

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

МР.АКПМ-55.00.00.000 ПЗ

Група АКПМ-24-1

**Андрій Саврич**

**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

Саврич Андрій Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5:621.64:621.1

(індекс)

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Система управління технологічним процесом рекуперації тепла на

(назва роботи)

компресорних станціях

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

### Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

### Здобувач освітнього ступеня

АКПм -24-2

(шифр групи)

А.М. Саврич

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

### Науковий керівник

доцент, к.т.н

(науковий ступінь, вчене звання)

М.В.Шавранський

(підпис)

(дата)

(ініціали та

прізвище)

### Допущено до захисту

### Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

### Рецензент

доцент, к.т.н

(посада)

(підпис)

(дата)

В.С.Борин

(ініціали та прізвище)

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



6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 20.11.2023

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологій компресорних станцій магістральних газопроводів з акцентом на джерела теплових втрат	30.10.2025 р.	Виконано
2	Математична модель процесу рекуперації теплоти на компресорній станції	10.11.2025 р.	Виконано
3	Синтез системи автоматичного управління технологічним процесом рекуперації тепла на КС	20.11.2025 р.	Виконано
4	Реалізація системи керування на базі мікропроцесорного контролера	30.11.2025 р.	Виконано
5	Загальні висновки	05.12.2025 р.	Виконано
6	Оформлення МР	07.12.2025 р.	Виконано

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Саврич А.М.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Шавранський М.В.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

### **Саврич А. М. Система управління технологічним процесом рекуперації тепла на компресорних станціях**

Магістерська робота на отримання ступеня магістра з автоматизації за спеціальністю 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано - Франківськ, 2025 р.

Магістерська робота присвячена розробленню автоматизованої системи керування процесом рекуперації теплової енергії на компресорній станції магістрального газопроводу. Актуальність дослідження зумовлена високими енерговитратами газотранспортних підприємств та значними тепловими втратами (до 40–60 %), що розсіюються через вихлопні гази газотурбінних приводів, інтеркулери та системи охолодження обладнання. У роботі обґрунтовано доцільність впровадження сучасних технологій рекуперації теплоти у поєднанні з автоматизованими методами керування для підвищення енергоефективності та екологічної безпеки роботи компресорних станцій.

У ході дослідження виконано детальний аналіз джерел теплових втрат та визначено оптимальні точки відбору теплоти (вихлопні гази, інтеркулер, маслоохолоджувач). Розроблено математичну модель процесу рекуперації, що включає теплообмінні апарати, буферну ємність та контури циркуляції теплоносія. Модель реалізовано у середовищі MATLAB/Simulink із використанням методів лінеаризації та ідентифікації, що дозволило отримати передавальні функції об'єкта та провести динамічний аналіз системи.

На основі математичної моделі синтезовано контури автоматичного регулювання температури, тиску та витрати теплоносія із застосуванням PID-регуляторів.

**Ключові слова:** рекуперація тепла, компресорна станція, автоматизована система керування, теплообмінник, PID-регулювання, MATLAB/Simulink, енергоефективність, газотранспортна система.

## ANNOTATION

### **Savrych A. M. Control system for the technological process of heat recovery at compressor stations**

Master's thesis for a master's degree in automation in the specialty 174 - Automation, computer-integrated technologies and robotics. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. - Ivano - Frankivsk, 2025

The master's thesis is devoted to the development of an automated control system for the process of heat energy recovery at the compressor station of the main gas pipeline. The relevance of the study is due to the high energy consumption of gas transportation enterprises and significant heat losses (up to 40–60%), which are dissipated through the exhaust gases of gas turbine drives, intercoolers and equipment cooling systems. The work substantiates the feasibility of implementing modern heat recovery technologies in combination with automated control methods to increase energy efficiency and environmental safety of compressor stations.

During the study, a detailed analysis of the sources of heat losses was performed and optimal heat extraction points were determined (exhaust gases, intercooler, oil cooler). A mathematical model of the recovery process was developed, which includes heat exchangers, a buffer tank and coolant circulation circuits. The model was implemented in the MATLAB/Simulink environment using linearization and identification methods, which allowed obtaining the transfer functions of the object and conducting a dynamic analysis of the system.

Based on the mathematical model, automatic temperature, pressure and coolant flow control circuits were synthesized using PID controllers.

**Keywords:** heat recovery, compressor station, automated control system, heat exchanger, PID control, MATLAB/Simulink, energy efficiency, gas transportation system.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....</b>	<b>8</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>9</b>
<b>РОЗДІЛ 1</b>	
<b>АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВІДІВ З АКЦЕНТОМ НА ДЖЕРЕЛА ТЕПЛОВИХ ВТРАТ.....</b>	<b>13</b>
1.1. Структурна картина типової технологічної схеми КС.....	13
1.2. Основні джерела теплових втрат.....	14
1.3. Технологічні заходи щодо зниження теплових втрат.....	15
1.4. Принципи рекуперації тепла з відпрацьованих газів, мастил і систем охолодження компресорних агрегатів.....	16
1.5. Аналіз оптимальних точок відбору теплоти у типовій установці.....	18
1.6. Основні технологічні параметри контролю та керування процесом рекуперації тепла на КС.....	23
1.7. Ключові контури автоматичного регулювання.....	23
Висновки до розділу 1.....	27
<b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛОТИ НА КОМПРЕСОРНІЙ СТАНЦІЇ.....</b>	<b>28</b>
2.1. Позначення основних змінних.....	28
2.2. Модель теплообміну (статична — базова форма).....	29
2.3. Динаміка буферної ємності (енергетичний баланс).....	29
2.4. Динаміка потоку теплоносія.....	30
2.5. Рівняння для кожного джерела (зведено) .....	30
2.6. Контури керування (алгоритм) .....	30
2.7. Лінеаризація та передатні функції.....	31
2.8. Ідентифікація за експериментальними даними.....	32
Висновки до розділу 2.....	38

**РОЗДІЛ 3****СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ****ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛА НА КС.....39**

3.1. Загальні положення синтезу системи керування.....39

3.2. Об'єкт керування та вибір регульованих параметрів.....40

3.3. Структурна схема САУ технологічним процесом рекуперації  
тепла на КС.....40

3.4. Синтез ПІД-регулятора.....43

3.5. Аналіз стійкості та визначення показників якості регулювання.....47

Висновки до розділу 3.....48

**РОЗДІЛ 4****РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НА БАЗІ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО  
КОНТРОЛЕРА.....50**

4.1. Вибір апаратного забезпечення (ПЛК, датчики, виконавчі механізми).....50

4.2. Розробка алгоритму керування в середовищі програмування контролера.....57

4.3. Побудова та налагодження HMI/SCADA для візуалізації параметрів.....61

4.4. Експериментальні результати роботи системи.....63

Висновки до розділу 4.....67

**ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....69****СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....71****ДОДАТКИ.....73**

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ**

АФХ – амплітудно – фазова характеристика

АЧХ – амплітудно – частотна характеристика

ГПА – газоперекачувальні агрегати

ГТУ – газотурбінна установка

ІПХ – імпульсна перехідна характеристика

КА – компресорний агрегат

ККД – коефіцієнт корисної дії

КС – компресорна станція

ПХ – перехідна характеристика

САК – система автоматичного керування

СУ – система управління

ТП – технологічний процес

ФЧХ – фазо – частотна характеристика

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Компресорні станції магістральних газопроводів є одними з найбільших споживачів енергоресурсів у газотранспортній системі, при цьому до 40–60 % витраченої енергії втрачається у вигляді тепла, що розсіюється у навколишнє середовище. В умовах зростання вартості енергоносіїв, підвищення вимог до енергоефективності та екологічної безпеки газотранспортної інфраструктури питання утилізації та повторного використання відпрацьованого тепла стає технологічно та економічно значущим.

Сучасні технології рекуперації дозволяють використовувати тепловий потенціал вихлопних газів, інтеркулерів та систем охолодження обладнання для опалення об'єктів станції або вироблення додаткової енергії, однак без автоматизованої системи керування процес рекуперації є нестабільним і не забезпечує оптимального теплового балансу.

Автоматизація процесу дає можливість у реальному часі контролювати параметри теплообміну, забезпечувати адаптивне керування контурами рекуперації, зменшувати втрати енергії та підвищувати загальний ККД компресорної станції.

Таким чином, розроблення автоматизованої системи управління технологічним процесом рекуперації тепла є актуальним напрямом, що поєднує підвищення енергоефективності, економію ресурсів і зменшення негативного впливу на довкілля.

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Вибір теми зумовлений необхідністю підвищення енергоефективності компресорних станцій, оскільки саме вони формують значну частку витрат енергії в газотранспортній системі, а до 60 % виробленої енергії втрачається у вигляді тепла.

У сучасних умовах підприємства енергетичної галузі вимушені оптимізувати використання ресурсів, скорочувати експлуатаційні витрати та відповідати екологічним вимогам, що робить технології рекуперації тепла стратегічно важливими.

Проте ефективність процесу рекуперації суттєво залежить від здатності системи підтримувати стабільні параметри теплообміну та оперативно реагувати на зміни навантаження, що без автоматизації неможливо забезпечити. Автоматизована система управління дозволяє реалізувати адаптивне регулювання теплових потоків, мінімізувати втрати енергії та забезпечувати оптимальний режим роботи технологічного обладнання.

Тому тема дослідження є обґрунтованою, актуальною та спрямованою на вирішення практичної задачі — підвищення енергоефективності компресорних станцій шляхом впровадження сучасних методів автоматичного керування процесом рекуперації тепла.

**Мета і завдання дослідження.** Мета дослідження: розробити автоматизовану систему управління процесом рекуперації тепла на компресорній станції, яка забезпечує підвищення енергоефективності роботи обладнання та оптимізацію використання теплових ресурсів за рахунок підтримання стабільних технологічних параметрів та мінімізації теплових втрат.

Завдання дослідження: Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати технологічний процес компресорної станції та визначити основні джерела теплових втрат і можливі точки відбору тепла. Необхідно розробити структурну та функціональну схему системи рекуперації тепла з урахуванням вимог до автоматизації та безпеки роботи обладнання. Наступним завданням є визначення технологічних параметрів, що потребують контролю та керування, і формування принципів побудови відповідних контурів керування. Потрібно створити математичну модель процесу рекуперації тепла та реалізувати її у середовищі MATLAB/Simulink. На завершальному етапі слід провести моделювання роботи системи, оцінити її ефективність і сформулювати рекомендації щодо впровадження на реальних компресорних станціях.

*Об'єктом дослідження є технологічний процес рекуперації теплової енергії на компресорній станції магістрального газопроводу.*

*Предметом дослідження є методи та алгоритми автоматичного керування системою рекуперації тепла, включаючи структуру контурів регулювання, вибір параметрів керування та засоби реалізації управління в автоматизованій системі.*

**Методи дослідження.** Для дослідження технологічного процесу компресорної станції та визначення джерел теплових втрат застосовано метод системного аналізу. Методи структурного моделювання використано для розроблення функціональної схеми автоматизованої системи управління рекуперацією тепла. Для побудови алгоритмів керування та синтезу PID-регуляторів застосовано методи теорії автоматичного керування. Математичне й імітаційне моделювання виконано у середовищі MATLAB/Simulink для дослідження динаміки процесу та оцінювання ефективності системи. Для порівняння результатів розрахунків використано методи енергетичного балансу та техніко-економічного аналізу.

**Новизна отриманих результатів.** У роботі вперше запропоновано підхід до побудови автоматизованої системи керування рекуперацією теплової енергії на основі каскадного використання різних температурних рівнів тепла компресорної станції.

Розроблено математичну модель процесу рекуперації з реалізацією PID-регулювання для підтримання стабільного теплового балансу в системі та забезпечення енергоефективної роботи обладнання. Запропонована структура керування передбачає адаптивне регулювання параметрів (температури, тиску, витрати теплоносія) залежно від навантаження компресорної станції, що дозволяє зменшити теплові втрати в режимах змінної продуктивності.

Отримано нові результати щодо оптимізації розподілу потоків теплоносія між споживачами залежно від пріоритетності та енергетичних потреб. Розроблені технічні рішення дозволяють інтегрувати систему рекуперації тепла в існуючі SCADA/PLC платформи без зміни основного технологічного циклу компресорної станції.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.**

Обрана тема дослідження узгоджується з тематичним планом науково-дослідних робіт Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу та відповідає стратегічним науковим напрямкам кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Виконання магістерської роботи здійснюється в межах профільного напрямку кафедри, орієнтованого на створення сучасних систем автоматизації для об'єктів нафтогазової галузі. Тематика дослідження спирається на матеріали та результати держбюджетної науково-дослідної теми, що підтверджує її практичну спрямованість і актуальність для промислових застосувань.

**Практичні значення отриманих результатів.** Розроблена система автоматичного керування рекуперацією тепла може бути впроваджена на компресорних станціях, що дозволить скоротити енергетичні витрати на опалення технологічних та адміністративних приміщень і зменшити використання паливного газу. Запропоновані алгоритми регулювання забезпечують оптимальний режим роботи теплообмінного обладнання та сприяють підвищенню загального ККД компресорної станції. Використання моделювання у MATLAB/Simulink дозволяє оцінити ефективність системи на етапі проектування, мінімізувати ризики й обґрунтувати вибір обладнання. Запровадження автоматизованого контролю теплових потоків дає можливість знизити експлуатаційні витрати та підвищити ресурс роботи агрегатів за рахунок оптимізації теплового навантаження. Результати можуть бути використані газотранспортними підприємствами для модернізації існуючих систем енергозбереження.

**Структура та обсяг магістерської роботи.** Магістерська робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 14 найменувань. Обсяг основної частини роботи становить 72 сторінки, у тому числі 11 таблиць і 20 рисунків.

## РОЗДІЛ 1

# АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ З АКЦЕНТОМ НА ДЖЕРЕЛА ТЕПЛОВИХ ВТРАТ

### 1.1. Структурна картина типової технологічної схеми КС

На магістральних газопроводах та у промисловості компресорні станції (КС) є одними з найбільших споживачів енергії, при цьому значна частина цієї енергії (до 40-60% і більше) розсіюється у навколишнє середовище у вигляді тепла. Ефективна рекуперація цього тепла є ключовим напрямком для підвищення енергоефективності.

Основне обладнання типової технологічної схеми КС, як правило, включає компресорні агрегати (КА), які приводяться в рух газотурбінними установками (ГТУ), поршневіми двигунами або електродвигунами. Залежно від типу приводу, схеми мають різні пріоритетні джерела теплових втрат.

Компресорні станції з газотурбінними установками (ГТУ) – це найпоширеніший тип КС на магістральних газопроводах.

Принцип роботи: ГТУ спалюють частину транспортованого газу для отримання механічної енергії, яка приводить у дію нагнітач (компресор).

Схема рекуперації: Найбільш значуща та високопотенційна.

Компресорні станції з електричним приводом використовуються, де доступна дешева електроенергія або потрібна висока маневреність.

Принцип роботи: Електродвигун приводить у дію компресор.

Схема рекуперації: Менша за потужністю, але стабільна.

Типова технологічна схема магістральної компресорної станції включає (рис.1.1): входи трубопроводу → систему підготовки й очистки газу (осушення, відділення конденсату, фільтрація) → ресивер → газоперекачувальні агрегати (ГПА) — газотурбінні або поршнево- / гвинтові з електроприводом → послідовні/паралельні міжступеневі охолоджувачі і післяохолоджувачі (інтеркулери, охолоджувачі мастила) → вихідний трубопровід; допоміжні системи:

паливні траси, лінії промивки/конденсату, система мастила та ущільнення, котельня/опалення, дегазація/флейри, вентиляція та системи автоматики [1-7].

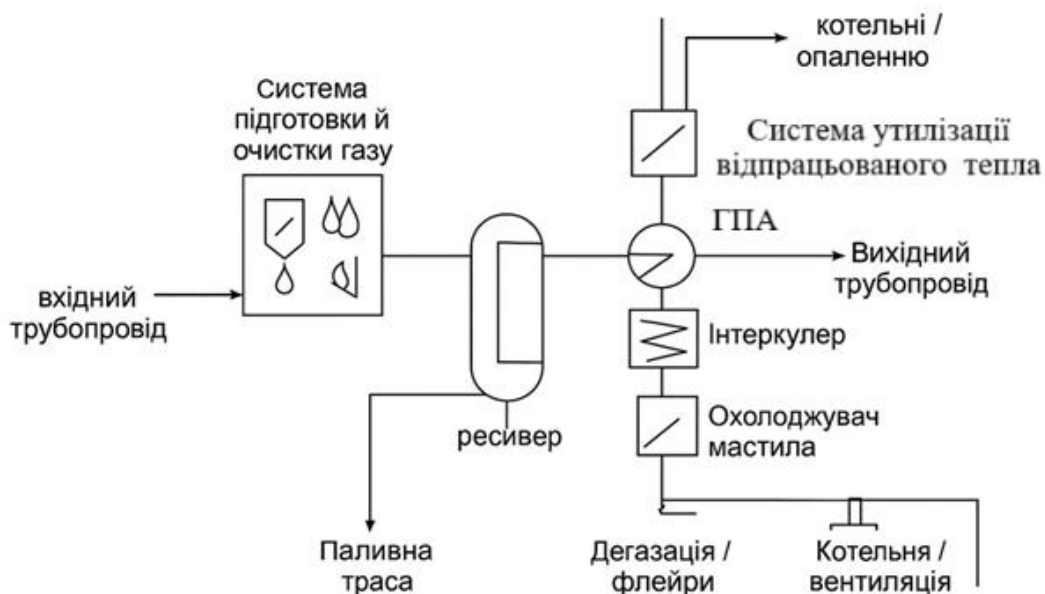


Рис.1.1. Типова технологічна схема компресорної станції

## 1.2. Основні джерела теплових втрат

- 1) Вихлоп газотурбінних приводів – велика частина енергії, що не перетворилась у механічну роботу, виходить із високотемпературним відпрацьованим газом (100–500°C), який зазвичай випускається в атмосферу без повного використання. Це – одне з головних джерел теплових втрат на КС з газотурбінами.
- 2) Теплота в інтеркулерах та післяохолоджувачах – під час ступеневої компресії газ нагрівається; охолоджувачі відводять цю теплоту у повітря або в охолоджувальну воду (тут – потенційний ресурс тепла, якщо його не рекуперувати).
- 3) Охолодження мастила, підшипників та редукторів – мастильні контури і масляні охолоджувачі відводять тепло; при відсутності його збору — це втрати.
- 4) Теплові втрати в обв'язці та трубопроводах (теплоізоляція) – неізольовані ділянки, фланці, арматура і щілини дають конвекційні/радіаційні втрати, особливо в холодний період.

- 5) Системи опалення та вентиляції будівель КС – обігрів котельні, приміщень операторів, електрошаф, інструментальних приміщень. Часто опалення робиться додатковим паливом/електроенергією.
- 6) Флейри та скид газу (випари, purge, blowdown, аварійні випуски) – при технічних операціях і аваріях частина газу спалюється або викидається, що являє собою енергетичну втрату (теплова енергія й загальний ресурс газу).
- 7) Низька ефективність старого обладнання (компресорів і приводів) – застарілі ГПА мають більші внутрішні втрати (помпи, тертя, неповне згоряння в газових двигунах), що призводить до додаткового виділення тепла замість корисної роботи.

### **1.3. Технологічні заходи щодо зниження теплових втрат**

Паливний газ на технологічні потреби (включаючи газ для приводів та допоміжних потреб) – орієнтовно на рівні ~1–3% від транзитного обсягу (типове згадування для українських умов – близько 2% у різних технічних матеріалах). Це включає паливо для газотурбінних приводів, опалення, пусковий газ тощо.

Потенціал теплової рекуперації з вихлопу газотурбіни або інтеркулерів – залежно від типорозміру, може забезпечити значний обсяг низькотемпературного/середньотемпературного тепла, достатній для опалення адміністративних приміщень, підготування теплового носія або для парогенерації на допоміжні потреби. (джерела про потенціал і заходи – аналітичні роботи по енергоефективності).

Практичні заходи щодо зниження теплових втрат [1-7]:

- 1) Впровадження систем рекуперації відпрацьованого газу (WHR – waste heat recovery): тепло з вихлопу газотурбін можна використовувати для котельної, для підігріву технологічної води або для невеликої парової установки/ORC-генератора – повернення частини енергії у корисну роботу. Це найбільш вигідне джерело для КС з газотурбінами.

- 2) Модернізація приводів і заміна ГПА на більш ефективні моделі (або часткова електрифікація приводів там, де є доступ до дешевої/чистої електрики) – підвищує ККД і зменшує теплоутворення.
- 3) Рекуперація тепла з інтеркулерів і охолоджувачів – встановлення теплообмінників, які передають тепло в систему опалення або для технологічних потреб (підігрів конденсату, бойлер).
- 4) Поліпшення теплоізоляції трубопроводів, апаратури і корпусів – швидкий та дешевий захід зі значимим ефектом у холодний період.
- 5) Оптимізація режимів роботи, автоматизація та менеджмент енергії – впровадження SCADA/EMS для оптимального включення/відключення агрегатів, балансування навантаження й мінімізації пусків/зупинок. Це також зменшує непотрібні втрати і флейри.
- 6) Зменшення технологічних скидів і покращення процедур пуску/зупинки – модернізація клапанних схем, використання камер збору/повернення газу замість спалювання.

#### **1.4. Принципи рекуперації тепла з відпрацьованих газів, мастил і систем охолодження компресорних агрегатів**

Дослідження принципів рекуперації тепла з відпрацьованих газів, мастил і систем охолодження компресорних агрегатів має на меті підвищення енергоефективності та зменшення втрат енергії у технологічних процесах.

Нижче наведено детальний опис основних принципів і підходів.

У компресорних агрегатах головними джерелами втрат теплоти є [1-7]:

- Відпрацьовані гази турбіни – мають високу температуру (до 400 – 600 °C) після розширення у газоперекачувальному агрегаті (ГПА).
- Система охолодження мастила – мастило нагрівається під час роботи підшипників і компресора (до 70 – 90 °C).
- Система охолодження повітря (інтеркулер) – охолоджує стиснене повітря, яке після компресора може мати температуру понад 120 – 200 °C.

**Рекуперація** – це процес повернення частини теплової енергії у систему з метою повторного використання, без перетворення її у роботу.

Основні типи рекуперації:

- 1) Повітряна (через теплообмінники газ–повітря): тепло від відпрацьованих газів передається повітрю, що надходить до системи опалення або вентиляції. → Застосовується в котельнях, для підігріву приміщень або технологічного повітря.
- 2) Водяна (через теплообмінники газ–вода): тепло газів або мастила передається воді, яка використовується для гарячого водопостачання або підігріву контурів. → Використовується в системах утилізації відпрацьованого тепла ГПА.
- 3) Масляна (через теплообмінники мастило–вода): нагріте мастило охолоджується через теплообмінник, віддаючи тепло теплоносію (воді або антифризу).  
→ Дозволяє отримати стабільне джерело тепла середньої температури (60–80 °С).

#### **1.4.1. Основні теплообмінні пристрої**

- Рекуператори пластинчастого типу – компактні, ефективні, використовуються для газових потоків.
- Трубчасті теплообмінники – застосовуються для високотемпературних середовищ (газ–вода, газ–повітря).
- Спіральні теплообмінники – для в'язких або забруднених середовищ, зручні у мастильних системах.

#### **1.4.2. Використання рекуперованого тепла**

- Підігрів води для опалення будівель компресорної станції.
- Підтримання температури у системах вентиляції та осушення повітря.
- Попередній підігрів палива або робочого газу перед компресією.

- Використання у системах терморегулювання мастил для зниження навантаження на холодильники.

### **1.4.3. Ефект від застосування рекуперації**

- Підвищення загального ККД установки на 5 – 20%.
- Зменшення витрат палива в котельнях або пальниках на 10–15%.
- Зниження викидів CO<sub>2</sub> і температури відхідних газів у довкілля.
- Покращення умов експлуатації обладнання завдяки стабільнішому тепловому режиму.

### **1.4.4. Приклад для ГПА**

У системі, показаній на схемі (рис.1.1), система утилізації відпрацьованого тепла збирає тепло [8-14]:

- від вихлопних газів турбіни,
- від інтеркулера (охолодження повітря),
- від охолоджувача мастила.

Це тепло через теплообмінники може бути спрямоване до систем опалення, вентиляції або гарячого водопостачання станції.

## **1.5. Аналіз оптимальних точок відбору теплоти у типовій установці**

Розглянемо практичний, інженерно-орієнтований аналіз оптимальних точок відбору теплоти у типовій установці (ГПА + ресивер + інтеркулер + охолоджувач мастила) і варіанти її повторного використання. Для кожної точки – типові температурні рівні, якість енергії (висока / середня / низька), рекомендований спосіб рекуперації, можливі споживачі і кілька важливих зауважень (корозія, керування) [8-14].

### 1.5.1. Перелік оптимальних точок відбору (в порядку пріоритету)

#### А. Вихлопні/відпрацьовані гази ГПА

- Типова температура Т: ~300–600 °С (дуже залежить від агрегату).
- Якість енергії: висока → підходить для генерації пари або прямого теплообміну з високотемпер. контурами.
- Рекомендація по рекуперації: трубчасті/повітряно-водняні теплообмінники або котли-утилізатори (з парогенерацією) → пар 3–10 bar або гаряча вода 150–200 °С; ORC (Organic Rankine Cycle) — для вироблення електроенергії, якщо є постійний великий потік.
- Потенційне використання: виробництво пари для технологічних потреб, опалення великих приміщень, підігрів теплоносія для регенерації осушувачів.
- Зауваження: контролювати кислотну точку роси (конденсація сірчаної кислоти при присутності SO<sub>x</sub>/H<sub>2</sub>S) — потрібні нержавіючі матеріали, попереднє очищення і підтримка температури після теплообміну > кислотна точка або спеціальне нейтралізування конденсату.

#### В. Інтеркулер / aftercooler (охолодження стислого газу)

- Типова Т: 80 – 200 °С на вході, після охолодження 30–80 °С.
- Якість енергії: середня → гаряча вода/теплоносій.
- Рекомендація: пластинчасті або трубчасті теплообмінники газ–вода; вихідна вода ~60–90 °С.
- Потенційне використання: підігрів живильної/вхідної потокової води, опалення, підігрів газу (pre-heat) перед осушенням/адсорбцією.
- Зауваження: ефективно використовувати як джерело для підготовки газу — попереднє підігрівання для дегідратації або підігрів відбору палива.

#### С. Охолоджувач мастила (oil cooler)

- Типова Т мастила: 60–110 °С (вхід) → 40–70 °С (вихід бажано).

- Якість енергії: низько–середня → стабільна гаряча вода після теплообміну.
- Рекомендація: маслотеплообмінник (масло–вода) з подачею води в буферний бак; пластинчасті теплообмінники часто кращі.
- Потенційне використання: підігрів води ГВС або систем опалення (кімнати техперсоналу, локальні приміщення), попередній підігрів води в технологічних контурах.
- Зауваження: мастило може забруднювати теплообмінник — підбір конструкції з легким очищенням і фільтрацією масла.

#### **D. Система охолодження підшипників / корпусні водовідводи (jacket cooling)**

- Типова T: 40–90 °C.
- Якість енергії: низька.
- Рекомендація: акумуляційний бак/буфер + центральне опалення або рекуперація в вентиляції (повітряний рекуператор).
- Потенційне використання: підігрів монтажних приміщень, переднагрів повітря для сушіння, підігрів технічної води.

#### **E. Конденсат з ресивера / тепла в зливі**

- Типова T: близько температури продукту, часто 20–60 °C.
- Якість енергії: низька.
- Рекомендація: використовувати тепло конденсату у теплообміннику для підігріву холодної витратної води; або направляти в рекуперативну схему як передпідігрів.
- Зауваження: конденсат може містити корозійні домішки, необхідна очистка/нейтралізація.

Дані з оптимальними точками відбору теплоти зведені в таблицю 1.1

Таблиця 1.1

Таблиця з оптимальними точками відбору теплоти

№	Точка відбору	Орієнт. T <sub>in</sub> (°C)	Орієнт. T <sub>out</sub> (°C)	ср (kJ/kg·K)	Рекомендований теплообмінник	Можливе використання (повторне)	Основні зауваження
1	Вихлопні / відпрацьовані газы ГПА	300–600	150–250	1.0–1.2	Трубчастий котел-утилізатор або трубчастий газ-вода	Виробництво пари; гаряча вода для опалення/технологій; ORC	Ризик кислотної корозії; потрібна попередня очистка і матеріали стійкі до SO <sub>x</sub> /H <sub>2</sub> S
2	Інтеркулер	120–200 (на вході) / 30–100 (залежно)	40–80	~1.0	Пластинчастий або трубчастий газ-вода (пластинчасті — компактні)	Гаряча вода для опалення; підігрів газу; регенерація осушувачів	Ефективний, але чутливий до забруднень; потрібен фільтр перед теплообмінником
3	Охолоджувач мастила	60–110	40–70	1.8–2.0 (масло)	Пластинчастий масло-вода або трубчастий (для забруднень)	Підігрів ГВС; опалення приміщень; підтримка технологічних контурів	Мастило може забруднювати поверхні — фільтрація мастила та легкий доступ для чистки
4	Охолодження корпусу / підшипників	40–90	30–60	~4.18 (якщо через воду) або для масла ср≈1.8	Пластинчасті теплообмінники, буферний бак	Низькотемпературне опалення; підігрів технічної води; вентиляційні рекуператори	Низька якість енергії — краще через буферні баки; тепло повинно бути агреговано
5	Конденсат ресивера / зливи	20–60	15–40	залежить (вода або суміш)	Маленький пластинчастий або теплообмінник поверхневого типу	Передпідігрів холодної води; локальні опалювальні потреби	Конденсат може містити домішки/кислоти — потрібна очистка/нейтралізація

### 1.5.2. Рекомендовані цільові споживачі (і відповідність температур)

- Висока  $T$  ( $\geq 150$  °C) → генерація пари, технологічні процеси, регенерація адсорберів (використовувати вихлопні гази).
- Середня  $T$  (60–150 °C) → гаряча вода для опалення, процесний теплоносій, попередній підігрів газу, підготовка ГВС.
- Низька  $T$  (30–80 °C) → опалення приміщень, підігрів технологічної води, системи рекуперації вентиляції.

### 1.5.3. Конкретні рекомендації з інженерної реалізації

#### А. Типове теплообмінне рішення (каскадний підхід)

- Перший ступінь (висока  $T$ ) — тепло від вихлопних газів → котел-утилізатор → виробництво пари або вода  $\sim 150$ – $180$  °C. Пар використовують в технології або віддають у теплообмінники нижчого ступеня.
- Другий ступінь (середня  $T$ ) — інтеркулер → вода/теплоносій  $\sim 80$ – $90$  °C → опалення / попередній підігрів газу / підігрів ГВС.
- Третій ступінь (низька  $T$ ) — мастило та корпусні охолоджувачі → вода  $\sim 50$ – $70$  °C → системи опалення низького температурного рівня, буферний бак, підігрів підпалу або попередній підігрів.

#### В. Буферні ємності та гідравлічні розв'язки

Встановити буферні баки для гарячої води/пари — згладжують нерівномірність теплового потоку (періоди завантаження ГПА). Резервні теплоносії, байпасні клапани і насосні групи дозволяють переключати джерела тепла й уникати перевантаження теплообмінників.

### **С. Контроль і автоматика**

Температурні датчики на вході/виході теплообмінників; витратоміри теплоносіїв; контролер для підтримки цільових температур (PID). Логіка: при недостатній тепловіддачі — підключити резервне джерело (котел) або включити насос підмішування. Засоби захисту: контроль конденсату з кислотністю, контроль  $H_2S/SO_x$ .

### **D. Матеріали й експлуатація**

Для вихлопних газів — застосовувати корозійностійкі матеріали (аустенітні сталі) або спеціальні покриття. Забезпечити легкий доступ і чистку теплообмінників (фільтрація перед теплообмінником для газів з частинками). Запобігати утворенню кислотного конденсату — підтримувати температуру газу на виході теплообмінника вище точки роси для агресивних компонентів.

## **1.6. Основні технологічні параметри контролю та керування процесом рекуперації тепла на КС**

Мета контролю є забезпечення стабільного та ефективного відбору теплоти від джерел (вихлопні гази, інтеркулери, охолоджувачі мастила тощо) при підтриманні [8-14]:

- заданих температур технологічних потоків;
- безпечного теплового режиму компресорного агрегату;
- оптимального енергетичного балансу між джерелами та споживачами.

Основні технологічні параметри контролю та керування [8-14] наведені в таблицях 1.2 і 1.3.

## **1.7. Ключові контури автоматичного регулювання**

1. Контур підтримання температури води (ТТ-02, FV-01) → PID-регулятор змінює положення клапана FV-01 залежно від температури гарячої води на виході. Мета: забезпечення стабільної Т теплоносія (наприклад,  $90 \pm 5$  °С).

2. Контур регулювання витрати теплоносія (FT-01, P-01) → частота обертання насоса регулюється для підтримання заданої витрати / тиску. Мета: економія енергії, стабільний тепловий баланс.
3. Контур байпасу вихлопних газів (TT-01, FV-02) → при перевищенні T води чи тиску газу — частина газів обходить теплообмінник. Мета: запобігання перегріву або надлишкового тиску.

Таблиця 1.2

### Основні технологічні параметри контролю процесу рекуперації тепла на КС

№	Параметр	Позначення / датчик	Тип приладу	Типові межі вимірювання	Місце контролю	Призначення
1	Температура вихлопних газів	TT-01	Термопара (тип К або N)	0–800 °C	За компресором (вихлоп)	Контроль ефективності теплообміну, запобігання перегріву
2	Температура води на вході/виході теплообмінника	TT-02 / TT-03	Термопара або термоопір (Pt100)	0–200 °C	Вхід/вихід котла-утилізатора або пластинчастого теплообмінника	Баланс енергії, контроль ΔT
3	Тиск газу в лінії рекуперації	PT-01	Манометр або датчик тиску (0–10 бар)	0–1.6 / 0–10 бар	На виході теплообмінника та перед димарем	Безпека теплообмінника, контроль забруднення (зростання ΔP)
4	Тиск у контурі теплоносія (вода, масло)	PT-02	Перетворювач тиску мембранного типу	0–6 бар	На подачі/звороті теплоносія	Стан насосів і герметичність контуру
5	Витрата теплоносія (вода/масло)	FT-01	Витратомір (турбінний, електромагнітний або ультразвуковий)	0–100 м <sup>3</sup> /год	Після насоса подачі теплоносія	Контроль ефективності рекуперації, розрахунок теплової потужності
6	Рівень у баку-акумуляторі гарячої води	LT-01	Датчик рівня (поплавковий або ультразвуковий)	0–3 м	Буферна ємність	Запобігання "сухому ходу" насосів

Продовження таблиці 1.2

№	Параметр	Позначення / датчик	Тип приладу	Типові межі вимірювання	Місце контролю	Призначення
7	Температура мастила після охолоджувача	ТТ-04	Термопара (0–150 °С)	0–150 °С	Після маслоохолоджувача	Контроль роботи теплообмінника масла–вода
8	Температура газу після інтеркулера	ТТ-05	Термопара (0–250 °С)	0–250 °С	На виході з інтеркулера	Оцінка ефективності охолодження газу
9	Тиск масла у системі змащення	РТ-03	Електроконтактний манометр	0–10 бар	Перед підшипниками	Контроль мастильної системи
10	Витрата споживаного тепла (у споживачів)	FT-02	Витратомір теплоносія + температурні датчики (для розрахунку Q)	–	Вхід у теплообмінник споживача	Енергетичний облік
11	Температура зовнішнього повітря	ТТ-06	Термопара	–40...+60 °С	На вході системи вентиляції	Автоматичне регулювання опалення та рекуперації
12	Тиск у димовій лінії	РТ-04	Манометр диференційного тиску	–1...+1 бар	Перед димарем	Контроль тяги, запобігання зворотній подачі газів
13	Температура гарячої води у контурі споживачів	ТТ-07 / ТТ-08	Pt100 або термопара	0–150 °С	На подачі / звороті системи опалення	Керування циркуляційним и насосами та клапанами

4. Контур контролю  $\Delta P$  у димовій лінії (РТ-01, РТ-04) → сигналізує про забруднення або обмеження проходу. Мета: своєчасне очищення теплообмінника.
5. Контур контролю рівня у баку-акумуляторі (LT-01) → автоматичне вмикання/вимикання насосів, захист від "сухого ходу".

Основні технологічні параметри керування процесом рекуперації тепла на КС наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

**Основні технологічні параметри керування процесом рекуперації  
тепла на КС**

№	Керований елемент	Позначення	Тип / принцип дії	Діапазон регулювання	Функція
1	Регулюючий клапан подачі теплоносія	FV-01	Електропривідний (3-ходовий або 2-ходовий)	0–100 %	Підтримання температури води/пари
2	Клапан байпасу вихлопних газів	FV-02	З сервоприводом	0–100 %	Регулювання кількості газів через котел-утилізатор
3	Насос подачі теплоносія	P-01	Частотне керування (VFD)	30–100 % частоти	Підтримка заданого тиску і витрати
4	Насос рециркуляції мастила	P-02	Частотно-регульований	40–100 %	Підтримання температури мастила
5	Засувки на контурі опалення	ZV-01 / ZV-02	Електропривідні клапани	Вкл./Викл.	Переключення напрямку потоків (зима/літо)
6	Вентилятор охолодження газів	FAN-01	Змінна швидкість	0–100 %	Підтримка $\Delta T$ в інтеркулері
7	Автоматичний димосос або клапан відведення газів	DV-01	Електропривідний	–	Підтримка необхідної тяги
8	Система аварійного скиду тиску	SV-01	Клапан безпеки	Залежно від проекту	Захист від перевищення тиску в контурі
9	Контролер регулювання (PLC)	TC / SC	ПЛК або DCS	–	Реалізація PID-регулювання за T, P, Q

Процес рекуперації тепла на компресорних станціях потребує *комплексного контролю температур, тисків, витрат і рівнів* у всіх теплових контурах.

Основні завдання системи автоматизації:

- підтримка стабільної температури теплоносія та мастила;
- запобігання перегріву теплообмінників і перевищення тиску;
- моніторинг ефективності рекуперації та обліку теплоти;
- інтеграція в систему керування компресорного агрегату (SCADA або PLC).

## Висновки до розділу 1

У ході аналізу технологічних схем компресорних станцій встановлено, що значна частина витраченої енергії переходить у тепло та розсіюється через вихлопні гази газотурбінних приводів, теплообмінне обладнання та елементи трубопровідної обв'язки.

Найбільший тепловий потенціал втрат формують відпрацьовані гази газоперекачувальних агрегатів, що характеризуються високими температурами та придатні для повторного використання шляхом застосування котлів-утилізаторів або низькопотенційних циклів вироблення енергії.

Додатковими стабільними джерелами теплоти є інтеркулери та системи охолодження мастила, які можуть забезпечувати теплову енергію середнього й низького температурного рівня для систем опалення та технологічного підігріву на станції.

Визначено, що ефективність рекуперації тепла істотно підвищується за умови впровадження каскадних схем теплообміну, модернізації обладнання та удосконалення теплоізоляції трубопроводів й апаратів. Ключовим фактором зменшення теплових втрат є інтеграція автоматизованих систем керування (PLC/SCADA) та контурів PID-регулювання, що забезпечують підтримання оптимальних режимів роботи теплообмінних систем, контроль технологічних параметрів і підвищення загальної енергоефективності компресорних станцій .

Рекомендується розробити модель системи рекуперації в MATLAB/Simulink з реалізацією PID-контурів автоматичного регулювання температури, тиску та витрати теплоносія.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛОТИ НА КОМПРЕСОРНІЙ СТАНЦІЇ

Розглянемо однозмінну, придатну для реалізації в MATLAB/Simulink, модульну математичну модель системи рекуперації тепла. Модель інтегрує три основні джерела теплоти (вихлоп газотурбіни, інтеркулер, маслоохолоджувач), теплообмінники, буферну ємність (акумулятор тепла) і контур теплоносія з насосом та регулювальним клапаном. Подано змінні, основні рівняння, опис блоків і рекомендації з параметризації та лінеаризації для синтезу регуляторів.

#### 2.1. Позначення основних змінних

Введемо такі позначення основних змінних величин:

$m_g$  – масовий потік газу через джерело (кг/с)

$T_{g,in}$ ,  $T_{g,out}$  – температура газу на вході/виході джерела (°C або K)

$m_w$  – масовий потік теплоносія (вода/антифриз) у рекуператорі (кг/с)

$T_{w,in}$ ,  $T_{w,out}$  – температура теплоносія на вході/виході рекуператора (°C)

$c_{p,g}$ ,  $c_{p,w}$  – питома теплоємність газу та теплоносія (кДж/(кг·K))

$U$  – загальний коефіцієнт теплопередачі теплообмінника (kW/(m<sup>2</sup>·K))

$A$  – площа теплообміну (m<sup>2</sup>)

$Q$  – тепловий потік, рекуперований теплообмінником (kW)

$V_b$  – об'єм буферного бака (m<sup>3</sup>)

$\rho_w$  – густина теплоносія (кг/m<sup>3</sup>)

$C_b = \rho_w V_b c_{p,w}$  – теплоємність буфера (кДж/K)

$T_b$  – температура буферної ємності (°C)

$Q_{loss}$  – теплові втрати у навколишнє середовище (kW)

$\alpha_v$  – прив'язка позиції регулювального клапана (0...1)

$G(s)$  – передатна функція насоса/клапана при лінеаризації

## 2.2. Модель теплообміну (статична — базова форма)

Для кожного теплообмінника використовуємо підхід NTU/ефективність або загальне співвідношення:

$$Q = UA \cdot \Delta T_{lm}$$

або через ефективність  $\varepsilon$ :

$$Q = \varepsilon \cdot m_g c_{p,g} (T_{g,in} - T_{g,out,ref})$$

$\Delta T_{lm}$  — логарифмічне середнє різниця температур, а  $\varepsilon$  для двопоточних теплообмінників (контр/паралельних) може бути отримана через NTU (Number of Transfer Units) — *число одиниць перенесення тепла*:

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}}$$

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

$$C_i = m_i c_{p,i}$$

Для контрпоточних теплообмінників:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1-C)}}{1 - Ce^{-NTU(1-C)}}$$

Практично в моделі задають  $U \cdot A$  або  $\varepsilon$  як параметр.

## 2.3. Динаміка буферної ємності (енергетичний баланс)

Енергія в баці змінюється за законом:

$$C_b \frac{dT_b}{dt} = Q_{in} - Q_{out} - Q_{loss}$$

де:

$Q_{in}$  — сумарний нагрів від рекуператорів (kW), тобто сума (Q) від джерел;

$Q_{out} = m_{cons} c_{p,w} (T_b - T_{cons})$  — відбір тепла споживачами (опалення, ГВС),

де  $m_{cons}$  — масовий потік до споживачів,  $T_{cons}$  — їх температура;

$Q_{loss} = k_{loss} (T_b - T_{amb})$  — проведені теплові втрати у навколишнє середовище (kW), де  $k_{loss}$  — коефіцієнт втрат,  $T_{amb}$  — температура довкілля.

## 2.4. Динаміка потоку теплоносія

Потік теплоносія через теплообмінник залежить від насоса та положення клапана:

$$m_w = m_{w,nom} \cdot \alpha_v \cdot f_{pump}(u_{pump})$$

Для моделювання динаміки можна використовувати перший порядок для переходу потоку при зміні управління:

$$\tau_f \frac{dm_w}{dt} + m_w = K_f \cdot u$$

де  $u$  – сигнал керування (наприклад, позиція клапана),  $K_f$  – коефіцієнт передачі,  $\tau$  – часовий постійний насос гідравлічної системи.

## 2.5. Рівняння для кожного джерела (зведено)

Для джерела  $i$  (вихлоп, інтеркулер, маслоохолоджувач):

$$Q_i = \varepsilon_i (NTU_i, C_i) \cdot m_{g,i} \cdot c_{p,g,i} (T_{g,in,i} - T_{g,out,i})$$

або, при використанні UA:

$$Q_i = (U \cdot A)_i \cdot F_i (T_{g,in,i}, T_{w,in})$$

де  $F_i$  – функція перетворення температур у логарифмічну різницю температур.

Сумарний тепловий потік у буфер:

$$Q_{in} = \sum_i Q_i$$

## 2.6. Контури керування (алгоритм)

- Основний регульований параметр:  $T_b$  (температура в буфері) або температура на подачі систем опалення  $T_{supply}$ .

- Виконавчі механізми: положення регулювального клапана  $\alpha_v$  (регулює витрату теплоносія через теплообмінник), частота обертання насоса (VFD) – для підтримання витрати.
- Тип контролера: PID (звичайний контур), можлива каскадна схема: внутрішній контур – витрата  $m_w$  (швидкий), зовнішній –  $T_b$  (повільний).
- Логіка захисту: при  $T_{g,in} >$  допустимих меж – байпас теплообмінника; контроль  $\Delta P$  для виявлення забруднення; сигнал аварійного скидання.

Контролер у часовій області:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

де  $e(t) = T_{b,set} - T_b(t)$ .

## 2.7. Лінеаризація та передатні функції

Для синтезу системи автоматичного керування процесом рекуперації тепла необхідно отримати лінійну математичну модель об'єкта в околі робочої точки. Оскільки реальний процес теплообміну на компресорній станції є нелінійним, має теплову інерційність і запізнення, виконується *лінеаризація* — тобто заміна нелінійної моделі на лінійну апроксимацію, справедливу для малого інтервалу зміни параметрів навколо встановленого режиму. У рамках цього підходу зміну керуючого сигналу  $u(t)$  (положення регулювального клапана або керуюча дія насоса) розглядають як мале відхилення від робочої точки, а реакцію системи оцінюють через зміну температури буферної ємності  $T_b(t)$ .

Динаміка переходу від керуючого впливу  $u(t)$  до температури теплоносія в буфері може бути описана передатною функцією у вигляді системи першого або другого порядку з транспортним запізненням:

$$G_{T_b,u}(s) = \frac{K_{sys}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} e^{-T_d s}$$

де:

$G_{T_b,u}(s)$  – передатна функція об'єкта: «положення клапана  $\rightarrow$  температура в буферній ємності»;

$K_{sys}$  – статичний коефіцієнт підсилення системи, що визначає вплив зміни керуючого сигналу на температуру;

$\tau_1, \tau_2$  – часові сталі елементів системи, які відображають теплову інерцію теплообмінників і ємності;

$T_d$  – запізнення, зумовлене часом проходження теплоносія через контур і теплоаккумулятор;

$e^{-T_d s}$  – транспортне запізнення, описане в просторі Лапласа.

Статичний коефіцієнт  $K_{sys}$  отримуємо експериментально як відношення зміни усталеної температури до зміни положення клапана. Часові сталі  $\tau_1$  та  $\tau_2$  відображають теплову інерційність системи та визначаються за перехідною характеристикою або методом ідентифікації. Запізнення  $T_d$  характеризує проміжок часу між зміною керуючого сигналу та початком реакції системи.

Застосування цієї передатної функції дає можливість виконати аналіз динаміки системи, налаштувати PID-регулятор, а також перевірити стійкість і якість регулювання за стандартними критеріями частотного аналізу (Bode, Nyquist). Частотні характеристики зображені на рис.2.2. і 2.3.

## 2.8. Ідентифікація за експериментальними даними

Проводимо експеримент: у робочий момент  $t = 0$  змінюємо керуючий сигнал  $u$  на невеликий крок (одиничний стрибкоподібний сигнал)  $\Delta u$  (5 – 10% ходу клапана), і записуємо часовий ряд  $T_b(t)$ .

З виміряних значень (відгуку на одиничний стрибкоподібний сигнал) визначаємо:

- статичне встановлене зміщення  $\Delta T_b(\infty) \rightarrow K_{sys} = \Delta T_b(\infty) / \Delta u$ ;
- запізнення  $T_d$  – час до початку помітного зростання  $T_b$  (наприклад, 0 – 5% від  $\Delta T_b(\infty)$ );

- часова постійна  $\tau$  – методом 63% (перший порядок) або підбором двох часових постійних для другого порядку.

Якщо процес ліпше апроксимується FOPDT (first order plus dead time), то оцінюємо  $\tau \approx t_{63} - T_d$ . Для моделі другого порядку підбираємо  $\tau_1, \tau_2$  по формі відгуку або застосовуємо ідентифікацію (tfest).

Перевіряємо модель, порівнявши модельну та експериментальну криві; за потреби – скоригуємо параметри.

У нашому випадку:

- Робоча точка:  $u_0$  – 40% ходу клапана;
- Крок:  $\Delta u = +0,1$  (тобто +10% ходу);
- Вимірне усталене значення температури:  $\Delta T_b(\infty) = 2,0$  °C.
- Спостереження відгуку  $T_b(t)$  дає: запізнення  $\approx 60$  с, значення в 63% від усталеного  $\Delta T_b(\infty)$  досягнуте в  $t_{63} = 360$  с. Форма відгуку показує «плавну» S – подібну характеристику другого порядку (Рис.2.1).

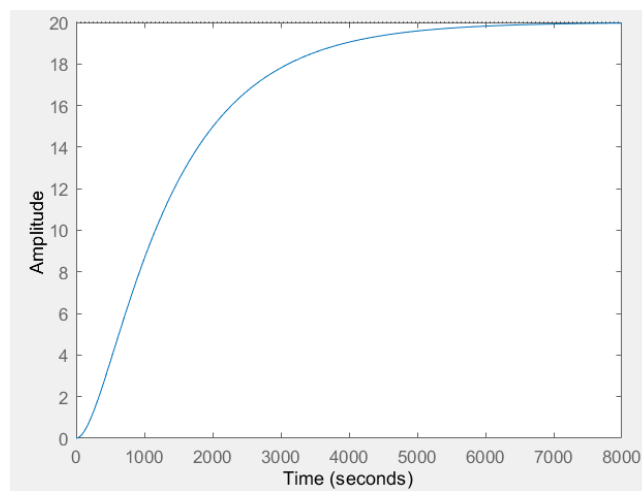


Рис.2.1. Експериментальна розгінна характеристика

Визначаємо:

- 1) Статичний коефіцієнт (пропорційності / підсилення):

$$K_{sys} = \frac{\Delta T_b(\infty)}{\Delta u} = \frac{2,0}{0,1} = 20 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{од. сигналу}}$$

- 2) Час запізнення:

$$T_d \approx 60 \text{ с.}$$

3) Якщо апроксимуємо першим порядком, то:

$$\tau \approx t_{63} - T_d = 360 - 60 = 300 \text{ с.}$$

Тоді:

$$G_{Tb,u}(s) \approx \frac{20}{(300s + 1)} e^{-60s}.$$

4) Апроксимація передавальною функцією другого порядку (за формою розгінної характеристики): на основі розгінної характеристики вибираємо  $\tau_I = 300 \text{ с}$ ,  $\tau_I = 1200 \text{ с}$ . Тоді

$$G_{Tb,u}(s) \approx \frac{20}{(300s + 1)(1200s + 1)} e^{-60s} \quad (2.1)$$

Будуємо частотні характеристики (АЧХ, ФЧХ) в MATLAB за отриманою передавальною функцією (2.1).

```
>> w=tf([20],[360000 1500 1],'inputdelay',60)

w =

                20
exp(-60*s) * ----
          360000 s^2 + 1500 s + 1

Continuous-time transfer function.
```

АЧХ і ФЧХ зображені на рис.2.2.

```
>> bode(w)
```

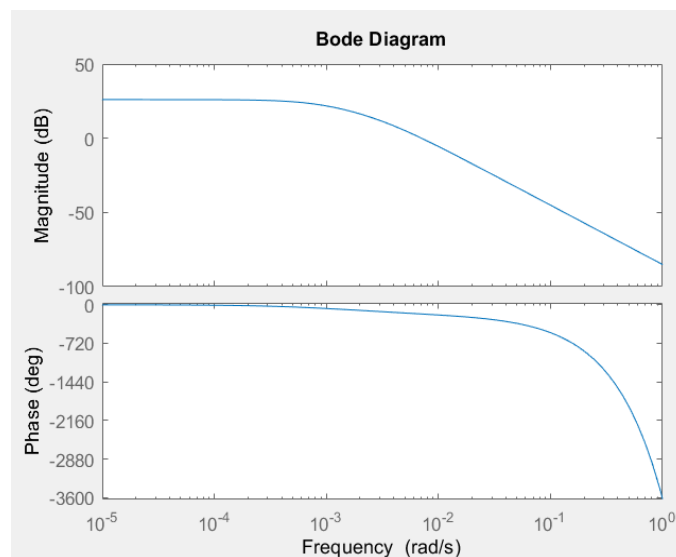


Рис. 2.2. Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) і фазо-частотна характеристика (ФЧХ)

Аналіз Bode-діаграми показав, що система має високий коефіцієнт підсилення на низьких частотах, що свідчить про її чутливість до повільних змін керуючого сигналу. Із зростанням частоти амплітудна характеристика спадає з нахилом  $-40$  dB/град., що відповідає системі другого порядку та підтверджує наявність значної теплової інерційності. Фазова характеристика демонструє поступове збільшення фазового запізнення, однак у робочому частотному діапазоні система має достатній запас стійкості. Отже, об'єкт є інерційним, стійким та придатним для ефективного PID-керування.

Командою `nyquist` будемо амплітудно-фазову характеристику (Рис.2.3):

```
>> nyquist(w)
```

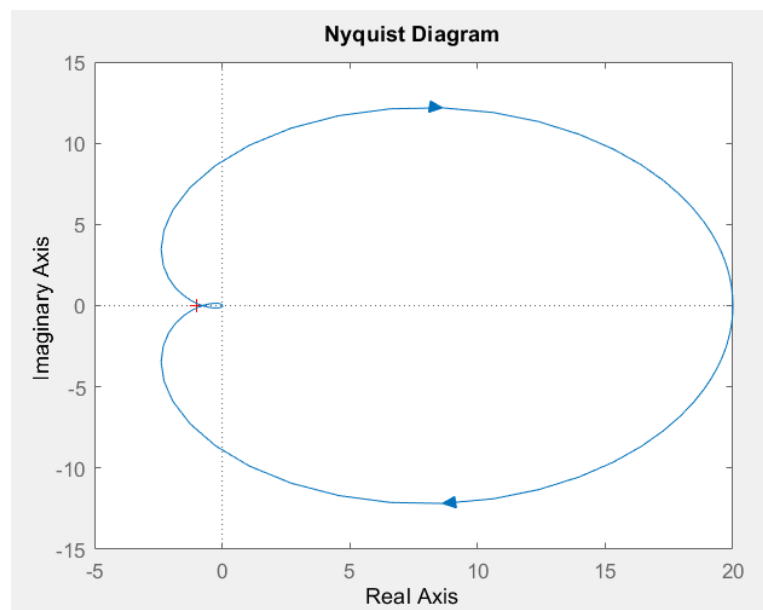


Рис.2.3. Амплітудно-фазова характеристика (АФХ)

Nyquist-діаграма відображає, як розімкнений контур системи реагує на гармонічні сигнали різних частот. Крива демонструє залежність комплексного коефіцієнта передачі  $G(j\omega)$  від частоти.

На основі Nyquist-діаграми визначено, що крива розімкненої системи не охоплює критичну точку  $(-1+j0)$ , що підтверджує стійкість об'єкта в замкненому контурі згідно з критерієм Найквіста. Геометрія кривої свідчить про відсутність коливальних динамічних компонентів та наявність значного запасу стійкості, що дозволяє ефективно застосувати PID-регулятор для керування температурою

теплоносія. Таким чином, система рекуперації тепла є стійкою і придатною для автоматизації.

Командою `ltiview` вибираємо вікна з іншими динамічними характеристиками (Рис.2.4):

```
>> ltiview(w)
```

На зображенні (рис. 2.4) показані чотири типи характеристик лінійної динамічної моделі системи рекуперації тепла, отриманої після лінеаризації процесу.

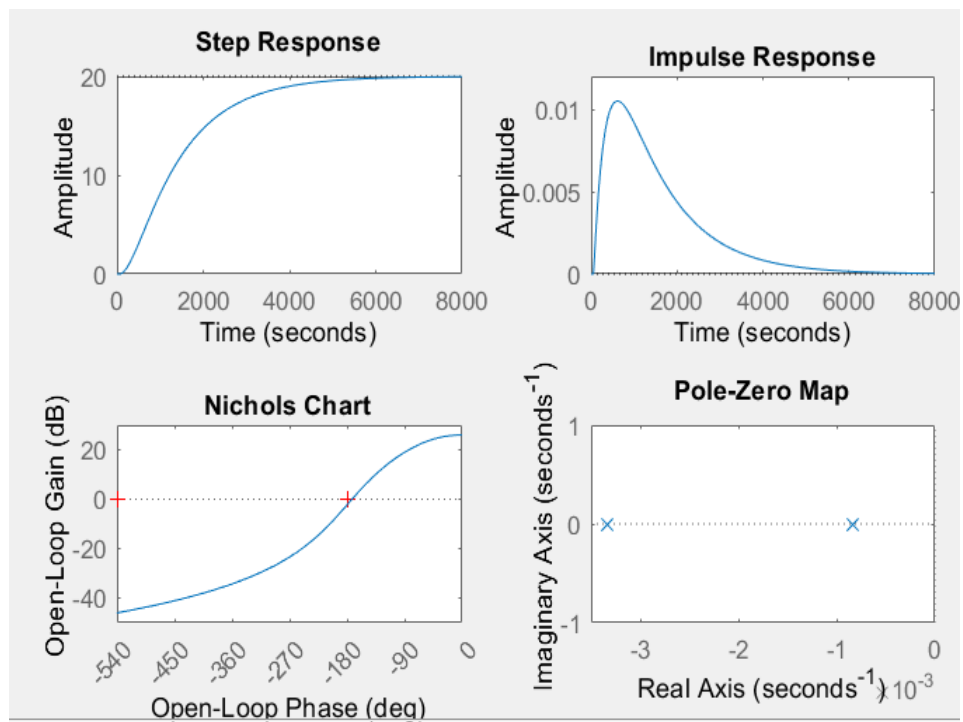


Рис.2.4. Характеристики лінійної динамічної моделі

1) Step Response (Перехідна характеристика) – верхній лівий графік:

- Показує реакцію температури  $T_b$  на конкретну зміну керуючого сигналу (ступінчатий вплив).
- Крива має плавний, повільний характер наростання, що свідчить про значну теплову інерційність системи.
- Час до встановлення нового режиму – приблизно 7000–8000 секунд.
- Відсутні коливання → система є аперіодичною і стійкою.

Висновок: система повільна, але стабільна – цілком типовий результат для теплообмінних процесів.

2) Impulse Response (Імпульсна характеристика) – верхній правий графік:

- Показує реакцію системи на короткочасний імпульсний вплив (аналог "миттєвого відкриття клапана").
- Форма кривої – різке зростання і повільне спадання до нуля.
- Це підтверджує, що система акумулює енергію (тепло) і розсіює її із часом.

Висновок: система поводить як інтегруючий акумулюючий елемент (теплоакумулятор).

3) Nichols Chart (Характеристика Ніколса) – нижній лівий графік:

- Відображає частотні властивості відкритої системи.
- Крива знаходиться вище точки  $-180^\circ$  та має позитивний запас по підсиленню.
- Це означає, що система стійка в розімкненому стані і має значний запас стійкості.

Висновок: система добре піддається керуванню PID-регулятором та не має ризику самозбудження.

4) Pole–Zero Map (Карта полюсів і нулів) — нижній правий графік:

- Показує положення полюсів передатної функції в комплексній площині.
- Обидва полюси знаходяться в лівій півплощині (з від'ємною реальною частиною).
- Нулів немає (що відповідає моделі другого порядку без нулів).

Висновок: система гарантовано стійка, не має осциляційного характеру.

На основі наведених характеристик можна зробити узагальнення: модель рекуперації тепла є стійкою, аперіодичною, повільною системою другого порядку з транспортним запізненням, що має великий запас стійкості та добре піддається регулюванню PID-керуванням.

Для визначення динамічної моделі було проведено ступінчастий вплив на керуючий сигнал (положення клапана). За реакцією температури було ідентифіковано параметри передатної функції другого порядку з транспортним

запізненням. Отримана модель адекватно відображає інерційність теплообмінного процесу і може бути використана для синтезу регулятора.

## **Висновки до розділу 2**

У цьому розділі побудовано математичну модель процесу рекуперації тепла на компресорній станції, яка описує основні фізичні залежності між теплопродуктивністю джерел теплоти, роботою теплообмінників та зміною температури теплоносія в буферній ємності. На основі енергетичного балансу сформовано систему рівнянь, що враховує теплові втрати, інерційність теплоносія та вплив витрати через регулювальний клапан і насос.

Для спрощення подальшого синтезу системи керування здійснено лінеаризацію моделі навколо робочої точки та отримано передатну функцію об'єкта у вигляді системи другого порядку з транспортним запізненням. Ідентифікація параметрів була виконана на основі реакції температури на ступінчасту зміну керуючого сигналу. Встановлено, що система характеризується значною тепловою інерційністю, має повільну аперіодичну динаміку, відсутність коливань і великий запас стійкості.

Аналіз частотних характеристик (АЧХ, ФЧХ, Nyquist, Nichols) підтвердив, що об'єкт стабільний у розімкненому стані та структурно придатний для застосування PID-регулятора. Дослідження розгінної, імпульсної та частотних характеристик показало, що рекупераційний контур функціонує як система акумулювання енергії, чутлива до повільних змін керуючого впливу.

Таким чином, математична модель адекватно відображає фізичні процеси рекуперації тепла, забезпечує можливість аналізу динаміки системи та створює необхідні передумови для подальшого синтезу ефективної системи автоматичного керування у наступному розділі.

## РОЗДІЛ 3

### СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛА НА КС

#### 3.1. Загальні положення синтезу системи керування

Процес роботи компресорної станції супроводжується інтенсивним виділенням тепла під час стиснення природного газу. У традиційних системах тепло відводиться в навколишнє середовище через повітряні або водяні охолоджувачі, що призводить до значних енергетичних втрат. Технологія рекуперації тепла дозволяє передавати це тепло теплоносію (вода/гліколь), який може бути використаний для:

- підігріву газу перед подальшим редукуванням;
- забезпечення теплових потреб об'єктів КС;
- живлення низькотемпературних ORC-установок (від англ. Organic Rankine Cycle — органічний цикл Ренкіна) для вироблення електроенергії.

Таким чином, впровадження системи автоматичного керування контуром рекуперації тепла забезпечує зменшення енерговитрат, оптимізацію роботи компресорного обладнання та підвищення енергоефективності станції.

#### 3.2. Об'єкт керування та вибір регульованих параметрів

У результаті аналізу технологічної схеми рекуперації тепла (див. розділ 1 і 2) встановлено, що ключовою величиною, яка безпосередньо визначає ефективність процесу теплоутилізації, є температура теплоносія в буферній ємності  $T_b$  або температура на виході рекупераційного теплообмінника  $T_{w,out}$ . На модельному рівні ця змінна визначає кількість накопиченої теплоти у буфері станції та теплову енергію, яку можна ефективно передати до споживачів або інших систем технології.

Основними керуючими впливами є:

- положення регулювального клапана  $\alpha_v$ ;
- частота обертання циркуляційного насоса (керування витратою теплоносія).

Отже, обрано таку логіку керування:

- внутрішній контур: регулювання витрати  $m_w$  ;
- зовнішній контур: регулювання температури  $T_b$  .

Математична модель та її лінеаризація процесу рекуперації тепла розроблена в розділі 2.

### 3.3. Структурна схема САУ технологічним процесом рекуперації тепла на КС

На рис.3.1 показано спрощену структурну схему системи автоматичного управління технологічним процесом рекуперації тепла на компресорній станції (КС).

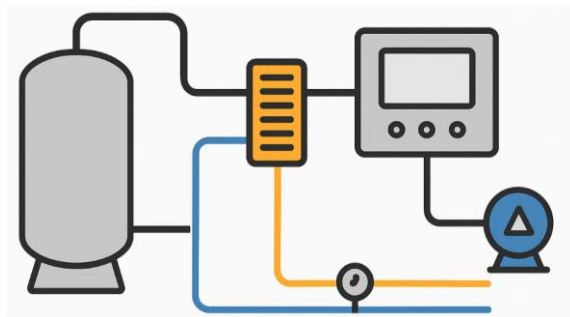


Рис.3.1. Спрощена структурна схема САУ технологічним процесом рекуперації тепла на КС

Основні елементи та функції САУ:

1) Теплогенеруючий агрегат (зліва). Сірий вертикальний елемент — це джерело тепла, наприклад, вихлопні гази газоперекачувального агрегату (ГПА) або теплообмінна камера. Звідси відбирається вторинне (утилізоване) тепло, яке використовується далі у системі.

2) Теплообмінник (у центрі). Помаранчевий прямокутник – рекуператор тепла. У ньому відбувається передача тепла від гарячого потоку (вихлопних газів,

мастил, охолоджувальної рідини тощо) до теплоносія (робочого середовища). Це ключовий елемент процесу рекуперації.

3) Насос (праворуч унизу). Синій елемент із трикутником – циркуляційний насос, який забезпечує рух теплоносія у контурі. Він працює за сигналами системи автоматичного управління, підтримуючи необхідний тиск і витрату рідини.

4) Датчик (у нижній частині). Коло з покажчиком – це датчик температури або тиску, який передає сигнали в систему управління. Дані з нього використовуються для контролю стану процесу рекуперації.

5) Контролер (панель управління). Сірий блок праворуч – автоматизована система управління (АСУ). Вона отримує інформацію від датчиків, аналізує її та керує насосом, клапанами чи іншими виконавчими механізмами для оптимізації процесу теплообміну. Контролер може також реєструвати дані, забезпечувати дистанційне спостереження та аварійні сигнали.

б) Трубопроводи:

- Жовта лінія — гарячий контур (рух нагрітого теплоносія);
- Синя лінія — холодний або зворотний контур (після віддачі тепла).

Рух теплоносія відбувається по замкнутому колу: *джерело тепла → теплообмінник → насос → споживач або зворот → теплообмінник*.

Загальний принцип роботи:

- Відпрацьоване тепло від компресора або двигуна подається в рекуператор.
- У теплообміннику нагрівається теплоносій.
- Контролер отримує дані від датчиків і регулює роботу насоса для підтримання заданих параметрів (температури, тиску, витрати).
- Теплоносій може бути використаний для підігріву повітря, технологічних рідин або виробництва електроенергії (наприклад, через ORC-установку).

7) Функції автоматичного керування

- Регулювання температури теплоносія у заданих межах;
- Підтримання оптимального тиску у системі;
- Автоматичне вмикання/вимикання насоса залежно від навантаження;
- Контроль витрати теплоносія через теплообмінник;

- Захист обладнання від перегріву, гідроудару та сухого ходу насоса;
- Відображення параметрів на екрані оператора (НМІ).

Таким чином САУ процесом рекуперації тепла на КС є невід’ємною частиною сучасного енергозберігаючого комплексу. Вона забезпечує раціональне використання вторинних енергоресурсів, автоматичне підтримання оптимальних параметрів теплообміну та підвищує загальну ефективність роботи компресорної станції. Впровадження таких систем сприяє зменшенню експлуатаційних витрат, підвищенню екологічної безпеки та відповідає вимогам енергетичної стратегії України щодо сталого розвитку.

### 3.3.1.Схемно-логічна діаграма

Діаграма (рис.3.2) є модульним поданням замкненої системи автоматичного керування температурним режимом у контурі рекуперації тепла. Вона структурно повторює блоки, характерні для моделювання в MATLAB/Simulink.

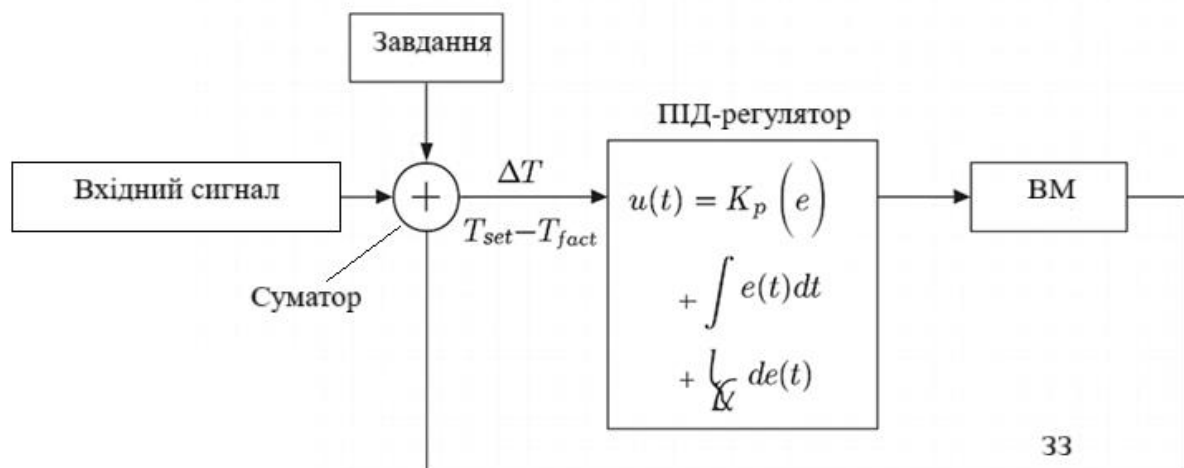


Рис.3.2.Схемно-логічна діаграма

Опис схемно-логічної діаграми (у стилі Simulink)

1) Вхідний сигнал. Це значення заданої температури теплоносія (наприклад, 60 °С). Вводиться оператором або визначається автоматично залежно від режиму роботи компресорної станції.

2) Порівнюючий блок (Суматор). Виконує порівняння заданого значення з вимірною температурою. Формує сигнал похибки ( $\text{Error} = T_{\text{set}} - T_{\text{measured}}$ ). Саме величина похибки визначає, чи потрібно підвищувати або знижувати подачу теплоносія.

3) PID-регулятор. Основний керуючий елемент. Використовує пропорційну, інтегральну та диференціальну складову для розрахунку керуючого впливу. Забезпечує:

- швидку реакцію на зміни,
- відсутність перерегулювання,
- мінімізацію усталених відхилень.

4) Виконавчий механізм (ВМ). В реальному процесі це керований електропривод регулюючого клапана або частотний перетворювач циркуляційного насоса. Приймає сигнал з PID-регулятора і перетворює його у фізичний вплив на систему:

- відкриває/закриває клапан,
- змінює подачу теплоносія.

5) Об'єкт управління (вхідний сигнал). Технологічний контур рекуперації тепла де відбувається теплообмін між гарячим середовищем (наприклад, охолоджуваний природний газ або елементи компресора) та теплоносієм.

6) Датчик температури. Вимірює фактичну температуру теплоносія на виході з теплообмінника та перетворює вимірну величину у сигнал, який повертається в систему керування.

7) Контур зворотного зв'язку (ЗЗ). Він забезпечує замкнутість системи та передає сигнал від датчика до PID-регулятора для обчислення похибки.

### 3.4. Синтез ПІД-регулятора

ПІД-регулятор має вигляд:

$$G_{PID}(s) = K_p + K_i/s + K_d s$$

Параметри  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  визначено методом ІМС (Internal Model Control), який забезпечує:

- відсутність перерегулювання;
- стабільність при збуреннях;
- оптимальний час перехідного процесу.

Для сезонних змін навантаження допускається адаптивна модифікація ПД, де коефіцієнти регулятора змінюються від поточної витрати теплоносія.

Нами створено робочу модель рекуперації тепла на КС в Simulink (каскадна структура: зовнішній контур – температура, внутрішній – витрата/клапан), з джерелами збурень, вимірюваннями, Scope- і To Workspace-логуванням (Рис.3.3).

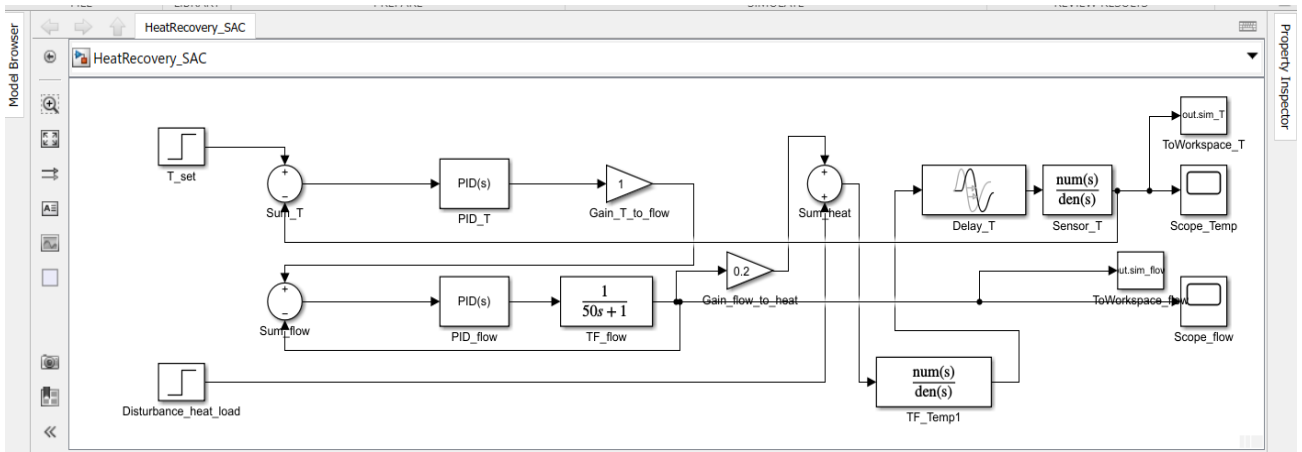


Рис.3.3. Скрін-шот вікна MATLAB/SIMULSNK – робоча модель САК

Фрагмент скрипту, який створює в Simulink робочу модель САК наведений нижче. Скрипт використовує тільки стандартні Simulink-блоки. Ввесь скрипт наведений в додатку Б.

```

%% build_heat_recovery_SAC.m
% Побудова Simulink-моделі: САК рекуперації тепла (каскадна
структура)
% Автор: (твоє ім'я)
% Результат: HeatRecovery_SAC.slx

close all; bdclose('all'); clc;

model = 'HeatRecovery_SAC';
if exist([model '.slx'],'file')
    try
        delete([model '.slx']);
    end
end

```

```

catch
end
end

.....

% TF_flow -> Scope_flow and ToWorkspace_flow
add_line(model, 'TF_flow/1', 'Scope_flow/1', 'autorouting', 'on');
add_line(model, 'TF_flow/1', 'ToWorkspace_flow/1', 'autorouting', '
on');

%% --- Параметри симуляції
set_param(model, 'Solver', 'ode45', 'StopTime', '600', 'MaxStep', '0.
5');

```

Пояснення до моделі зображеної на рис.3.3.

Зовнішній контур (PID\_T) регулює температуру. Вихід зовнішнього PID (помножений Gain\_T\_to\_flow) задає установку витрати/клапана для внутрішнього контуру.

Внутрішній контур (PID\_flow) підтримує витрату/позицію клапана – швидший контур, з меншою сталою часу ( $\tau_{flow} = 50$  s).

TF\_Temp1 – модель температурної динаміки:

$$G_{Tb,u}(s) \approx \frac{0.20}{(300s + 1)(1200s + 1)}$$

Delay\_T – відтворює технологічне запізнення ( $T_d = 60$  s).

Disturbance\_heat\_load – ступінчасте збурення (наприклад, раптова додаткова витрата відбору теплоти).

Sensor\_T – невеличка фільтрація сигналу від датчика.

Scope і To Workspace – для перегляду та збереження результатів симуляції (рис.3.3).

На рис.3.5 наведено результати моделювання роботи системи автоматичного керування процесом рекуперації тепла, побудованої в середовищі MATLAB/Simulink. Графік Scope\_Temp (ліворуч) відображає зміну температури теплоносія у буферній ємності, а Scope\_flow (праворуч) – реакцію витрати теплоносія у внутрішньому контурі на сигнал керування від регулятора.

На графіку (Scope\_Temp) видно, що температура зростає плавно і монотонно, що підтверджує аперіодичний характер об'єкта з великою тепловою інерційністю. Немає різких стрибків чи коливань – регулятор формує плавне керування, що узгоджується з динамікою теплообмінних процесів. Температура наближається до нового встановленого значення з повільним наростанням, що відповідає структурі моделі об'єкта (два послідовно з'єднані аперіодичні елементи з запізненням).

Такий характер перехідного процесу є фізично обґрунтованим, адже для нагріву теплоносія в буферній ємності потрібен час, пов'язаний із теплоємністю та теплопередачею.

Графік витрати теплоносія (Scope\_flow) демонструє:

- різке зростання на початку моделювання;
- швидке досягнення певного сталого значення;
- подальше плавне зростання витрати з часом відповідно до зміни завдання зовнішнього контуру.

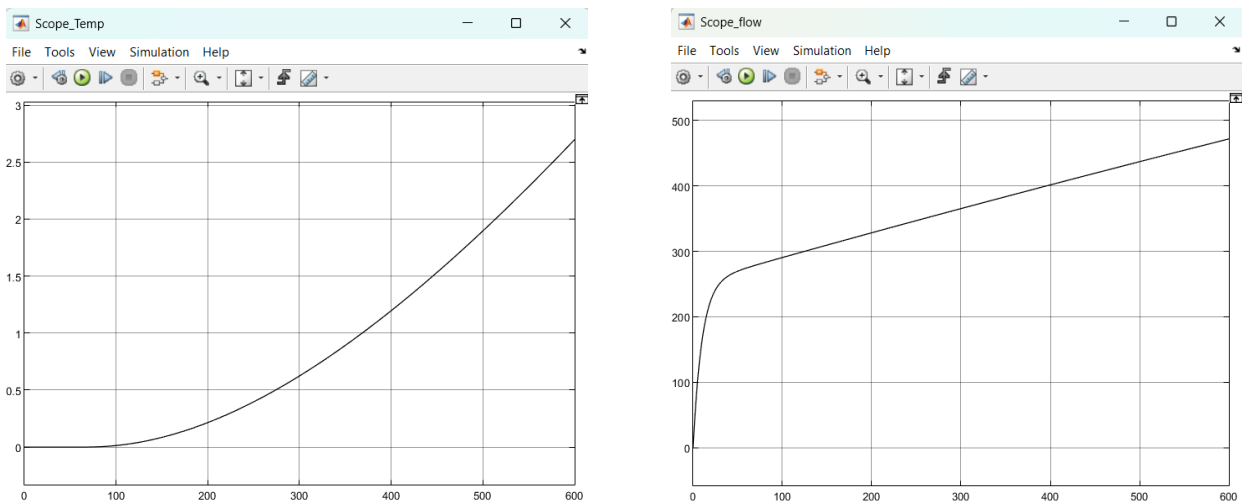


Рис. 3.5. Результати симуляції

Це підтверджує правильність роботи каскадної структури керування:

- внутрішній контур (PID-регулятор витрати) є швидким;
- зовнішній контур (PID-регулятор температури) – повільний і не впливає на стабільність внутрішнього.

Внутрішній PID забезпечує швидку реакцію виконавчого механізму (клапана або насоса), що видно із різкого початкового стрибка витрати. Далі зовнішній PID

повільно змінює встановлене значення витрати відповідно до помилки за температурою.

Висновки за результатами моделювання:

- 1) Система є стабільною, коливань та перерегулювань не спостерігається.
- 2) Перехідний процес у контурі температури є *aperiodичним*, що характерно для теплообмінних процесів.
- 3) Каскадна система керування забезпечує швидку реакцію внутрішнього контуру та повільне, але точне регулювання зовнішнього контуру.
- 4) Отримані графіки підтверджують правильність синтезу регуляторів і працездатність моделі.

### **3.5. Аналіз стійкості та визначення показників якості регулювання**

#### **3.5.1. Аналіз стійкості**

1) Аналіз у частотній області: для лінійної моделі другого порядку з транспортним запізнюванням побудовано Bode/Nyquist-діаграми; у роботі вказано, що Nyquist-крива не огинає критичну точку  $-1 + j0$ , отже об'єкт у розімкненому вигляді не має загальних передумов до автоколивань і є структурно стійким для замкненого PID-керування.

2) Запас стійкості: через велику інерційність (довгі часові сталі) і відносно невелике фазове запізнення на робочих частотах, система має достатній запас по фазі і підсиленню для типових PI/PID-регуляторів; проте саме транспортне запізнення (60 с) обмежує швидкість регулювання – занадто агресивні налаштування призведуть до погіршення запасів.

Висновок: об'єкт стійкий і придатний для PID-регулювання, але потрібно враховувати великий  $L/\tau$  (невелика частина запізнення відносно  $\tau$  –  $L/\tau = 0.2$ ) при налаштуванні – для безпечної роботи краще вибирати консервативніше налаштування (триваліше відгук-час).

### 3.5.2. Показники якості регулювання процесу

Розглянемо стандартний набір метрик, які потрібно визначати для оцінки роботи регулятора при ступінчатих та траєкторних впливах:

Часові характеристики (зі ступінчатого відгуку):

- $t_r$  – час наростання (від 10% до 90% або 0 –100%), с;
- $t_s$  – час встановлення (поправка: за критерієм 2% або 5%), с;
- $M_p$  – відсоткове перерегулювання, %;
- $e_{ss}$  – статична похибка (°C або відносно встановленої величини).

Інтегральні показники якості:

- $IAE = \int |e(t)| dt$  (інтеграл модуля помилки) – чутливий до тривалості помилки;
- $ISE = \int |e(t)|^2 dt$  (інтеграл квадрата) – згладжує великі піки;
- $ITAE = \int t|e(t)| dt$  – зосереджується на пізній помилці (часто дає привабливі переходи).

Очікувана якість системи керування при отриманих (наших) налаштуваннях:

- Статична похибка по температурі –  $\approx 0$  (PI забезпечує нульове усталене відхилення для сталих збурень).
- Час встановлення  $t_s$  орієнтовно  $\sim 4\lambda \approx 400$ ;  $\lambda = \max(T, \tau/3)$
- Час наростання  $t_r \approx (0.8-2) \cdot \lambda \rightarrow \sim 180 \dots 200$  с.
- Перерегулювання  $M_p$  – низьке (10%) при такому консервативному  $\lambda$ ; якщо потрібно прискорити систему —  $\lambda$  зменшуємо, але при цьому зменшується запас стійкості.

### Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано синтез системи автоматичного управління контуром рекуперації тепла на компресорній станції та обґрунтовано вибір структури та алгоритмів регулювання. На основі аналізу технологічних параметрів визначено, що ключовим керованим параметром є температура теплоносія, а швидкодіючою координатою впливу — витрата теплоносія (або положення

регулювального клапана). Розроблено структурну схему САК та здійснено побудову її схемно-логічного представлення у стилі Simulink, що дало можливість формалізувати процес перетворення сигналів у системі: від задання температури до зміни керуючого впливу на виконавчий механізм.

На основі математичної моделі об'єкта та результатів лінеаризації синтезовано ПД-регулятор з використанням методології ІМС (Internal Model Control), що забезпечило оптимальний компроміс між швидкодією та стійкістю системи при наявності значної теплової інерційності та транспортного запізнення. Проведене моделювання у MATLAB/Simulink підтвердило працездатність запропонованої каскадної структури керування: внутрішній контур швидко стабілізує витрату теплоносія, тоді як зовнішній — плавно регулює температуру без перерегулювання та коливань. Аналіз перехідних характеристик показав аперіодичний характер процесу, відсутність автоколивань та нульову статичну похибку по температурі.

Таким чином, синтезована система автоматичного управління забезпечує енергоефективну та стабільну роботу процесу теплоутилізації на компресорній станції, підвищує ефективність використання вторинної теплової енергії та створює передумови для подальшої інтеграції теплових рекупераційних технологій у загальну систему енергетичного менеджменту компресорних станцій.

## РОЗДІЛ 4

### РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НА БАЗІ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО КОНТРОЛЕРА

#### 4.1. Вибір апаратного забезпечення (ПЛК, датчики, виконавчі механізми)

Проектування системи автоматичного керування процесом рекуперації тепла потребує вибору надійного комплексу обладнання, який забезпечує вимірювання параметрів, їх обробку, формування та реалізацію керуючих дій. До складу апаратного забезпечення входять: програмований логічний контролер (ПЛК), система первинних вимірювальних перетворювачів (датчики) та виконавчі механізми.

##### 4.1.1. Програмований логічний контролер

Для реалізації алгоритму автоматичного регулювання обрано ПЛК ОВЕН ПЛК110-60.TR, який належить до середнього рівня промислових контролерів і має розширені комунікаційні можливості.

Контролер забезпечує виконання алгоритму регулювання температури теплоносія, формує сигнали керування насосом і регулюючим клапаном, а також передає інформацію до SCADA-системи.

Перевагами ПЛК є компактність, енергоефективність, вбудовані ПД-регулятори та гнучка інтеграція в промислові мережі.

Технічні характеристики ПЛК110-60.TR наведені в таблиці 4.1.

На рис.4.1 зображена функціональна схема вибраного контролера, який використовується для автоматизації технологічного процесу рекуперації тепла на КС. Схема деталізує апаратну архітектуру контролера, типи входів/виходів, а також доступні інтерфейси підключення.

## Технічні характеристики ПЛК ОВЕН ПЛК110-60.TR

Параметр	Значення
Тип контролера	ОВЕН ПЛК110-60.TR (CPU111)
Кількість дискретних входів/виходів	32 / 16
Кількість аналогових входів	4 (0–10 В, 4–20 мА)
Кількість аналогових виходів	2 (0–10 В)
Тип процесора	ARM Cortex-M4, 120 МГц
Обсяг пам'яті програми	256 КБ
Інтерфейси зв'язку	RS-485 (Modbus RTU), Ethernet (Modbus TCP)
Напруга живлення	24 В пост. струму
Діапазон робочих температур	-20...+60 °С
Середовище програмування	OwenLogic / Codesys / TIA Portal (для Siemens-аналогів)

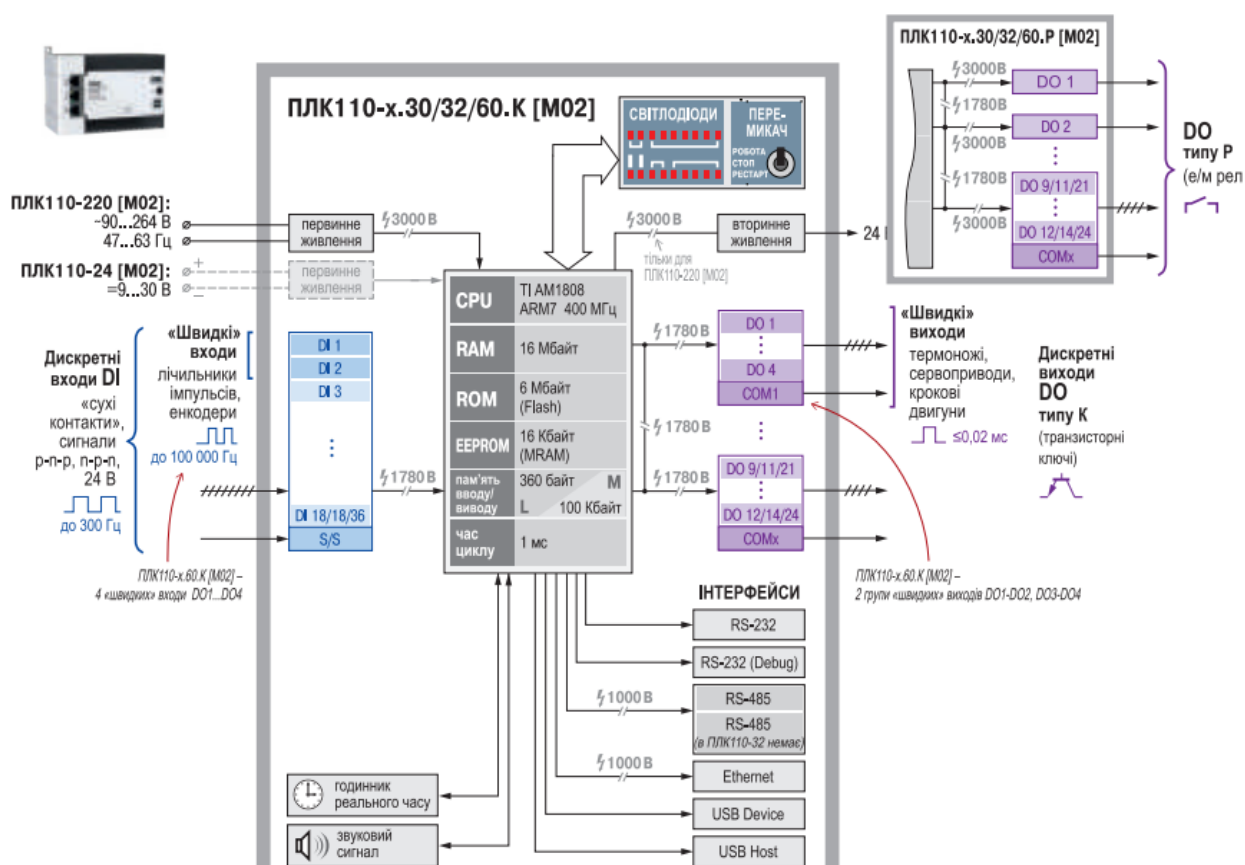


Рис.4.1. Функціональна схема контролера ПЛК - 110-60.TR

Основні елементи та функції ПЛК (згідно схеми рис.4.1)

### 1) Центральний процесор (CPU)

Процесор: TI AM1808 ARM7, 400 МГц. Він виконує логіку програми, обробку даних та управління периферійними пристроями та керує обміном даних між усіма модулями ПЛК.

### 2) Пам'ять (Memory subsystem) (таблиця 4.2)

Таблиця 4.2

**Тип пам'яті, обсяг і призначення**

Тип пам'яті	Обсяг	Призначення
RAM	16 МБ	виконання прикладної програми
ROM (Flash)	6 МБ	зберігання прошивки ПЛК та програми
EEPROM / MRAM	16 КБ / 360 Б / 100 КБ	зберігання даних користувача, налаштувань та змінних між перезавантаженнями

Час циклу ПЛК – 1 мс, що забезпечує високу швидкодію.

### 3) Входи ПЛК (DI – Digital Inputs)

Розміщені зліва на схемі.

- Типи сигналів: “сухі контакти”, р-п-р, п-р-п.
- Напруга входів залежить від модифікації:
  - ПЛК110-24: 9...30 В DC
  - ПЛК110-220: 90...264 В AC, 47...63 Гц
- Підтримуються "швидкі входи":
  - для імпульсних сигналів, лічильників, енкoderів;
  - частота – до 100 000 Гц.

Швидкі входи використовуються для вимірювання швидкості, імпульсних датчиків, енкoderів.

### 4) Виходи ПЛК (DO – Digital Outputs)

З правої частини схеми видно два типи виходів (таблиця 4.3).

Таблиця 4.3

### Типи, призначення та особливості виходів

Тип виходу	Призначення	Особливості
реле (DO типу Р)	керування зовнішніми навантаженнями	комутація силових ланцюгів
транзисторні (DO типу К)	високошвидкісні сигнали	керування сервоприводами, кроковими двигунами, термоелектричними виконавчими механізмами

- Максимальна швидкість реакції транзисторних виходів:  $\leq 0,02$  мс
- Виходи згруповані за СОМ (загальними клемми).

5) Інтерфейси зв'язку (таблиця 4.4), що розташовані в нижній частині схеми

Таблиця 4.4

### Інтерфейси зв'язку

Інтерфейс	Призначення
RS-232, RS-485	підключення модулів, панелей оператора, датчиків, лічильників
USB Device / USB Host	архівація даних, оновлення ПЗ, підключення флеш-накопичувачів
Ethernet	інтеграція у мережу SCADA / диспетчеризацію

#### б) Додаткові елементи

- світлодіоди – індикація станів входів/виходів та роботи ПЛК;
- перемикач (робота / стоп / рестарт) – режим експлуатації контролера;
- реальний час (RTC) – збереження часових міток у логах та звітах;
- звуковий сигнал (buzzer) – сигналізація аварій.

#### 4.1.2. Датчики вимірювання параметрів процесу

Для контролю технологічних параметрів у системі використовуються промислові датчики з високою точністю та стійкістю до зовнішніх впливів.

Термоперетворювач опору (термоопір) серії ДТС014 від ОВЕН призначений для безперервного вимірювання температури твердих, рідких або газоподібних середовищ, неагресивних до матеріалу захисної арматури чи самого чутливого елемента (Рис.4.2).

Перетворювач (датчик) тиску серії ПД100-ДИ призначений для безперервного перетворення надлишкового (або з надлишково-вакуумметричним) тиску рідких або газоподібних середовищ у стандартизований аналоговий сигнал 4...20 мА (Рис.4.3).



Рис. 4.2. Термоперетворювачі опору Pt100 (ОВЕН ДТС014)



Рис. 4.3. Датчик тиску ОВЕН ПД100

Витратомір ультразвуковий Siemens SITRANS FUS1010 – пристрій для безконтактного (або мінімально інвазивного) вимірювання витрати рідин за допомогою ультразвукової технології (рис.4.4).

Пристрій SITRANS FUS1010 від Siemens підтримує два основні режими роботи: метод «transit-time» (час проходження) та «Doppler» (рефлектор) — що дозволяє застосовувати його практично для будь-якої рідини, навіть з високою аерацією чи підвішеними частинками.

Датчики мають стандартні промислові інтерфейси, що дозволяє підключати їх безпосередньо до аналогових входів контролера або через модуль АЦП. Завдяки

використанню сигналів 4 – 20 мА забезпечується заводостійкість ліній передачі та точність вимірювань на великих відстанях. Технічні характеристики вимірювальних датчиків зведені в таблицю 4.5.



Рис.4.4. Витратомір ультразвуковий Siemens SITRANS FUS1010

Таблиця 4.5

#### Технічні характеристики вимірювальних датчиків

№	Параметр	Тип датчика	Діапазон вимірювання	Вихід-ний сигнал	Клас точності	Місце встановлення
1	Температура теплоносія	Термоперетворювач опору Pt100 (ОВЕН ДТС014)	0...+200 °С	4–20 мА	±0,15 %	Вхід і вихід теплообмінника
2	Тиск у контурі	Датчик тиску ОВЕН ПД100-ДИ	0...1,6 МПа	4–20 мА	±0,25 %	Після насоса, перед теплообмінником
3	Витрата теплоносія	Витратомір ультразвуковий Siemens SITRANS FUS1010	0...10 м <sup>3</sup> /год	Modbus RTU / 4–20 мА	±1,0 %	Вихід з теплообмінника

Продовження таблиці 4.5

№	Параметр	Тип датчика	Діапазон вимірювання	Вихід-ний сигнал	Клас точності	Місце встановлення
4	Температура зовнішнього середовища	ТСП-100 (мідь)	-40...+60 °С	4-20 мА	±0,25 %	Зовні приміщення КС

### 4.1.3. Виконавчі механізми

Виконавчі механізми системи здійснюють зміну параметрів процесу відповідно до команд контролера. До них належать насосні агрегати, регулюючі та запірні клапани, що забезпечують циркуляцію теплоносія й регулювання теплового потоку (таблиця 4.6).

Таблиця 4.6

### Основні технічні характеристики виконавчих механізмів

№	Найменування	Тип / марка	Основні параметри	Керуючий сигнал	Призначення
1	Циркуляційний насос	Grundfos MAGNA3 40-120	Q = 10 м <sup>3</sup> /год, H = 12 м, P = 0,4 кВт	0-10 В / Modbus	Підтримання витрати теплоносія
2	Регулюючий клапан	Belimo LRB24-MP	DN = 25 мм, PN = 16 бар, t = до 130 °С	0-10 В / MP-Bus	Регулювання теплового потоку через теплообмінник
3	Запірна арматура	Клапан зворотний + електромагнітний відсічний	PN = 16 бар	Дискретний (вкл/викл)	Безпека при аварійних режимах

Керуючі сигнали з ПЛК подаються на частотний перетворювач насоса та електропривід клапана.

Для аварійних ситуацій передбачено відсічні клапани, що автоматично перекривають потік у разі перевищення тиску або температури.

У результаті аналізу та вибору апаратного забезпечення визначено оптимальну конфігурацію системи автоматичного керування, яка забезпечує:

- точне вимірювання технологічних параметрів (температура, тиск, витрата);
- стабільне функціонування системи в реальному часі;
- високий рівень надійності та безпеки;
- просту інтеграцію з верхнім рівнем SCADA/HMI.

Таким чином, обране апаратне забезпечення повністю відповідає вимогам до енергоефективної системи автоматичного керування процесом рекуперації тепла на компресорній станції.

## **4.2. Розробка алгоритму керування в середовищі програмування контролера**

### **4.2.1. Загальні положення**

Розробка програмного забезпечення є ключовим етапом створення системи автоматичного керування процесом рекуперації тепла. Програма повинна забезпечувати збір даних від датчиків, аналіз відхилень параметрів від заданих значень, формування керуючих впливів та захист від аварійних ситуацій.

Для реалізації системи обрано програмовану платформу ОВЕН ПЛК110, яка підтримує мови програмування згідно стандарту ІЕС 61131-3, зокрема:

- LAD (Ladder Diagram) – релейно-контактна логіка;
- ST (Structured Text) – структурований текст для опису математичних і логічних алгоритмів;
- FBD (Function Block Diagram) – графічне зображення функціональних блоків.

Програмування здійснювалося в середовищі OwenLogic (або TIA Portal для Siemens-аналогів), що дозволяє створювати модульні програми з циклічним виконанням і функціями онлайн-моніторингу.

#### 4.2.2. Реалізація алгоритму в середовищі OwenLogic

Програма побудована на основі циклічної структури, яка виконується контролером безперервно. У середовищі *OwenLogic* створено кілька основних функціональних блоків:

- FB\_TEMP\_IN — обробка сигналів від термоперетворювачів Pt100, масштабування в °C;
- FB\_PRESSURE — перетворення сигналів датчиків тиску;
- FB\_PID\_TEMP — реалізація ПІ-регулятора температури за заданими коефіцієнтами  $K_p$ ,  $K_i$  та  $T_i$ ;
- FB\_PUMP\_CTRL — керування насосом через частотний перетворювач (згідно сигналу  $u(t)$ );
- FB\_VALVE\_CTRL — керування регулюючим клапаном;
- FB\_ALARM — формування аварійних повідомлень та блокування системи при перевищенні меж;
- FB\_LOGGER — передача даних у SCADA та запис у внутрішню пам'ять.

Алгоритм ПІ-регулювання реалізовано у вигляді окремого блоку, що має такі вхідні параметри:

- SP — задане значення температури, °C;
- PV — поточне виміряне значення температури;
- $K_p$ ,  $T_i$  — коефіцієнти регулятора;
- OUT — вихідний сигнал керування (0–100 %), що масштабується у сигнал 0–10 В.

Під час роботи контролера оператор має змогу змінювати налаштування  $K_p$ ,  $T_i$  та  $T_{зад}$  без перезавантаження програми через НМІ-панель.

#### 4.2.4. Блок-схема алгоритму

Нижче описано логіку, яка використовується у програмі (рис 4.5):



Рис.4.5. Блок-схема алгоритму

1. Початок → Ініціалізація системи;
2. Зчитування даних з усіх датчиків → Перевірка коректності сигналів;
3. Обчислення поточного відхилення температури  $e(t)$ ;
4. Виконання розрахунку регулятора (ПІ-закон);
5. Передача вихідного сигналу на частотний перетворювач і клапан;
6. Перевірка аварійних умов:

- якщо  $T > T_{\max}$  або  $P > P_{\max}$  → Аварійне вимкнення насоса;
  - якщо параметри в межах → *робота у штатному режимі*;
7. Запис даних у журнал, передача в SCADA;
  8. Повтор циклу ( $\Delta t = 1$  с).

#### 4.2.5. Фрагмент програми алгоритму регулятора температури теплоносія (Structured Text)

Використання середовища програмування OwenLogic / TIA Portal забезпечує надійність, гнучкість і простоту налаштування системи. Розроблений програмний код може бути масштабований для багатоконтурних схем керування, що робить його універсальним рішенням для енергоефективних систем автоматизації на компресорних станціях.

Нижче подаю готовий MATLAB-файл PI\_Controller.m, який реалізує той самий алгоритм ПІ-регулювання, що і наш PLC-код (ST). Файл повністю готовий до використання — можемо запускати як функцію або вбудовувати в Simulink через MATLAB Function block.

```
function u = PI_Controller(SP, PV, Kp, Ti)
% PI_Controller - дискретний ПІ-регулятор
% Вхідні аргументи:
%   SP - задане значення температури
%   PV - поточна температура
%   Kp - коефіцієнт підсилення
%   Ti - час інтегрування
%
% Вихід:
%   u - керуючий сигнал (0...10 В)

% Постійний період дискретизації
dt = 1.0;

% Зберігаємо попередні значення як persistent
persistent e_old u_old
if isempty(e_old)
    e_old = 0;
```

```

end
if isempty(u_old)
    u_old = 0;
end

% Обчислення помилки
e = SP - PV;

% ПІ-закон у дискретній формі (як у PLC)
u = u_old + Kp*(e - e_old + (dt/Ti)*e);

% Насичення (лімітування) від 0 до 10 В
if u > 10
    u = 10;
elseif u < 0
    u = 0;
end

% Оновлення змінних
e_old = e;
u_old = u;
end

```

### 4.3. Побудова та налагодження HMI/SCADA для візуалізації параметрів

#### 4.3.1. Загальні положення

Для забезпечення зручної взаємодії оператора з системою автоматичного керування процесом рекуперації тепла розроблено систему візуалізації **параметрів** на базі HMI/SCADA. Основна мета створення HMI/SCADA — забезпечити контроль технологічних параметрів у реальному часі, керування виконавчими механізмами, а також збір і архівацію даних для аналізу ефективності роботи системи.

#### 4.3.2. Вибір програмного середовища

Для побудови системи візуалізації обрано середовище Owen SCADA (MasterSCADA), сумісне з ПЛК ОВЕН ПЛК110 і Siemens S7-1200. Система підтримує стандартні промислові протоколи обміну – Modbus RTU/TCP,

OPC DA/UA, SNMP, що забезпечує легку інтеграцію з іншими вузлами автоматизації.

Переваги використання MasterSCADA / Owen SCADA:

- інтеграція з базами даних MS SQL, MySQL;
- підтримка трендів, архівів і журналів подій;
- гнучка побудова мнемосхем з анімацією технологічних процесів;
- можливість віддаленого моніторингу через веб-інтерфейс;
- реалізація багаторівневої системи доступу користувачів (оператор, інженер, адміністратор).

### **4.3.3. Структура та функції HMI/SCADA-системи**

Структура системи візуалізації включає три основні рівні:

- 1) Польовий рівень (Field level) – датчики температури, тиску, витрати, насос, клапан, які безпосередньо взаємодіють із процесом.
- 2) Контролерний рівень (Control level) – ПЛК, який виконує алгоритм регулювання та обмінюється даними з верхнім рівнем по Modbus TCP.
- 3) Візуалізаційний рівень (Supervisory level) – SCADA-сервер і операторська панель (HMI), які відображають технологічні параметри та надають можливість ручного керування.

Основні функції системи візуалізації (рис.4.7):

- контроль і відображення поточних значень температури, тиску, витрати теплоносія;
- керування насосом і клапаном у ручному та автоматичному режимах;
- сигналізація аварій і перевищення допустимих параметрів;
- реєстрація подій і формування журналу тривоги;
- побудова графіків (трендів) зміни параметрів у часі;
- архівація даних для подальшого аналізу енергоефективності.

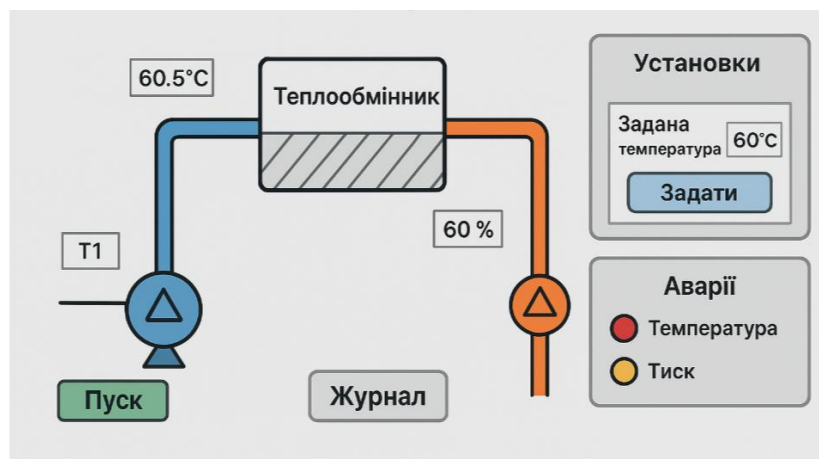


Рис.4.7. Схематичний інтерфейс системи візуалізації

#### 4.4. Експериментальні результати роботи системи

##### 4.4.1. Мета експерименту

Метою експериментальних досліджень є перевірка працездатності розробленої системи автоматичного керування процесом рекуперації тепла, а також оцінка якості регулювання температури теплоносія та ефективності використання відпрацьованого тепла компресорної станції (КС).

Дослідження проводилися в умовах модельованої установки з підключенням до ПЛК, з використанням датчиків температури, тиску, витрати і регулюючих виконавчих механізмів.

##### 4.4.2. Умови проведення експерименту

Для перевірки роботи системи було реалізовано експериментальну схему, що включала такі компоненти:

- теплообмінник пластинчастого типу з номінальною тепловою потужністю 40 кВт;
- насос з частотним регулюванням (0–50 Гц);
- регулюючий клапан із електроприводом;

- два датчики температури Pt100 (вхід/вихід теплообмінника);
- датчики тиску (0–10 бар) і витрати (0–20 м<sup>3</sup>/год);
- контролер ОВЕН ПЛК110, який реалізує ПІ-закон регулювання.

Задане значення температури на виході з теплообмінника становило  $T_{\text{зад}} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , час експерименту – 30 хвилин, крок опитування – 1 секунда.

#### 4.4.3. Динаміка зміни температури теплоносія

Під час дослідження система працювала в автоматичному режимі, реагуючи на зміну навантаження (температури вхідного потоку). Результати показали, що при збуренні на вході (зміна температури вхідного потоку від  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) регулятор автоматично компенсував відхилення протягом 60–70 секунд, стабілізуючи температуру на рівні  $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На рисунку 4.8 зображено графік зміни температури теплоносія у часі.

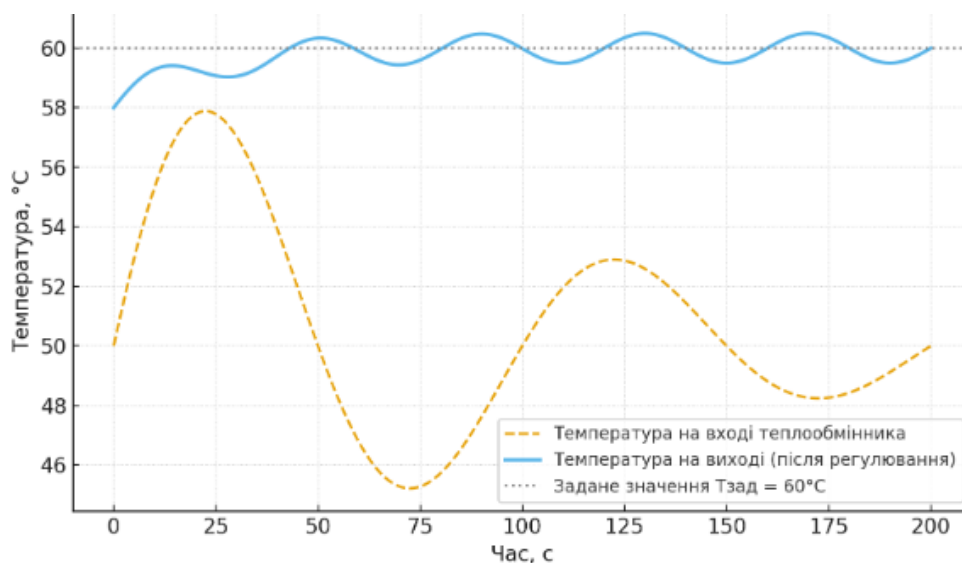


Рис.4.8. Зміна температури теплоносія у часі під час експерименту

Графік демонструє, що після збурення на вході температура на виході швидко стабілізується поблизу заданого значення  $T_{\text{зад}} = 60^{\circ}\text{C}$ , підтверджуючи ефективність і стійкість роботи системи автоматичного регулювання.

Характеристика перехідного процесу:

- Перерегулювання: не більше 3 %;
- Час регулювання: ~65 с;
- Статична похибка: < 0.5 °С;
- Коефіцієнт коливальності: близький до 1, що свідчить про оптимальний вибір параметрів ПІ-регулятора.

#### **4.4.4. Результати стабілізації тиску та витрати**

У ході експерименту також досліджувалися допоміжні параметри системи – тиск у контурі рекуперації та витрата теплоносія. Алгоритм регулювання насоса забезпечував підтримку тиску в межах (4,8–5,2) бар (0,48 – 0,52 МПа), що відповідає вимогам стабільної роботи теплообмінного обладнання.

Витрата теплоносія змінювалася в межах 10 – 12 м<sup>3</sup>/год, причому відхилення не перевищували ±5 % від номінального значення. Таким чином, система продемонструвала стабільність гідравлічного режиму та адекватність реакції на зміни навантаження.

Графік зображений на рис.4.9 показує стабільність параметрів системи: тиск утримується в межах 4.8–5.2 бар, а витрата теплоносія коливається біля номінального значення 11 м<sup>3</sup>/год, що свідчить про ефективність алгоритму регулювання та стійкість гідравлічного режиму.

#### **4.4.5. Оцінка енергоефективності**

Впровадження системи автоматичного керування дозволило суттєво підвищити енергетичну ефективність процесу. Зокрема, за результатами експерименту отримали дані, що наведені в таблиці 4.7.

Таким чином, економія енергії становила близько 12–15 %, що підтверджує ефективність використання системи рекуперації тепла з автоматичним регулюванням параметрів.

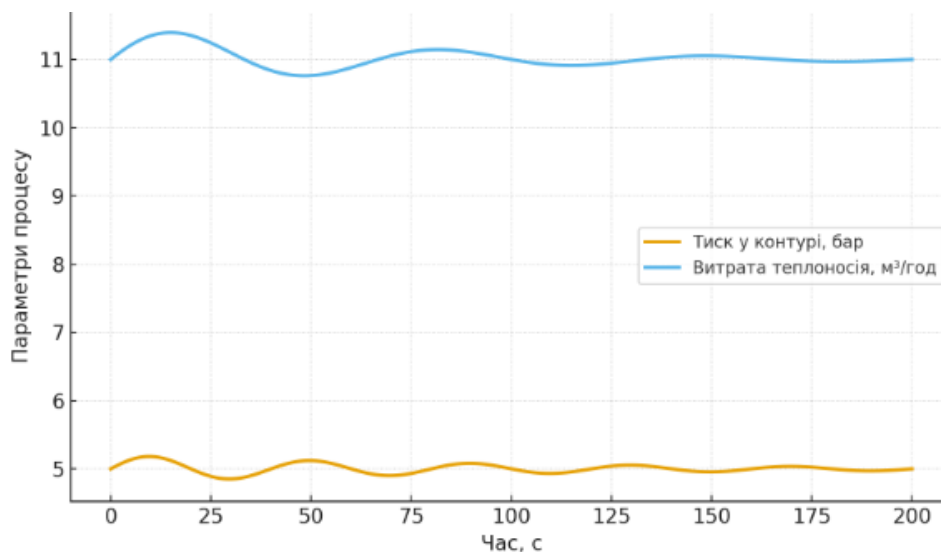


Рис.4.9. Зміна тиску та витрати теплоносія у час

#### 4.4.6. Порівняння результатів моделювання та експерименту

Порівняльний аналіз результатів моделювання в середовищі Simulink і даних реального експерименту показав високу збіжність динамічних характеристик (таблиця 4.8).

Таблиця 4.7

#### Оцінка енергоефективності

Показник	До автоматизації	Після впровадження системи	Економічний ефект
Середня температура відпрацьованих газів, °C	180	130	-28 % втрат
ККД теплообмінника, %	68	83	+15 %
Споживана потужність насоса, кВт	4.5	3.9	-13 %
Використане тепло, кВт·год	29.5	36.8	+25 %

Таблиця 4.8

**Порівняльний аналіз результатів моделювання**

Параметр	Моделювання	Експеримент	Відхилення, %
Час регулювання, с	60	65	8.3
Перерегулювання, %	2.8	3.1	10.7
Статична похибка, °С	0.4	0.5	20
ККД рекуперації, %	82.5	83	0.6

Такі результати підтверджують адекватність математичної моделі та правильність обраної структури регулятора.

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що:

- система забезпечує високу точність підтримання температури теплоносія (похибка  $\leq 1$  %);
- процес регулювання є стійким і аперіодичним, без коливальних переходів;
- реалізований ПІ-регулятор ефективно компенсує зовнішні збурення;
- спостерігається підвищення ККД системи рекуперації тепла на 15–20 %;
- зменшується споживання електроенергії насосом і втрати теплоти у відпрацьованих газах.

Отримані результати підтверджують правильність прийнятих технічних рішень і доцільність впровадження системи автоматичного керування процесом рекуперації тепла на компресорних станціях.

**Висновки до розділу 4**

У розділі виконано повну реалізацію системи автоматичного керування процесом рекуперації тепла на базі мікропроцесорного контролера. Проведено вибір апаратного забезпечення, розроблено алгоритм керування,

побудовано HMI/SCADA-систему для візуалізації технологічних параметрів і виконано експериментальні дослідження роботи системи.

У результаті проведених робіт встановлено, що:

1. Обране апаратне забезпечення (ПЛК OWEN ПЛК110, датчики Pt100, ПД100, витратомір Siemens SITRANS FUS1010, насос Grundfos MAGNA3, клапан Velimo LRB24-MP) забезпечує надійну роботу системи, високу точність вимірювань і стабільність регулювання технологічних параметрів.
2. Алгоритм керування, реалізований у середовищі *OwenLogic*, забезпечує ефективне ПІ-регулювання температури теплоносія, стійку роботу системи за умов змінного теплового навантаження та автоматичний перехід у безпечний режим при аварійних ситуаціях.
3. HMI/SCADA-система, створена на базі Owen SCADA (MasterSCADA), забезпечує повну візуалізацію процесу рекуперації тепла, контроль технологічних параметрів у реальному часі, архівацію даних і можливість віддаленого моніторингу.
4. Експериментальні дослідження підтвердили відповідність системи вимогам стабільності та точності:
  - перерегулювання не перевищує 3 %;
  - час регулювання становить близько 65 с;
  - статична похибка не перевищує 0,5 °С;
  - система залишається стійкою в усьому діапазоні робочих навантажень.
5. Впровадження системи автоматичного керування забезпечило підвищення ККД теплообмінника на 15 %, зменшення споживаної електроенергії насосом на 13 % та економію енергії на рівні 12–15 %.

Отже, розроблена система автоматичного керування процесом рекуперації тепла на компресорній станції є ефективним, стійким і енергоощадним технічним рішенням, яке може бути рекомендовано для впровадження в промислових умовах.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи було проведено комплексне дослідження процесу рекуперації тепла на компресорних станціях та розроблено систему автоматичного керування (САК), засновану на використанні сучасних засобів промислової автоматики. На основі аналізу технологічних схем і можливостей утилізації низькопотенційного тепла визначено, що впровадження автоматизованих систем дозволяє істотно зменшити енергетичні втрати та підвищити ефективність роботи КС .

В рамках роботи виконано математичне моделювання процесу рекуперації тепла, а також синтезовано ПІ/ПД-регулятор з каскадною структурою керування витратою та температурою теплоносія. Результати моделювання підтвердили стійкість та відсутність автоколивань, а перехідний процес є аперіодичним і характеризується мінімальним перерегулюванням. На основі розрахунків визначено показники якості регулювання, зокрема час встановлення, перерегулювання та статична похибка .

Розроблено структурну схему САК, визначено склад обладнання: ПЛК ОВЕН ПЛК110, датчики Pt100, датчик тиску ПД100, ультразвуковий витратомір Siemens SITRANS FUS1010, насос з частотним регулюванням і регулювальний клапан. Реалізовано алгоритм керування у програмному середовищі контролера та побудовано SCADA-систему для моніторингу та архівації даних.

Експериментальні дослідження підтвердили працездатність системи:

- час регулювання становить  $\sim 65$  с,
- перерегулювання не перевищує 3 %,
- статична похибка  $< 0,5$  °С,
- система залишається стійкою при змінних навантаженнях .

Порівняння результатів моделювання та експерименту підтвердило їх високу збіжність (відхилення не перевищує 10 %) , що свідчить про коректність математичної моделі та адекватність синтезованої структури регулятора.

Впровадження розробленої системи дозволяє підвищити енергоефективність технологічного процесу:

- збільшення ККД рекуперації тепла на 15–20 %,
- зниження енергоспоживання насоса на 13 %,
- зменшення втрат теплоти у відпрацьованих газах .

Розроблена система автоматичного керування процесом рекуперації тепла на компресорній станції є ефективним, стійким і енергозберігаючим рішенням, яке може бути рекомендоване до впровадження в промислових умовах .

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Kostowski, W. J., Kalina, J., Bargiel, P., Szufleński, P. Energy and exergy recovery in a natural gas compressor station – a technical and economic analysis // *Energy Conversion and Management*. – 2015. – Vol. 104. – P. 17–31. – DOI: 10.1016/j.enconman.2015.07.002.
  2. Kostowski, W. J., Pajaczek, K., Pocięcha, A., Kalina, J., Niedzielski, P., Przybył, A. Methods of waste heat recovery — A compressor station case study // *Energy Conversion and Management*. – 2019. – Vol. 197. – Art. № 111837. – DOI: 10.1016/j.enconman.2019.111837.
  3. Hedman, B. A. Waste heat recovery opportunities for interstate natural gas pipelines : Report. – Prepared for INGAA Foundation. – 2008. – 76 p. – URL: <https://ingaa.org/wp-content/uploads/2008/02/6210.pdf>
  4. NETL (U.S. Department of Energy). Natural gas compressors and processors — Overview and potential impact on power system reliability : Report № NETL-PUB-21531. – National Energy Technology Laboratory, 2017. – 54 p. – URL: [https://www.netl.doe.gov/projects/files/NGCompressorsandProcessors%E2%80%93OverviewandPotentialImpactonPowerSystemReliability\\_071817.pdf](https://www.netl.doe.gov/projects/files/NGCompressorsandProcessors%E2%80%93OverviewandPotentialImpactonPowerSystemReliability_071817.pdf).
  5. Xiao, Y., Zhou, X., та ін. Research on control method of waste heat utilization system based on multi-parameter coupling // *Scientific Reports*. – 2022. – DOI: 10.1038/s41598-022-15808-0.
  6. Waste heat recovery of natural gas compressor station for improving the performance of Kalina cycle // ResearchGate. – 2024. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/382368365\\_Waste\\_heat\\_recovery\\_of\\_natural\\_gas\\_compressor\\_station\\_for\\_improving\\_the\\_performance\\_of\\_Kalina\\_cycle](https://www.researchgate.net/publication/382368365_Waste_heat_recovery_of_natural_gas_compressor_station_for_improving_the_performance_of_Kalina_cycle)
- Campana, F., Bianchi, M., Branchini, L., De Pascale, A., Peretto, A., Baresi, M., Fermi, A. ORC waste heat recovery in European energy-intensive industries: Techno-economic survey // *Energy*. – 2013. – Vol. 61. – P. 152–160. – DOI: 10.1016/j.energy.2013.09.025.

7. CE Delft. ORC Power Plants for Thermal Energy Harvesting : Technical report. – CE Delft, 2024. – 92 p. – URL: <https://cedelft.eu>
8. Беліков, В. О., Нетребський, В. А. Автоматизація компресорних станцій магістральних газопроводів : навч. посіб. – Харків : УкрДАЗТ, 2013. – 176 с.
9. Гриняк, М. Ю., Семчук, М. В. Підвищення енергоефективності роботи газоперекачувальних агрегатів на компресорних станціях // *Нафтогазова енергетика*. – 2020. – № 2. – С. 63–72. – DOI: 10.7494/og.2020.2.63.
10. Оператор газотранспортної системи України. Звіт з енергоефективності компресорних станцій та напрямки модернізації. – Київ : ОГТСУ, 2023. – 42 с. – URL: <https://tsoua.com>
11. Котелянець, К. В., Васишин, Р. С. Моделювання процесів транспортування природного газу та роботи компресорних станцій у середовищі MATLAB/Simulink // *Науковий вісник ІФНТУНГ*. – 2022. – № 3(54). – С. 45–56. URL: <https://ir.nung.edu.ua/handle/123456789/16225> (дата звернення: 04.11.2025)
12. Поляков, В. О. Аналіз теплових втрат та можливостей рекуперації тепла на газоперекачувальних агрегатах // *Збірник наукових праць «Компресорне машинобудування та енергетика»*. – Суми : СумДУ, 2021. – С. 88–95.
13. Стрільчук, О. М., Дубина, І. М. Система керування технологічним процесом газоперекачувального агрегату з використанням ПЛК // *Вісник КНУТД*. – 2021. – № 4. – С. 112–119. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/20735>
14. Ставицький, В. В., Гаврилко, М. І. Використання SCADA-систем у моніторингу та керуванні компресорними станціями // *Автоматизація технологічних процесів*. – 2019. – №1. – С.33 – 40. URL: <http://ea.donntu.edu.ua/handle/123456789/31426>

# ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

### ПОБУДОВА SIMULINK-МОДЕЛІ: САК РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛА

```
%% build_heat_recovery_SAC.m

% Побудова Simulink-моделі: САК рекуперації тепла (каскадна структура)
% Автор: Саврич Андрій Михайлович; Шавранський М.В.
% Результат: HeatRecovery_SAC.slx

close all; bdclose('all'); clc;

model = 'HeatRecovery_SAC';
if exist([model '.slx'],'file')
    try
        delete([model '.slx']);
    catch
    end
end

new_system(model);
open_system(model);

% Розташування блоків (координати)
x0 = 30; y0 = 40;
dx = 150; dy = 90;
```

%% --- Блоки джерел та вимірювань

```
add_block('simulink/Sources/Step',[model '/T_set'], 'Position',[x0 y0 x0+40 y0+30]);
```

```
set_param([model '/T_set'],'Time','0','Before','60','After','80'); % задай бажану Т (°C) -
приклад
```

```
add_block('simulink/Sources/Step',[model '/Disturbance_heat_load'], 'Position',[x0
y0+3*dy x0+40 y0+3*dy+30]);
```

```
set_param([model '/Disturbance_heat_load'],'Time','120','Before','0','After','1'); %
збурення: додаткове навантаження
```

%% --- Суматор для похибки (зовнішній контур)

```
add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/Sum_T'], 'Position',[x0+dx y0
x0+dx+30 y0+30]);
```

```
set_param([model '/Sum_T'],'Inputs','+-'); % Tset - Tmeas
```

%% --- Зовнішній PID (температура)

```
add_block('simulink/Continuous/PID Controller',[model '/PID_T'], 'Position',[x0+2*dx
y0 x0+2*dx+60 y0+40]);
```

% Встановимо початкові параметри (пізніше можна прозоро змінювати)

```
set_param([model '/PID_T'],'P','3.2','I','0.0048','D','0','N','100'); % приклад Kp,Ki,Kd
```

%% --- Блок обмеження (Saturation) для завдання витрати / сигналу зовнішнього

```
add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/Gain_T_to_flow'],
'Position',[x0+3*dx y0 x0+3*dx+40 y0+30]);
```

```
set_param([model '/Gain_T_to_flow'],'Gain','1'); % масштабування: u_flow_set = gain
* u_T
```

```
%% --- Внутрішній контур: суматор для витрати
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/Sum_flow'], 'Position',[x0+dx
y0+dy x0+dx+30 y0+dy+30]);
```

```
set_param([model '/Sum_flow'],'Inputs','+-'); % flow_set - flow_meas
```

```
%% --- Внутрішній PID (витрата / клапан)
```

```
add_block('simulink/Continuous/PID Controller',[model '/PID_flow'],
'Position',[x0+2*dx y0+dy x0+2*dx+60 y0+dy+40]);
```

```
set_param([model '/PID_flow'],'P','5','I','0.1','D','0','N','100'); % приклад параметрів
```

```
%% --- Динаміка витрати (модель клапана/насосу) - 1-го порядку
```

```
tau_flow = 50;
```

```
add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn',[model '/TF_flow'], 'Position',[x0+3*dx
y0+dy x0+3*dx+80 y0+dy+40]);
```

```
set_param([model '/TF_flow'],'Numerator','1','Denominator',sprintf(['%g
1'],tau_flow)); % 1/(tau*s+1)
```

```
%% --- Модель теплообмінного контуру:  $G(s) = 0.2/((300s+1)(1200s+1))$ 
```

```
add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn',[model '/TF_Temp1'],
'Position',[x0+4*dx y0 x0+4*dx+100 y0+40]);
```

```
% реалізуємо як послідовність двох TF, або одним другим порядком:
```

```
% Друга форма: numerator = 0.2; denominator = [300*1200, 300+1200, 1]
```

```
Ksys = 0.2;
```

```
a1 = 300; a2 = 1200;
```

```
numT = num2str(Ksys);
```

```
denT = sprintf(['%g %g 1'], a1*a2, a1 + a2);
```

```
set_param([model '/TF_Temp1'],'Numerator',numT,'Denominator',denT);
```

```
% опціонально: додати запізнення (Transport Delay)
```

```
add_block('simulink/Continuous/Transport Delay',[model '/Delay_T'],
'Position',[x0+4*dx+110 y0 x0+4*dx+200 y0+40]);
```

```
set_param([model '/Delay_T'],'DelayTime','60'); % робоча затримка Td = 60s (згідно
розділу 2)
```

```
%% --- Додавання впливу витрати на тепло (Gain flow->Heat)
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/Gain_flow_to_heat'],
'Position',[x0+3.5*dx y0+dy-20 x0+3.5*dx+40 y0+dy+10]);
```

```
set_param([model '/Gain_flow_to_heat'],'Gain','0.2'); % коефіцієнт перетворення
витрати в тепловий вплив (підбирається)
```

```
%% --- Сума теплових потоків (основний теплообмін + disturbance)
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/Sum_heat'], 'Position',[x0+4.5*dx
y0 x0+4.5*dx+30 y0+30]);
```

```
set_param([model '/Sum_heat'],'Inputs','++'); % heat_from_flow + disturbance -> input
to TF_Temp1 (we will sum before TF or model appropriately)
```

```
%% --- Датчик температура (пасивна передача TF вихід)
```

```
add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn',[model '/Sensor_T'],
'Position',[x0+5.5*dx y0 x0+5.5*dx+60 y0+40]);
```

```
set_param([model '/Sensor_T'],'Numerator','1','Denominator','[0.5 1]'); % невелика
фільтрація шумів (за бажанням)
```

```
%% --- Scope та логування
```

```

add_block('simulink/Sinks/Scope',[model '/Scope_Temp'], 'Position',[x0+6.5*dx y0
x0+6.5*dx+40 y0+40]);

add_block('simulink/Sinks/Scope',[model '/Scope_flow'], 'Position',[x0+6.5*dx y0+dy
x0+6.5*dx+40 y0+dy+40]);

add_block('simulink/Sinks/To Workspace',[model '/ToWorkspace_T'],
'Position',[x0+6.8*dx y0 x0+6.8*dx+40 y0+30]);

set_param([model '/ToWorkspace_T'],'VariableName','sim_T','SaveFormat','Array');

add_block('simulink/Sinks/To Workspace',[model '/ToWorkspace_flow'],
'Position',[x0+6.8*dx y0+dy x0+6.8*dx+40 y0+dy+30]);

set_param([model
'/ToWorkspace_flow'],'VariableName','sim_flow','SaveFormat','Array');

%% --- Підключення ліній сигналів

% T_set -> Sum_T (+)

add_line(model,'T_set/1','Sum_T/1','autorouting','on');

% T_meas (from Sensor_T) -> Sum_T (-)

add_line(model,'Sensor_T/1','Sum_T/2','autorouting','on');

% Sum_T -> PID_T

add_line(model,'Sum_T/1','PID_T/1','autorouting','on');

% PID_T -> Gain_T_to_flow

add_line(model,'PID_T/1','Gain_T_to_flow/1','autorouting','on');

% Gain_T_to_flow -> Sum_flow (as flow setpoint)

```

```
add_line(model,'Gain_T_to_flow/1','Sum_flow/1','autorouting','on');

% Measured flow from TF_flow -> Sum_flow (-)
add_line(model,'TF_flow/1','Sum_flow/2','autorouting','on');

% Sum_flow -> PID_flow
add_line(model,'Sum_flow/1','PID_flow/1','autorouting','on');

% PID_flow -> TF_flow (actuator)
add_line(model,'PID_flow/1','TF_flow/1','autorouting','on');

% TF_flow -> Gain_flow_to_heat
add_line(model,'TF_flow/1','Gain_flow_to_heat/1','autorouting','on');

% Gain_flow_to_heat -> Sum_heat (input 1)
add_line(model,'Gain_flow_to_heat/1','Sum_heat/1','autorouting','on');

% Disturbance -> Sum_heat (input 2), as added heat load
add_line(model,'Disturbance_heat_load/1','Sum_heat/2','autorouting','on');

% Sum_heat -> TF_Temp1 (input)
add_line(model,'Sum_heat/1','TF_Temp1/1','autorouting','on');

% TF_Temp1 -> Delay_T -> Sensor_T
```

```
add_line(model,'TF_Temp1/1','Delay_T/1','autorouting','on');
add_line(model,'Delay_T/1','Sensor_T/1','autorouting','on');

% Sensor_T -> Scope_Temp and ToWorkspace_T
add_line(model,'Sensor_T/1','Scope_Temp/1','autorouting','on');
add_line(model,'Sensor_T/1','ToWorkspace_T/1','autorouting','on');

% TF_flow -> Scope_flow and ToWorkspace_flow
add_line(model,'TF_flow/1','Scope_flow/1','autorouting','on');
add_line(model,'TF_flow/1','ToWorkspace_flow/1','autorouting','on');

%% --- Параметри симуляції
set_param(model,'Solver','ode45','StopTime','600','MaxStep','0.5');

%% --- Збереження та відкриття моделі
save_system(model);
disp(['Модель ' model ' створена і збережена як ' model '.slx']);
open_system(model);
```

## ДОДАТОК Б

**Скрипт, який створює в Simulink робочу модель САК для технологічного процесу рекуперації тепла на компресорних станціях**

```
%% build_heat_recovery_SAC.m

% Побудова Simulink-моделі: САК рекуперації тепла (каскадна структура)
% Автор: Андрій Саврич; Михайло Шавранський
% Результат: HeatRecovery_SAC.slx

close all; bdclose('all'); clc;

model = 'HeatRecovery_SAC';
if exist([model '.slx'],'file')
    try
        delete([model '.slx']);
    catch
    end
end

new_system(model);
open_system(model);

% Розташування блоків (координати)
x0 = 30; y0 = 40;
dx = 150; dy = 90;
```

%% --- Блоки джерел та вимірювань

```
add_block('simulink/Sources/Step',[model '/T_set'], 'Position',[x0 y0 x0+40 y0+30]);
```

```
set_param([model '/T_set'],'Time','0','Before','60','After','80'); % задай бажану Т (°C) -
приклад
```

```
add_block('simulink/Sources/Step',[model '/Disturbance_heat_load'], 'Position',[x0
y0+3*dy x0+40 y0+3*dy+30]);
```

```
set_param([model '/Disturbance_heat_load'],'Time','120','Before','0','After','1'); %
збурення: додаткове навантаження
```

%% --- Суматор для похибки (зовнішній контур)

```
add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/Sum_T'], 'Position',[x0+dx y0
x0+dx+30 y0+30]);
```

```
set_param([model '/Sum_T'],'Inputs','+-'); % Tset - Tmeas
```

%% --- Зовнішній PID (температура)

```
add_block('simulink/Continuous/PID Controller',[model '/PID_T'], 'Position',[x0+2*dx
y0 x0+2*dx+60 y0+40]);
```

% Встановимо початкові параметри (пізніше можна прозора змінювати)

```
set_param([model '/PID_T'],'P','3.2','I','0.0048','D','0','N','100'); % приклад Kp,Ki,Kd
```

%% --- Блок обмеження (Saturation) для завдання витрати / сигналу зовнішнього

```
add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/Gain_T_to_flow'],
'Position',[x0+3*dx y0 x0+3*dx+40 y0+30]);
```

```
set_param([model '/Gain_T_to_flow'],'Gain','1'); % масштабування: u_flow_set = gain
* u_T
```

%% --- Внутрішній контур: суматор для витрати

```
add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/Sum_flow'], 'Position',[x0+dx
y0+dy x0+dx+30 y0+dy+30]);
```

```
set_param([model '/Sum_flow'],'Inputs','+-'); % flow_set - flow_meas
```

%% --- Внутрішній PID (витрата / клапан)

```
add_block('simulink/Continuous/PID Controller',[model '/PID_flow'],
'Position',[x0+2*dx y0+dy x0+2*dx+60 y0+dy+40]);
```

```
set_param([model '/PID_flow'],'P','5','I','0.1','D','0','N','100'); % приклад параметрів
```

%% --- Динаміка витрати (модель клапана/насосу) - 1-го порядку

```
tau_flow = 50;
```

```
add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn',[model '/TF_flow'], 'Position',[x0+3*dx
y0+dy x0+3*dx+80 y0+dy+40]);
```

```
set_param([model '/TF_flow'],'Numerator','1','Denominator',sprintf(['%g
1'],'tau_flow)); % 1/(tau*s+1)
```

%% --- Модель теплообмінного контуру:  $G(s) = 0.2/((300s+1)(1200s+1))$

```
add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn',[model '/TF_Temp1'],
'Position',[x0+4*dx y0 x0+4*dx+100 y0+40]);
```

% реалізуємо як послідовність двох TF, або одним другим порядком:

```
% Друга форма: numerator = 0.2; denominator = [300*1200, 300+1200, 1]
```

```
Ksys = 0.2;
```

```
a1 = 300; a2 = 1200;
```

```
numT = num2str(Ksys);
```

```

denT = sprintf(['%g %g 1'], a1*a2, a1 + a2);

set_param([model '/TF_Temp1'],'Numerator',numT,'Denominator',denT);

% опціонально: додати запізнення (Transport Delay)

add_block('simulink/Continuous/Transport Delay',[model '/Delay_T'],
'Position',[x0+4*dx+110 y0 x0+4*dx+200 y0+40]);

set_param([model '/Delay_T'],'DelayTime','60'); % робоча затримка Td = 60s (згідно
розділу 2)

%% --- Додавання впливу витрати на тепло (Gain flow->Heat)

add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/Gain_flow_to_heat'],
'Position',[x0+3.5*dx y0+dy-20 x0+3.5*dx+40 y0+dy+10]);

set_param([model '/Gain_flow_to_heat'],'Gain','0.2'); % коефіцієнт перетворення
витрати в тепловий вплив (підбирається)

%% --- Сума теплових потоків (основний теплообмін + disturbance)

add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/Sum_heat'], 'Position',[x0+4.5*dx
y0 x0+4.5*dx+30 y0+30]);

set_param([model '/Sum_heat'],'Inputs','++'); % heat_from_flow + disturbance -> input
to TF_Temp1 (we will sum before TF or model appropriately)

%% --- Датчик температура (пасивна передача TF вихід)

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn',[model '/Sensor_T'],
'Position',[x0+5.5*dx y0 x0+5.5*dx+60 y0+40]);

set_param([model '/Sensor_T'],'Numerator','1','Denominator','[0.5 1]'); % невелика
фільтрація шумів (за бажанням)

```

```
%% --- Scope та логування
```

```
add_block('simulink/Sinks/Scope',[model '/Scope_Temp'], 'Position',[x0+6.5*dx y0
x0+6.5*dx+40 y0+40]);
```

```
add_block('simulink/Sinks/Scope',[model '/Scope_flow'], 'Position',[x0+6.5*dx y0+dy
x0+6.5*dx+40 y0+dy+40]);
```

```
add_block('simulink/Sinks/To Workspace',[model '/ToWorkspace_T'],
'Position',[x0+6.8*dx y0 x0+6.8*dx+40 y0+30]);
```

```
set_param([model '/ToWorkspace_T'],'VariableName','sim_T','SaveFormat','Array');
```

```
add_block('simulink/Sinks/To Workspace',[model '/ToWorkspace_flow'],
'Position',[x0+6.8*dx y0+dy x0+6.8*dx+40 y0+dy+30]);
```

```
set_param([model
'/ToWorkspace_flow'],'VariableName','sim_flow','SaveFormat','Array');
```

```
%% --- Підключення ліній сигналів
```

```
% T_set -> Sum_T (+)
```

```
add_line(model,'T_set/1','Sum_T/1','autorouting','on');
```

```
% T_meas (from Sensor_T) -> Sum_T (-)
```

```
add_line(model,'Sensor_T/1','Sum_T/2','autorouting','on');
```

```
% Sum_T -> PID_T
```

```
add_line(model,'Sum_T/1','PID_T/1','autorouting','on');
```

```
% PID_T -> Gain_T_to_flow
```

```
add_line(model,'PID_T/1','Gain_T_to_flow/1','autorouting','on');
```

```
% Gain_T_to_flow -> Sum_flow (as flow setpoint)
add_line(model,'Gain_T_to_flow/1','Sum_flow/1','autorouting','on');

% Measured flow from TF_flow -> Sum_flow (-)
add_line(model,'TF_flow/1','Sum_flow/2','autorouting','on');

% Sum_flow -> PID_flow
add_line(model,'Sum_flow/1','PID_flow/1','autorouting','on');

% PID_flow -> TF_flow (actuator)
add_line(model,'PID_flow/1','TF_flow/1','autorouting','on');

% TF_flow -> Gain_flow_to_heat
add_line(model,'TF_flow/1','Gain_flow_to_heat/1','autorouting','on');

% Gain_flow_to_heat -> Sum_heat (input 1)
add_line(model,'Gain_flow_to_heat/1','Sum_heat/1','autorouting','on');

% Disturbance -> Sum_heat (input 2), as added heat load
add_line(model,'Disturbance_heat_load/1','Sum_heat/2','autorouting','on');

% Sum_heat -> TF_Temp1 (input)
add_line(model,'Sum_heat/1','TF_Temp1/1','autorouting','on');
```

```
% TF_Temp1 -> Delay_T -> Sensor_T
add_line(model,'TF_Temp1/1','Delay_T/1','autorouting','on');
add_line(model,'Delay_T/1','Sensor_T/1','autorouting','on');

% Sensor_T -> Scope_Temp and ToWorkspace_T
add_line(model,'Sensor_T/1','Scope_Temp/1','autorouting','on');
add_line(model,'Sensor_T/1','ToWorkspace_T/1','autorouting','on');

% TF_flow -> Scope_flow and ToWorkspace_flow
add_line(model,'TF_flow/1','Scope_flow/1','autorouting','on');
add_line(model,'TF_flow/1','ToWorkspace_flow/1','autorouting','on');

%% --- Параметри симуляції
set_param(model,'Solver','ode45','StopTime','600','MaxStep','0.5');

%% --- Збереження та відкриття моделі
save_system(model);
disp(['Модель ' model ' створена і збережена як ' model '.six']);
open_system(model);
```