

БАКАЛАВРСКА РОБОТА

БР.АКПзд-30.00.00.000 ПЗ

Група АКПзд-23-2К

Назар Грицай

2025

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Грицай Назар Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК УДК 658.012.011

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Автоматизація підігрівників нафти нафтозбірних колекторів

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174- Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Нормоконтроль

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПзд-23-2К

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

Н.І.Грицай

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада)

Л.І. Фешанич

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

М.І.Когутяк

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доц.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І.Лагойда

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКТ

(А.І. Лагойда)

«___» _____ 2025 року

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Грицай Назар Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація підігрівників нафти нафтозбірних колекторів

керівник роботи Когутяк Мирослав Іванович к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від « 07 » 05 20 25 року № 53/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025

3. Вихідні дані до роботи Технічна документація на технологічну
установку. Матеріали переддипломної практики

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Процес підігріву нафти як об'єкт автоматизації

2) Математична модель підігрівника нафти;

3) Синтез та аналіз автоматичних систем регулювання лінійного підігрівника

4) Розроблення проектної документації АСР шляхового підігрівника

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Лист1 -Функціональна схема автоматизації - БР.АКПзд-30.00.00.000 01

Лист2 -Математична модель підігрівника- БР.АКПдз-30.00.00.000 02

Лист3 -Аналіз та синтез одноконтурної АСР- БР.АКПзд.30.00.00.000 03

Лист4 -Аналіз та синтез АСР з корекцією- БР.АКПзд-30.00.00.000 04

Лист 5 - Ієрархічна структура АСК установки- БР.АКПзд-30.00.00.000 05

Лист 6 - Програмне забезпечення контролера- БР.АКПзд-30.00.00.000 06

Лист 7 -Аналіз одноконтурних АСР температури з LQR-регулятором -
БР.АКПзд.30.00.00.000 07

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 06.11.24

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Технологічний процес підігріву нафти як об'єкт автоматизації	13.05.2025	
2	Розроблення математичної моделі підігрівника нафти	18.05.2025	
3	Синтез та аналіз автоматичних систем регулювання процесу підігріву	20.05.25	
4	Розроблення проектної документації АСР шляхового підігрівника	25.05.25	
5	Висновки та підготовка графіки.	07.06.25	

Студент _____
(підпис)

Грицай Н.І.
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту _____
(підпис)

Когутяк М.І.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 61 сторінку друкованого тексту, 17 рисунків, 7 таблиці, 14 посилання на джерела.

Тема : ” Автоматизація підігрівників нафти нафтозбірних колекторів”.

Об’єктом дослідження : шляховий підігрівник нафти.

Мета роботи: удосконалення автоматичної системи керування процесу підігріву нафти на промислах.

Методи дослідження: експериментальне та аналітичне моделювання об’єкта та автоматичної системи керування шляхового підігрівника нафти.

Результати бакалаврської роботи: для досягнення заданої мети проведений аналіз шляхового блочного підігрівника нафти як об’єкта автоматизації .

Отримана математична модель блочного підігрівника з проміжним теплоносієм на основі матеріального та теплового балансу по апарату.

Синтезовано системи регулювання температури у підігрівнику та проведено імітаційні експерименти по дослідженню систем регулювання при зміні заданої точки та збуреннях , що діють на систему.

Спроектовано ієрархічну комп’ютерно інтегровану систему керування установкою комплексної підготовки газу та розроблено необхідні супровідні проектні документи.

Ключові слова: імітаційна модель , система автоматизованого керування, проміжний підігрівник, система регулювання, промисловий контролер , регулятор .

ABSTRACT

The bachelor thesis contains: 61 pages of printed text, 17 figures, 7 tables, 14 references to sources.

Topic: "Automation of oil heaters of oil collectors".

The object of the study: a road oil heater.

The purpose of the work: improvement of the automatic control system of the oil heating process in fields.

Research methods: experimental and analytical modeling of the facility and the automatic control system of the on-board oil heater.

The results of the bachelor's work: to achieve the given goal, an analysis of the way block heater of oil as an object of automation was carried out.

The mathematical model of the block heater with an intermediate coolant based on the material and thermal balance on the device is obtained.

The systems of temperature regulation in the heater are synthesized and simulated experiments were performed on the study of regulatory systems when changing the given point and perturbations operating on the system.

A hierarchical computer integrated system of installation of comprehensive gas preparation and the necessary accompanying project documents are designed.

Key words: simulation model, automated control system, intermediate heater, regulation system, industrial controller, regulator.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	9
1 ПРОЦЕС ПІДГРІВУ НАФТИ ЯК ОБ'ЄКТ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	10
1.1 Принцип роботи нафтових підігрівачів.....	10
1.2. Розрахунок статичного режиму підігрівника нафти	14
1.3 Параметри контролю і регулювання.....	22
Висновки до розділу.....	22
2 РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПІДГРІВНИКА НАФТИ.....	23
2.1. Математична модель шляхового підігрівника нафти з проміжним теплоносієм.....	23
2.2. Синтез та дослідження математичної моделі підігрівника	26
Висновки до розділу.....	31
3 АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПІДГРІВНИКА НАФТИ.....	32
3.1 Розроблення імітаційної моделі САР	32
3.2 Дослідження роботи одноконтурної системи.....	34
3.3 Синтез та дослідження LQG-регулятора.....	37
Висновки до розділу	44
4. РОЗРОБЛЕННЯ ПРОЕКТНИХ ДОКУМЕНТІВ НА СИСТЕМУ КЕРУВАННЯ ПІДГРІВНИКОМ НАФТИ.....	46
4.1 Структура і функції автоматичної системи керування підігрівником нафти.....	46
4.2. Вибір технічних засобів автоматизації.....	48

					БР. АКПзд – 30.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Грицай Н.І			Автоматизація підігрівників нафти нафтозбірних колекторів	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Когутяк М.І.					7	
Рецензент.		Фешанич Л.І.				ІФНТУНГ АКПзд-23-2К		
Н. Контр.		Лагойда Л.І						
Затверд.		Лагойда А.І.						

4.3. Функціональна схема автоматизації та схема підключень.....	54
4. 4 Розроблення екранних форм системи управління ПП.....	56
Висновки до розділу.....	57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	60

					БР.АКТзд-30.00.00.000ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

БПП – блок підготовки палива;

ВМ – виконавчий механізм;

ВНЕ – водо-нафтова емульсія;

КІСУ- комп'ютерно -інтегрована система управління

МН – магістральний нафтопровід;

ПП- проміжний підігрівач;

РО – регулюючий орган;

САР – система автоматичного регулювання.

PLC- програмований логічний контролер;

SCADA-програмний паке диспетчерського управління і збіру даних ;

УКПН-установка комплексної підготовки нафти.

ШП- шляховий підігрівач;

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Процес підігріву нафти здійснюється з метою покращення її реологічних властивостей, зниження в'язкості та підвищення ефективності подальшої переробки. На промислових підприємствах підігрів зазвичай проводиться у трубчастих печах або шляхових підігрівачах до температури 40–45 °С. Такий тепловий вплив сприяє інтенсифікації процесів руйнування нафтових емульсій, забезпечуючи більш глибоке знесолення та зневоднення сировини.

Найбільш технологічно досконалим способом термічної обробки нафти є її підігрів у блочних шляхових підігрівачах. Зазначені пристрої представляють собою автоматизовані блокові газові печі з водяним проміжним теплоносієм. Вони призначені для попереднього підігріву нафтопродуктів перед транспортуванням трубопровідним транспортом, а також можуть бути використані для нагріву води в межах технологічного процесу. Наявність проміжного теплоносія забезпечує м'який режим нагріву, що позитивно впливає на стабільність температурного режиму та зменшує ризики термічної деградації продукту.

Метою даної бакалаврської роботи є удосконалення існуючої системи автоматизації блочної печі підігріву нафти. Для досягнення поставленої мети необхідно здійснити комплексний аналіз підігрівача як об'єкта автоматизації, розробити математичну модель його динаміки, яка стане основою для синтезу ефективної системи автоматичного регулювання температурного режиму. Запропоноване рішення спрямоване на підвищення економічної доцільності та енергетичної ефективності експлуатації технологічного обладнання.

У рамках дослідження передбачено розроблення відповідної проєктної документації, виконання обґрунтованих розрахунків, а також проведення необхідних досліджень для підтвердження ефективності запропонованих технічних рішень.

Бакалаврська робота містить вступ, чотири розділи, загальні висновки та посилання на джерела. Загальний об'єм роботи -61с.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ПРОЦЕС ПІДГРІВУ НАФТИ ЯК ОБ'ЄКТ АВТОМАТИЗАЦІЇ

У нафтогазовій промисловості під час видобутку високо-парафіністих і в'язких сортів нафти, а також нафт з високою температурою застигання, виникає необхідність у забезпеченні їх належної текучості. Для цього застосовується технологія підігріву продукції свердловин — від гирла свердловини до центрального пункту збору й підготовки нафти й газу.

Підігрівання необхідне для зменшення в'язкості нафти, запобігання утворенню парафінових відкладень у трубопроводах і забезпечення безперебійного транспортування продукції. Для цього на різних етапах нафтозбору застосовуються спеціалізовані нагрівальні установки.

Зокрема:

* У викидних лініях для підігріву продукції застосовують гирлові нагрівачі типу УН-0,2 і ПТТ-2;

* У нафтозбірних колекторах — шляхові нагрівачі типу ПП-0,4, ПП-0,63, ПП-1,6 та трубопровідні нагрівачі типу ПТ.

1.1. Принцип роботи нафтових підігрівачів

Для прикладу розглянемо принцип роботи шляхового нафтового підігрівача, одного з найбільш поширених типів обладнання цього призначення.

Блокові газові печі з водяним теплоносієм типів ПП-0,63, ПП-1,6, ПП-4 широко використовуються для нагріву знесоленої та зневодненої нафти, нафтових емульсій і технічної води. Вони забезпечують необхідну температуру сировини для подальшої її обробки й транспортування.

Конструктивно підігрівач складається з кількох основних блоків:

* Блок нагріву — відповідає за передачу теплової енергії від продуктів згоряння до теплоносія, який, у свою чергу, нагріває нафту.

* Блок підготовки палива (БПП) — забезпечує стабільне та безпечне подання палива для горіння.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

* Система автоматизації й безпеки — виконує контроль за технологічним процесом, включаючи дистанційний підпал, регулювання температури, тиску, а також спрацьовування аварійних і попереджувальних сигналів при відхиленнях параметрів.

Паливо (природний або попутний нафтовий газ, дизельне пальне або підготовлена нафта) згорає в топці, передаючи тепло проміжному теплоносію (воді). Ця вода, у свою чергу, нагріває нафту, яка проходить через продуктивний змішувач, після чого надходить далі по трубопроводу.

Шляховий підігрівач ПП-1,6 випускається в двох модифікаціях:

* ПП-1,6А (газовий) — працює на природному або попутному нафтовому газі;

* ПП-1,6АЖ (рідинний) — використовує рідке паливо, підготовлене за допомогою блоку підготовки рідкого палива (БПП), з очищенням і редукуванням.

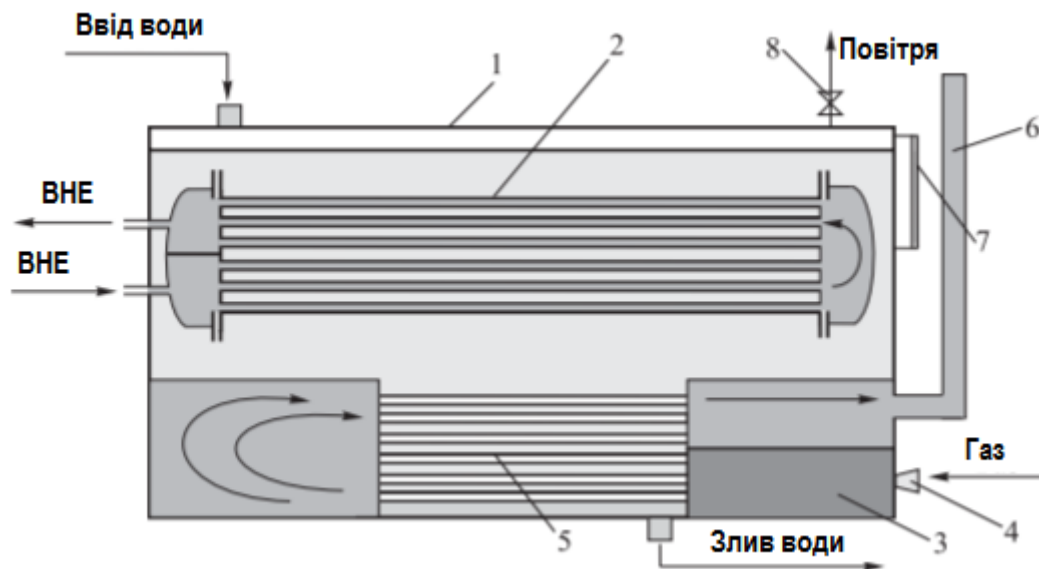
Для забезпечення високого рівня безпеки та надійності роботи, підігрівач оснащується сучасною системою автоматичного керування. Вона дозволяє контролювати та регулювати всі ключові параметри процесу нагріву, проводити дистанційне керування роботою пальників, а також забезпечує автоматичне відключення установки у разі виникнення аварійної ситуації.

Опис конструкції та принципу дії шляхового підігрівача

Схематичне зображення роботи шляхового підігрівача наведено на рис. 1.1.

Шляховий підігрівач є теплообмінним пристроєм, що виконується у прямокутному або циліндричному виконанні. У корпусі (поз. 1) розміщено теплообмінні трубки (поз. 2), по яких транспортується нафта або інша робоча рідина, що підлягає нагріванню. У нижній частині корпусу встановлено газові форсунки (поз. 3), камеру згоряння паливного газу та жарові труби (поз. 5). До конструкції також входять вихлопна труба (поз. 6), індикатор рівня води (поз. 7) та патрубок із краном (поз. 8) для відведення газів, що виділяються з води, в атмосферу.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



1 — корпус; 2 — теплообмінні труби; 3 — камера згорання газу; 4 — форсунка газу; 5 — жарові труби; 6 — димохід; 7 — показчик рівня води; 8 — кран для скидання газу.

Рисунок 1.1 Шляховий підігрівач ПП

Принцип дії пристрою полягає в наступному: міжтрубний простір між теплообмінними трубками (2) та жаровими трубами (5) заповнюється водою. Нафта подається через трубки (2), в яких відбувається її нагрів. Після подачі паливного газу через форсунки (4) в камеру згорання (3) утворюється теплота, яка передається через жарові труби (5) воді у міжтрубному просторі. Далі тепло від нагрітої води передається до теплообмінних труб (2), а з них — до нафти, що транспортується.

Максимальна температура нагріву внаслідок такого способу теплозабезпечення обмежується значенням $+100^{\circ}\text{C}$. Це істотно знижує інтенсивність утворення солевідкладень у трубах порівняно з аналогічними процесами, що спостерігаються у печах типу ПТБ. Однак через двоступеневу передачу тепла (від газу до води, а потім до нафти) коефіцієнт корисної дії сучасних шляхових підігрівачів, хоча і перевищує 80 %, є дещо нижчим, ніж у печей типу ПТБ.

У деяких конструкціях замість пучка жарових труб застосовують прямокутні П-подібні канали. Для підігрівачів підвищеної потужності

										Арк.
										12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ					

передбачено використання двох таких каналів, що супроводжується наявністю двох форсунок для подачі паливного газу та двох димових каналів відповідно.

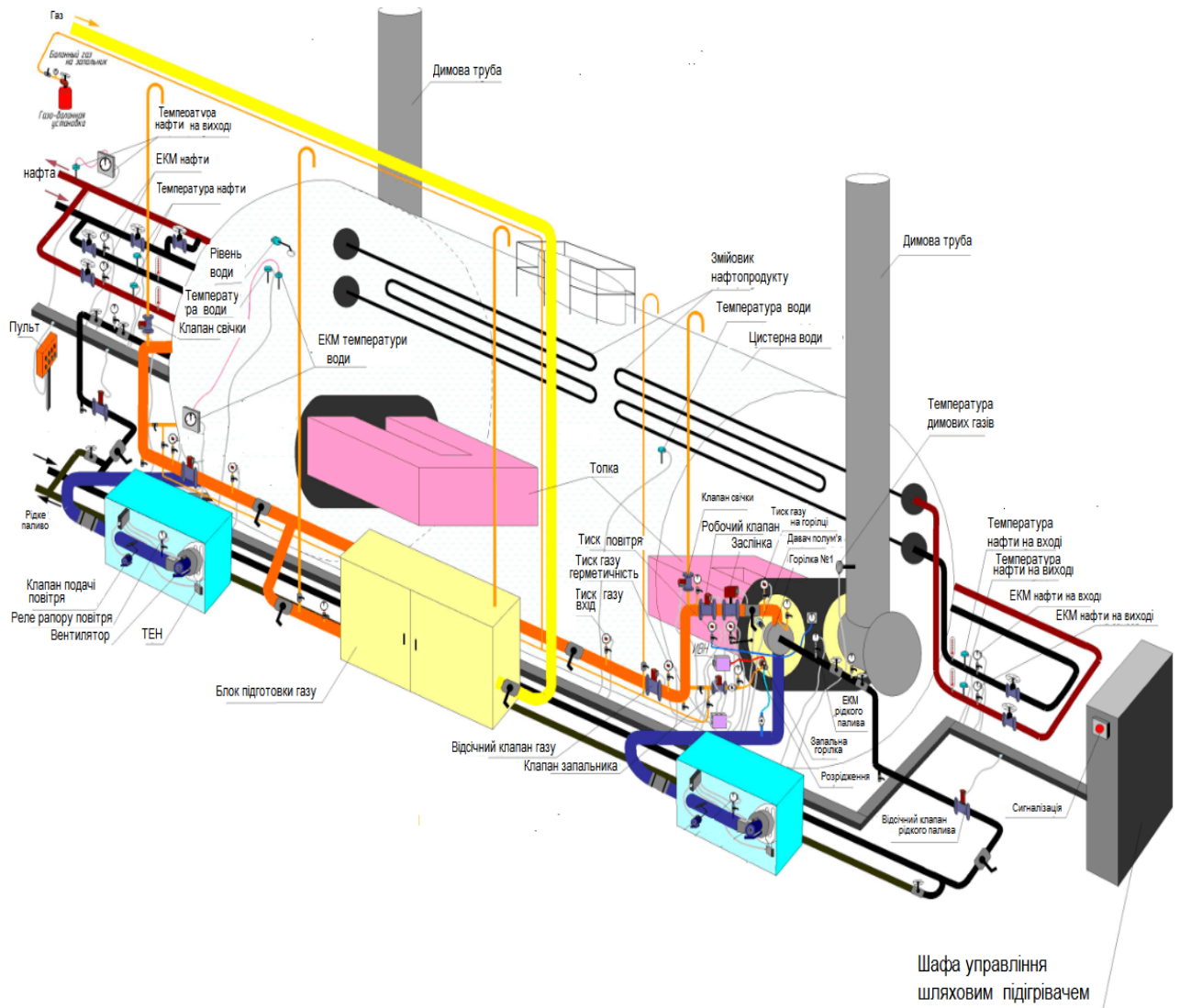


Рисунок 1.2- Шляховий підігрівач ПП-1,6 (конструкція з елементами автоматики)

Основними показниками якості роботи шляхового підігрівача є:

- продуктивність;
- корисне теплове навантаження;
- теплове напруження радіантних труб;
- площа поверхневого нагріву;
- коефіцієнт корисної дії.

1.2 Розрахунок статичного режиму підігрівника нафти

Таблиця 1.1 - Початкові дані для розрахунку підігрівача

Найменування показників	Позначення	Значення
Продуктивність	Гдт	2350 т/добу
		97 917 кг/год
		27,199 кг/с
Щільність сировини	D_{4}^{20}	910 кг/м ³
Перепад тиску в змійовику	Рр	5,5 кгс/см ²
Температура сировини на вході	Твх	15 °С
Температура сировини на виході	Твих	45 °С
Об'єм теплоносія (прісна вода)	V	100 м ³
Температура нагріву проміжного теплоносія	T	+95 °С
Номінальна теплова потужність	N	1,86 МВт (1,6 Гкал/год)

Розрахунок теплообміну нафтова емульсія – проміжний теплоносій

Температурна схема:

- Проміжний теплоносій:
 - Вхідна температура: 95 °С
 - Вихідна температура: 70 °С
- Нафтова емульсія:
 - Вхідна температура: 15 °С
 - Вихідна температура: 45 °С

Пояснення: Температурна схема дозволяє визначити напрямок і кількість теплового потоку, який передається від проміжного теплоносія до нафтової емульсії.

$$\Delta t_B = 95 - 15 = 80; \Delta t_M = 70 - 45 = 25;$$

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B + \Delta t_M}{2} = 52,5^\circ C.$$

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначимо середню температуру нафтової емульсії (робоча точка)

$$t_2 = t_1 + \Delta t_{CP} = 42,5^\circ C.$$

Розрахунок процесу горіння палива

Мета:

1. Визначити нижчу теплоту згорання палива.
2. Розрахувати кількість та склад продуктів згорання.
3. Обчислити тепловміст продуктів згорання.

Нижча теплота згорання палива визначається по формулі:

$$q_g^H = \sum q_{pi}^H \cdot C_i,$$

де q_p^H , C_i - відповідно теплота згорання компонента попутного газу і його масова доля.

$$q_g^H = 50010 \cdot 0.94 + 47490 \cdot 0.02 + 46350 \cdot 0.015 + 45715 \cdot 0.02 = 49570 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Кількість повітря (теоретичне), необхідного для згорання 1 кг палива визначають по формулі:

$$L_0 = 0,115 \cdot C + 0,345 \cdot H + 0,043 \cdot (S - O).$$

Тоді після розрахунків отримаємо

$$L_0 = 0,115 \cdot 77 + 0,345 \cdot 22 = 16,4 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$$

Витрату повітря (фактичну) визначають по формулі:

$$L = \alpha \cdot L_0, \quad L = 1,1 \cdot 16,4 = 18 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$$

де $\alpha = 1.1$ - коефіцієнт надлишку повітря.

$$G_{dg} = 1 + \alpha \cdot L_0,$$

$$G_{dg} = 1 + 1.1 \cdot 16,4 = 19 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$$

Кількість газів, що утворюються при спалюванні 1 кг палива :

$$m_{CO_2} = 0.03667 \cdot C = 0.03667 \cdot 77 = 2,82 \frac{\text{кг}}{\text{кг}},$$

$$m_{H_2O} = 0.09 \cdot H = 0.09 \cdot 22 = 2 \frac{\text{кг}}{\text{кг}},$$

$$m_{O_2} = 0.232 \cdot L_0 (\alpha - 1) = 16,4 \cdot 0.232 \cdot (1,1 - 1) = 0,38 \frac{\text{кг}}{\text{кг}},$$

$$m_{N_2} = 0.768 \cdot \alpha L_0 = 0.768 \cdot 1,1 \cdot 16,4 = 13,85 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$$

					БР.АКТЗд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перевірка здійснюється у такій спосіб

$$\sum_{i=1}^M m_i = G, \quad 2.82 + 2 + 0,38 + 13,85 = 19,05 \text{ кг} / \text{кг} \approx 19 \text{ кг} / \text{кг}.$$

Об'ємна витрата повітря, необхідна для згорання 1 кг палива визначають по формулі:

$$V_0 = 0,089 \cdot C + 0,267 \cdot H, \quad V_0 = 0,089 \cdot 77 + 0,267 \cdot 22 = 12,73 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Розрахунок тепловмісту продуктів згорання на 1 кг палива при заданій температурі робиться по наступній формулі:

$$q_t = (T - 273)(m_{CO_2} \cdot C_{CO_2} + m_{H_2O} \cdot C_{H_2O} + m_{O_2} \cdot C_{O_2} + m_{N_2} \cdot C_{N_2}),$$

де T - температура газу для згорання;

C_{gi} - середні масові теплоємності продуктів згорання , кДж/кг·К.

Після підрахунків тепловмісту продуктів згорання при 293 К на 1 кг палива отримаємо:

$$q_{293} = 413,76 \text{ кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}.$$

Тепловий баланс шляхового підігрівача.

Розрахунок ККД і витрати палива.

Тоді рівняння теплового балансу запишеться в наступному виді:

Прихід тепла у топці:

$$Q_T^{\text{прихід}} = q_g^H + c_g \cdot T_g + \alpha \cdot L_0 \cdot c_a \cdot T_a,$$

де c_g, c_a - теплоємності відповідно газу і повітря;

T_g, T_a - температура відповідно паливного газу і повітря;

q_g^H - теплота згорання паливного газу.

Явне тепло палива і повітря зазвичай невелике і ними часто в технічних розрахунках нехтують.

Витрати тепла із топки:

$$Q_T^{\text{відхід}} = q_{dg \rightarrow w} + q_{dg \uparrow} + q_b,$$

де $q_{dg \rightarrow w}$ - тепло передане від димових газів проміжному теплоносію;

					БР.АКТЗд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$q_{dg\uparrow} = c_{dg}(T_{dg}^{\uparrow} - 273)$ - втрати тепла з димовими газами, де c_{dg} - середня теплоємність продуктів згорання.

$q_{\triangleright} = 0,06 \cdot q_g^H = 2974.2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ - втрати тепла через ізоляцію (приймаємо 6 % (0,06 в долях) від нижчої теплотворної здатності палива.

Корисне тепло на нагрів сировини можна визначити з виразу

$$q_{dg \rightarrow w} = q_g^H - q_{dg\uparrow} + q_{\triangleright}$$

Температуру димових газів, що виходять із печі, визначають на основі накопиченого досвіду експлуатації — вона повинна перевищувати температуру теплоносія (води) на 100–150 °С. Це значення приймають для робочої точки $T_w = 355.5 \text{ K}$

$$T_{dg}^{\uparrow} = T_w + 150 = 355.5 + 150 = 505.5 \text{ K} . \text{ Тоді } q_{dg\uparrow} = 5407.74 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Тоді коефіцієнт корисної дії (к.к.д) печі

$$\eta = \frac{q_{dg \rightarrow w}}{q_g^H} = \frac{49570 - 5407.74 - 2974.2}{49570} = 0.83$$

Таблиця 1.2- Узагальнені результати розрахунку теплового режиму

tw	T_{dg}	T_{dg}^{\uparrow}	Q_{kor}	Q_{dg_out}	qp
70	923.5	493	1233	5099	12880
76.25	926	499.25	1233	5253	12884
82.5	928.8	505.5	1233	5408	12893
88.75	931.5	511.75	1233	5563	12902
95	934	518	1233	5718	12910

$$q_{dg \rightarrow w} = 41188.06 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Корисне теплове навантаження підігрівача обчислюється за формулою:

$$Q_{kor} = G_n \cdot c_n (T_n^{out} - T_n^{in}) ,$$

де c_n - теплоємність нафтової емульсії;

T_n^{out} , T_n^{in} - температура нафти на виході і вході із ПП;

$G_n = 24.2 \text{ кг/с}$ - витрата нафти через ПП (робоча точка);

Оскільки, теплоємність нафти залежно від температури і тиску то її можна визначити по формулі:

$$C_n = 1.5072 + \frac{T - 273}{100} (1.7182 - 1.5072 \rho_{273}^{293}).$$

Нафта з температурою 293К, щільність при цій температурі складе 872 кг/м^3 :

$$C_n = 1.5072 + \frac{355.5 - 273}{100} (1.7182 - 1.5072 \cdot 0.872) = 1.83 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}.$$

Розрахунок теплоємності попутних газів виконується за правилом змішування, з урахуванням середніх теплоємностей окремих компонентів, наведених у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 - Середні теплоємності газів

Параметри газів/ показники	CO ₂	N ₂	CH ₄ метан	C ₂ H ₆ етан	C ₃ H ₈ пропан	n-C ₄ H ₁₀ н-бутан	i-C ₄ H ₁₀ ізобутан
Средня теплоємність, кДж/(кг К)	0,843	1,036	2,226	1,751	1,667	1,682	1,666
Питома теплота згорання, МДж/кг			50	47.5	46.3	45.7	45.6
Вміст, %	0,4	0,1	94,0	2	1,5	1,3	0,7

$$C_{\text{газ}} = 0.004 \cdot 0.843 + 0.001 \cdot 1.036 + 0.94 \cdot 2.226 + 0.02 \cdot 1.751 + 0.015 \cdot 1.667 + 0.013 \cdot 1.682 + 0.007 \cdot 1.666 = 2.037 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}.$$

Теплоємність води з вмістом різних солей, кислот і основ розраховуємо аналогічним чином. Теплоємності солей приведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Середні теплоємності солей.

	H ₂ CO ₃	H ₂ SO ₄	HCl	Ca(OH) ₂	Mg(OH) ₂	Na(OH)+K(OH)
Средня теплоємність, кДж/(кг К)	0,576	1,416	0,766	1,181	1,320	1,332
Вміст, %	0,7	0,1	6	1	0,3	3

$$C_{\text{води}} = 4.2 \cdot 0.9 + 0.007 \cdot 0.576 + 0.002 \cdot 1.416 + 0.06 \cdot 0.766 + \\ + 0.003 \cdot 1.320 + 0.03 \cdot 1.332 = 3.89 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Оскільки нафта приходить з 12,6%-ою обводненням і містить 0,8% попутного газу, тому розрахуємо теплоємність нафти, що приходить, по правилу змішування

$$C_{\text{не}} = 3.89 \cdot 0.126 + 1.762 \cdot 0.866 + 2.2037 \cdot 0.008 = 2.038 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Розраховуємо корисне теплове навантаження печі :

$$Q_{\text{kor}} = 24.2 \cdot 2.038 \cdot 25 = 1233 \frac{\text{кДж}}{\text{с}} = 4433800 \frac{\text{кДж}}{\text{год}}$$

Визначаємо повне теплове навантаження :

$$Q_T = \frac{Q_{\text{kor}}}{\eta} = \frac{1233}{0.83} = 1.486 \text{ МВт}$$

Витрата палива:

$$B = \frac{Q_T}{q_g^H} = \frac{1486}{49570} = 0.03 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 107.9 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

Висновки:

1. Розрахунки, виконані на цьому етапі, показали, що коефіцієнт корисної дії підігрівника становить $\eta = 0,83$, що відповідає нормативним значенням для печей даного типу.
2. Повне теплове навантаження підігрівника склало 1,486 МВт.

Спрощений розрахунок радіації камери

Мета етапу розрахунку — визначення температури продуктів згоряння, які виходять із топки, а також фактичної теплонапруженості поверхні радіантних труб.

Температура продуктів згоряння, що залишають топку, визначається методом послідовних наближень (ітераційним методом) з використанням наступного рівняння:

$$T_n = 100 \sqrt[4]{\frac{1}{\Psi} \left[\frac{1}{C_s} \cdot \frac{H_p}{H_s} (q_r - q_k) + \left(\frac{T_s}{100} \right)^4 \right]}$$

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де q_r і q_k – теплонапруженість поверхні радіантних труб (фактична) і що припадає на частку вільної конвекції, ккал/м² год.;

H_p - поверхня нагріву радіантних труб, м²

H_p / H_s - відношення поверхонь, залежне від типу печі, від виду і способу спалювання палива; приймаємо $H_p / H_s = 3,5$

θ - середня температура зовнішньої стінки радіантних труб, К;

Ψ - коефіцієнт, для топок з вільним факелом $\Psi = 1,2$;

$C_s = 4,96$ ккал/м² год·К - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

Метод ітерацій полягає у припущенні початкового значення температури продуктів згорання T_n в межах 1000–1200 К. При заданій температурі розраховуються всі параметри, що входять до рівняння для визначення T_n . Далі за цим рівнянням обчислюється нове значення температури T_n , яке порівнюється з початково прийнятим. Якщо відносне відхилення перевищує 5 %, розрахунок повторюється з новим значенням T_n , яке дорівнює отриманому в попередній ітерації.

Розрахунок триває до тих пір, поки задане і розраховане значення T_n не співпадуть з достатньою точністю.

Для першої ітерації приймаємо $T_n = 1000$ К.

Середні масові теплоємності газів при цій температурі кДж/кг·К:

$$C_{CO_2} = 1.06825; \quad C_{H_2O} = 2.0514; \quad C_{O_2} = 1.0071; \quad C_{N_2} = 1.07915; \quad C_{\text{де}} = 22.59.$$

Тепловміст продуктів згорання при температурі $T_{II} = 1000$ К:

$$I = (T_{II} - 273)(m_{CO_2} \cdot C_{CO_2} + m_{H_2O} \cdot C_{H_2O} + m_{O_2} \cdot C_{O_2} + m_{N_2} \cdot C_{N_2}),$$

$$I(1000K) = 16422.9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Максимальна температура продуктів згорання визначається по формулі:

$$T_{max} = T_0 + \frac{Q_P^H \cdot \eta_m}{\sum m_i \cdot C_i},$$

де T_0 - приведена температура продуктів згорання; $T_0 = 293$ К;

$\eta_m = 0,99$ - к.к.д. топки.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_{\max} = 2126K.$$

Середні масові теплоємності газів при температурі T_{\max} , кДж/кг·К:

$$C_{CO_2} = 1.25; \quad C_{H_2O} = 2.52; \quad C_{O_2} = 1.1358; \quad C_{N_2} = 1.2267.$$

Тепловміст продуктів згорання при температурі T_{\max} :

$$I_{\max} = 62440 \text{ кДж / кг.}$$

Тепловміст продуктів згорання при температурі T_{dg}^{\uparrow} :

$$q_{dg}^{\uparrow} = 5407.74 \text{ кДж / кг.}$$

Коефіцієнт прямої віддачі:

$$\mu = \frac{I_{\max} \cdot \eta_m - I}{I_{\max} \cdot \eta_m - q_{dg}^{\uparrow}}. \quad \mu = 0.757$$

Фактична теплонапруженість поверхні радіантних труб:

$$q_r = \frac{Q_{kor} \cdot \mu}{F_r} = \frac{4438800 \cdot 0.757}{65.54 \cdot 4.1868} = 17422 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}}.$$

Температура зовнішньої стінки екрану обчислюється за формулою:

$$T_s = T_{cpw} + 273 + q_r \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_{zol}}{\lambda_{zol}} \right),$$

де $\alpha_2 = 600 \dots 1000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{К}$ - коефіцієнт тепловіддачі від стінки до продукту, що нагрівається; приймаємо $\alpha_2 = 800 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{К}$;

δ - товщина стінки труби, $\delta = 0,01 \text{ м}$;

$\lambda = 30 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{К}$ - коефіцієнт теплопровідності стінки труби;

$\frac{\delta_{zol}}{\lambda_{zol}}$ - відношення товщини до коефіцієнта теплопровідності зольних відкладень; для рідких палив $\frac{\delta_{zol}}{\lambda_{zol}} = 0,002 \text{ м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{К} / \text{ккал}$;

T_{cpw} - середня температура продукту, що нагрівається.

$$T_{cpw} = 82.5^\circ \text{C.}$$

$$T_s = 82.5 + 273 + 17420 \left(\frac{1}{800} + \frac{0.01}{30} + 0.002 \right) = 731.5K$$

Теплонапруженість поверхні радіантних труб, що доводиться на долю вільної конвекції:

						Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	

$$q_k = 1.8 \sqrt[4]{(T_n - T_s) \cdot (T_n - T_s)};$$

$$q_k = 1957 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}}.$$

Очевидно, що температура продуктів згорання, які покидають топку:

$$T_{dg} = 100 \sqrt[4]{\frac{1}{1.2} \left[\frac{1}{4.96} \cdot 3.05(17420 - 1957) + \left(\frac{731.5}{100} \right)^4 \right]} = 1007.64 \text{ K}$$

Як бачимо, розрахована T_n розрізняється зі значенням, прийнятим на початку розрахунку, тому після повторної ітерації $T_n = 1005,3 \text{ K}$.

1.3 Параметри контролю та регулювання

Основні параметри контролю та блокування:

- температура та тиск нафти на вході й виході з нагрівача;
- температура та рівень проміжного теплоносія (води);
- тиск газу і повітря на вході до топки;
- температура димових газів;
- стан запальників;
- система безпеки при загазованості майданчика;
- блокування подачі газу у разі погасання запальника.

Параметри, що підлягають регулюванню:

- температура проміжного теплоносія — шляхом зміни подачі паливного газу;
- співвідношення паливо–повітря — шляхом регулювання подачі повітря.

Висновки до розділу

У даному розділі проаналізовано процес підігріву нафтової емульсії з метою її подальшого транспортування в шляховому підігрівачі з використанням проміжного теплоносія. Проведено розрахунок статичного режиму роботи підігрівача та визначено робочу точку його теплового режиму. Окреслено основні параметри контролю та регулювання для ефективного керування процесом.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПІДГРІВНИКА НАФТИ

2.1 Математична модель шляхового підігрівника нафти з проміжним теплоносієм

Запишемо рівняння енергетичного балансу для нафтової емульсії:

[швидкість накопичення тепла]=[прихід тепла з нафтою]+[конвекція тепла]+
+[тепло, що виноситься нафтою].

$$M_n \cdot c_n \cdot \frac{dT_n}{dt} = G_n \cdot c_n \cdot (T_n - T_n^{in}) + q_{w \rightarrow n},$$

$M_n = V_z \cdot \rho_n$ - маса нафти у змішувачу;

$q_{w \rightarrow n} = C_{w \rightarrow n} \cdot F_z (T_w - T_n)$ - конвекція тепла від води до нафти,

$C_{w \rightarrow n}$ - еквівалентний коефіцієнт теплопередачі від теплоносія до нафти;

$F_z = 254 \text{ м}^2$ - площа поверхні обміну.

Запишемо рівняння енергетичного балансу для проміжного теплоносія (води):

[швидкість накопичення тепла водою]=[тепло від димових газів] - [конвекція від води до нафти].

$$M_w \cdot c_w \cdot \frac{dT_w}{dt} = -q_{w \rightarrow n} + q_{dg \rightarrow w}$$

$M_w = V_w \cdot \rho_w = 100 \cdot 969.5 = 96950 \text{ кг}$ - маса води у ПП ($\rho_w = 969.5 \text{ кг/м}^3$ у робочій точці при температурі 82.5°C);

c_w - теплоємність води;

T_w^{out}, T_w^{in} - температура води початкова і кінцева;

$q_{dg \rightarrow w}$ - передача тепла від димових газів до води.

Тепловий баланс процесу спалювання (по димових газах):

[швидкість накопичення тепла у димових газах]=[тепло спалювання палива] - [передача тепла від димових газів до води] - [винос тепла з димовими газами].

Прихід тепла у топці:

$$Q_T^{прихід} = q_g^H + c_g \cdot T_g + \alpha \cdot L_0 \cdot c_a \cdot T_a,$$

					БР.АКТЗд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де c_g, c_a - теплоємності відповідно газу і повітря;

T_g, T_a - температура відповідно паливного газу і повітря;

q_g^H - теплота згорання паливного газу.

Для практичних розрахунків другою та третьою складовою часто нехтують.

Витрати тепла із топки:

$$Q_T^{oxid} = q_{dg \rightarrow w} + q_{dg \uparrow} + q_{\triangleright}$$

де $q_{dg \rightarrow w}$ - тепло передане від димових газів проміжному теплоносію;

$q_{dg \uparrow} = c_{dg} (T_{dg}^{\uparrow} - 273)$ - втрати тепла з димовими газами, де c_{dg} - середня теплоємність продуктів згорання.

$q_{\triangleright} = 0.06 \cdot q_g^H$ - втрати тепла через ізоляцію.

Передача тепла через стінку від димових газів має радіантну (променевий теплообмін) q_r і конвекційну складову q_k .

$$q_{s \rightarrow w} = q_r + q_k \quad q_r = \varepsilon \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right]; \quad q_k = c_{s \rightarrow w} \cdot (T_s - T_w)$$

$$q_{dg \rightarrow s} = q_{r1} + q_{k1} \quad q_{r1} = \varepsilon \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_{dg}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_s}{100} \right)^4 \right]; \quad q_k = c_{dg \rightarrow s} \cdot (T_{dg} - T_s)$$

Температуру димових газів, які виходять з печі, вибирають відповідно до накопиченого досвіду експлуатації на 100 - 150 ° С більшою за температуру теплоносія (води)

$$T_{dg}^{\uparrow} = T_{cpw} + 150$$

Передачу тепла від димових газів до проміжного теплоносія можна представити у формі

$$q_{dg \rightarrow w} = B \cdot C_{dg \rightarrow w} \cdot F_{dg} (T_{cpdg} - T_w),$$

$C_{dg \rightarrow w}$ - еквівалентний коефіцієнт теплопередачі від димових газів до води;

$F_{dg} = 54.96 \text{ м}^2$ - площа поверхні обміну.

Таким чином динамічний баланс тепла по димових газах можна записати у такий спосіб

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V_{zdg} \cdot \rho_{cpdg} \cdot c_{cpdg} \cdot \frac{T_{dg\uparrow}}{dt} = B \left[V_{dg} \cdot \rho_{cpdg} \cdot C_{cpdg} (T_{dg} - T_{dg\uparrow}) - C_{dg \rightarrow w} \cdot F_{dg} (T_{cpdg} - T_w) \right],$$

де V_{zdg} - об'єм димового каналу підігрівника;

ρ_{cpdg} - середня густина димових газів;

V_{dg} - об'єм димових газів при спалюванні 1 кг палива.

Параметри розрахунку процесу спалювання газу приведені в табл 2.1 по результатах розрахунку статички ПП.

Таблиця 2.1- Розрахункові параметри статичного режиму ПП процесу спалювання

Компоненти	Теплоємність компонентів димових газів,кДж/кг К						
	m,кг/кг	300К	500К	700К	1100К	1500К	1900К
CO ₂	2.82	0,8286	0,9207	0,9906	1,0902	1,1564	1,2020
H ₂ O	2	1,8632	1,9004	1,9557	2.0847	2,2195	2,3417
O ₂	0.38	0,9169	0,9391	0,9688	1,0182	1,0530	1,0789
N ₂	13.85	1,0308	1,0362	1,0500	1,0886	1,1279	1,1581
c_{dg} , кДж/кг К		21.4	23.21	24.47	27.22	29.94	32.28
q_{dg} , кДж/кг	Σ19	577.69	5269.5	10447	22513	36738	52526

Тоді характерні такі залежності;

-середня теплоємність продуктів згорання

$$c_{dg} = 19.91 + 0.006595 \cdot T_{dg}$$

-ентальпія продуктів згорання

$$q_{dg} = -5453 + 18.21 \cdot T_{dg} + 0.006479 \cdot T_{dg}^2;$$

-корисне тепло, яке виділяється у топці після спалювання 1кг палива рівне

$$q_{dg} = \eta_{III} \cdot q_G^H,$$

де $\eta_{III} = 0.83$ - к.к.д. топки;

$q_G^H = 49570$ кДж/кг- теплотворна здатність паливного газу

-температура димових газів на виході з топки

$$T_{dg} = 274.2 + 0.04477q_{dg} - 4.237 \cdot 10^{-7} q_{dg}^2 + 3.062 \cdot 10^{-12} q_{dg}^3;$$

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2 Синтез та дослідження математичної моделі підігрівника

Відповідно до створеної математичної моделі було синтезовано імітаційну модель підігрівача, що представлена на рис. 2.1.

Модель включає три підсистеми, а також окремі субблоки для розрахунку процесів теплопередачі. Зокрема, підсистема **NAFNA** реалізує рівняння динамічного теплового балансу нагріву нафти. Структура цієї підсистеми детально представлена на рис. 2.2.

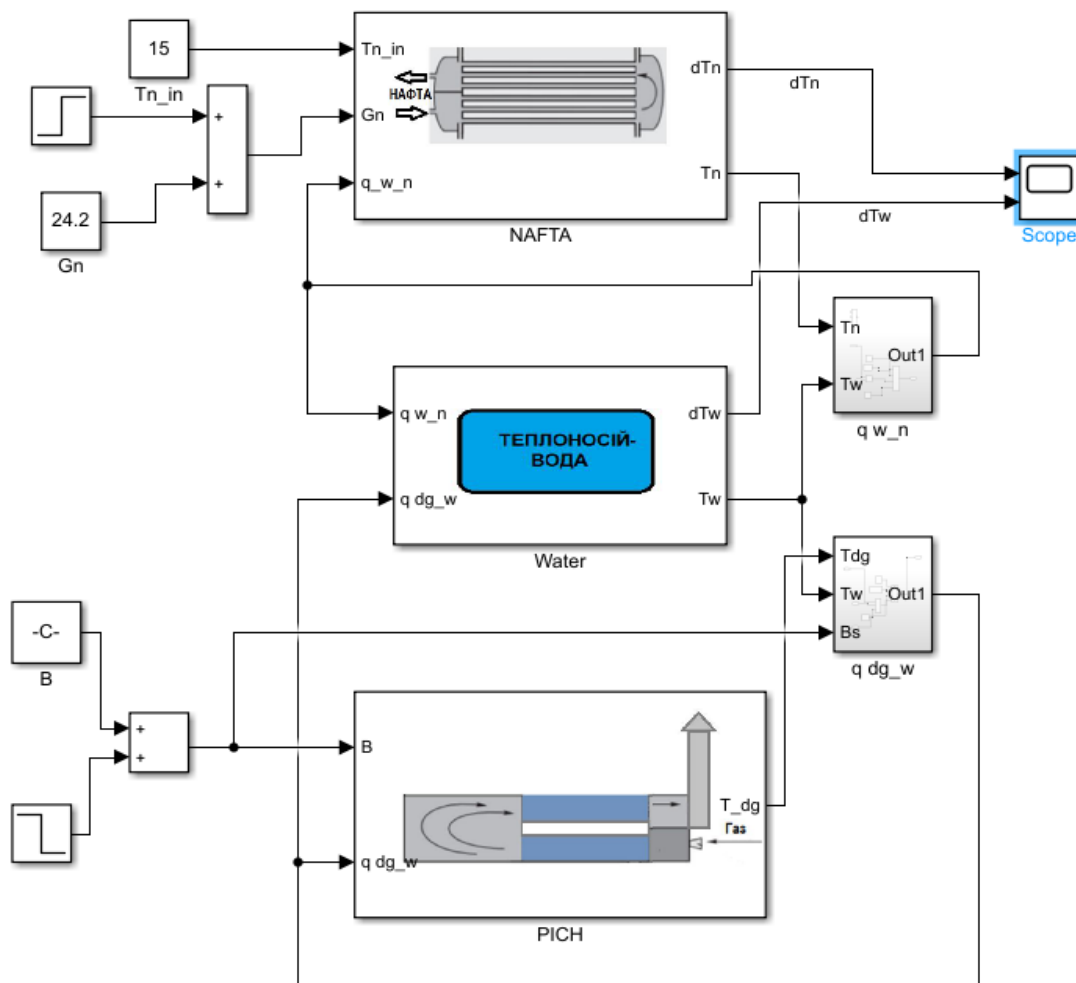


Рисунок 2.1- Симуляційна модель підігрівника нафти.

Підсистема **WATER** реалізує математичну модель динаміки теплових процесів у проміжному теплоносії — воді. Теплоакумулювальні властивості води враховуються шляхом розв'язання диференціального рівняння енергетичного балансу, в якому тепла енергія, отримана від продуктів згоряння, порівнюється

									Арк.
									26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ				

з енергією, переданою робочому середовищу — нафті. Такий підхід дозволяє точно моделювати інерційні властивості системи теплообміну.

Підсистема **РІСН** моделює динаміку генерації теплової енергії в камері згоряння внаслідок хімічного перетворення палива. Розрахунок базується на законах термохімії з урахуванням коефіцієнта корисного використання теплоти згоряння. Частка енергії, яка передається теплоносію, розраховується через коефіцієнти теплопередачі, тоді як залишкова енергія враховується як теплова втрата з димовими газами. Таким чином забезпечується енергетичне замикання теплового балансу печі.

Для дослідження динамічних режимів функціонування підігрівача модель передбачає інтеграцію блоків збурень у вигляді змінних вхідних параметрів — витрати нафти та її температури на вході. Це дозволяє провести аналіз чутливості системи до змін зовнішніх умов, визначити характер перехідних процесів та оцінити стійкість режиму.

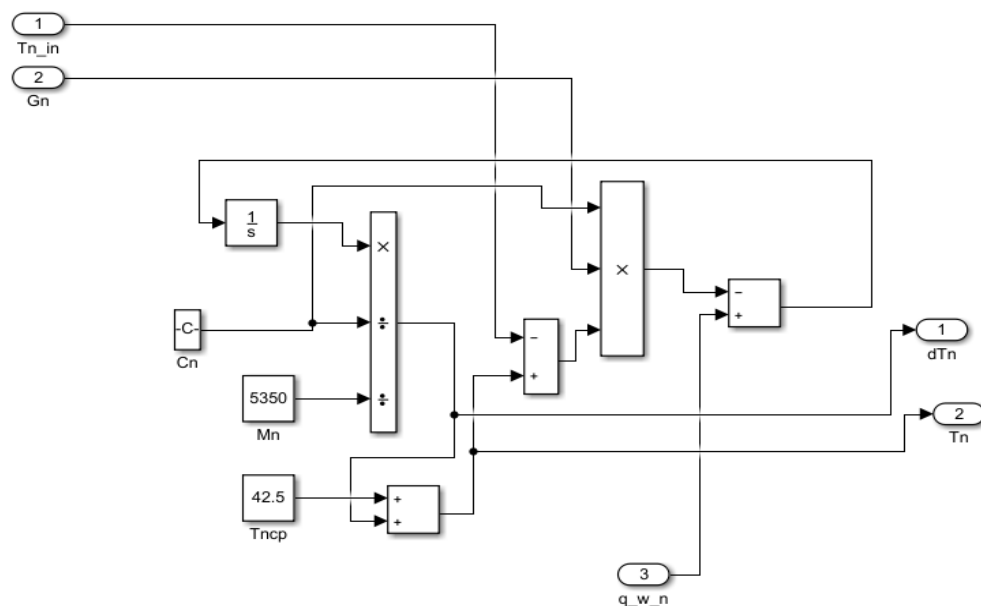


Рисунок 2.2- Алгоритмічна схема підсистеми NAFTA

Керувальна дія в даній системі реалізується зміною витрати паливного газу.

						Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	

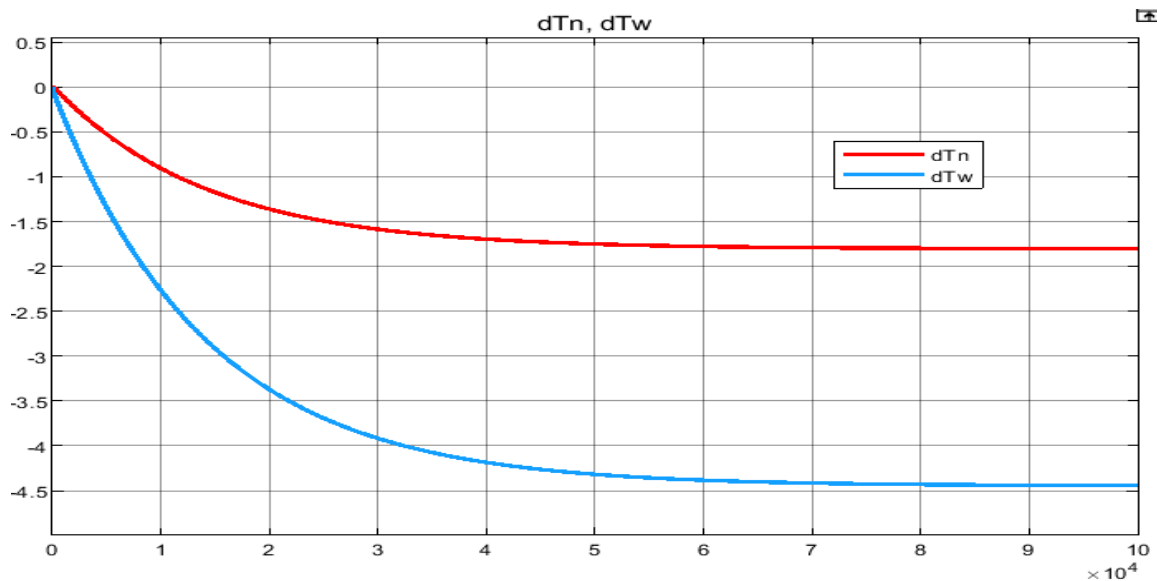


Рисунок 2.3- Диференц температури нафти і води при зниженні подачі палива на -10 кг/год відносно базової точки

Перевірка роботи імітаційної моделі

Аналіз працездатності створеної імітаційної моделі здійснювався шляхом дослідження впливу збурювальних і керувальних дій на зміну температурних режимів підігріву нафти та проміжного теплоносія.

Для оцінки динамічних властивостей системи було змодельовано сценарій зниження витрати паливного газу. Результати моделювання представлені на рис. 2.3.

Аналіз отриманих результатів свідчить про значну інерційність теплотехнічної системи. Тривалість перехідного процесу становить близько 70 000 с (приблизно 19–20 годин), що підтверджує високий ступінь енергетичної акумулювальної здатності теплоносія та конструктивної масивності підігрівача.

У процесі переходу система демонструє поступове зниження температури:

- температура нафти зменшується на $1,8 \text{ }^\circ\text{C}$,
- температура теплоносія — на $4,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Такі зміни є критичними для підтримання стабільного режиму транспортування нафти, що підкреслює необхідність застосування ефективних регуляторів та засобів автоматичного керування.

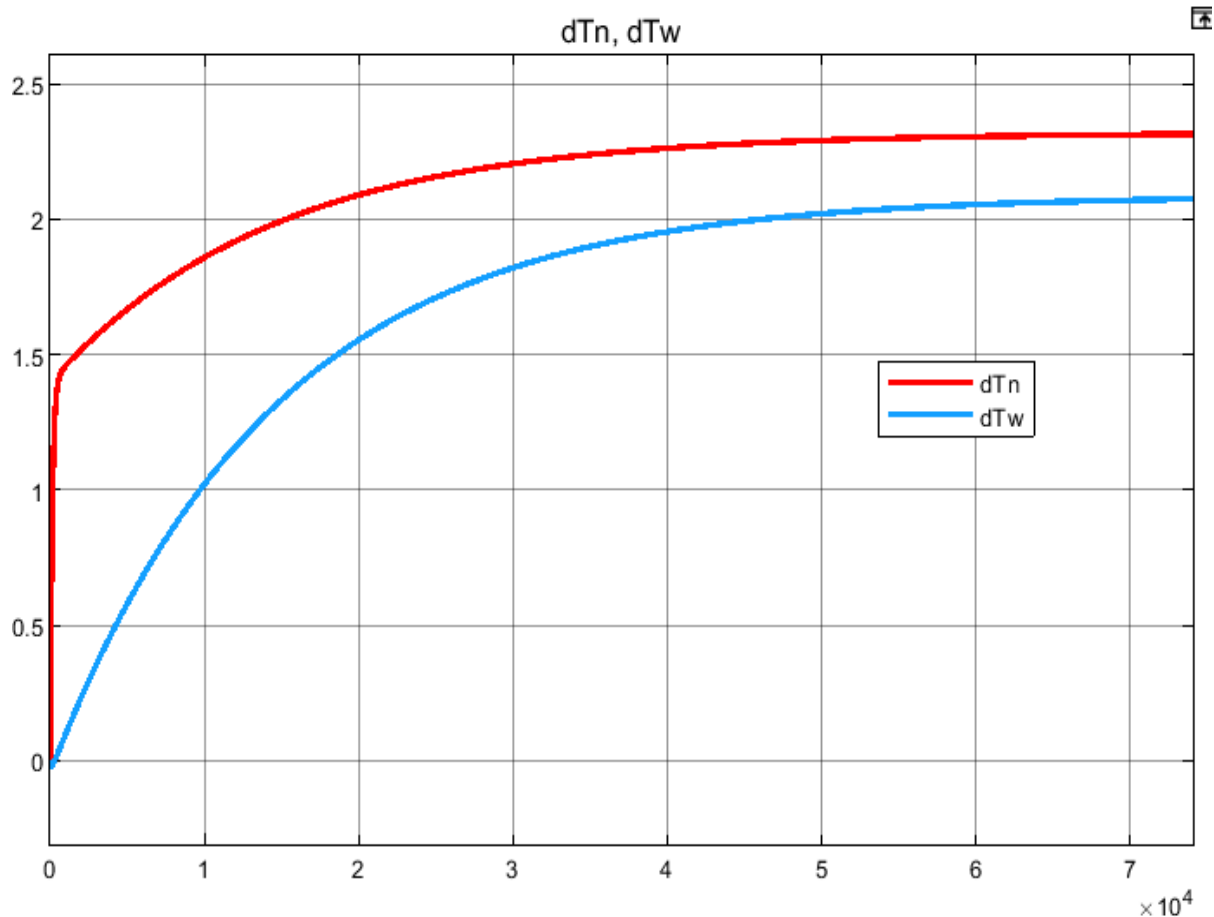


Рисунок 2.4- Динаміка системи при зміні витрати нафти на – 2 кг/с відносно робочої точки

На рис. 2.4 наведено результати чисельного експерименту, проведеного з використанням імітаційної моделі, що ілюструє динаміку температурних режимів нафти та проміжного теплоносія при зменшенні витрати нафти на 2 кг/с. Така зміна входить до класу квазістатичних збурень, що дозволяє дослідити усталену реакцію системи.

Внаслідок зменшення витрати нафти зростає час теплової взаємодії в теплообміннику, що приводить до ефективнішого засвоєння теплоти нафтовим потоком. Це підтверджується наступними спостереженнями:

- температура нафти на виході з підігрівача зростає на 2,3 °С;
- температура проміжного теплоносія (води) підвищується на 2,1 °С.

Такий ефект зумовлений покращенням умов теплопередачі, що описується підвищенням температурного напору та зміною гідравлічних характеристик. Реакція системи узгоджується з законом збереження енергії та теплообміну .

На рис. 2.5 подано результати симуляції зміни температурного балансу в разі підвищення температури нафти на вході на $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це збурення імітує реальні сценарії змін у сировинному потоці або сезонні коливання температур. У відповідь на зміну вхідного теплового потоку система демонструє наступну реакцію:

- температура нафти на виході з підігрівача зростає на $4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- температура теплоносія — на $4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ці результати демонструють високу чутливість моделі до зміни вхідних параметрів, що вказує на необхідність використання адаптивних або прогнозних регуляторів у системі автоматичного керування.

Крім того, такий аналіз дозволяє здійснити верифікацію математичної моделі, оскільки спостережувана реакція відповідає очікуваному фізичному змісту процесу — зростання температури на вході веде до зміщення теплової рівноваги вгору, без значного збільшення градієнта температур, що також свідчить про високу теплову інерційність системи.

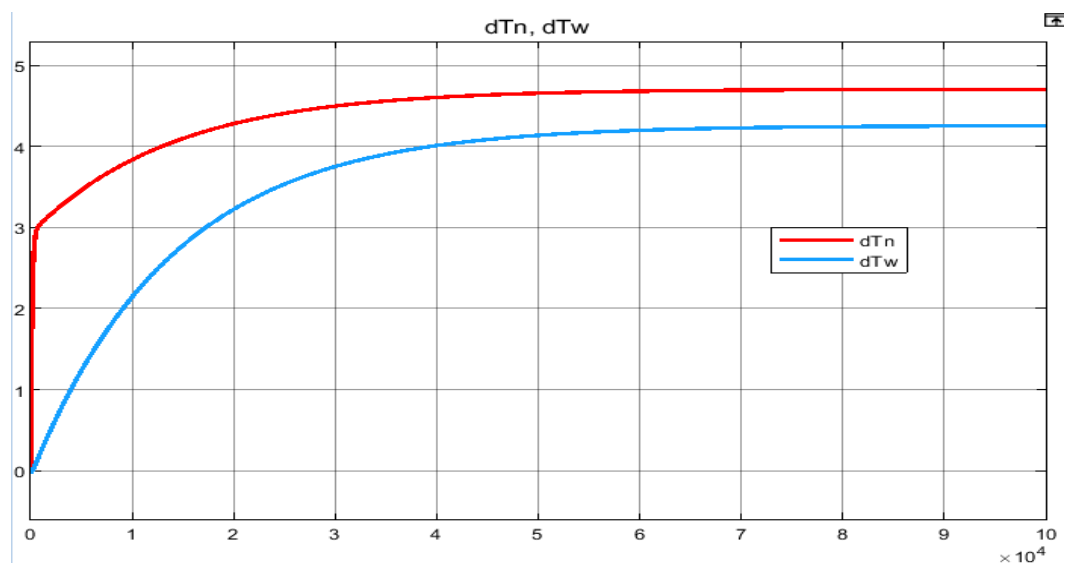


Рисунок 2.5- Симуляція роботи підігрівача при зміні температури нафти на $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

						БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк. 30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Висновки до розділу

На основі рівнянь матеріального та теплового балансу розроблено математичну модель динаміки теплового процесу в підігрівачі нафти. Ця модель охоплює основні фізико-хімічні явища, що відбуваються в системі теплообміну між продуктами згоряння, проміжним теплоносієм і нафтою.

На базі побудованої моделі реалізовано імітаційну модель у середовищі MATLAB/Simulink, що дозволяє проводити чисельні експерименти в умовах змінних вхідних параметрів і збурень. У моделі враховано:

- динаміку теплових процесів у кожному з компонентів системи (паливо/газ–вода–нафта),
- часову інерційність системи,
- теплотехнічні втрати.

Результати імітаційних досліджень свідчать про адекватність і працездатність створеної моделі. Поведінка системи у відповідь на збурення (зміна витрати нафти, температури на вході, витрати палива) відповідає очікуваним фізичним закономірностям, що підтверджує вірність обраного підходу до моделювання.

Розроблена модель може бути використана як основа для подальшого аналізу, оптимізації та розробки систем автоматизованого керування підігрівачем, а також для навчальних і дослідницьких цілей.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ЛІНІЙНОГО ПІДГРІВНИКА НАФТИ

3.1 Розроблення імітаційної моделі САР

У попередньому розділі була синтезована структурована імітаційна модель підігрівача, яка включає низку підсистем (NAFNA, WATER, PICH), що моделюють відповідні фізичні процеси теплообміну. На даному етапі, з метою реалізації системи автоматичного регулювання (САР), доцільно спростити структуру моделі шляхом формування узагальненого блоку об'єкта керування.

На рис. 3.1 представлено інтегрований блок моделі підігрівача, який об'єднує всі підсистеми з моделі, представленої на рис. 2.1. Для забезпечення гнучкості аналізу керувальних впливів і збурень усі відповідні входи винесені за межі цього блоку. Такий підхід полегшує реалізацію та тестування різних варіантів систем керування.

Оскільки ключовим показником ефективної роботи підігрівача є стабілізація температури проміжного теплоносія в межах 90–95 °С, саме цей параметр обрано в якості керованої змінної, а контур регулювання замкнено по ньому.

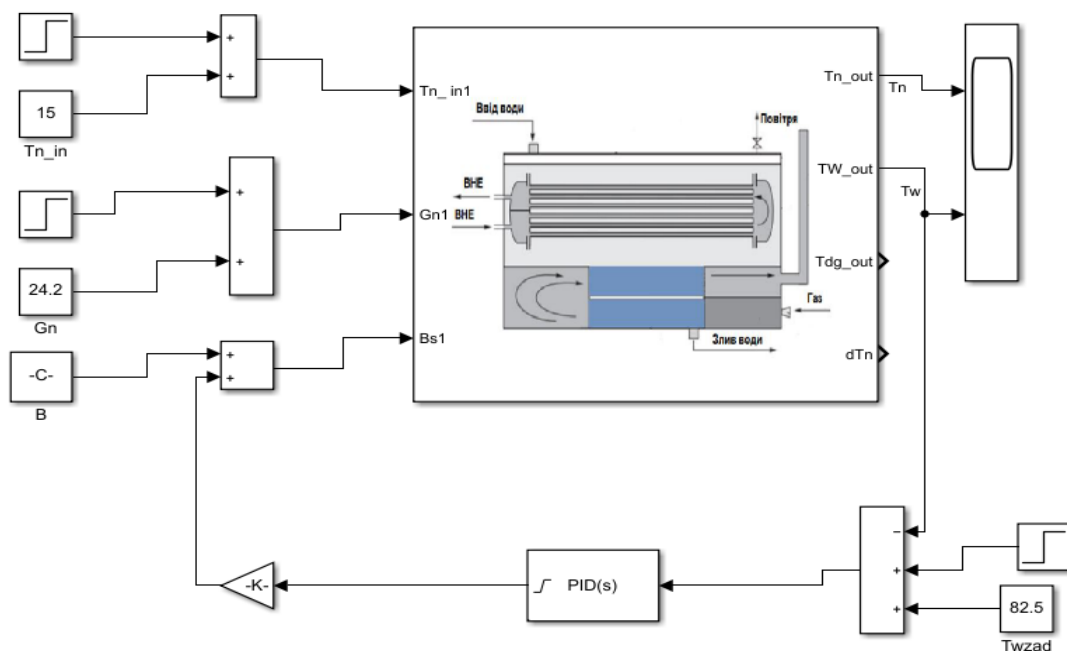


Рисунок 3.1- Імітаційна модель Системи стабілізації температури теплоносія

Такий вибір зумовлений фізико-хімічними обмеженнями, зокрема, необхідністю унеможливлення закипання води, що могло б призвести до аварійної ситуації або зниження ефективності теплообміну.

Беручи до уваги високу інерційність об'єкта керування (перехідний процес триває до 20 годин), доцільним є застосування ПІД-регулятора як найбільш адаптивного засобу для таких систем. Переваги ПІД-регулювання полягають у здатності враховувати як поточне відхилення, так і його похідні та інтегральні характеристики, що дозволяє ефективно компенсувати збурення та забезпечувати плавну стабілізацію процесу.

Для налаштування ПІД-регулятора використано вбудований інструмент PID Tuner середовища MATLAB/Simulink. Цей інструмент реалізує методи параметричної оптимізації на основі критеріїв якості перехідного процесу (час наростання, час регулювання, перерегулювання, стабільність системи), дозволяючи швидко отримати оптимальні налаштування.

На рис. 3.2 наведений результат оптимального пошуку параметрів ПІД-регулятора.

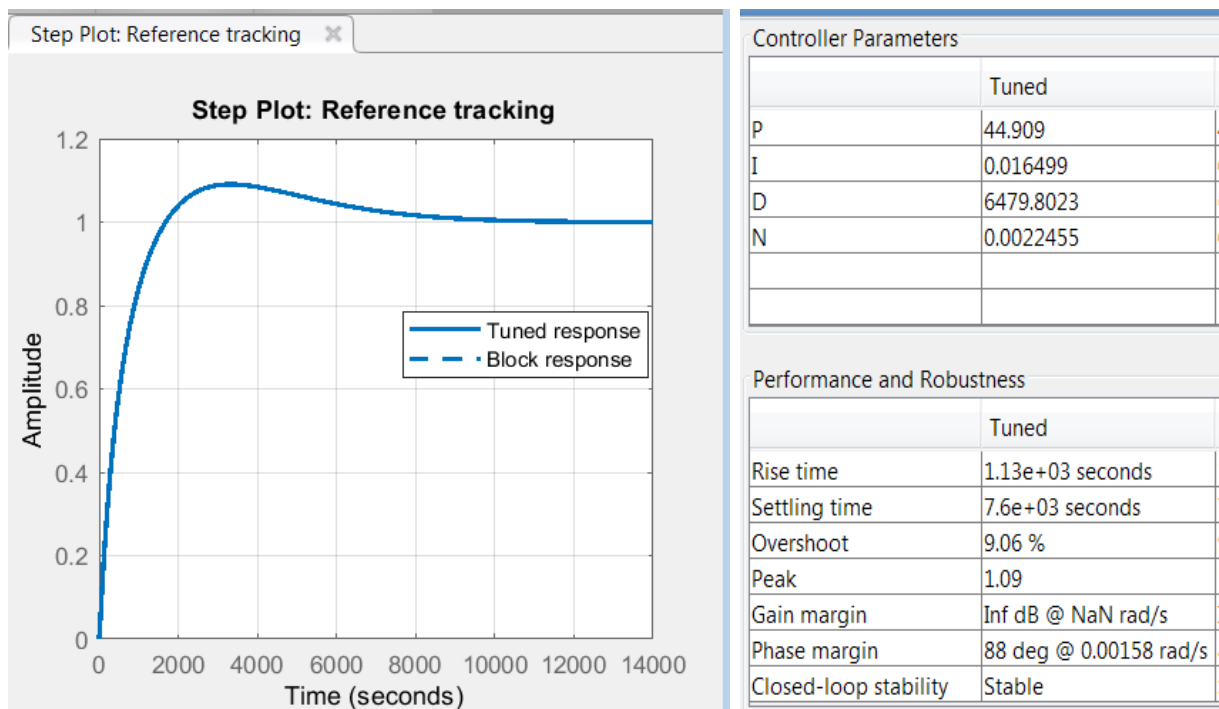


Рисунок 3.2-Результати налаштування ПІД -регулятора

Крім того інструмент надає сервіс щодо оцінки якості роботи САР. Так налаштування вказане в у верхній правій частині вікна забезпечує наступні параметри якості роботи системи:

- час наростання-1130с;
- час регулювання-7600с;
- перерегулювання-9%;
- запас за амплітудою-необмежений;
- запас по фазі - 88град.

Отримані показники свідчать про стійкість та ефективність розробленої САР, а також підтверджують відповідність її роботи вимогам до керування інерційними теплофізичними об'єктами.

3.2 Дослідження роботи одноконтурної системи

Імітаційними експериментами необхідно дослідити роботу системи на різних режимах роботи і дії різних збурень

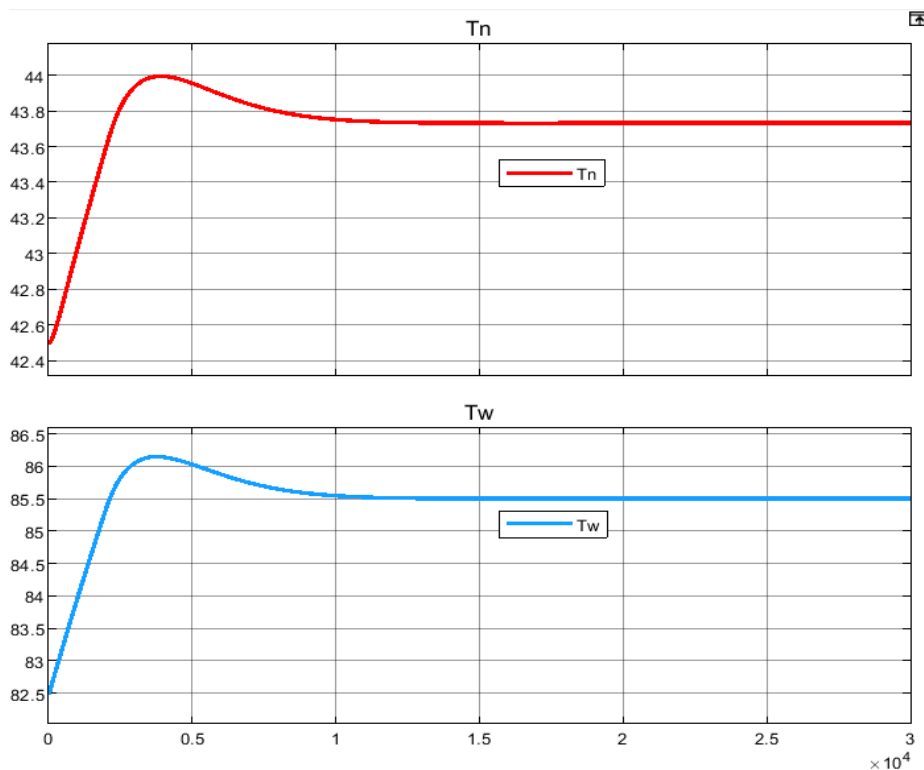


Рисунок 3.3- Робота САР при зміні завдання по температурі теплоносія (зміна уставки по температурі води з +82.5°С до +85.5°С)

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рис. 3.3 представлено реакцію системи автоматичного регулювання на зміну заданої уставки температури проміжного теплоносія. Із графіку видно, що після збільшення уставки система здійснює перехід на новий режим стабілізації, при якому температура теплоносія досягає нового значення без значних коливань.

Водночас спостерігається паралельне зростання температури підігріву нафти, що узгоджується з фізичними закономірностями теплообміну в системі. Температура нафти також стабілізується на новому рівні, що свідчить про взаємозв'язок контурів керування та узгодженість термодинамічної поведінки системи.

Максимальне перерегулювання становить не більше 5 %, що вважається допустимим для даного технологічного процесу, з огляду на його високу інерційність та обмеження по швидкості зміни температури.

Отримані результати підтверджують ефективність налаштувань ПІД-регулятора, а також адекватність і точність реалізованої імітаційної моделі для прогнозування поведінки реального об'єкта при зміні режимів роботи.

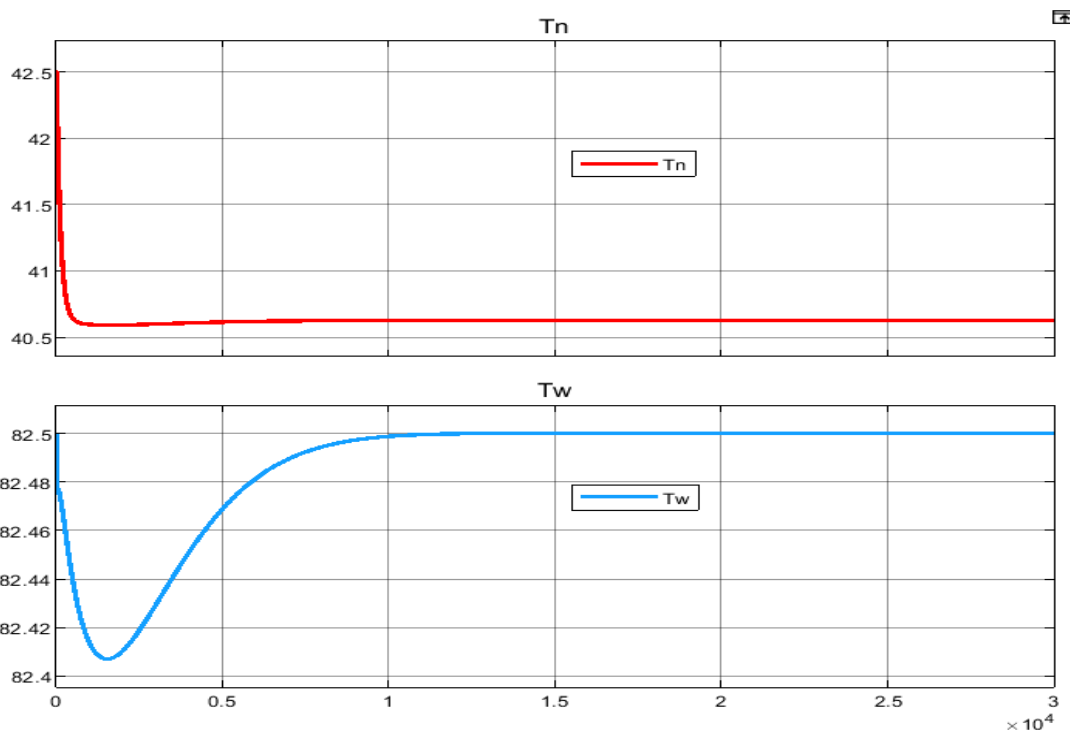


Рисунок 3.4- Робота САР при дії збурення в каналі витрати нафти (зміна витрати нафти на +3кг/с відносно робочої точки 24.2 кг/с)

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рис. 3.4 узагальнено результати імітаційного експерименту щодо реакції системи автоматичного регулювання на раптову зміну витрати нафти на вході в підігрівач. Аналіз динаміки температур показує, що у відповідь на стрибкоподібне зростання витрати нафти система реагує очікуваним зниженням температури проміжного теплоносія (води), що є наслідком підвищеного відбору тепла.

Проте завдяки дії ПІД-регулятора, який реагує на відхилення від заданої уставки, відбувається автоматичне збільшення подачі паливного газу, що компенсує теплове навантаження. Внаслідок цього температура теплоносія повертається до заданого рівня, забезпечуючи ефективну терморегуляцію системи.

Максимальне відхилення температури води становить лише $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$, що свідчить про високу точність та чутливість системи регулювання, а також стійкість ПІД-контролера до збурювальних впливів.

Температура нафти при цьому знижується на $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, що також є логічним результатом збільшення її витрати. Проте, враховуючи особливості технологічного процесу, при істотніших змінах витрати доцільним є впровадження адаптивної корекції уставки регулятора, наприклад, на основі впровадження каскадної або модальної структури САР.

Таким чином, модель демонструє не лише адекватну реакцію на збурення, але й дозволяє оцінити межі ефективного функціонування системи у варіативних режимах.

На рис.3.5 показана реакція контуру стабілізації на зміну температури нафти на вході ПП. При зростанні температури нафти до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ підвищується температура нафти на виході на $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$, тому при суттєвіших коливаннях температури доцільно вводити корекцію завдання регулятору. Контур стабілізації при цьому працює добре і вибіг температури не перевищує $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Покращення роботи системи можливе при застосуванні оптимальних регуляторів при застосуванні технології аналітичного конструювання.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

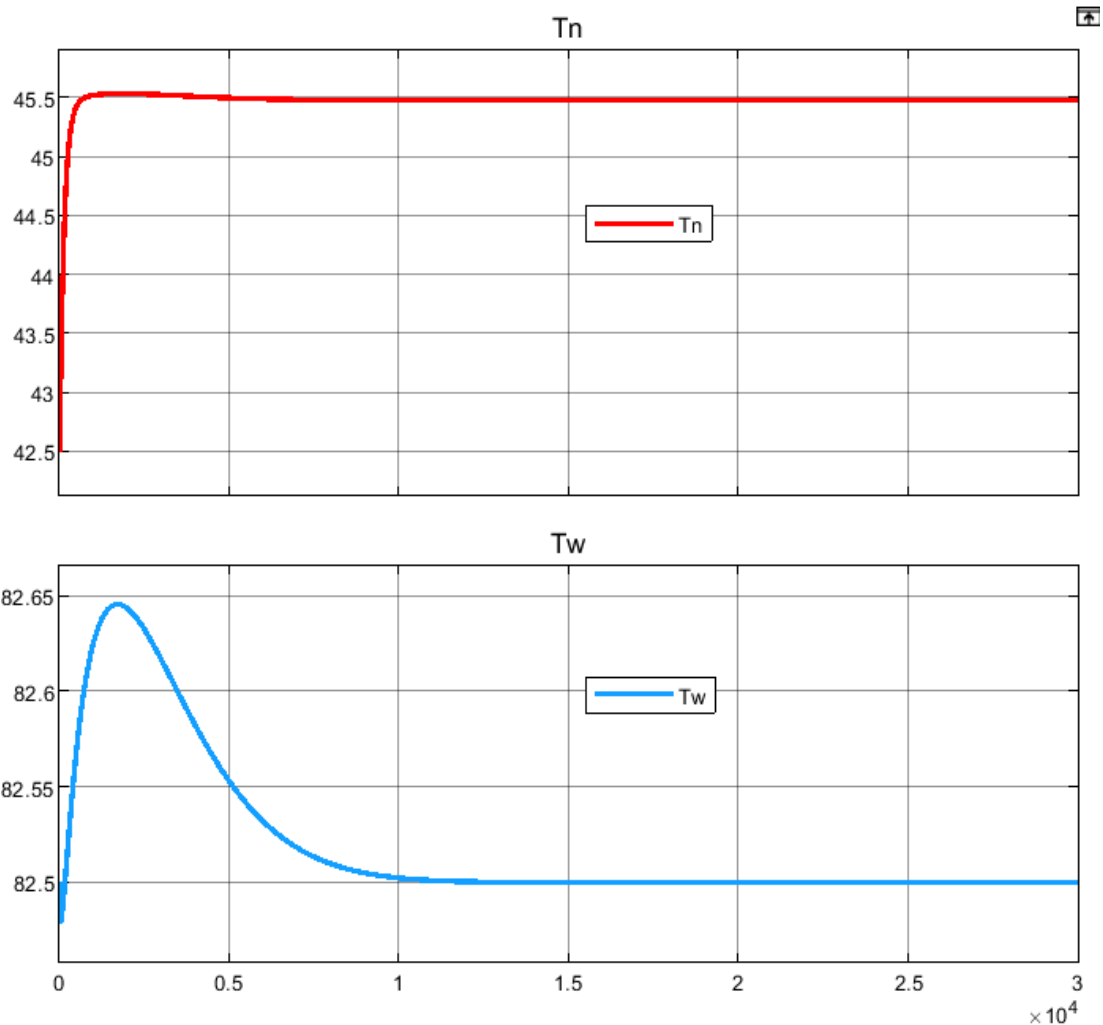


Рисунок 3.5- Робота САР при дії збурення в каналі вхідної температури нафти (зміна температури нафти $+15^{\circ}\text{C}$ до $+20^{\circ}\text{C}$)

3.3 Синтез та дослідження LQG-регулятора

Лінійно-квадратичне гаусівське (ЛКГ, англ. LQG) управління належить до категорії сучасних (оптимальних) методів синтезу систем автоматичного керування. Методологія побудови ЛКГ-контролера базується на мінімізації заданого квадратичного функціоналу якості, що враховує як відхилення вихідних параметрів системи, так і витрати керувального впливу. Таким чином, ЛКГ-контролери забезпечують оптимальний баланс між точністю регулювання та енергетичними витратами.

Особливістю теорії ЛКГ є врахування стохастичних збурень у вигляді гаусівського білого шуму, як на вході, так і у вимірювальних сигналах. Для ефективної роботи у таких умовах до структури контролера включається фільтр

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Калмана, який виконує оптимальну оцінку станів системи на основі неповної або зашумленої інформації. Таким чином, ЛКГ-регулятор є комбінацією оптимального оцінювача (фільтра Калмана) та лінійного квадратичного регулятора (LQR).

Попри переваги, одним із суттєвих обмежень ЛКГ-підходу є його відсутність робастності, тобто чутливість до похибок у моделі або до структурних змін у динаміці об'єкта. Синтез ЛКГ-регулятора передбачає точне знання лінійної моделі об'єкта, тому застосовується здебільшого для добре ідентифікованих систем з лінійною поведінкою.

Для підвищення стійкості до невизначеностей застосовують модифікації класичного ЛКГ-синтезу, зокрема:

- мінімаксні LQG-алгоритми, що враховують найгірші випадки впливу збурень,
- комбіновані LQG/ H_∞ -контролери, які поєднують переваги оптимального керування та робастного підходу.

ЛКГ-регулятори можуть реалізовуватися як у неперервному, так і в дискретному часовому представленні, що дозволяє ефективно застосовувати їх у широкому спектрі задач – від класичних технічних систем до інтелектуальних кіберфізичних об'єктів.

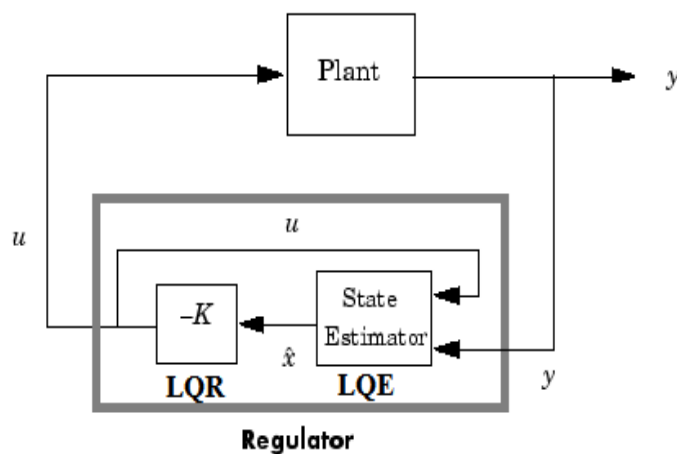


Рисунок 3.6 Структура САР з LQG регулятором

Відповідно до принципу поділу, на якому ґрунтується рішення задачі LQG , розв'язок вихідної задачі розпадається на розв'язок двох задач простішого виду :

- Розробка лінійного квадратичного регулятора (LQR);
- Створення оптимального спостерігача (LQE). Фільтрування Калмана.

На рис.3.6 показано конфігурацію системи LQG .

Спочатку необхідно модель у tf -формі записати як рівняння просторів станів (ss -форма).

В результаті перетворення система, представлена в ss -формі, має вигляд:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du.\end{aligned}$$

А сам LQG регулятор описується матричними рівняннями

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= [A - LC - (B - LD)K]\hat{x} + Ly, \\ u &= -K\hat{x}.\end{aligned}$$

Перше рівняння відповідає оптимальному спостерігачу LQE , а друге лінійно квадратичному регулятору LQR .

Ефективність регулювання вимірюється інтегральним квадратичним функціоналом у вигляді:

$$J(u) = \int_0^{\infty} (\hat{x}^T Q \hat{x} + u^T R u) dt$$

Вагові матриці Q і R задаються користувачем і визначають компроміс між ефективністю регулювання та зусиллям управління. В даний час не існує єдиного методу, який підходить усім для вибору цих ваг, тому налаштування Q та R інтуїтивна.

Створення оптимального спостерігача (LQE). Фільтрування Калмана. Фільтр Калмана забезпечує оптимальний алгоритм обробки рекурсивних зашумлених даних, який працює таким чином, що поточне оціночне значення стану визначається попереднім оціненим значенням стану та поточними вимірними даними замість повних вимірних даних.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Спостерігаючі пристрої

Метод синтезу регулятора *LQR* управління передбачає, що компоненти вектора стану X можна виміряти. Однак на практиці деякі компоненти можуть бути невідомі з однієї з двох причин:

- Вимірювальних приладів може бути недостатньо.
- Деякі компоненти вектора X можуть мати фізичного сенсу.

Однак якщо система є спостережуваною, всі компоненти вектора X можуть бути відновлені за спостереженнями вектора Y .

Система, що описується матрицями A і C , є спостережною тоді і тільки тоді, коли існує кінцевий час T такий, що початковий стан $X(0)$ може бути визначено в результаті спостереження вихідної змінної $y(t)$, $t \in T$ при заданому управлінні $u(t)$.

Спостережуваність системи описується умовою:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \dots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} = n$$

Якщо детермінант цієї матриці відмінний від нуля, система спостерігається.

Для того, щоб дізнатися про всі компоненти вектора стану об'єкта, можна використовувати його модель:

$$\frac{d\hat{X}(t)}{dt} = A \cdot \hat{X}(t) + B \cdot U(t),$$

де $\hat{X}(t)$ оцінка стану об'єкта.

Якщо початковий стан об'єкта і моделі збігаються, і модель адекватна об'єкту, можна вважати будь-якої миті часу, що

$$\hat{X}(t) = X(t).$$

Однак практично досягти повної адекватності об'єкта і моделі неможливо, неможливою є повна рівність початкових умов. Тому на практиці можна розраховувати лише на виконання умови:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{X}(t) = X(t).$$

Подібною властивістю мають так звані асимптотичні пристрої, що спостерігають.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

LQ -оптимальний зворотний зв'язок за станом $u = -K\hat{x}$ не може бути реалізований без повного вимірювання стану. Однак ми можемо вивести оцінку стану \hat{x} так, щоб $u = -K\hat{x}$ залишалася оптимальною для відтворення зворотного зв'язку. Ця оцінка стану генерується фільтром Калмана

$$\frac{d}{dt}\hat{x} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x} - Du).$$

При розробці фільтра Калмана функцію *kalman* в середовищі MATLAB можна використати для визначення масиву з шуканою матрицею L фільтра Калмана.

Для синтезу регулятора необхідно спочатку отримати лінійну модель для основного каналу регулювання «подача палива- температура нафти на виході ПП». За результатами проведеного моделювання (рис.2.3) отримана динамічна розгінна характеристика апроксимована передавальною функцією

$$G(s) = \frac{0.17}{(13000s + 1)(755s + 1)}.$$

Попередньо необхідно здійснити перехід у простір станів (хоча ця процедура в *SISOTool* автоматично виконується при виборі даного типу регулятора , на відміну від традиційного синтезу).

```

W1=tf(0.17, [13000 1])*tf(1, [755 1])
tau=0;
if tau ==0
W1_ss=ss(W1)
else                                % Коли є запізнення
    s=tf('s');
    W1_t=exp(-tau*s)
    W1_tau=pade(W1_t,2) % Розкладання в ряд Паде
    W1_ss= ss(W1*W1_tau)
end
% Перевірка состережності
v=obsv(W1_ss.A,W1_ss.C);
m1=rank(v)
% Перевірка керованості
v1=ctrb(W1_ss.A,W1_ss.B);

```

						Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	

```

m2=rank(v1)
% ВИСНОВКИ
if m1>=1 && m2>=1
    disp('Система повністю спостережувана і керована')
else error('Система неспостережувана і некерована')
end
sisotool(W1)
+++++
W1_ss =
A =
      x1      x2
x1 -0.001401 -0.0004173
x2 0.0002441      0
B =
      u1
x1 0.007813
x2      0
C =
      x1      x2
y1      0 0.009081
D =
      u1
y1 0
Continuous-time state-space model.
m1 =
    2
m2 =
    2
Система повністю спостережувана і керована
+++++

```

В панорамному вікні *SISOTool* можна вибрати архітектуру АСР та отримати налаштування регуляторів різними способами з вибором конкретного типу регулятора, а також синтезувати *LQR* контролер. При цьому є хороші засоби аналізу отриманих результатів.

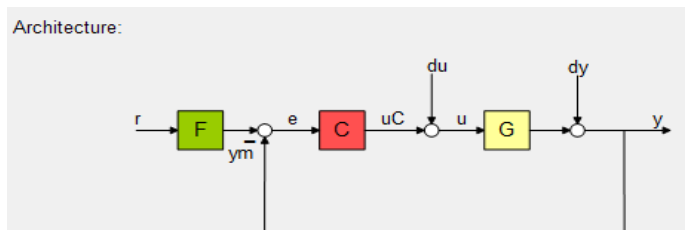


Рисунок 3.7 Архітектура системи: G – plant (математична модель об’єкта), H – sensordynamics (давач), F — prefilter (фільтр), C — compensator (регулятор)

У вкладці Tuning Methods виберемо LQG Synthesis для переходу до методу синтезу LQG регулятора із спостерігачем Калмана. При цьому з'явиться вікно синтезу регулятора.

Порядок контролера задаємо рівним m3. Далі змінюючи положення повзунків налаштування забезпечуємо переміщення нулів та полюсів синтезованого регулятора. Перерахунок закріплюється через кнопку Update Compensator.

Процедура завершується по досягненні заданих показників якості АСР по діаграмі *Bode* та *Step* рис. 3.8.

В результаті синтезу отримали передавальну функцію LQG регулятора із спостерігачем Калмана:

Compensator

$$C = 0.014269 \times \frac{(1 + 7.3e+02s)(1 + 7.4e+04s)}{s(1 + 11s)(1 + 11s)}$$

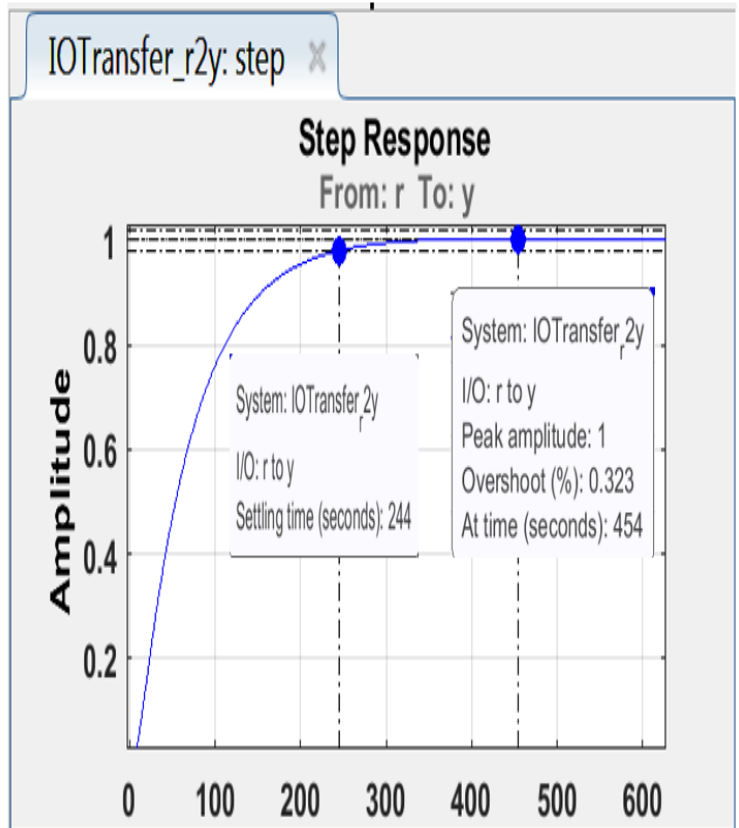
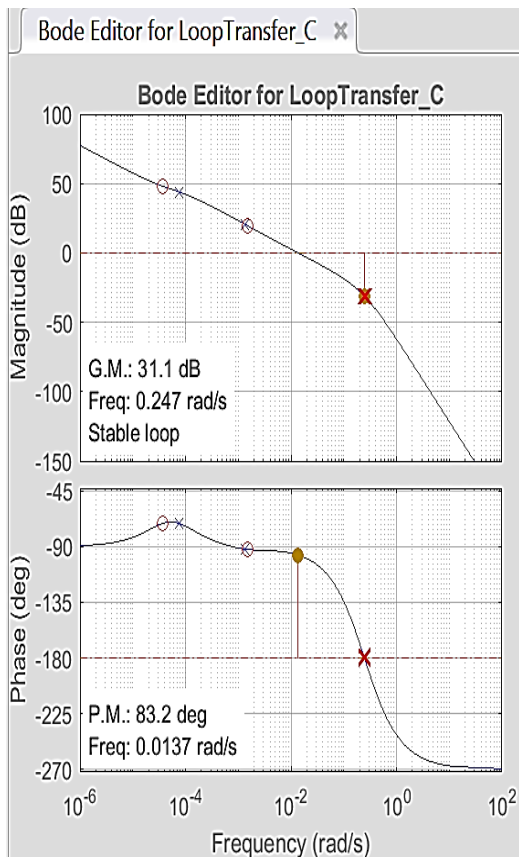


Рисунок 3.8 Результати синтезу регулятора (діаграма *Bode* та *Step*)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Підсумкові результати аналізу синтезованих систем приведені в табл.3.1

Таблиця 3.1 Порівняння якісних показників роботи синтезованих АСР

Параметри оцінки якості роботи АСР	АСР з ПІД-регулятором	АСР з <i>LQG</i> регулятором
Час регулювання,с	7600	244
Перерегулювання ,%	9	0.32
Запас по фазі , град.	88	83.2
Запас по амплітуді, дБ	∞	31,1
Висновки по стійкості	стійка	стійка

Висновки по розділу

Синтезована система автоматичного регулювання температури нафти на основі класичного ПІД-регулятора демонструє задовільну якість регулювання при дії різних збурюючих впливів. Отримані показники – зокрема, невелике перерегулювання, достатній запас стійкості та стабілізація параметра в заданому діапазоні – дозволяють рекомендувати цю структуру для практичного використання у реальних умовах експлуатації теплотехнічного обладнання.

Разом із тим, система, синтезована за принципами лінійно-квадратичного гаусівського (*LQG*) управління, демонструє значно покращені динамічні характеристики, зокрема:

- скорочення часу регулювання,
- зменшення величини перерегулювання,
- вища точність стабілізації параметра за наявності стохастичних збурень.

Завдяки застосуванню фільтра Калмана, контролер забезпечує оптимальну фільтрацію зашумлених сигналів та покращену реакцію системи на збурення, що характерні для реальних промислових умов.

Таким чином, LQG-регулятор доцільно розглядати як перспективне рішення для реалізації САР у високотехнологічних або чутливих до точності об'єктах, де особливо важливими є динамічна якість та стійкість до випадкових впливів.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОЕКТНИХ ДОКУМЕНТІВ НА СИСТЕМУ КЕРУВАННЯ ПІДГРІВНИКОМ НАФТИ

4.1 Структура і функції автоматичної системи керування підігрівником нафти

Система автоматичного управління підігрівачем нафти реалізує автоматизовану підтримку параметрів технологічного процесу з метою підвищення енергоефективності, надійності та безпеки експлуатації теплотехнічного обладнання. Система інтегрує засоби контролю, регулювання, сигналізації, захисту, а також здійснює інтерфейс з оператором.

Основні функції системи:

- автоматичний пуск і зупинка підігрівача;
- управління розпалом пальників і контроль наявності полум'я;
- автоматичне перемикання між режимами великого і малого горіння;
- підтримка працездатності для різних типів підігрівачів (ПП-0,63А, ПП-1,6А, ПКН-1,9 тощо);
- виявлення і блокування аварійних ситуацій з фіксацією причин;
- моніторинг та управління в режимі реального часу з автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора.

Технічні можливості САУ:

Система побудована на основі модульної архітектури з використанням цифрових контролерів та сенсорних мереж, що дозволяє реалізувати:

- вимірювання, обробку та контроль основних параметрів технологічного процесу;
- запам'ятовування причин аварійних зупинок та забезпечення зворотного аналізу подій;
- управління виконавчими механізмами за алгоритмічно заданими умовами;
- автоматичне регулювання температури нагріву продукту;

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- обмін даними з верхнім рівнем диспетчеризації за допомогою цифрових інтерфейсів (Modbus, Profibus тощо);
- обслуговування сенсорної системи без зупинки обладнання;
- адаптацію системи під специфіку конкретного об'єкта.

Контрольовані параметри:

Система забезпечує безперервний моніторинг наступних змінних:

- витрата паливного газу та нафти;
- тиск у газових і повітряних магістралях;
- температура газу, повітря, холодного й підігрітого продукту;
- температура димових газів;
- стан полум'я пальників;
- контроль вибухонебезпечних концентрацій газу на критичних ділянках.

Алгоритми автоматичного регулювання:

Система реалізує двоконтурне регулювання температурного режиму:

1. Температурне регулювання продукту на виході:
 - реалізується зміною витрати паливного газу;
 - контур замкнений по датчику температури на вихідному трубопроводі.
2. Регулювання співвідношення газ–повітря:
 - виконується на основі тиску в газовому та повітряному колекторах;
 - здійснюється шляхом керування частотою обертання дуттєвого вентилятора або поворотною заслінкою.

Таке поєднання дозволяє забезпечити максимальну паливну ефективність при дотриманні вимог безпеки.

Інформаційні функції:

- збір і візуалізація даних технологічного процесу в режимі реального часу;

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- виявлення та сигналізація аварій і відхилень;
- мнемосхемне відображення стану об'єкта;
- архівування подій та параметрів;
- облік витрати палива і продукту;
- облік напрацювання обладнання;
- автоматичне формування звітності;
- контроль проходження етапів пуску/зупинки.

САУ побудована з урахуванням методів управління динамічними об'єктами з розподіленими параметрами. При розробці враховувались особливості багатоконтурних термодинамічних процесів, а алгоритми адаптовані до об'єктів з високою інерційністю та стохастичними збуреннями. Дослідження роботи САУ проводилось шляхом імітаційного моделювання, що дозволило оптимізувати параметри регуляторів (у тому числі ПД та LQG) для досягнення найкращих показників точності та стійкості.

4.2 Вибір технічних засобів автоматизації

Основним завданням на етапі вибору програмно-технічних засобів (ПТЗ) для реалізації автоматизованої системи є аналіз можливих варіантів реалізації, обґрунтований вибір компонентів системи автоматизації, а також оцінка їх сумісності та інтеграційної здатності в межах загальної архітектури автоматизованої системи керування підігрівачем нафти (АС УКПН).

Комплекс ПТЗ АС УКПН включає наступні основні підсистеми:

- вимірювальні пристрої (сенсори, датчики, витратоміри, термометри тощо);
- виконавчі пристрої (клапани, приводи, регулятори);
- контролерне обладнання (промислові ПЛК або РАС);
- система сигналізації та операторського моніторингу.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір контролерного обладнання блоку підігрівача

В якості апаратної основи для реалізації системи автоматизованого управління шляхового підігрівача обрано промисловий програмований логічний контролер (ПЛК) ControlLogix 5573 серії 1756 від компанії Allen-Bradley (Rockwell Automation). Цей контролер належить до лінійки високонадійних і масштабованих рішень, які призначені для побудови «легких» і «середніх» АСУ ТП, а також може ефективно застосовуватись у складі високонавантажених розподілених систем управління з великою кількістю каналів вводу/виводу та складною логікою управління.



Контролер ControlLogix 5573 повністю відповідає сучасним вимогам до систем автоматизації, включаючи:

- модульну архітектуру, що дозволяє легко розширювати функціональність системи;
- високу швидкодію та обробку задач реального часу;
- надійну комунікацію з іншими компонентами через інтерфейси Ethernet/IP, ControlNet, DeviceNet;
- гнучку інтеграцію з SCADA-системами та вищим рівнем MES/ERP;
- підтримку широкої гами I/O модулів (аналогових, дискретних, термодинамічних тощо).

Серія 1756 підтримує централізовану логіку управління із можливістю резервування як процесорних, так і мережевих модулів, що підвищує загальну відмовостійкість системи.

Переваги використання ControlLogix 5573:

- Масштабованість: дозволяє почати з базової конфігурації та поступово нарощувати функціонал;
- Інтеграція з цифровими протоколами сучасних сенсорів і приводів;

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Розвинена діагностика і підтримка вбудованого журналювання подій;
- Висока швидкодія та мінімальні затримки при обміні даними;
- Можливість резервування контролерів, живлення, комунікаційних ліній.

У табл. 4.1 наведено основні технічні характеристики ПЛК ControlLogix 5573.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики контролера ControlLogix 1756-L73

Параметр	Значення
Тип процесора	ControlLogix 5573
Об'єм користувацької пам'яті	8 МБ
Типи підтримуваних модулів	Дискретні, аналогові, спеціалізовані (HART, термопари)
Інтерфейси комунікації	EtherNet/IP, ControlNet, DeviceNet, USB
Кількість задач реального часу	До 32
Максимальна кількість I/O модулів	128 модулів у локальному та віддалених шасі
Час виконання інструкцій	0.5 – 1.0 мкс для базових команд
Підтримка мов програмування	Ladder Diagram, Structured Text, Function Block Diagram, SFC
Середовище програмування	RSLogix 5000 / Studio 5000
Температурний діапазон експлуатації	від 0 до +60°C
Живлення процесорного модуля	24 В постійного струму

Таким чином, контролер **ControlLogix 5573** є оптимальним вибором для реалізації системи автоматичного управління шляховим підігрівачем нафти завдяки своїм технічним характеристикам, надійності та сумісності з сучасним промисловим обладнанням. Його використання забезпечує гнучку, масштабовану і відмовостійку архітектуру АСУ ТП, яка повністю відповідає вимогам до енерготехнологічного обладнання.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вимірювання витрати.

Для вимірювання витрати газу обраний витратомір Метран-350 на базі осередненої напірної трубки (ОНТ) Annubar тому він відрізняється більш високою точністю вимірювання, високим ступенем захищеності та невисокою ціною.



Витратоміри на базі осередненої напірної трубки Annubar призначені для вимірювання витрати рідини, газу, пара в технологічних процесах в різних галузях промисловості, а також в системах технологічного та комерційного обліку.

Відрізняються простотою монтажу з мінімальною кількістю зварних швів, малим зносом осередненої напірної трубки, що збільшує міжповірювальний інтервал, незначними втратами тиску на трубці Annubar.

Вибір датчиків тиску

Датчики тиску необхідні для відстеження тиску нафти, повітря, паливного газу на вході в арматурний блок паливних ліній, корекція показань витратоміра, а також для відстеження тиску паливного газу після регулятора, перевірки герметичності клапанів і розрідження перед заслінкою димових газів, сигналізація, захист і регулювання.

Для вимірювання тиску будемо використовувати датчики тиску Метран-150 CG. Датчики тиску серії Метран-150 призначені для безперервного перетворення значення вимірюваного параметра (абсолютного, надлишкового тиску, різниці тиску) в уніфікований струмовий вихідний сигнал і / або цифровий сигнал на базі HART-протоколу в системах автоматичного управління, контролю і регулювання технологічних процесів.



150TG. 150TA



150CG. 150CD

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір датчика - сигналізатора рівня

Якщо відбувається швидке наповнення резервуар , то на нього додатково встановлюють сигналізатори граничного рівня, які подають сигнал при наповненні резервуара до максимального рівня. Даний сигнал буде використовуватися для відключення насосів в автоматичному режимі, для закриття або відкриття засувки на трубопроводах. Крім аварійного сигналу в схемі автоматизації резервуара з нафтою передбачаються попереджувальні сигнали про низький і високий рівень нафти в резервуарі від датчиків сигналізації рівня. В якості датчика сигналізатора будемо використовувати вібраційний сигналізатор рівня Rosemount 2120.



Вимірювання температури

Для вимірювання температури обраний датчик температури Метран-274 тому він оптимальним чином підходить для поставленої задачі.

Перевагами датчика є термін служби, висока вибухозахищеність, невисока ціна, низьке енергоспоживання і відсутність необхідності використання додаткових нормуючих перетворювачів.



Вимірювана температура перетвориться в уніфікований вихідний сигнал (4..20 мА) постійного струму за допомогою чутливого елемента первинного перетворювача і вбудованого в головку датчика вимірювального перетворювача. Це дозволяє розробляти структуру АСУ ТП, не застосовуючи додаткові нормуючих перетворювачі. Діапазон вимірюваних температур, в ° С від мінус 50 до плюс 180.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір виконавих пристроїв

Як виконавчий пристрій для регулювання витрати паливного газу використовується регулюючий клапан Honeywell типу V5015A з електроприводом ML7420, представлений на рис. 4.1.

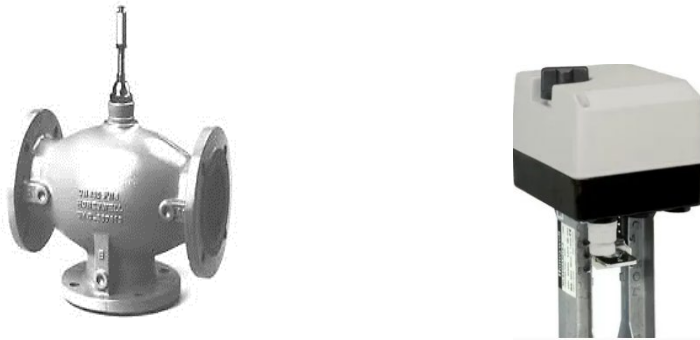


Рисунок 4.1 – Регулююча арматура Honeywell V5015A з електроприводом ML7420

Клапан Honeywell V5015A — це двоходовий прямоходовий клапан із сідельною конструкцією, призначений для точного регулювання витрати газу або рідини в системах автоматичного керування. Разом із електроприводом ML7420, який забезпечує позиціонування за аналоговим сигналом 0–10 В або 4–20 мА, ця арматура дозволяє ефективно інтегрувати пристрій до цифрової системи управління на базі контролера.

Завдяки модульній конструкції, клапани Honeywell мають високий ступінь сервісопридатності, що знижує експлуатаційні витрати та спрощує технічне обслуговування.

Для регулювання подачі повітря використаємо поворотні заслінки Honeywell серії D6R із симетричним диском запірно-регулюючого типу, які комплектуються електроприводами серії ML7421 або M7284. Дані пристрої забезпечують точне регулювання повітряного потоку в системах автоматизованого керування підігрівачем. Заслінки Honeywell мають широкий діапазон типорозмірів (DN40–DN400) і можуть працювати при тиску до PN1,6 МПа.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приводи, що застосовуються, мають вбудовані позиціонери, які дозволяють реалізувати плавне управління у замкненому контурі автоматичного регулювання.

4.3 Функціональна схема автоматизації та схема підключень

Функціональна схема автоматизації є основним технічним документом, що визначає функціонально-блокову структуру систем автоматичного контролю, керування та регулювання технологічного процесу. Схема також відображає оснащення об'єкта керування приладами та засобами автоматизації.

На функціональній схемі зображено:

- канали автоматичного контролю;
- канали регулювання;
- контури дистанційного керування та сигналізації.

Усі елементи системи позначено відповідно до стандартних умовних графічних символів. Вони об'єднані лініями функціональних зв'язків. Схема включає спрощене зображення технологічної частини процесу з умовними позначеннями обладнання.

Основні завдання, реалізовані в межах функціональної схеми:

- зчитування первинної інформації про стан технологічного процесу та обладнання;
- безпосередній вплив на об'єкт з метою стабілізації та керування параметрами;
- контроль і реєстрація параметрів процесу та стану обладнання.

Схема виконана відповідно до діючих державних стандартів і представлена на аркуші БР.АКТзд-30.00.00.000.01.

Інформаційна структура системи

Верхній рівень автоматизованої системи представлений:

- базою даних корпоративної інформаційної системи (КІС);
- базою даних АСУ ТП.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інформація структурована через екранні форми, що виводяться на автоматизовані робочі місця (АРМ). На АРМ оператора відображаються поточні технологічні параметри, повідомлення системи та керуючі елементи. Для АРМ диспетчера реалізовано автоматичне формування звітної документації у форматі XML.

Регламент формування звітів:

- кожні 2 години (парні/непарні години);
- щодобово о 00:00;
- щомісячно;
- на вимогу оператора (оперативні звіти).

Типи звітів:

- зведення щодо поточного стану технологічного обладнання;
- зведення за результатами поточних вимірювань.

Історична підсистема

Для збереження хронології зміни параметрів застосовується модуль історії **HISTORY**. Параметри зберігаються з визначеною роздільною здатністю у базі даних. Дані зберігаються протягом трьох місяців, після чого проходять процедуру прорідження відповідно до встановленого алгоритму.

Проектування схеми зовнішніх проводок

Схема зовнішніх електричних з'єднань системи автоматизації розроблена згідно з чинними технічними вимогами та наведена на аркуші БР.АКТзд-30.00.00.000.06.

Характеристики приєднаних засобів вимірювання:

- Датчики температури оснащені вбудованими перетворювачами сигналу термоопору (RTD) у стандартний уніфікований аналоговий струмовий сигнал 4–20 мА.
- Витратоміри мають вихідний аналоговий сигнал 4–20 мА, сформований на основі внутрішнього перетворення параметрів потоку.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Датчики тиску функціонують на основі сенсорів з ємнісною чутливою коміркою, з подальшим перетворенням вимірюваної величини у уніфікований струмовий сигнал 4–20 мА.

Кабельна продукція:

Для здійснення зовнішніх з'єднань застосовано кабель типу КВВГнг, що не підтримує горіння (вогнестійкий) та відповідає вимогам до промислових систем керування. Кабель забезпечує надійну передачу аналогових та дискретних сигналів у складних умовах експлуатації.

Використання уніфікованих аналогових сигналів дозволяє забезпечити високу сумісність із системою збору даних та контролером, а також зменшує вплив перешкод і втрат сигналу при передаванні на значні відстані.

4. 4 Розроблення екранних форм системи управління

Місцеве (операторське) управління підігрівачем здійснюється за допомогою панелі оператора Harmony HMI серії HMIET6500 виробництва Schneider Electric, з використанням середовища розробки Vijeo Designer.

Структура відеоінтерфейсу

Відеоінтерфейс формує операторське середовище візуалізації технологічного процесу, а також забезпечує можливість ручного управління окремими компонентами обладнання. До складу інтерфейсу входять такі елементи:

- Мнемосхеми — графічне представлення поточного стану об'єктів автоматизації та основних технологічних параметрів.
- Контекстні (спливаючі) вікна — реалізують функції керування режимами роботи об'єктів, налаштування параметрів, активацію чи деактивацію обладнання.
- Табличні форми — призначені для відображення детальної інформації, не включеної до мнемосхем (наприклад, журналів подій, історичних даних, параметрів ручного введення тощо).

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приклад відеокадру для підігрівника нафти ПП-1.6 наведено на рис. 4.2.

Доступні мнемосхеми

На панелі оператора реалізовано наступні відеокадри:

- мнемосхема підігрівача ПП-1.6;
- екран налаштувань аналогових сигналів;
- екран налаштувань ПІД-регуляторів;
- екран режимів роботи.

Мнемосхема «ПП-1.6» забезпечує візуалізацію та контроль наступних параметрів і об'єктів:

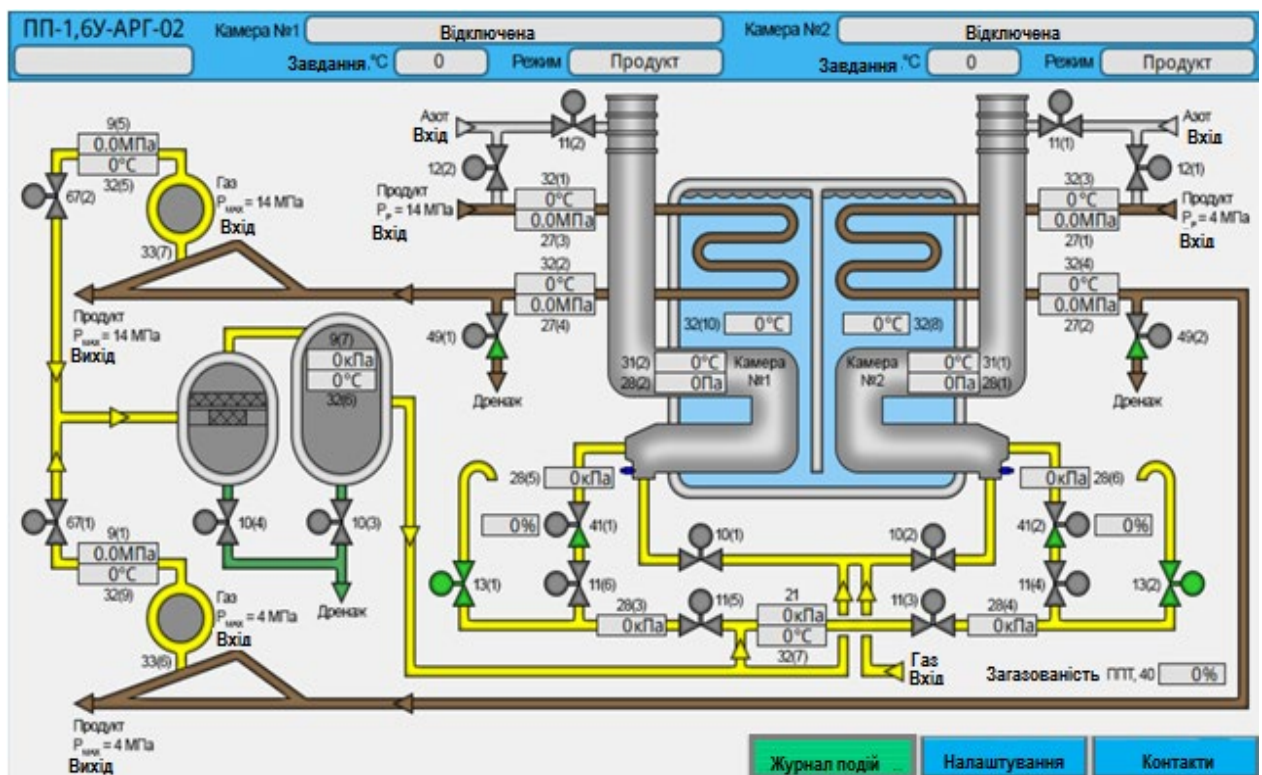


Рисунок 4.2 – Відеокадр мнемосхеми контролю підігрівача ПП-1.6

- технологічні параметри підігрівача: температура, витрата, тиск, стан аварійних сигналів;
- параметри трубопроводів, що подають і відводять продукт;
- стан і режим роботи газових пальників, заслінок, запірної арматури.

Висновки по розділу

У даному розділі:

- розроблено архітектуру комплексної інформаційно-керуючої системи управління (КІСУ) підігрівником у складі установки комплексної підготовки нафти (УКПН);
- виконано вибір апаратних та програмних засобів автоматизації, з урахуванням вимог надійності, сумісності та функціональності;
- сформовано перелік ключових проектних рішень та документації, що забезпечують реалізацію системи автоматизованого керування технологічним процесом.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даній бакалаврській роботі виконано комплекс досліджень та проектних рішень, спрямованих на автоматизацію процесу підігріву нафти у шляхових підігрівачах в складі установки комплексної підготовки нафти (УКПН). Основні результати роботи можна сформулювати наступним чином:

1. Проведено аналіз технологічного процесу підігріву нафти, визначено основні контрольовані та регульовані параметри, що впливають на ефективність і безпечність процесу.
2. Виконано розрахунок статичного режиму роботи підігрівача з проміжним теплоносієм та визначено параметри робочої точки системи.
3. На основі теплового та матеріального балансу побудовано математичну модель процесу, яка стала базою для створення імітаційної моделі.
4. За допомогою моделювання в середовищі MATLAB/Simulink реалізовано симуляційну модель одноконтурної САР регулювання температури проміжного теплоносія. Проведено дослідження роботи САР при зміні збурювальних впливів та уставки.
5. Система автоматичного регулювання синтезована за критеріями стійкості, швидкодії та точності, відповідає вимогам якості керування в умовах експлуатації.
6. Розроблено основні проектні документи:
 - функціональна схема автоматизації підігрівача;
 - схема зовнішніх електропідключень;
 - структура комп'ютерно-інтегрованої системи керування;
 - фрагменти відеоінтерфейсу панелі оператора.
7. Вибрано програмно-технічні засоби автоматизації, включаючи промисловий контролер Allen-Bradley ControlLogix 5573, виконавчі механізми Honeywell, операторську панель HMI Schneider Electric, засоби вимірювання та зв'язку, відповідно до вимог до надійності, сумісності та функціональності.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Лабай В. Й. Тепломасообмін : Підручник для ВНЗ. – Львів: Тріада Плюс, 2004. – 260 с.
2. Чепурний М. М. Тепломасообмін в прикладах і задачах : навчальний посібник / М. М. Чепурний, Н. В. Резидент. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 128 с.
3. Омельченко О.В., Цвіркун Л.О. Тепломасообмін : навч. посіб. Кривий Ріг:ДонНУЕТ, 2021. 100 с.
4. Пічне обладнання у хімічних та нафтопереробних процесах: навч. посіб. / А.Р. Степанюк. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 172 с.
5. Мочалін В. Н., Кочнев Н. В. Моделювання та дослідження систем автоматичного управління з використанням ПЕОМ: навч. посіб. Київ : КПІ, 2005. 178 с
6. Ананьєв В. П. Синтез і налагодження квазіоптимальних систем підпорядкованого регулювання в металургії: навч. посіб. Київ : Просвіта, 2007. 344 с.
7. Авраменко В. С., Авраменко А. С. Проектування інформаційних систем: навч. посіб. Черкаси : Черкаський національний університет ім. Б. Хмельницького, 2017. 434 с. 22.
8. Автоматизовані системи управління технологічними процесами: довідник / за заг. ред. Б. Б. Тимофеева ; уклад. Н. Г. Скрипаненко. Київ : Техника, 2003. 351 с.
9. Установки підігріву нафти: подорожні підігрівники нафти трубопровідні автоматизовані ПТ-25/100М-1Р;ПТ-16/150М-1Р;ПТ-16/15УП-1Р веб-сайт. URL: <https://ua.all.biz/uk/ustanovky-pidigrivu-nafty-podorozhni-pidigrivnyky-g608213>(дата звернення: 21.05.2021)
10. Білецький В. С. Основи нафтогазової справи / В. С. Бі -лецький, В. М. Орловський, В. І. Дмитренко, А. М. Похилко. – По л-тава : ПолтНТУ, Київ : ФОП Халіков Р.Х., 2017. – 312 с.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. Орловський В. М., Білецький В. С., Вітрик В. Г., Сіренко В. І. Технологія видобування нафти. Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, НТУ «ХПІ», ТОВ НТП «Бурова техніка», Львів, Видавництво «Новий Світ – 2000», 2022. – 308 с.

12. Когутяк М.І. Сучасні комп'ютерні технології в автоматизації Ч1. Автоматизовані системи керування технологічними процесами нафтогазової галузі. Нав. Посіб. ІФНТУНГ: Факел, 2009, с.272.

13. Когутяк М.І., Лагойда А.І. Сучасні комп'ютерні технології в автоматизації Ч2. Автоматизовані системи керування підприємствами. Нав. Посіб. ІФНТУНГ: Факел, 2011, с.272.

14. Трегуб В.Г. Основи комп'ютерно-інтегрованого керування. (Інтегровані автоматизовані системи керування): Навч. посіб. - К.: НУХТ, 2005. - 191 с.

					БР.АКТзд- 30.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		