T, \quad (3.16)$$

$$A = \frac{\Lambda}{c\rho\Delta z^2} \begin{pmatrix} -2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -2 \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

$$U = (T_h^{in}, T_c^{in})^T, \quad (3.18)$$

$$\beta = \frac{\Lambda}{c\rho\Delta z^2} * (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 1)^T. \quad (3.19)$$

З урахуванням позначень (3.16)–(3.19) система рівнянь прийме вигляд:

$$\frac{dT}{dz} = AT + BU. \quad (3.20)$$

Систему диференціальних рівнянь (3.20) будемо розглядати з початковими умовами $T(0)$.

Щоб скористатися співвідношенням (3.3) визначимо похідну за допомогою наближеної формули:

$$\left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=z_k} \approx (\alpha T_k + \beta T_{k-1} + \gamma T_{k-2}). \quad (3.21)$$

де α, β, γ – спеціально вибрані числові параметри.

Для визначення параметрів з формули (3.21) будемо використовувати ряд Тейлора (3.10) та ряд Тейлора:

$$T_{k-2} = T_k - 2 \frac{dT_k}{dz} \Delta z + \frac{1}{2!} * 4 \frac{d^2 T_k}{dz^2} \Delta z^2 - \frac{1}{3!} * 8 \frac{d^3 T_k}{dz^3} \Delta z^3 \dots \quad (3.22)$$

Підставимо ряди Тейлора (3.10) та (3.21) в (3.22):

$$\begin{aligned} \frac{dT_k}{dz} = & \alpha T_k + \beta \left(T_k - \frac{dT_k}{dz} \Delta z + \frac{1}{2!} \frac{d^2 T_k}{dz^2} \Delta z^2 \dots \right) + \\ & + \gamma \left(2 \frac{dT_k}{dz} \Delta z + \frac{1}{2!} * 4 \frac{d^2 T_k}{dz^2} \Delta z^2 \dots \right) \end{aligned} \quad (3.23)$$

Із рівності (3.23) отримуємо таке співвідношення:

$$\begin{cases} \alpha + \beta + \gamma = 0, \\ -(\beta + 2\gamma) = 1, \\ \beta + 4\gamma = 0. \end{cases} \quad (3.24)$$

У виді (3.24) маємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення α, β, γ , вирішення котрих буде наступним:

$$\begin{cases} \beta = -4\gamma \\ \gamma = \frac{1}{2\Delta z} \\ \alpha = -\beta - \gamma = \frac{3}{2\Delta z} \end{cases} \quad (3.25)$$

З урахуванням виразів (3.7) та (3.25) співвідношення (3.3) прийме вигляд:

$$T_c^{out} = T_c^{in} - \frac{\Lambda A_c}{C_c \rho_c Q_c} * \frac{3T_c^{in}(t) - 4T_{n_h} + T_{n_h-1}}{2\Delta z}. \quad (3.26)$$

Приведемо подібні доданки в (3.27):

$$T_c^{out} = \left(1 - \frac{3\Lambda A_c}{2\Delta z C_c \rho_c Q_c}\right) T_c^{in}(t) - \frac{\Lambda A_c}{2\Delta z C_c \rho_c Q_c} (-4T_{n_h} + T_{n_h-1}). \quad (3.27)$$

Введемо нові позначення:

$$C = \frac{\Lambda A_c}{2\Delta z C_c \rho_c Q_c}, \quad (3.28)$$

$$D = 1 - \frac{3\Lambda A_c}{2\Delta z C_c \rho_c Q_c} \quad (3.29)$$

Тоді з урахуванням виразів (3.28), (3.29), співвідношення (3.27) прийме вигляд:

$$T_c^{out} = T * C + U * D. \quad (3.30)$$

У вигляді (3.30), ми отримали математичну модель для процесів в теплообмінному апараті.

Для тестування комп'ютерної моделі теплопровідності будемо використовувати такі матриці:

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (3.31)$$

$$D = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\Lambda}{c\rho\Delta z^2} & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \frac{\Lambda}{c\rho\Delta z^2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.32)$$

Матриці (3.32) (3.33) мають розмір $(n_h + 2)n_h$, та $(n_h + 2) * 2$, та відповідають вектору такого виду:

$$y = (T_h^{in}, T_1, T_1 \dots T_{n_h}, T_h^{out})^T. \quad (3.33)$$

В тестовій задачі прийmemo такі вихідні данні:

$$h = 5\text{мм}, c = 586 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}}, \rho = 7830 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \Lambda = 48 \frac{\text{Вт}}{\text{м} * \text{К}},$$

$$T_0 = 300\text{К}, T_h^{in} = 407\text{К}, T_c^{in} = 293\text{К}.$$

Час моделювання прийmemo у вигляді: $t_f = 10\text{с}$.

де t_f – проміжок часу коли розглядається процес.

Проведемо моделювання процесу.

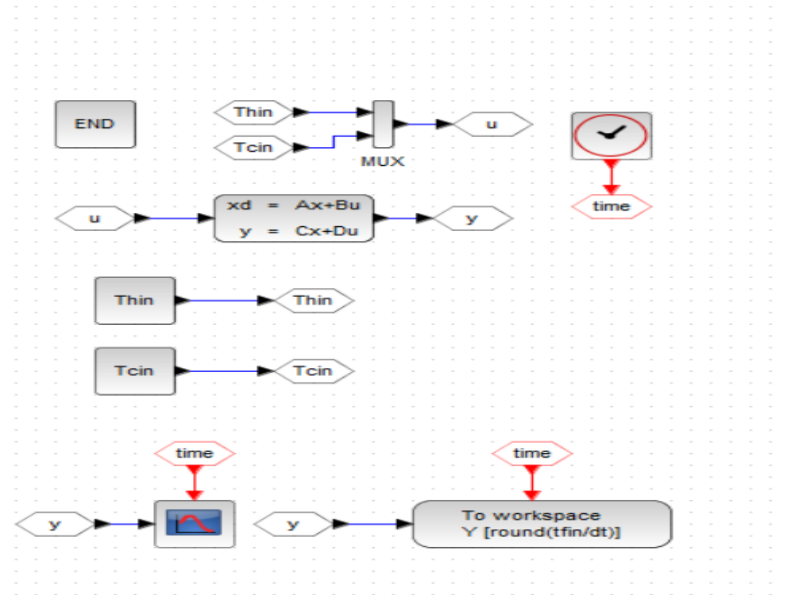


Рисунок 3.2 – Комп'ютерна модель температури між плоскими стінками

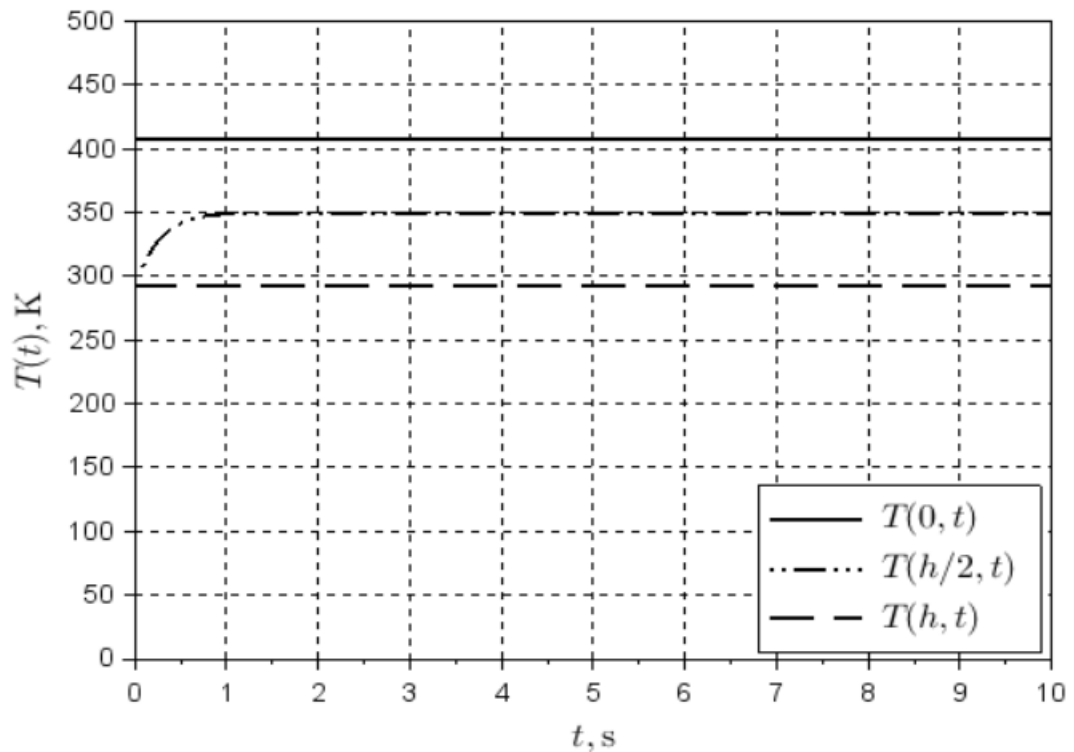


Рисунок 3.3 – Графік температури між стінками на краюх

Щоб виконати моделювання теплообмінного апарату введемо таке позначення:

$$\alpha = \frac{\Lambda A_c}{2\Delta z C_c \rho_c Q_c}. \quad (3.34)$$

Тоді з урахуванням позначення (3.45) вираз (3.39) та (3.40) прийме вигляд:

$$C = \alpha(0 \quad 0 \quad 0 \dots \quad 0 \quad 1 - 4), \quad (3.35)$$

$$D = (0 \quad 1 - 3\alpha). \quad (3.36)$$

Необхідні дані для розрахунку теплообмінного апарату:

$$C_c = 415 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \rho_c = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, Q_c = 0,0425 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}, A_c = 1 \text{ м}^2.$$

Проведемо моделювання теплообмінного апарату

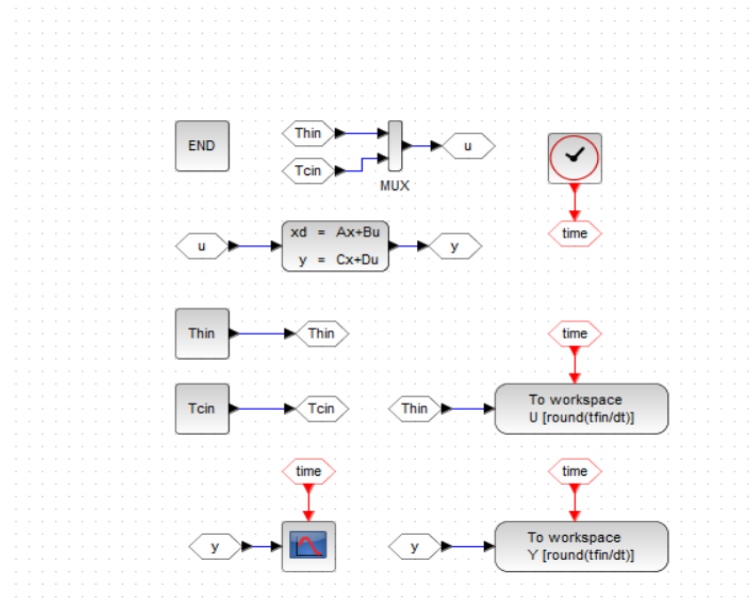


Рисунок 3.4 – Модель для порівняння вихідної температури

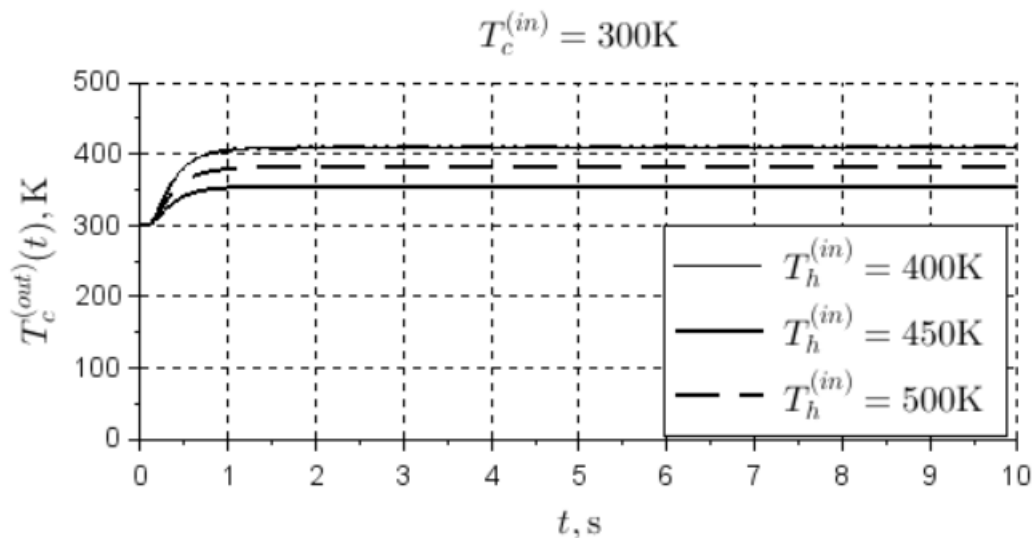


Рисунок 3.5 – Графік залежності вихідної температури від вхідної

3.2 Ідентифікація теплообмінного апарату як об'єкту автоматизації

Щоб мати математичну модель теплообмінного апарату як об'єкта автоматизації введемо величину:

$$x(t) = T_c^{out} - T_0, \quad (3.37)$$

де $x(t)$ – нова змінна яка представляє параметр управління.

Проведемо моделювання теплообмінного апарату як об'єкту автоматизації:

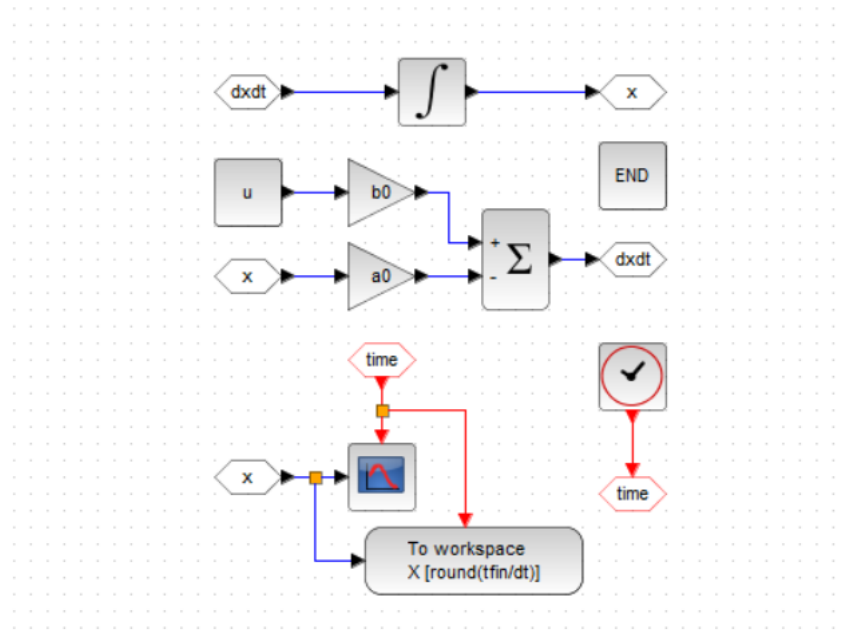


Рисунок 3.6 – Модель теплообмінного апарату як об'єкту автоматизації

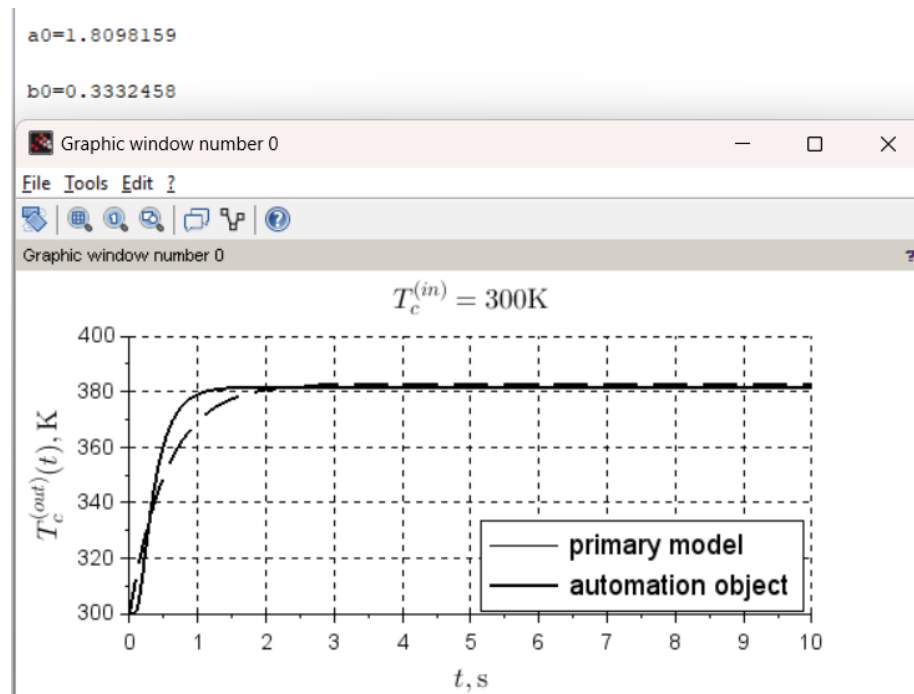


Рисунок 3.7 – Графік процесів в теплообмінному апараті та їх наближене представлення

3.3 Дослідження впливу параметрів ПІД-регулятора на процеси в теплообмінному апараті

Математична модель:

$$\frac{dx}{dt} + a_0x = b_0U(t), x_0 = 0, \quad (3.38)$$

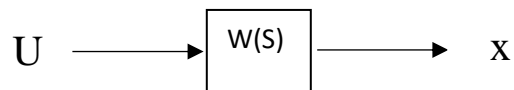


Рисунок 3.8 – Теплообмінний апарат у вигляді динамічної ланки

$$W(S) = \frac{b_0}{S + a_0}, \quad (3.39)$$

$$T_c^{out}(t) = x(t) + T_c^{in}(t), \quad (3.40)$$

де $T_c^{in}(t)$ – неконтролюємо змінюється температура на вході теплообмінного апарату.

Прийmemo що:

$$T_c^{in}(t) = T_0 + \Delta T(t), \quad (3.41)$$

де $\Delta T(t)$ – випадкова змінна.

Прийmemo що випадкова функція:

$$\Delta T(t) \leq [\Delta T], \quad (3.42)$$

де $[\Delta T]$ – випадкова функція для задання вхідного значення.

$$\kappa_i = \kappa \frac{(a_0 + b_0 \kappa_p)^2}{4(1 + b_0 \kappa_D) b_0}. \quad (3.43)$$

Проведемо моделювання процесів в теплообмінному апараті при випадковій змінній на вході.

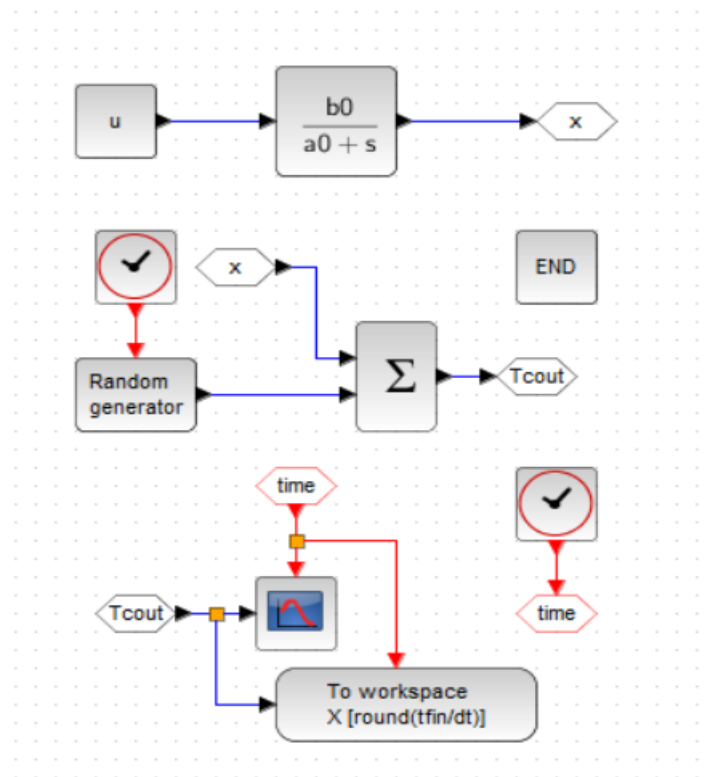


Рисунок 3.9 – Модель процесів в теплообмінному апараті при випадковій зміні температури на вході

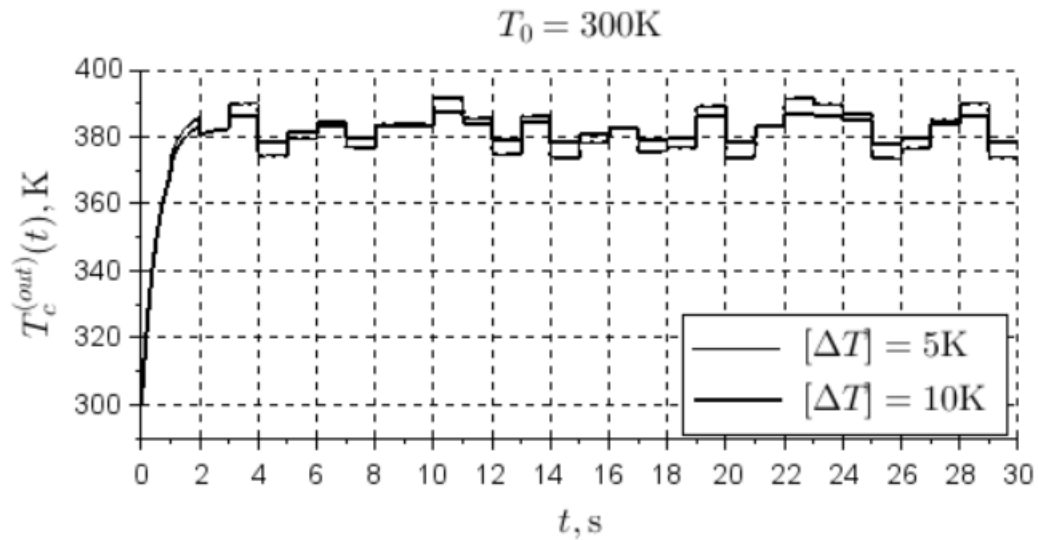


Рисунок 3.10 – Графік впливу випадкової зміни температури на вході, на його температуру на виході

З цього дослідження видно що температура ніяк не регулюється при постійному збуренні.

Далі проведемо моделювання процесів в теплообмінному апараті з ПІД-регулятором.

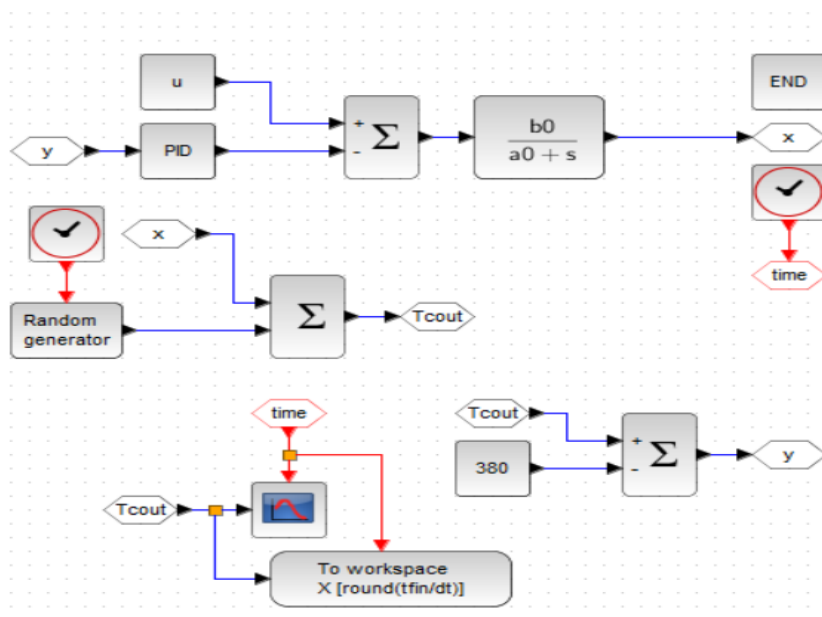


Рисунок 3.11 – Модель теплообмінного апарату з ПІД-регулятором

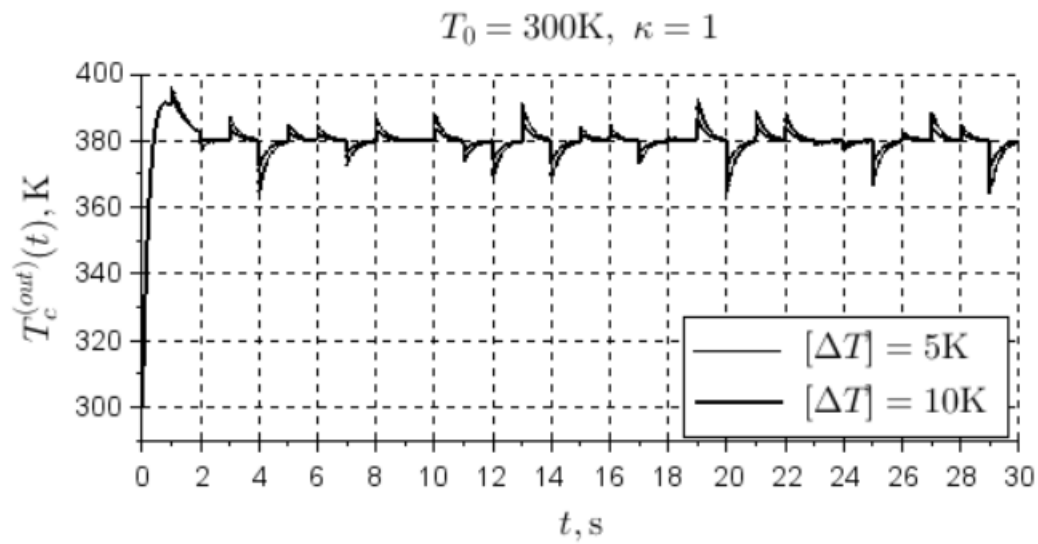


Рисунок 3.12 – Графік процесу регулювання температури на виході з теплообмінного апарату

Очевидно що ПД-регулятор працює правильно, та приводить температуру до заданого значення після збурення.

Далі проведемо моделювання процесу регулювання температури з різними значеннями інтегральної складової $\kappa = 0, \kappa = 1, \kappa \geq 1$.

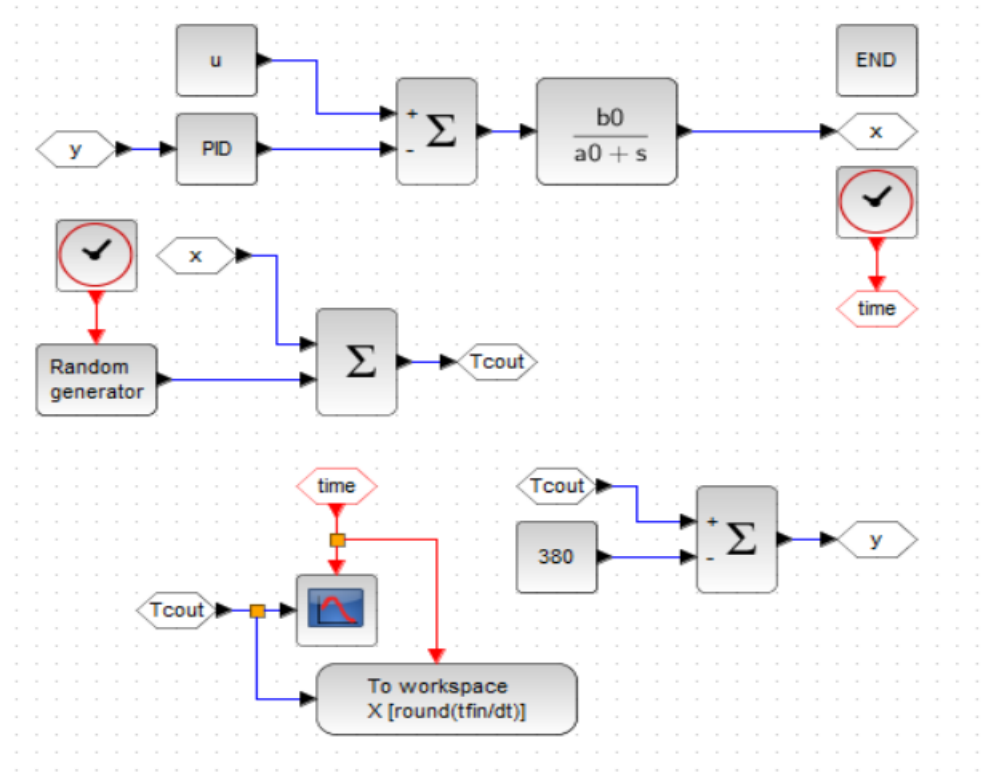


Рисунок 3.13 – Модель ПІД-регулятора з змінною інтегральною складовою

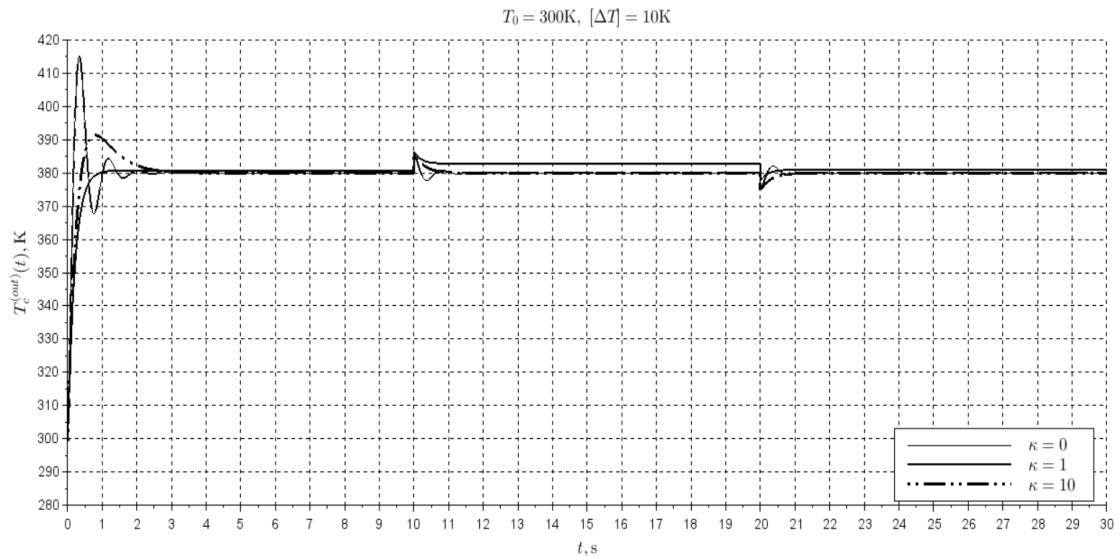


Рисунок 3.14 – Графік впливу параметрів ПІД-регулятора на процес компенсації збурень вхідної температури

З графіка видно що без інтегральної складової задане значення температури не підтримується, але вплив збурення зменшений. Коли ми підключаємо інтегральну складову, то температура регулюється до необхідного значення.

3.4 Висновки за розділом 3

У ході комп'ютерного моделювання було проведено моделювання внутрішніх процесів с заданою початковими значеннями, а потім з випадковою вхідною величиною. З цих досліджень видно, що без ПД-регулятора температура не регулюється, і постійно змінює своє значення. Після чого було підключено ПД-регулятор, і проведено декілька досліджень, з яких видно що найбільш точне регулювання виконується при $k=1$.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Вимоги до особистого робочого місця працівника

Роботодавець, який використовує найману працю робітників, повинен забезпечити відповідність їхніх робочих місць комфортним та безпечним умовам. Розмір одного робочого місця має становити не менше 6 квадратних метрів. При необхідності, суміжні робочі місця співробітників, що працюють з комп'ютером, слід розділити перегородками висотою до 2 метрів. При визначенні достатнього розміру приміщення і робочого місця на одну особу необхідно додатково враховувати шафи, сейфи, тумби або інші предмети меблів чи обладнання, які знаходяться в кімнаті. На столі працівника можливо розмістити допоміжні для роботи пристрої (принтери, колонки, сканери), а також місця для зберігання документів, за умови, що це не обмежуватиме видимість екрану і не заважатиме працівнику. У разі надмірного шуму чи вібрації технічного обладнання, роботодавець повинен забезпечити працівників антивібраційними килимками. Робочий стілець співробітника має бути підйомно-поворотним, легко регульованим за висотою та забезпечувати належну підтримку та зручне положення спини і хребта особи. Щодня необхідно проводити вологе прибирання приміщення, та очищати робоче місце та безпосередньо монітор комп'ютера від запиленості.

На підприємстві забороняється:

- проводити ремонт та технічне обслуговування комп'ютера за робочим місцем працівника;
- самочинно ремонтувати або намагатись здійснити технічне налагодження комп'ютера без залучення компетентних спеціалістів;

- складувати на робочому місці зайві документи, деталі та предмети, що не потрібні для роботи;
- використовувати монітори з нечітким зображенням та монітори, у яких наявні поламки екрану;
- працювати з матричним принтером без антивібраційного покриття та зі знятою кришкою;
- допускати до роботи осіб, які не пройшли затвердження на підприємстві курс охорони праці для роботи з комп'ютером, не дозволяється.

4.2 Небезпеки під час роботи з комп'ютерною технікою

На користувачів під час роботи з комп'ютерною технікою можуть діяти такі види небезпек:

- ураження електричним струмом;
- енергетична небезпека (виникає через коротке замикання: опіки, електрична дуга, викид розплавленого металу);
- небезпека загоряння; термонебезпека (дія високих температур через нагрівання конструктивних елементів);
- механічна небезпека (травми через падіння, дію рухомих частин, поріз за гострі частини конструктивних елементів);
- небезпека випромінювання (дія звукового (акустичного), високочастотного, інфрачервоного, ультрафіолетового й іонізуючого випромінювання, а також видимого світла когерентної високої інтенсивності (лазерного випромінювання));
- хімічна небезпека (контакт із деякими хімікатами, які використовують для того, щоб обслуговувати обладнання, або від вдихання їх парів)[10].

ВИСНОВКИ

В результаті виконання аналізу літератури за темою кваліфікаційної роботи були розглянуті загальні відомості про процеси та конструкції теплообмінних апаратів, принципи автоматизації теплообмінних апаратів та визначення параметрів ПД-регулятора.

Був визначений загальний підхід щодо проектування ПД-регулятора температури теплообмінного апарату. Побудована математична модель теплообмінного апарату, та визначені параметри ПД-регулятора.

Зроблено комп'ютерне моделювання процесів в теплообмінному апараті, виконана ідентифікація теплообмінного апарату як об'єкту автоматизації, та проведено дослідження впливу параметрів ПД-регулятора на процеси в теплообмінному апараті.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008–2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Документація. – Введ. 2015-06-22. - К.: Держстандарт України, 2015. - 31 с.

2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.

3. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. № 143. – Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-diju-rishennja-vchenoi-radi -universitetu.pdf

4. Z. Li, Q. Wang, M. Fang, and Z. Luo, "Different cases study on the heating surface layout of a new 600 MWe coal-fired power plant coupled with CaO-based carbon capture system based on heat exchanger network", Chemical Engineering and Processing – Process Intensification, vol. 172, 108787, 2022.

5. H. Raj Singh, D. Sharma, D.K. Sharma, and S. Chadha, "Low-cost novel designed receiver heat exchanger for household solarized cooking system: development and operationalization", Materials Today: Proceedings, vol. 47 (part 11), pp. 3018-3023, 2021.

6. D. Li, Y. Li, X. Zheng, J. Wang, and W. Sun, "Synthesis of heat exchanger network with complex phase transition based on pinch technology and carbon tax", IFAC-PapersOnLine, vol. 55 (is. 7), pp. 418-423, 2022.

7. M. Al-Dhaifallah, "Fuzzy fractional-order PID control for heat exchanger", Alexandria Engineering Journal, vol. 63, pp. 11-16, 2023.

8. Nevliudov I., Ratusnyi O., Romashov Yu. Development of General Approaches for Mathematical Modelling of Heat Exchangers as Automation Objects // Manufacturing & Mechatronic Systems 2023: Proceedings of VIIst International Conference, Kharkiv, October 19-20, 2023: Theses of Reports / [Ed. I.Sh. Nevlyudov (chief editor).] - Kharkiv .: [electronic version], 2023. - 163 p. - pp. 153-157.

9. S. Alyokhina, I. Nevliudov and Y. Romashov, "The Feed Water Level Improved Automated Control for Steam Generators of Nuclear Power Plants", in 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2022, pp. 1-6.

10. D. Shah, A. Shah, and A. Mehta, "Higher order networked sliding mode controller for heat exchanger connected via data communication network", European Journal of Control, vol. 58, pp. 301-314, 2021.

11. Y. Jia, T. Chai, H. Wang, and C.-Y. Su, "A signal compensation based cascaded PI control for an industrial heat exchange system", Control Engineering Practice, vol. 98, 104372, 2020

12. Навчальний посібник "Безпека життєдіяльності" / Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк, І. І. Хондак ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Харків : ХНУРЕ, 2018. 336 с. – ISBN 978-966-659-246-3.