

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕНІКА»
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ ТА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до бакалаврської кваліфікаційної роботи на тему:
Автоматизація індивідуального теплового пункту з багатоконтурними
теплообмінниками

Студентки групи АВ-42 Галабурда Анастасія Валентинівна
(шифр) (прізвище, ім'я та по батькові)

Керівник роботи:	_____ / <u>Оксана БИЦЬ</u> / (підпис) (ім'я та прізвище)
Консультанти:	_____ / <u>Ігор КОСТИК</u> / (підпис) (ім'я та прізвище)
	_____ / <u>Ганна КРИХ</u> / (підпис) (ім'я та прізвище)
	_____ / <u>Юрій КІТ</u> / (підпис) (ім'я та прізвище)
	_____ / <u>Наталія МИХАЙЛИК</u> / (підпис) (ім'я та прізвище)
Завідувач кафедри:	_____ / <u>Федір МАТІКО</u> / (підпис) (ім'я та прізвище)

Львів 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Інститут енергетики і систем керування Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Спеціальність 151 “Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології”

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри АВКТ:

д.т.н., проф. Федір МАТІКО

“ ” 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Галабурда Анастасія Валентинівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Автоматизація індивідуального теплового пункту
з багатоконтурними теплообмінниками

затверджена наказом по університету від “ 26 ” травня 2025 р., № 1766-4-08

2. Термін подання студентом закінченої роботи “ 16 ” червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Технологічна схема

2. Опис технологічного процесу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які належить розробити):

Вступ

1. Аналіз технологічного процесу, як об'єкта керування

2. Техніко-економічне обґрунтування функціональної схеми автоматизації

3. Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації

4. Розроблення та опис розгорнутої функціональної схеми автоматизації

5. Програмне забезпечення системи автоматизації

6. Принципові електричні схеми з'єднань засобів автоматизації

7. Розрахунок і моделювання системи автоматичного регулювання температури гарячого водопостачання

8. Охорона праці при впровадженні та експлуатації системи автоматизації

9. Обґрунтування економічної доцільності впровадження системи автоматизації

Висновки

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

1. Функціональна схема автоматизації

2. Програма функціонування мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації

3. Принципова електрична схема з'єднань засобів автоматизації

4. Моделювання системи автоматичного регулювання температури в опалювальному приміщенні

6. Консультування роботи, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Економіки</i>	<i>доц. Михайлик Н.І.</i>		
<i>Охорони праці</i>	<i>доц. Кім Ю.В.</i>		
<i>Моделювання</i>	<i>доц. Крих Г.Б.</i>		
<i>Мікропроцесорних програмованих засобів автоматизації</i>	<i>доц. Костик І.В.</i>		

7. Дата видачі завдання _____ 19 травня 2025 р. _____

Керівник роботи _____ / Оксана БИЦЬ /
(підпис) (ім'я, прізвище)

Завдання прийняла до виконання _____ / Анастасія ГАЛАБУРДА /
(підпис) (ім'я, прізвище)

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Вступ</i>	<i>20.05.2025р.</i>	
2.	<i>Аналіз технологічного процесу, як об'єкта керування</i>	<i>21.05.2025р.</i>	
3.	<i>Техніко-економічне обґрунтування функціональної схеми автоматизації</i>	<i>22.05.2025р.</i>	
4.	<i>Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації</i>	<i>23.05.2025р.</i>	
5.	<i>Розроблення та опис розгорнутої функціональної схеми автоматизації</i>	<i>26.05.2025р.</i>	
6.	<i>Програмне забезпечення системи автоматизації</i>	<i>28.05.2025р.</i>	
7.	<i>Принципові електричні схеми з'єднань засобів автоматизації</i>	<i>30.05.2025р.</i>	
8.	<i>Розрахунок і моделювання системи автоматичного регулювання температури в опалювальному приміщенні</i>	<i>02.06.2025р.</i>	
9.	<i>Охорона праці при впровадженні та експлуатації системи автоматизації</i>	<i>06.06.2025р.</i>	
10.	<i>Обґрунтування економічної доцільності впровадження системи автоматизації</i>	<i>10.06.2025р.</i>	
11.	<i>Висновки</i>	<i>12.06.2025р.</i>	

Студентка: _____ / Анастасія ГАЛАБУРДА /
(підпис) (ім'я, прізвище)

Керівник роботи: _____ / Оксана БИЦЬ /
(підпис) (ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається зі 137 сторінок основного тексту, містить 59 ілюстрації, 10 таблиць, 28 джерел посилань, а також 4 графічні плакати, що відображають функціональну схему автоматизації, програму роботи контролера, принципову електричну схему з'єднань засобів автоматизації та результати моделювання системи регулювання температури.

Об'єктом дослідження виступає індивідуальний тепловий пункт з багатоконтурними теплообмінниками, що використовується для забезпечення ефективного теплопостачання та гарячого водопостачання будівель. Предметом дослідження є система автоматичного керування цим тепловим пунктом, орієнтована на стабільну роботу в умовах змінних теплових навантажень, підвищення енергоефективності та зменшення впливу людського фактора.

Метою роботи є розроблення сучасної системи автоматизації індивідуального теплового пункту з багатоконтурними теплообмінниками із застосуванням мікропроцесорної техніки, засобів вимірювання, керування та регулювання з урахуванням технічних і економічних вимог до сучасних енергосистем.

У процесі виконання роботи було здійснено аналіз технологічного процесу та параметрів ІТП, обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації, зокрема контролера, сенсорів і виконавчих пристроїв. Розроблено функціональну та принципову електричну схеми, сформовано алгоритми роботи системи, створено програмне забезпечення для контролера. Проведено математичне моделювання каскадної системи автоматичного регулювання температури в опалювальному приміщенні, а також виконано оцінку економічної доцільності впровадження розробленої системи автоматизації. У роботі також розглянуто питання охорони праці під час експлуатації автоматизованих систем.

Результати дослідження мають практичну значущість для впровадження в реальні об'єкти теплопостачання, оскільки запропонована система дозволяє забезпечити стабільну, безпечну та економічно ефективну експлуатацію ІТП з урахуванням сучасних вимог до автоматизації та енергозбереження.

ABSTRACT

The bachelor's qualification thesis consists of 137 pages of core text and includes 59 figures, 10 tables, 28 reference sources, and 4 graphic posters depicting the automation functional diagram, controller operation algorithm, principal electric wiring diagram of automation devices, and simulation results of the temperature control system.

The object of this study is an individual heating substation equipped with multi-loop heat exchangers designed for efficient heating and hot water supply in buildings. The subject of the research is the automatic control system for such a substation, which is aimed at maintaining reliable operation under variable thermal loads, improving energy efficiency, and reducing the impact of human error.

The purpose of the work is to design a modern automation system for the individual heating substation using multi-loop heat exchangers, based on microprocessor technology and modern control and measurement devices, in compliance with current technical and economic requirements for energy systems.

During the project, a comprehensive analysis of the technological process and operational parameters of the heating substation was conducted. The selection of automation equipment, including controllers, sensors, and actuators, was justified. A functional and electrical schematic was developed, operating algorithms were created, and software was written for the controller. Mathematical modeling of the cascade temperature control system for the heating circuit was performed, along with an evaluation of the economic feasibility of implementing the proposed solution. Occupational safety issues related to the operation of automated systems were also addressed.

The results of the research are of practical value and can be implemented in real heating infrastructure, as the developed system ensures stable, safe, and energy-efficient operation of heating substations in accordance with modern standards for automation and energy saving.

ЗМІСТ

1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА СПРОЩЕНОЇ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ	9
1.1 Опис технологічного процесу	9
1.2 Аналіз факторів, що впливають на перебіг технологічного процесу.....	11
1.3 Матеріальний та тепловий баланси технологічного об'єкта.....	12
1.4 Обґрунтування номінальних значень параметрів технологічного процесу та їхніх допустимих відхилень	13
1.5 Технологічна карта.....	15
1.6 Складання структурної схеми взаємозв'язків параметрів об'єкта керування.....	15
2 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	18
2.1 Аналіз характеристик взаємозв'язку між параметрами об'єкта керування.....	18
2.2 Обґрунтування та вибір координат регулювання, вимірювання, контролю, сигналізації, захисту та блокування.....	19
2.3 Визначення функціональних ознак систем автоматизації.....	20
2.4 Порівняльний аналіз існуючих схем керування та розроблення оптимальної функціональної схеми автоматизації спрощеним способом ...	22
3 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	28
3.1. Вимірювальні перетворювачі та виконавчі механізми	28
3.1.1 Обґрунтування вибору вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів	28
3.1.2 Технічні характеристики вибраних вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів	33
3.2 Мікропроцесорний програмований засіб автоматизації.....	42
3.2.1 Обґрунтування вибору мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації та опис його технічних характеристик	43
3.2.2 Конфігурування мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації	45
3.3 Специфікація технічних засобів автоматизації	46
4 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗГОРНУТИМ СПОСОБОМ ТА ЇЇ ОПИС	50

5 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ	57
5.1 Алгоритми функціонування контурів системи автоматизації.....	57
5.2 Програма функціонування мікропроцесорного програмного засобу автоматизації.....	67
6 РОЗРОБКА ТА ПИС ПРИНЦИПОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ З'ЄДНАНЬ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	75
7 РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ОПАЛЮВАЛЬНОМУ ПРИМІЩЕННІ	82
7.1 Побудова моделі об'єкта регулювання	82
7.2 Вибір структурної схеми системи регулювання температури в опалювальному приміщенні та розрахунок параметрів регулятора	89
7.3 Синтез каскадної системи регулювання	97
7.4 Моделювання та дослідження каскадної системи регулювання	103
8 ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	114
8.1 Технічні рішення щодо безпечної експлуатації засобів автоматизації .	115
8.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітації	116
8.2.1 Мікроклімат.....	117
8.2.2 Склад повітря робочої зони	118
8.2.3 Виробниче освітлення.....	118
8.2.4 Виробничий шум.....	120
8.2.5 Виробничі випромінювання	121
8.3 Пожежна безпека	122
8.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежам.....	122
8.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту	123
9 ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	125
ВИСНОВКИ	131
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	134

ВСТУП

У сучасних умовах експлуатації будівель та споруд питання підвищення енергоефективності та надійності систем теплопостачання набуває все більшої актуальності. Зростаючі тарифи на енергоносії, необхідність дотримання вимог екологічної безпеки та прагнення до економії експлуатаційних витрат зумовлюють потребу у пошуку нових рішень у галузі теплопостачання. Одним із таких рішень є впровадження індивідуальних теплових пунктів (ІТП), які оснащені багатоконтурними теплообмінниками та здатні задовольняти потреби будівлі у теплопостачанні з мінімальними втратами та максимальною ефективністю.

ІТП являє собою комплекс інженерного обладнання, який відповідає за передачу тепла від централізованої теплової мережі до системи опалення та гарячого водопостачання (ГВП) будівлі. Багатоконтурні теплообмінники у його складі забезпечують більш гнучке та ефективне управління тепловими потоками, що дозволяє досягти стабільної роботи системи в умовах змін зовнішніх факторів та різноманітних потреб користувачів. Водночас застосування багатоконтурних теплообмінників створює нові виклики у процесі автоматизації, пов'язані з необхідністю одночасного регулювання параметрів у різних контурах та узгодження їхньої роботи для досягнення максимальної енергоефективності та безпеки.

Автоматизація ІТП має ключове значення, адже дозволяє підтримувати оптимальні режими роботи системи у реальному часі, зменшуючи ризик людських помилок і забезпечуючи стабільність параметрів навіть у випадку змін навантаження чи зовнішніх впливів. Завдяки автоматизованому управлінню можливо забезпечити точний контроль температури та тиску теплоносія, що підвищує рівень комфорту для користувачів і сприяє ефективному використанню теплової енергії. Автоматизація також дозволяє виявляти та локалізувати потенційні аварійні ситуації на ранніх етапах, запобігаючи виходу з ладу обладнання та знижуючи витрати на ремонт і обслуговування.

Серед основних переваг автоматизації ІТП можна виділити суттєве зменшення експлуатаційних витрат завдяки оптимальному споживанню

енергоресурсів, підвищення надійності та безпеки роботи системи, зниження впливу людського фактора та забезпечення стабільного комфорту у приміщеннях незалежно від коливань зовнішньої температури. Автоматизовані системи також дозволяють проводити оперативний моніторинг та дистанційне управління технологічними процесами, що відкриває можливості для подальшої оптимізації витрат та адаптації до нових потреб користувачів.

Основною метою роботи є розроблення системи автоматизації індивідуального теплового пункту з багатоконтурними теплообмінниками, яка базується на застосуванні сучасних технічних засобів автоматизації та мікропроцесорної техніки. У процесі виконання роботи проведено детальний аналіз технологічного процесу ІТП, розглянуто фактори, що впливають на його ефективність та надійність, обґрунтовано вибір необхідного обладнання, розроблено функціональну та принципову схеми автоматизації, а також створено програмне забезпечення для мікропроцесорного програмованого контролера. Крім цього, виконано розрахунки та моделювання системи автоматичного регулювання температури гарячого водопостачання, а також розглянуто питання охорони праці та економічної доцільності впровадження автоматизованої системи.

Практична цінність роботи полягає у можливості впровадження запропонованих рішень у реальні об'єкти тепlopостачання. Це дозволить не лише забезпечити стабільну та безпечну роботу системи опалення та ГВП, але й значно підвищити рівень енергоефективності будівлі та знизити витрати на експлуатацію. Отримані результати можуть бути використані для модернізації вже існуючих теплових пунктів або у процесі проектування нових.

РОЗДІЛ 1

ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА СПРОЩЕНОЇ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ

1.1 Опис технологічного процесу

ІТП призначений для автоматизованого контролю та регулювання параметрів теплоносія, що забезпечує ефективне опалення та гаряче водопостачання будівлі [1]. Технологічний процес функціонування ІТП включає декілька ключових етапів, що об'єднують моніторинг, контроль тиску, температури та витрати теплоносія, а також запуск і зупинку насосного обладнання.

На рисунку 1.1 зображено технологічну схему ІТП з багатоконтурними теплообмінниками.

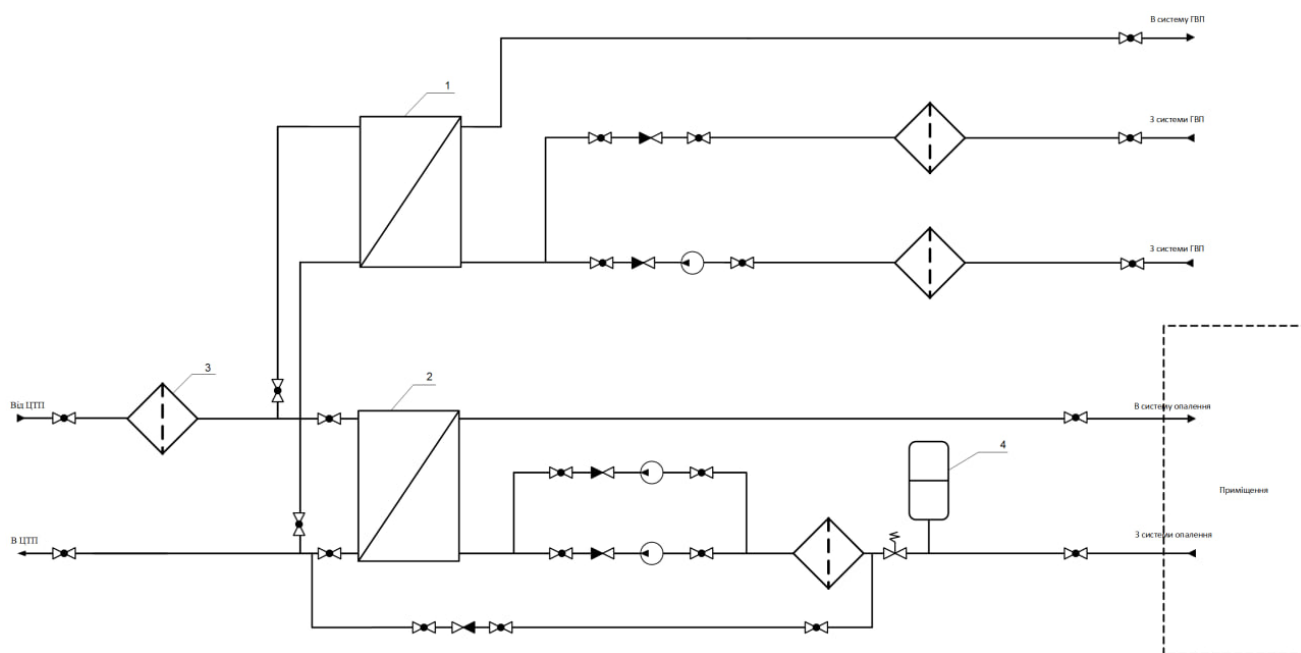


Рисунок 1.1 Технологічна схема ІТП з багатоконтурними теплообмінниками, де: 1) пластинчастий теплообмінник ГВП; 2) пластинчастий теплообмінник опалення; 3) фільтр; 4) розширювальний бак.

Гарячий теплоносій, що надходить від джерела тепла, проходить через пластинчастий теплообмінник, де він передає своє тепло воді, яка циркулює в системі опалення, знижуючи при цьому свою температуру. Використання пластинчастого теплообмінника робить систему опалення незалежною, ізолюючи її від гідравлічних змін у джерелі тепла або тепловій мережі. Вода із зовнішньої

мережі заповнює систему тільки при першому наповненні або при необхідності підживлення, що забезпечує додаткову стабільність роботи системи опалення.

На етапі подачі теплоносія до системи здійснюється вимірювання тиску на вході і виході. Сигнал з первинних вимірювальних перетворювачів (ПВП) подається на програмований логічний контролер (ПЛК), що дозволяє фіксувати зміни тиску та забезпечувати стабільність технологічного процесу. Це необхідно для контролю перепаду тиску на вході і виході теплоносія, що підтримує оптимальний рівень тиску в системі та запобігає можливим аварійним ситуаціям. Температура теплоносія вимірюється за допомогою ПВП температури, які відслідковують температуру на різних ділянках системи – на вході, виході та в теплообмінниках опалення і ГВП. Отримані значення передаються до ПЛК, який керує клапанами, підтримуючи заданий температурний режим залежно від зовнішніх умов і потреб будівлі. Для вимірювання витрати теплоносія використовується витратомір, що дозволяє контролювати об'єм рідини, яка проходить через систему опалення. Такий підхід дозволяє точно регулювати кількість подачі тепла до споживачів, підвищуючи ефективність теплопостачання.

Запуск та регулювання насосного обладнання виконуються автоматично за допомогою пристрою плавного пуску, який, керуючи насосами, стабілізує тиск в системі підживлення і підтримує циркуляцію теплоносія. Це забезпечує необхідний рівень тиску навіть при змінних навантаженнях. Автоматичне підживлення системи здійснюється за допомогою регулятора тиску, який активується, коли тиск у нагрівному контурі знижується нижче заданого значення. Такий підхід дозволяє ефективно управляти тепловим пунктом, забезпечуючи стабільну роботу системи опалення та захист її компонентів від можливих аварійних ситуацій. Система контролює також сигнали аварійної сигналізації, встановлені на випадок відхилення тиску чи температури від заданих значень. Світлодіодні індикатори сповіщають про порушення параметрів, що дозволяє оператору оперативно реагувати на збої у роботі ІТП.

Вимірювання температури теплоносія на виході з теплообмінника ГВП відбувається за допомогою ПВП, вихідний сигнал з якого поступає на ПЛК.

Регулювання температури теплоносія, що подається в теплообмінник ГВП здійснюється за допомогою комбінованого регулювального клапану. Також передбачено сигналізацію по верхній та нижній межі у разі якщо температура теплоносія виходить за межі заданих значень.

Вимірювання температури в приміщенні та температури теплоносія на виході з теплообмінника системи опалення (СО) здійснюється за допомогою окремих ПВП. Вихідні сигнали з обох вимірювальних перетворювачів передаються на ПЛК для подальшої обробки. Регулювання температури теплоносія, що подається в теплообмінник СО здійснюється за допомогою комбінованого регулювального клапану.

Таким чином, технологічний процес в ІТП побудований на автоматизованому моніторингу і регулюванні параметрів теплоносія, що дозволяє забезпечити надійне та економічно ефективно опалення і ГВП, адаптуючись до змінних умов експлуатації. Оскільки нагрівання води призводить до збільшення її об'єму, в замкнутому контурі системи опалення встановлено розширювальний бак, який приймає надлишок об'єму нагрітої води. Розширювальний бак розділений еластичною мембраною, яка розтягується або стискається, приймаючи та повертаючи воду в систему залежно від її температури. Для захисту від аварійного підвищення тиску встановлюються запобіжні клапани, з яких один є резервним [2].

1.2 Аналіз факторів, що впливають на перебіг технологічного процесу

Зміна температури повітря – це ключовий фактор, що впливає на функціонування опалювальних систем та комфорт у приміщеннях. Цей фактор враховується при проектуванні та експлуатації будівельних систем опалення, так як температурні зміни впливають на споживання енергії, внутрішній клімат та загальний комфорт приміщень.

Передача тепла через огорожувальні конструкції, які включають стіни, дах, підлогу та вікна, здійснюється головним чином шляхом кондуктивного теплообміну. Тобто, тепло передається від обігрівача чи системи опалення через

матеріал огороження до оточуючого середовища. Крім того, на поверхнях цих конструкцій також відбувається теплообмін випромінюванням та конвекцією.

Періодичні коливання температури повітря відображаються у щорічних та добових змінах. Ці зміни залежать від різних факторів, таких як географічне розташування, пора року та рельєф місцевості. Наприклад, у регіонах з помірним кліматом можуть бути помітні значні різниці в температурі між літом та зимою, а також між днем та ніччю.

Неперіодичні коливання температури виникають внаслідок випадкових подій і факторів, таких як проходження холодних фронтів, зміна погодних умов або місцеві метеорологічні явища. Ці неперіодичні зміни можуть бути тривалими або короткочасними, і вони також можуть впливати на режим опалення та енергоефективність будівельних систем.

1.3 Матеріальний та тепловий баланси технологічного об'єкта

Ефективність роботи ІТП залежить від передачі тепла від теплоносія з теплової мережі до теплоносія з системи опалення, при цьому потрібно забезпечити необхідний тиск в системі опалення. Теплоносій розподіляється на дві системи: опалення та ГВП.

За допомогою розподілу теплоти, яка подається до теплового пункту, відбувається складання теплового балансу даного теплового пункту [3].

В загальному вигляді рівняння теплового балансу ІТП в усталеному режимі роботи записується так (1.1):

$$Q_{\text{заг}} = Q_{\text{пн}} + Q_{\text{пд}} + Q_{\text{ГВП}} + Q_{\text{втр}}, \quad (1.1)$$

де $Q_{\text{заг}}$ – загальна теплота на 1 м^3 теплоносія, що йде з теплової мережі, кДж/м^3 ;

$Q_{\text{пн}}$ – корисно використана теплота в системі опалення, кДж/м^3 ;

$Q_{\text{ГВП}}$ – корисно використана теплота в системі гарячого водопостачання, кДж/м^3 ;

$Q_{\text{втр}}$ – втрати теплоти в трубопроводах та гідравлічних опорах, кДж/м^3 .

При цьому $Q_{\text{пн}}$ (1.2) та $Q_{\text{ГВП}}$ (1.3) дорівнюють:

$$Q_{\text{пн}} = F_{\text{тн}}^{\text{оф}} \cdot C_1 \cdot (t_{\text{тн}}^{\text{оф}} - t_{\text{вх}}^{\text{оф}}), \quad (1.2)$$

де $F_{\text{тн}}^{\text{оф}}$ – витрата теплоносія з теплової мережі до системи опалення фасаду, м³/год;

C_1 – питома теплоємність теплоносія з мережі, кДж/(кг·К);

$t_{\text{тн}}^{\text{оф}}$ – температура води в системі опалення фасаду, °С;

$t_{\text{вх}}^{\text{пн}}$ – температура теплоносія з мережі на вході в теплообмінник, °С.

$$Q_{\text{ГВП}} = F_{\text{ГВП}} \cdot C_2 \cdot (t_{\text{ГВП}} - t_{\text{вх}}^{\text{ГВП}}), \quad (1.3)$$

де $F_{\text{ГВП}}$ – витрата теплоносія з теплової мережі до системи ГВП, м³/год;

C_2 – питома теплоємність теплоносія з мережі, кДж/(кг·К);

$t_{\text{ГВП}}$ – температура води в системі ГВП, °С;

$t_{\text{вх}}^{\text{ГВП}}$ – температура теплоносія з мережі на вході в теплообмінник, °С.

Розрахунок матеріального балансу проводять для витрат теплоносія, що йде до системи опалення та ГВП.

Витрата теплоносія в системі опалення(1.4):

$$F_{\text{оф со}} = F_{\text{підж}}^{\text{оф}} + F_{\text{зв}}^{\text{пн}}, \quad (1.4)$$

де $F_{\text{оф со}}$ – витрата теплоносія в системі опалення, м³/год;

$F_{\text{підж}}^{\text{оф}}$ – витрата теплоносія в системі підживлення системи опалення, м³/год;

$F_{\text{зв}}^{\text{оф}}$ – витрата теплоносія в зворотній подачі в системі опалення, м³/год.

Витрата теплоносія в системі ГВП (1.5):

$$F_{\text{ГВП}} = F_{\text{цв}}^{\text{ГВП}} + F_{\text{хвп}}^{\text{оф}}, \quad (1.5)$$

де $F_{\text{ГВП}}$ – витрата теплоносія в системі ГВП, м³/год;

$F_{\text{цв}}^{\text{ГВП}}$ – витрата теплоносія циркуляційної води ГВП, м³/год;

$F_{\text{хвп}}^{\text{оф}}$ – витрата теплоносія з системи ХВП, м³/год.

1.4 Обґрунтування номінальних значень параметрів технологічного процесу та їхніх допустимих відхилень

У технологічному процесі, що реалізується в індивідуальному тепловому пункті, важливу роль відіграють параметри теплоносія, зокрема тиск та

температура. Їх значення мають бути чітко визначеними, оскільки від цього залежить ефективність та безпечність роботи всієї системи опалення.

Максимальна температура теплоносія на введенні ІТП від джерела тепла становить $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це значення є типовим для централізованих систем теплопостачання і забезпечує достатній рівень теплоти для задоволення теплових навантажень споживачів у холодний період року. Діапазон вимірювання температури становить $0\dots120\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дозволяє відстежувати параметри теплоносія як у пікові, так і в міжсезонні періоди. Граничне допустиме відхилення – $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає технічним вимогам до стабільності температури у теплових мережах.

Температура теплоносія на вході до внутрішньої системи опалення обмежується значенням $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це обмеження зумовлене конструктивними особливостями обладнання в будівлях та вимогами до безпеки експлуатації. Параметр контролюється в межах $0\dots90\text{ }^{\circ}\text{C}$ із допустимим відхиленням $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, що забезпечує стабільність температурного режиму для ефективного опалення приміщень.

Номінальний тиск у контурі джерела тепла становить 1 МПа , що характерно для мережі центрального теплопостачання. Контроль цього параметра в межах $0\dots1\text{ МПа}$ дозволяє уникнути перенавантаження трубопроводів і забезпечити надійність теплообміну. Допустима похибка вимірювання складає $\pm 30\text{ кПа}$.

У системі опалення номінальний тиск зазвичай підтримується на рівні $0,2\text{ МПа}$, що є достатнім для циркуляції теплоносія по внутрішніх мережах будівлі. Робочий діапазон – $0\dots0,2\text{ МПа}$, із допустимим відхиленням $\pm 6\text{ кПа}$, що відповідає нормам і гарантує коректну роботу арматури, теплообмінників та насосів.

Перепад тисків на введенні джерела тепла в ІТП знаходиться в межах від 45 до 300 кПа . Цей показник є критичним для забезпечення необхідної інтенсивності теплообміну через теплообмінники. Його контроль у межах $0\dots300\text{ кПа}$ із допустимим відхиленням $\pm 2\text{ кПа}$ дозволяє точно налаштувати систему для підтримки стабільного теплопостачання.

Втрати тиску в системі опалення при розрахунковій витраті теплоносія не повинні перевищувати 30 кПа . Це пов'язано з необхідністю забезпечити економну

роботу циркуляційних насосів, зменшення навантаження на обладнання та уникнення перевитрати енергії. Параметр контролюється в межах 0...30 кПа з максимально допустимою похибкою ± 1 кПа [4].

1.5 Технологічна карта

Номінальні значення параметрів технологічного процесу та їх допустимі відхилення наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Технологічна карта

№ п/п	Назва параметру	Одиниця вимірювання	Номінальне значення	Допустимі відхилення
1	2	3	4	5
1	Температура теплоносія з тепломережі	°C	70-95	± 18
2	Температура теплоносія в тепломережу	°C	50	± 12
3	Температура води на гаряче водопостачання	°C	55	± 5
4	Тиск води на гаряче водопостачання	МПа	0.45	± 0.1
5	Температура холодної води	°C	12	± 3
6	Тиск холодної води	МПа	0.6	± 0.05
7	Температура зворотної води з гарячого водопостачання	°C	50	± 10
8	Температура теплоносія до системи опалення	°C	70	± 15
9	Температура теплоносія від системи опалення	°C	50	± 10

1.6 Складання структурної схеми взаємозв'язків параметрів об'єкта керування

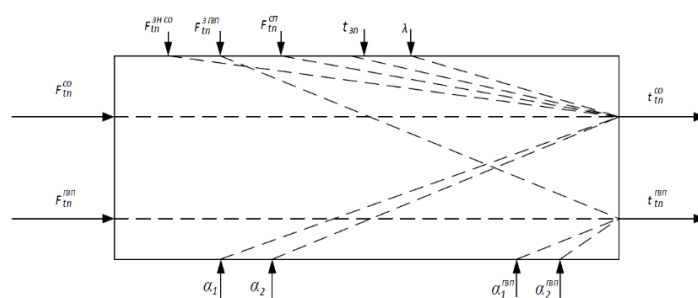


Рисунок 1.2 Структурна схема взаємозв'язків параметрів об'єкта керування

Вхідні величини об'єкта:

$F_{\text{ТН}}^{\text{СО}}$ – витрати теплоносія з теплової мережі до системи опалення, м³/год;

$F_{\text{ТН}}^{\text{ГВП}}$ – витрата теплоносія з теплової мережі до системи ГВП, м³/год.

Вихідні величини об'єкта:

$t_{\text{ТН}}^{\text{СО}}$ – температура води в системі опалення, °С;

$t_{\text{ТН}}^{\text{ГВП}}$ – температура води в системі гарячого водопостачання, °С;

Збурюючі величини об'єкта:

$F_{\text{ТН}}^{\text{ЗН СО}}$ – витрата теплоносія із зворотного напрямку в системі опалення, °С;

$F_{\text{ТН}}^{\text{З ГВП}}$ – витрати теплоносія із системи гарячого водопостачання, °С;

$F_{\text{ТН}}^{\text{СП}}$ – витрати теплоносія із системи підживлення до системи опалення, м³/год;

α_1 – коефіцієнти тепловіддачі від гарячого теплоносія мережі до стінки пластини теплообмінника системи опалення, Вт/(м²·К);

α_2 – коефіцієнти тепловіддачі від стінки пластини теплообмінника до теплоносія системи опалення Вт/(м²·К);

$\alpha_1^{\text{ГВП}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від гарячого теплоносія мережі до стінки пластини теплообмінника (ГВП), Вт/(м²·К);

$\alpha_2^{\text{ГВП}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від стінки пластини теплообмінника до теплоносія системи ГВП, Вт/(м²·К);

λ – коефіцієнт теплопровідності стінки пластинчастого теплообмінника (система опалення, система гарячого водопостачання), Вт/(м·К);

$t_{\text{зп}}$ – температура зовнішнього повітря, °С.

Висновки: ІТП з багатоконтурними теплообмінниками є сучасною високоефективною системою автоматизованого теплопостачання, яка забезпечує стабільну роботу систем опалення та ГВП будівлі. Технологічна схема ІТП дозволяє не лише забезпечити необхідні теплові навантаження, а й реалізувати адаптивне регулювання параметрів теплоносія відповідно до зовнішніх умов і внутрішніх потреб.

Комплексна автоматизація дозволяє точно контролювати тиск, температуру та витрату теплоносія завдяки використанню сучасних сенсорів і регулювальних

пристроїв. Це забезпечує оптимізацію теплових процесів, підвищення енергоефективності та зниження витрат на експлуатацію. Наявність аварійної сигналізації та індикаторів дає змогу оперативно реагувати на відхилення, що мінімізує ризики пошкодження обладнання.

Матеріальні та теплові баланси, розраховані для ІТП, демонструють чіткий розподіл енергії між системами опалення та ГВП, з урахуванням втрат у мережі. Це дозволяє ефективно прогнозувати теплові навантаження та планувати споживання енергії. Обґрунтовані номінальні значення температури, тиску та допустимі відхилення підтверджують відповідність системи вимогам безпеки та надійності.

РОЗДІЛ 2

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1 Аналіз характеристик взаємозв'язку між параметрами об'єкта керування

До основних параметрів технологічного процесу належать витрата води у прямому трубопроводі теплової мережі, витрата у зворотному трубопроводі та у лінії підживлення, температура теплоносія у системах опалення та ГВП, а також тиск у подаючому та зворотному трубопроводах. Ці параметри мають бути постійно під контролем для забезпечення ефективної та надійної роботи ІТП. Вони є основою для прийняття рішень у процесі управління і регулювання теплових потоків.

Для досягнення необхідної якості вимірювання та регулювання таких параметрів слід дотримуватися встановлених нормативів та вимог, що стосуються роботи ІТП. Важливо також забезпечити достатню точність і надійність усіх вимірювальних приладів, оскільки це безпосередньо впливає на енергоефективність системи та на якість обслуговування споживачів теплової енергії. Серед важливих вимог до сучасного ІТП – обов'язкова наявність приладів обліку теплової енергії, що дає можливість здійснювати чіткий контроль за споживанням ресурсів і оптимізувати роботу системи. Крім того, система автоматизації повинна забезпечувати не лише підтримку необхідних параметрів, а й своєчасне виявлення та усунення відхилень або аварійних ситуацій.

Таким чином, грамотне визначення меж і складових технологічного процесу, а також правильний вибір вимірювальних та виконавчих елементів, створюють основу для ефективної роботи ІТП. Це дозволяє забезпечити стабільність, безпеку і високий рівень енергоефективності всієї системи тепlopостачання.

2.2 Обґрунтування та вибір координат регулювання, вимірювання, контролю, сигналізації, захисту та блокування

Системи автоматизації технологічного процесу відіграють ключову роль у забезпеченні ефективної та надійної роботи ІТП. Вони відповідають за вимірювання і контроль технологічних параметрів, дистанційне керування обладнанням, сигналізацію про відхилення, аварійне блокування та захист устаткування, а також за облік спожитих і вироблених енергетичних ресурсів. Однією з основних функцій є точне регулювання параметрів теплоносія для досягнення енергоефективності й стабільної експлуатації.

Завдання автоматизації ІТП полягає в підтриманні необхідних параметрів тиску та температури у системах опалення та ГВП. Зокрема, система регулює температуру теплоносія, що подається на опалення, температуру гарячої води у ГВП, а також тиск у відповідних трубопроводах. Температура в системі опалення коригується залежно від умов у приміщеннях, а в ГВП – з урахуванням вимог до комфорту користувачів. Температура теплоносія змінюється шляхом регулювання витрати зворотної води або нагрівального потоку до теплообмінника.

Автоматизація водяних систем опалення передбачає стабілізацію температури повітря в приміщеннях та підтримання тиску зворотного теплоносія завдяки роботі циркуляційних насосів. Це гарантує рівномірний розподіл тепла та безпечну роботу навіть при зміні теплового навантаження або витрат ГВП.

Регулюючі дії враховують як задані параметри, так і зовнішні збурення – коливання температури чи тиску в тепловій мережі. Тому система постійно контролює ключові параметри: температуру води у прямому трубопроводі системи опалення, температуру і тиск у контурі ГВП, тиск у зворотному трубопроводі, у підживлювальній системі, а також перепади тиску в тепловій мережі. Окрім того, ведеться контроль витрати прямого теплоносія, температури зворотного потоку, а також тиску до і після фільтра, грязьовика та теплообмінника.

Для забезпечення комфортних умов експлуатації система підтримує температуру повітря в приміщеннях близько 20 °С, температуру гарячої води – у межах 50–60 °С, а тиск у зворотному трубопроводі — на рівні 400 кПа. Таким

чином, автоматизація ІТП забезпечує енергоефективність, комфорт, надійність і безпеку роботи всього комплексу.

2.3 Визначення функціональних ознак систем автоматизації

Таблиця 2.1

Функціональні ознаки системи автоматизації

№ п/п	Обсяг автоматизації	Показ	Реєстрація	Підсумування	Визначення відхилення	Сигналізація	Дискретне керування	Захист	Блокування	Автоматичне регулювання
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Тиск теплоносія на вході в систему ІТП	+	+							
2	Тиск теплоносія на виході з системи ІТП	+	+							
3	Перепад тиску на водяному фільтрі (вхід в систему)	+			+	+				
4	Температура теплоносія на виході з системи ІТП	+	+	+						
5	Витрата теплоносія в системі	+	+	+						
6	Температура теплоносія на вході в систему ІТП	+	+	+						
7	Температура теплоносія перед теплообмінником ГВП	+	+							

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
21	Тиск теплоносія перед циркуляційними насосами	+	+							+
22	Тиск в розривальній баці	+	+							
23	Тиск теплоносія на виході з системи опалення	+	+							
24	Температура теплоносія на виході з системи опалення	+	+							

2.4 Порівняльний аналіз існуючих схем керування та розроблення оптимальної функціональної схеми автоматизації спрощеним способом

Регулювання температури в системі опалення може здійснюватися трьома основними методами: за відхиленням регульованої величини, за збуренням, а також шляхом комбінування цих двох способів.

Найпоширенішим і найбільш зрозумілим методом є регулювання за відхиленням регульованої величини. У цьому випадку за основу береться температура повітря в приміщенні. У встановлених точках (одному або кількох опалюваних приміщеннях) монтуються температурні датчики, які постійно вимірюють фактичне значення температури. Якщо температура відхиляється від заданого значення, регулятор автоматично вмикає або вимикає подачу тепла, збільшуючи або зменшуючи теплове навантаження. Цей метод дозволяє точно підтримувати мікроклімат у приміщеннях і швидко реагувати на зміну теплових потреб. Перевагою є чітка відповідність реакції системи до реальних умов усередині приміщення, що забезпечує високий рівень комфорту. До недоліків можна віднести інерційність: система реагує вже після того, як зміни температури відбулися, тобто працює з певним запізненням.

Інший підхід – регулювання за збуренням, яке базується на врахуванні зовнішніх впливів на систему. Датчики в цьому випадку встановлюються зовні будівлі, де вони фіксують метеорологічні параметри. Цей метод дозволяє

заздалегідь реагувати на очікуване зниження або підвищення температури в приміщенні, оскільки система адаптується до змін довкілля ще до того, як вони вплинуть на внутрішній мікроклімат. Проте така система ефективна лише настільки, наскільки точно зовнішні фактори враховані в алгоритмах управління. Якщо ж змінна, яка суттєво впливає на тепловий баланс, не контролюється (наприклад, відчинене вікно чи внутрішні джерела тепла), система не зможе належним чином скоригувати подачу тепла.

Оптимальне рішення – комбіноване регулювання, яке поєднує обидва підходи. Система при цьому одночасно враховує як зовнішні збурення, так і фактичну температуру в приміщенні. Такий підхід дозволяє максимально точно підтримувати тепловий комфорт за рахунок прогнозованої корекції подачі тепла та оперативного реагування на реальні зміни температури. Комбінований метод підвищує енергоефективність системи, зменшує теплові втрати і забезпечує комфорт для споживачів.

У проєктованій системі передбачається реалізація регулювання температури за відхиленням регульованої величини, оскільки цей підхід дозволяє максимально точно контролювати температуру в приміщеннях та забезпечити стабільну якість опалення в умовах змін теплового навантаження.

За основу розробленої функціональної схеми автоматизації індивідуального теплового пункту з багатоконтурними теплообмінниками (рис. 2.2) було взято функціональну схему ІТП українського виробника ОРЕКС (рис. 2.1) [5].

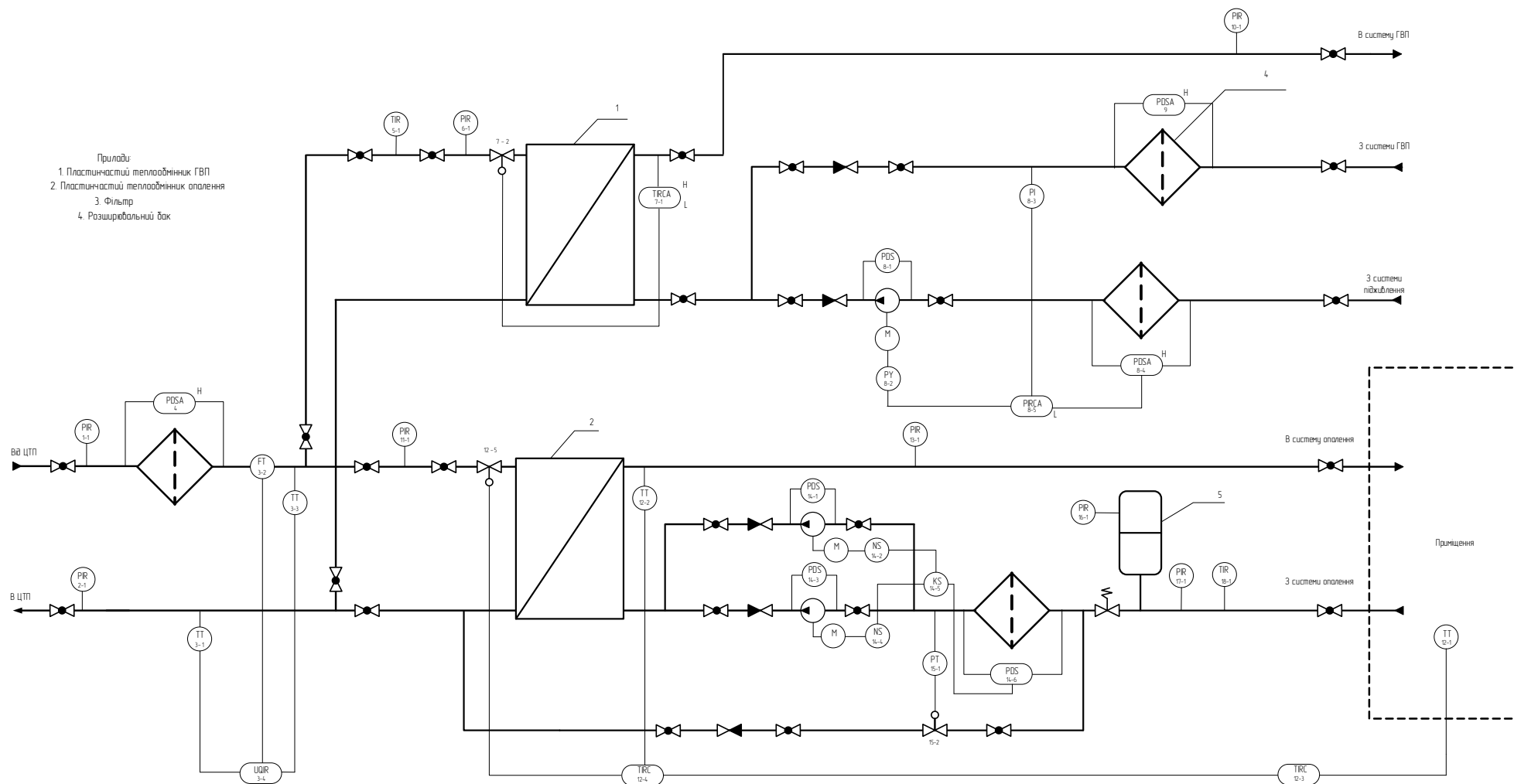


Рисунок 2.2 Спрощена функціональна схема автоматизації ІТП з багатоконтурними теплообмінниками

У представленій функціональній схемі автоматизації передбачено реалізацію 18 контурів, які охоплюють регулювання, вимірювання, індикацію та сигналізацію технологічних параметрів, зокрема таких, як:

Контур 1. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на вході теплоносія в систему.

Контур 2. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на виході теплоносія з системи.

Контур 3. Вимірювання, індикація та реєстрація кількості теплової енергії.

Контур 4. Сигналізації та контролю перепаду тиску на водяному фільтрі.

Контур 5. Вимірювання, індикація та реєстрація температури теплоносія на вході в теплообмінник ГВП.

Контур 6. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на вході в теплообмінник ГВП.

Контур 7. Сигналізація та регулювання температури в теплообміннику гарячого водопостачання.

Контур 8. Сигналізації та регулювання тиску на виході з системи гарячого водопостачання.

Контур 9. Сигналізації та контролю перепаду тиску на водяному фільтрі.

Контур 10. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на вході в систему гарячого водопостачання.

Контур 11. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на вході теплоносія в теплообмінник системи опалення.

Контур 12. Регулювання температури теплоносія в систему опалення.

Контур 13. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на вході в систему опалення.

Контур 14. Керування циркуляційними насосами системи опалення.

Контур 15. Контур керування байпасною лінією підживлення системи опалення.

Контур 16. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску в розширювальному баці.

Контур 17. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на виході з системи опалення.

Контур 18. Вимірювання, індикація та реєстрація температури на виході з системи опалення.

Висновки: У розділі було всебічно проаналізовано ІТП як об'єкт автоматизації, визначено його межі, основні параметри, зв'язки з зовнішнім середовищем, а також обґрунтовано вибір координат регулювання, контролю, сигналізації та захисту. У межах розгляду технологічного процесу визначено основні вхідні та вихідні величини, що дозволяє сформулювати чітку структуру управління системою.

Було встановлено, що ефективна робота ІТП вимагає точного вимірювання та регулювання параметрів теплоносія – температури, тиску та витрати, з урахуванням впливу внутрішніх і зовнішніх збурень. На основі цього визначено функціональні ознаки автоматизованої системи, яка забезпечує безперебійну та енергоефективну роботу опалення та гарячого водопостачання.

Здійснено порівняльний аналіз методів регулювання температури в системі опалення – за відхиленням, за збуренням і комбінованого – та обґрунтовано вибір найбільш доцільного способу для проєктованої системи. Комбінований підхід було визнано оптимальним для забезпечення точного температурного режиму та підвищення енергоефективності, проте у розробленій спрощеній схемі автоматизації реалізовано регулювання за відхиленням, як найбільш практичне та адаптивне до змін теплового навантаження.

Функціональна схема ІТП, розроблена на основі типового рішення виробника ОРЕКС, включає 18 контурів регулювання, контролю та сигналізації, що охоплюють усі критично важливі технологічні параметри. Це дозволяє забезпечити надійне управління тепловими потоками, стабільну роботу системи опалення та ГВП, а також точне реагування на зміну умов експлуатації.

Таким чином, запропонована автоматизована система ІТП є технологічно обґрунтованою, функціонально повною та відповідає вимогам сучасних стандартів енергоефективності та комфорту.

РОЗДІЛ 3

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1. Вимірювальні перетворювачі та виконавчі механізми

3.1.1 Обґрунтування вибору вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів

Контур 1. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на вході теплоносія в систему

Вимірювання тиску на вході теплоносія в систему відбувається за допомогою датчика тиску Danfoss MBS 1700 1811-A1AB04-0 з діапазоном вимірювання 0-6 бар та уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 мА, який подається на аналоговий вхід ПЛК SIMATIC S7-300.

Контур 2. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на виході теплоносія з системи

Вимірювання тиску на виході теплоносія з системи відбувається за допомогою датчика тиску Danfoss MBS 1700 1811-A1AB04-0 з діапазоном вимірювання 0-6 бар та уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 мА, який подається на аналоговий вхід ПЛК SIMATIC S7-300.

Контур 3. Вимірювання, індикація та реєстрація кількості теплової енергії.

В третьому контурі вимірюється температура теплоносія на вході і виході з системи опалення за допомогою перетворювача температури РегМик ПТУ-ТХАУ-002-Т-К-0,2 з діапазоном вимірювання від 0 до 150°C та уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 мА, витрата рідини вимірюється за допомогою магнітоіндуктивного витратоміра серії МІМ (0.1-25 л/хв, аналоговий сигнал 4-20 мА), далі сигнал надходить до ПЛК SIMATIC S7-300 для визначення спожитого тепла.

Контур 4. Сигналізації та контролю перепаду тиску на водяному фільтрі

Вимірювання перепаду тиску мережевої води на водяному фільтрі здійснюється за допомогою реле перепаду тиску Danfoss YNS106X (0,25-3,5 бар), яке формує дискретний сигнал, що подається на дискретний вхід ПЛК, який згідно

програми функціонування при перевищенні гранично допустимої межі за верхнім рівнем, формує керуючий сигнал, який в свою чергу вмикає світлову індикацію типу – Lovato electric 8LP2T ILB4P.

Контур 5. Вимірювання, індикація та реєстрація температури теплоносія на вході в теплообмінник гарячого водопостачання

У контурі вимірюється температура теплоносія на вході в теплообмінник гарячого водопостачання за допомогою перетворювача температури РегМик ПТУ-ТХАУ-002-Т-К-0,2 з діапазоном вимірювання від 0 до 150°C та уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 мА, який подається на аналоговий вхід ПЛК.

Контур 6. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на вході в теплообмінник гарячого водопостачання

Вимірювання тиску на вході в теплообмінник гарячого водопостачання відбувається за допомогою датчика тиску Danfoss MBS 1700 1811-A1AB04-0 з діапазоном 0-6 бар та уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 мА, який подається на аналоговий вхід ПЛК.

Контур 7. Сигналізація та регулювання температури в теплообміннику гарячого водопостачання

Вимірювання температури теплоносія в теплообміннику гарячого водопостачання відбувається за допомогою перетворювача температури РегМик ПТУ-ТХАУ-002-Т-К-0,2 з діапазоном вимірювання від 0 до 150°C та уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 мА, сигнал поступає на контролер. Далі за програмою функціонування контролер формує регулюючу дію, яка надходить до аналогового входу (4-20 мА) редукторного електроприводу АМЕ655 Danfoss VFS2 двоходового регулюючого клапану Danfoss VFS2 (DN 65) для регулювання температури теплоносія, що подається в теплообмінник системи опалення. У разі відхилень температури нижче або вище допустимого рівня активується сигналізація, яка реалізована за допомогою світлодіодних індикаторів ILB4P.

Контур 8. Сигналізації та регулювання тиску на виході з системи гарячого водопостачання

Вимірювання тиску в системі гарячого водопостачання здійснюється за допомогою датчика тиску Danfoss MBS 1700 1811-A1AB04-0, який має діапазон вимірювання 0–6 бар та передає уніфікований аналоговий сигнал 4 –20 мА. Потім сигнал передається на програмований логічний контролер SIMATIC S7-300, який відповідно до заданої програми формує керуючий сигнал (4 –20 мА), який подається на аналоговий вхід частотного перетворювача CFM110 (трифазний, 220 В, 0,55 кВт). У разі відхилень тиску нижче допустимого рівня також активується сигналізація, яка реалізована за допомогою світлодіодних індикаторів ILB4P.

Крім того, у разі значного перепаду тиску мережевої води на водяному фільтрі реле перепаду тиску Danfoss YNS106X (0,25–3,5 бар) формує дискретний сигнал на вхід контролера SIMATIC S7-300. Контролер, згідно з програмою, надсилає керуючий сигнал, що активує світлову індикацію за допомогою Lovato Electric 8LP2T ILB4P та одночасно подає сигнал на дискретний вхід частотного перетворювача CFM110, який зупиняє роботу насоса для захисту системи.

Контур 9. Сигналізації та контролю перепаду тиску на водяному фільтрі

Контроль перепаду тиску мережевої води на водяному фільтрі здійснюється за допомогою реле перепаду тиску Danfoss YNS106X (0,25-3,5 бар), яке подає формує дискретний сигнал, який подається на дискретний вхід ПЛК, який згідно програми функціонування при перевищенні гранично допустимої межі за верхнім рівнем, формує керуючий сигнал, який в свою чергу вмикає світлову індикацію типу – Lovato electric 8LP2T ILB4P.

Контур 10. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на вході в систему гарячого водопостачання

Вимірювання тиску на вході в систему гарячого водопостачання вимірюється за допомогою датчика тиску Danfoss MBS 1700 1811-A1AB04-0 з діапазоном 0-6 бар та уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 мА, який подається на аналоговий вхід програмного контролера SIMATIC S7-300.

Контур 11. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на вході в теплообмінник опалення

Вимірювання тиску на вході в теплообмінник опалення відбувається за допомогою датчика тиску Danfoss MBS 1700 1811-A1AB04-0 з діапазоном 0-6 бар та уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 мА, який подається на аналоговий вхід програмного контролера SIMATIC S7-300.

Контур 12. Вимірювання, індикація та реєстрація температури на вході в систему опалення

Вимірювання температури на вході в систему опалення водопостачання відбувається за допомогою перетворювача температури РегМик ПТУ-ТХАУ-002-Т-К-0,2 з діапазоном вимірювання від 0 до 150°C та уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 мА, який подається на аналоговий вхід програмного контролера SIMATIC S7-300.

Вимірювання температури в приміщенні відбувається за допомогою датчика температури AUTONICS THD-R-PT/C (-20-60 °C, 4-20 мА). Сигнали поступають на програмний контролер SIMATIC S7-300, після чого згідно з програмою каскадного регулювання формується керуючий сигнал, який з ПЛК надходить до аналогового входу (4-20 мА) редукторного електроприводу АМЕ655 Danfoss VFS2 двоходового регулюючого клапану Danfoss VFS2 (DN 65) для регулювання температури теплоносія, що подається в теплообмінник системи опалення.

Контур 13. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на вході в систему опалення

Вимірювання тиску на вході в систему опалення водопостачання відбувається за допомогою датчика тиску Danfoss MBS 1700 1811-A1AB04-0 з діапазоном 0-6 бар та уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 мА, який подається на аналоговий вхід програмного контролера SIMATIC S7-300

Контур 14. Керування циркуляційними насосами системи опалення

Робота циркуляційних насосів в системі опалення контролюється таймером ПЛК SIMATIC S7-300, який формує на виходах дискретний сигнал, що подається на пристрої плавного пуску типу – VLT Soft Start Controller MCD, які керують роботою відповідного насоса типу – RE SLWQB60-220V. Також здійснюється контроль перепаду тиску на кожному насосі у разі поломки циркуляційного насоса,

реле перепаду тиску Danfoss YNS106X (0,25-3,5 бар), в свою чергу формує дискретний сигнал, який подається на дискретний вхід ПЛК SIMATIC S7-300. В цьому випадку одразу вмикається другий двигун не залежно від того, який з них повинен працювати.

Регулювання перепаду тиску мережевої води на водяному фільтрі здійснюється за допомогою реле перепаду тиску Danfoss YNS106X (0,25-3,5 бар), яке подає формує дискретний сигнал, який подається на дискретний вхід ПЛК, який згідно програми функціонування надає дискретні сигнали на пристрої плавного пуску типу – VLT Soft Start Controller MCD, які керують насосами типу – RE SLWQB60-220V, щоб зупинити їхню роботу.

Контур 15. Контур керування байпасною лінією підживлення системи опалення

За допомогою датчика тиску Danfoss MBS 1700 1811-A1AB04-0 з діапазоном 0-6 бар та уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 мА, вимірюється тиск води при виході з розширювального баку, якщо тиск низький датчик формує аналоговий сигнал на SIMATIC S7-300, який згідно програми функціонування формує сигнал, що надходить до електроприводу AME10 регулюючого клапану Danfoss VS2 для регулювання тиску охолодженого теплоносія.

Контур 16. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску в розширювальному бачку

Вимірювання тиску в розширювальному бачку відбувається за допомогою датчика тиску Danfoss MBS 1700 1811-A1AB04-0 з діапазоном 0-6 бар та уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 мА, який подається на аналоговий вхід програмного контролера SIMATIC S7-300

Контур 17. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на виході з системи опалення

Вимірювання тиску на виході з системи опалення відбувається за допомогою датчика тиску Danfoss MBS 1700 1811-A1AB04-0 з діапазоном 0-6 бар та уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 мА, який подається на аналоговий вхід програмного контролера SIMATIC S7-300.

Контур 18. Вимірювання, індикація та реєстрація температури на виході з системи опалення

У вісімнадцятому контурі вимірюється температура теплоносія на виході з системи опалення за допомогою перетворювача температури РегМик ПТУ-ТХАУ-002-Т-К-0,2 з діапазоном вимірювання від 0 до 150°C та уніфікованим аналоговим сигналом 4-20 мА.

3.1.2 Технічні характеристики вибраних вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів

ПВП тиску Danfoss MBS 1700 1811-A1AB04-0

MBS 1700 призначений для використання як перетворювача тиску загального призначення, що забезпечує надійне вимірювання тиску. Діапазон вимірювання відносного тиску (манометричного) від 0 до 6 бар; вихідний сигнал 4-20 мА [6].

Зовнішній вигляд датчика тиску (а) та схема підключення (б) наведені на рисунку 3.1.

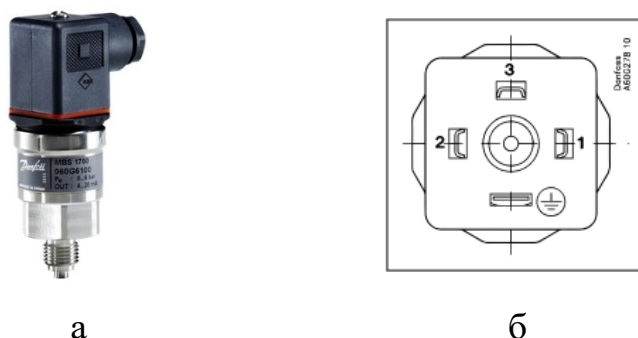


Рисунок 3.1 Датчик тиску Danfoss MBS 1700:
а) зовнішній вигляд; б) схема підключення.

ПВП температури РегМик ПТУ-ТХАУ-002-Т-К-0,2

ПТУ призначений для вимірювання і перетворення температури навколишнього середовища, рідких, газоподібних і сипучих середовищ в уніфікований вихідний сигнал 4-20 мА постійного струму, в різних галузях промисловості. Діапазон вимірювання від 0 до 150°C [7].

На рисунку 3.2. представлені габаритні установчі розміри (а) та схема внутрішніх з'єднань перетворювача температури (б).

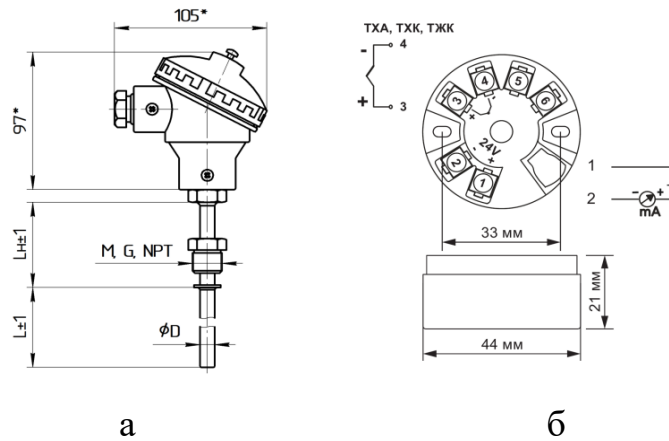


Рисунок 3.2 Конструкція перетворювача температури РегМик ПТУ-ТХАУ:

а) габаритні установчі розміри; б) схема внутрішніх з'єднань.

Магнітоіндуктивний витратомір серії MIM-12-R 10 H G5 C3T 0

Пристрій працює за принципом електромагнітного виміру. Індукована напруга вловлюється двома чутливими електродами, які знаходяться в контакті з середовищем, що вимірюється, відправляється на вимірювальний підсилювач. Діапазон вимірювання 0.1-25 л/хв; вихідний аналоговий сигнал 4-20 мА [8].

Зовнішній вигляд (а) та схема підключення (б) магнітоіндуктивного витратоміра представлені на рисунку 3.3.

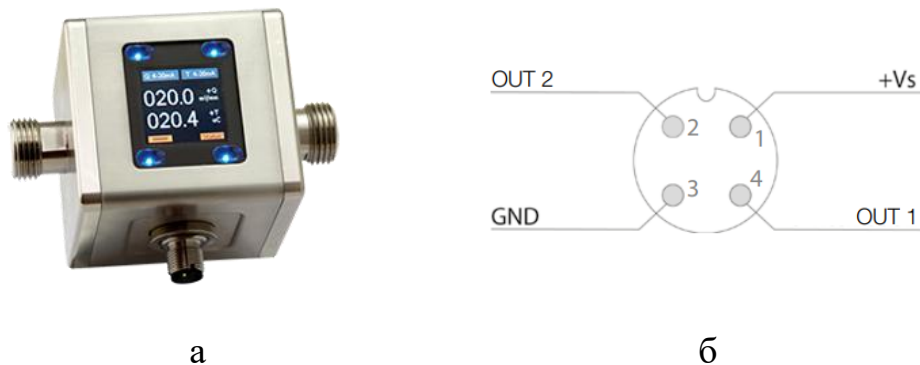


Рисунок 3.3 Магнітоіндуктивний витратомір серії MIM-12-R 10 H G5 C3T0:

а) зовнішній вигляд; б) схема підключення.

ПВП температури та вологи AUTONICS THD-R-C

Температурно-вологісний сенсор серії THD-R, призначений для вимірювання температури та відносної вологості повітря. Прилад працює від джерела живлення 24 В DC, споживаючи до 2.4 Вт, і має час відгуку 10 секунд. Він підтримує діапазон

вимірювання температури від -19.9 до 60.0 °C і вологості від 0 до 99.9% RH. Точність вимірювання температури складає ± 1.0 °C, а вологості – до $\pm 3\%$ RH залежно від моделі.

Вихідні сигнали температури та вологості можуть передаватися через аналогові інтерфейси (4-20 мА, DC) або через Modbus RTU (RS485). Прилад має ступінь захисту IP65 для сенсорної частини, що забезпечує стійкість до пилу та бризок [9].

На рисунку 3.4 зображено габаритні розміри (а) та схема підключення (б) датчика температури та вологи AUTONICS THD-R-C.

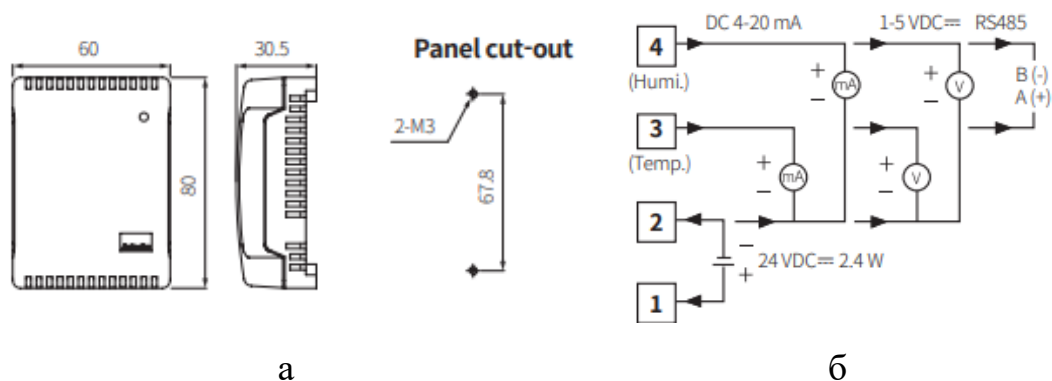


Рисунок 3.4 Датчик температури та вологи AUTONICS THD-R-C:

а) габаритні розміри; б) схема підключення.

Редукторний електропривід АМЕ655

Редукторний електропривід АМЕ655 працює від напруги живлення 24 або 230; +10 до -15%; пост. або змін. струму. Керуючий сигнал: 4-20 мА або імпульсний. Вихідний сигнал 4-20 мА. Клас захисту IP 54 [10].

На рисунку 3.5 зображено зовнішній вигляд(а) та схема підключення (б) електроприводу АМЕ655.

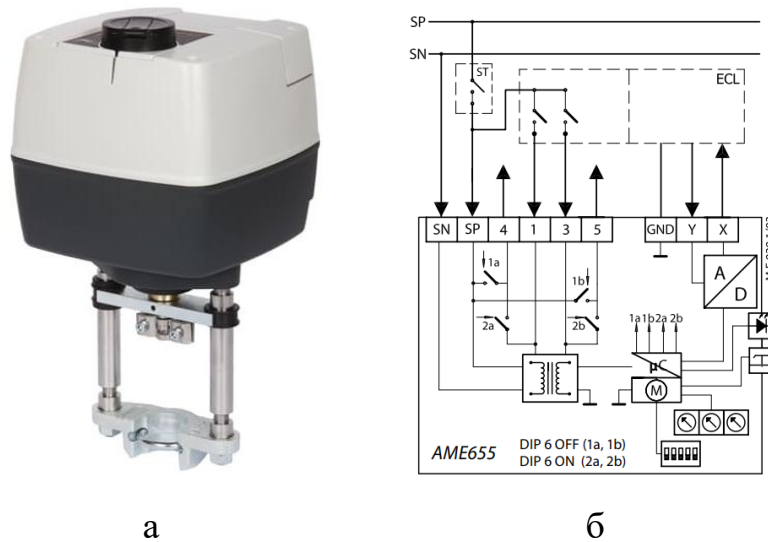


Рисунок 3.5 Електропривід АМЕ655:

а) зовнішній вигляд; б) схема підключення для роботи з сигналом 4-20 мА.

Danfoss VFS2 клапан регулюючий двоходовий

Регулюючі двоходові клапани Danfoss VFS2 застосовують в системах опалення, гарячого водопостачання, тепlopостачання вентиляційних установок та кондиціонерів, а також у теплових пунктах. Робочий тиск 25 бар; DN 65. Максимальна температура 200 °С. Пропускна здатність 63 м³/год [11].

На рисунку 3.6 зображений зовнішній вигляд сідельного регулювального клапану VFS2.



Рисунок 3.6 Зовнішній вигляд сідельного регулювального клапану VFS2

Реле перепаду тиску Danfoss YNS-C106

Реле перепаду тиску Danfoss YNS-106X призначене для застосування в системах автоматизації, технологічних захистів та блокувань. Найбільш поширене

застосування реле перепаду тиску – захист насосів від сухого ходу. Реле відрізняються високою надійністю роботи, зручністю монтажу та експлуатації. Діапазон налаштування уставки перепаду тиску: 0,25-3,5 бар [12].

На рисунку 3.7 зображений зовнішній вигляд (а) та контактна схема підключення (б) реле перепаду тиску Danfoss YNS-C106.

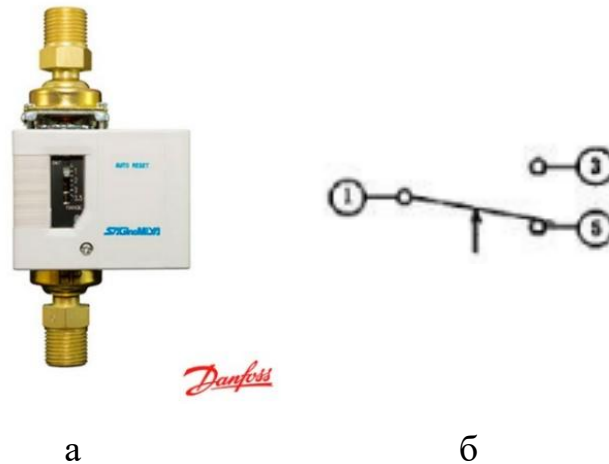


Рисунок 3.7 Реле перепаду тиску Danfoss YNS-C106:
а) зовнішній вигляд; б) контактна схема підключення.

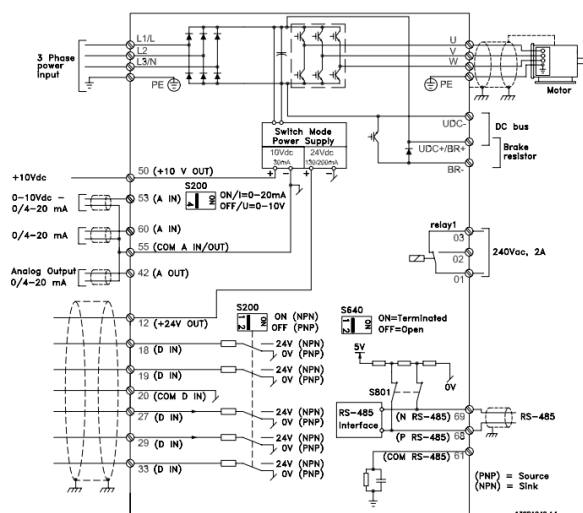
Частотний перетворювач VLT Micro Drive FC51

Частотний перетворювач VLT Micro Drive FC51 призначений для керування електродвигунами з максимальною потужністю 0.75 кВт та номінальним струмом 4.2 А. Пристрій працює на однофазному вході з напругою 200-240 В та виходом 230 В. Він має компактні габарити 150x70x148 мм та відповідає класу захисту IP20, що забезпечує базовий захист від пилу. Наявність ЕМС-фільтра дозволяє зменшити електромагнітні завади. Гальмівний ключ не передбачений. Перетворювач відзначається простотою у встановленні та експлуатації, що робить його ідеальним для невеликих промислових та комерційних застосувань [13].

На рисунку 3.8 зображені його зовнішній вигляд (а) та схема підключення (б).



а)



б)

Рисунок 3.8 Частотний перетворювач VLT Micro Drive FC51:

а) зовнішній вигляд; б) схема підключення.

Індикаторний світлодіодний пристрій Lovato 8 LP2T ILB4P

Lovato 8 LP2T ILB4P – індикаторний світлодіодний пристрій постійного світіння для промислових панелей. Працює при температурі від $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ і живиться від напруги 24 В AC/DC. Корпус виконаний з поліаміду та полікарбонату, забезпечує захист IP65 з передньої сторони (IP20 з задньої), що дозволяє використовувати пристрій у запиленому та вологому середовищі. Споживає струм до 20 мА, має високу електричну зносостійкість ($>30\ 000$ годин). Діаметр монтажного отвору – 22 мм, кріплення – гвинтове [14].

На рисунку 3.9 зображено зовнішній вигляд індикатора.



Рисунок 3.9 Зовнішній вигляд індикаторного світлодіодного пристрою

Lovato 8 LP2T ILB4P

Сідельний регулювальний клапан VS2

Сідельні регулювальні клапани VS2 застосовуються з редукторними електричними приводами типу типу АМЕ13, які можуть використовуватися з будь-яким різновидом аналогового керуючого сигналу (0(2)...10 В чи 0(4)...20 мА).

Сідельні регулювальні клапани VS2 застосовують в системах опалення, гарячого водопостачання, тепlopостачання вентиляційних установок та кондиціонерів, а також у теплових пунктах [15].

На рисунку 3.10 зображено зовнішній вигляд сідельного регулювального клапану VS2.



Рисунок 3.10 Зовнішній вигляд сідельного регулювального клапану VS2

Електропривід АМЕ10

Електропривід АМЕ10, зовнішній вигляд якого представлений на рисунку 2.5, зовнішній вигляд якого представлений на рисунку 2.5, призначений для керування регулюючими клапанами в системах опалення, вентиляції та кондиціонування. Він працює з сигналами 4-20 мА або 0-10 В, що дозволяє точно регулювати положення клапана для підтримання заданих параметрів температури або тиску. Електропривід АМЕ13 забезпечує плавне керування клапанами завдяки електронному управлінню, має компактний дизайн і простий у монтажі. Це надійне рішення для автоматизації теплотехнічних систем, яке сприяє підвищенню ефективності роботи і зниженню енергоспоживання [16].

На рисунку 3.11 зображено зовнішній вигляд електроприводу, на на рисунку 3.12 – габаритні розміри (а) та схема підключення (б) електроприводу АМЕ10.



Рисунок 3.11 Зовнішній вигляд електроприводу АМЕ10

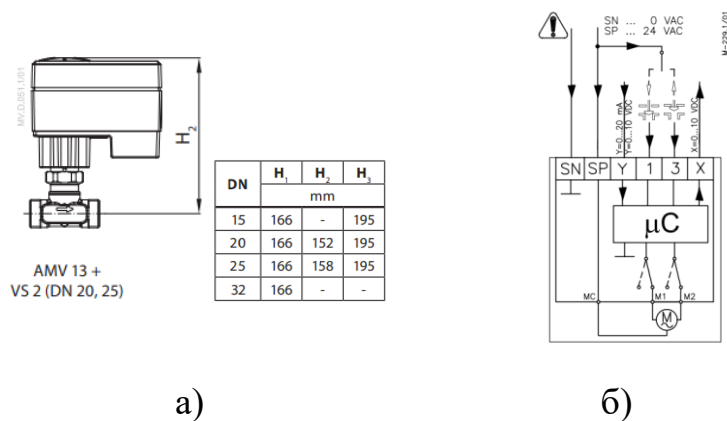


Рисунок 3.12 Електропривід АМЕ10:

а) габаритні розміри; б) схема підключення.

Прилад плавного пуску VLT Soft Starter MCD 100

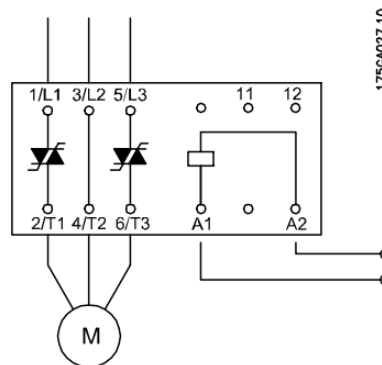
Пристрої плавного пуску серії MCD 100 забезпечують плавний запуск і зупинку трифазних двигунів змінного струму, що дозволяє зменшити пускові струми та уникнути шкідливого впливу різких стрибків пускового моменту. Завдяки цифровому керуванню пристрій забезпечує точність налаштувань і простоту встановлення. Контролер дозволяє індивідуально регулювати час прискорення та уповільнення, що забезпечує гнучкість у налаштуванні під потреби користувача.

Пристрій підтримує навантаження двигуна до 15 А, має регульований час прискорення та уповільнення в діапазоні від 0 до 10 секунд, а початковий крутний момент можна налаштувати до 85%. Він також обладнаний функцією швидкого старту (відриву), працює з універсальною керуючою напругою 208–240 В АС/DC, автоматично визначає відсутність фаз і адаптується до частоти мережі 50/60 Гц. Для зручності контролю стану передбачена світлодіодна індикація. Пристрій дозволяє необмежену кількість запусків і зупинок на годину при навантаженні до 15 А [17].

Схема підключення (б) та зовнішній вигляд (а) пристрою наведені на рисунку 3.13.



а)



б)

Рисунок 3.13 Магнітний пускач Danfoss VLT MCD 100-007

а) зовнішній вигляд; б) схема електричних з'єднань.

Насос серії RE SLWQB60

Насоси серії RE SLWQB60 – це електричні відцентрові пристрої, призначені для перекачування води з різних джерел, таких як резервуари, басейни, дощові бочки чи ґрунтові води. Завдяки створюваному тиску, ці насоси ідеально підходять для зрошення або транспортування води. Вони також ефективні для використання в ставках, басейнах, системах поливу, садівництві, дощових бочках, великих акваріумах, а також у сільському господарстві для обслуговування мілководних і глибоководних колодязів. Насоси чудово підходять для подачі прісної води в сільські будинки, на ферми та до котеджів.

Насос моделі SLWQB60-220V має потужність 370 Вт, працює від мережі 220 В, забезпечує продуктивність 40 літрів на хвилину та швидкість обертання ротора 3600 обертів на хвилину. Розмір вхідного та вихідного з'єднання становить 3/4" [18].

Схема підключення (б) та зовнішній вигляд (а) пристрою наведені на рисунку 3.14.

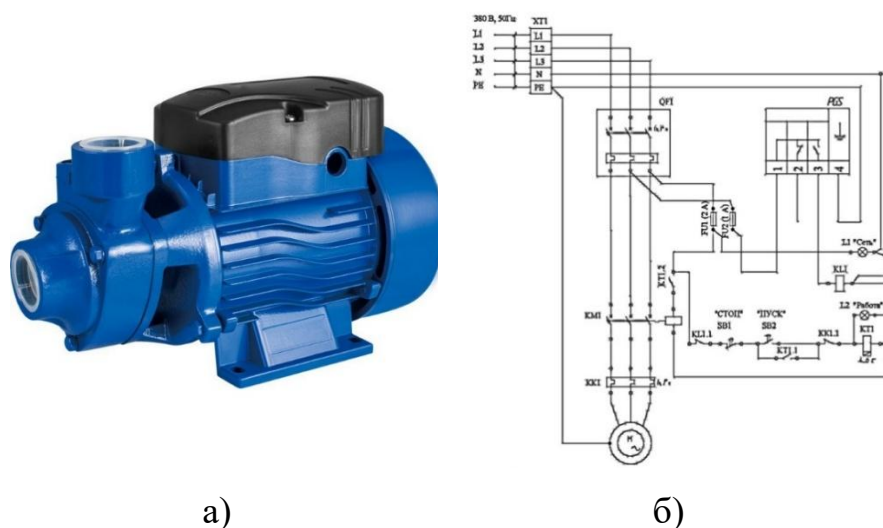


Рисунок 3.14 Відцентровий насос RE SLWQB60-220V:
а) зовнішній вигляд; б) схема електричних з'єднань.

Реле MER2-024DC

Мініатюрне електромагнітне реле MER2-024DC – це компактний пристрій, призначений для комутації електричних ланцюгів. Воно оснащено двома перекидними контактами та працює від постійної напруги 24 В. Реле здатне комутувати навантаження з струмом до 8 А (AC1, 250 В), що робить його зручним для застосування в автоматизованих системах керування, промисловій електроніці та побутових пристроях [19].

Зовнішній вигляд пристрою наведений на рисунку 3.15.

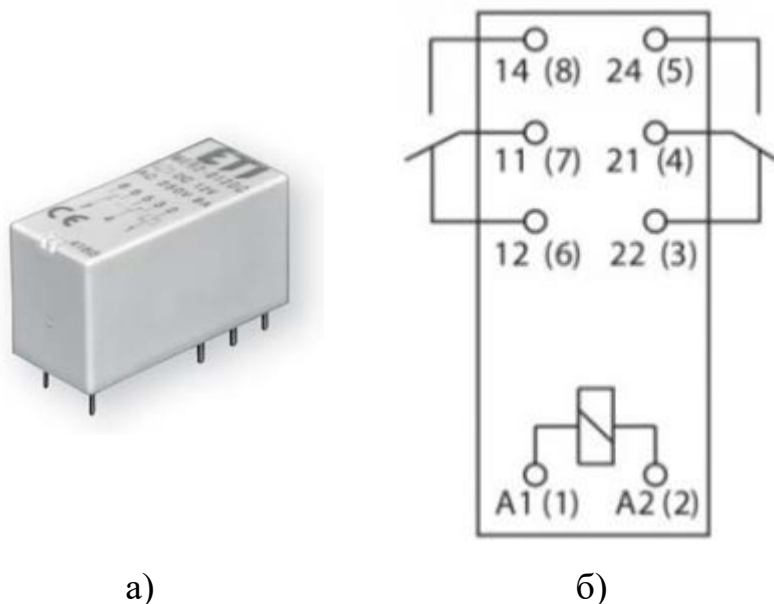


Рисунок 3.15 Зовнішній вигляд реле MER2-024DC

3.2 Мікропроцесорний програмованих засіб автоматизації

3.2.1 Обґрунтування вибору мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації та опис його технічних характеристик

Мікропроцесорний програмований засіб автоматизації Siemens Simatic S7-300 (рисунок 3.16) — це високоефективна система управління, що використовується для автоматизації промислових процесів. Вона підтримує різні моделі центральних процесорів, такі як CPU 313, CPU 314, CPU 315, CPU 317 та інші. Інтегрована оперативна пам'ять може досягати 512 кілобайт, що дозволяє зберігати і виконувати складні програми. Живлення системи забезпечується від джерела постійного струму 24 В або змінного струму 120/230 В залежно від обраної моделі. S7-300 дозволяє підключення до 32 модулів в одній конфігурації та підтримує такі протоколи, як Profibus, Profinet, MPI, а також Ethernet через відповідні комунікаційні модулі. Система працює в температурному діапазоні від -25 до +60 °C [20].



Рисунок 3.16 Зовнішній вигляд мікропроцесорного програмного засобу автоматизації Simatic S7-300

Будова S7-300 модульна, що забезпечує її універсальність і простоту адаптації. Центральний процесор виконує програми та управляє всією системою, а модулі вводу/виводу дозволяють підключати як аналогові, так і дискретні пристрої. Для комунікації з іншими системами використовуються спеціалізовані модулі, а живлення забезпечується окремим блоком. Монтаж S7-300 виконується на стандартну DIN-рейку, що спрощує її встановлення в шафи управління і дозволяє легко розширювати систему за необхідності.

Електричне підключення периферійних пристроїв виконується через гвинтові або пружинні клеми модулів. Дискретні датчики та виконавчі механізми

підключаються до відповідних дискретних модулів, а для аналогових сигналів (наприклад, 4-20 мА або 0-10 В) використовуються спеціальні модулі вводу/виводу. Комунікація з іншими пристроями реалізується за допомогою інтерфейсів Profibus DP, Profinet або Ethernet, що забезпечує високу швидкість і надійність передачі даних [20].

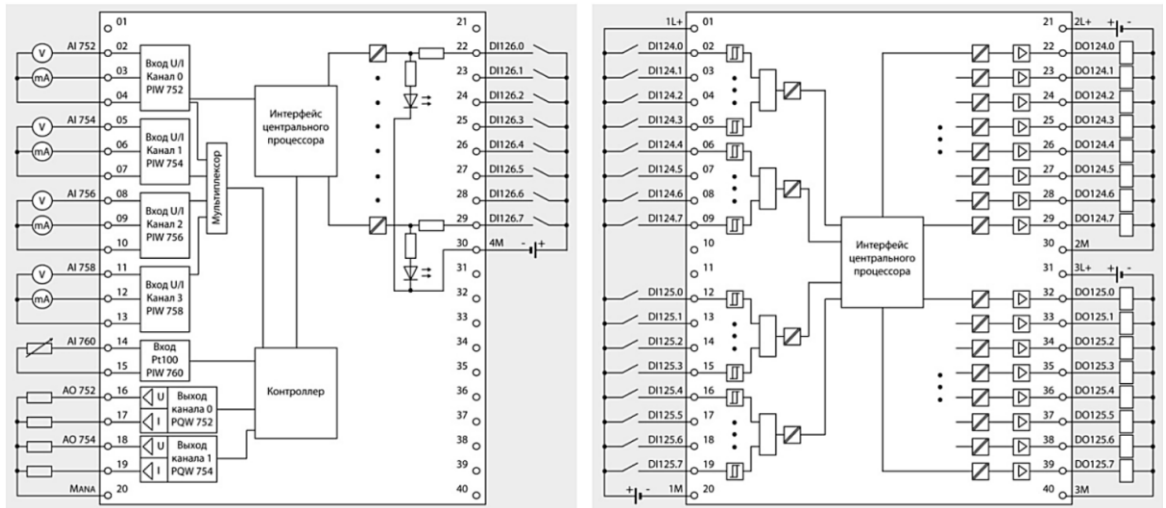


Рисунок 3.17 Схема приєднання вхідних та вихідних сигналів до каналів вводу/виводу модуля центрального процесора CPU 314C-2 DP

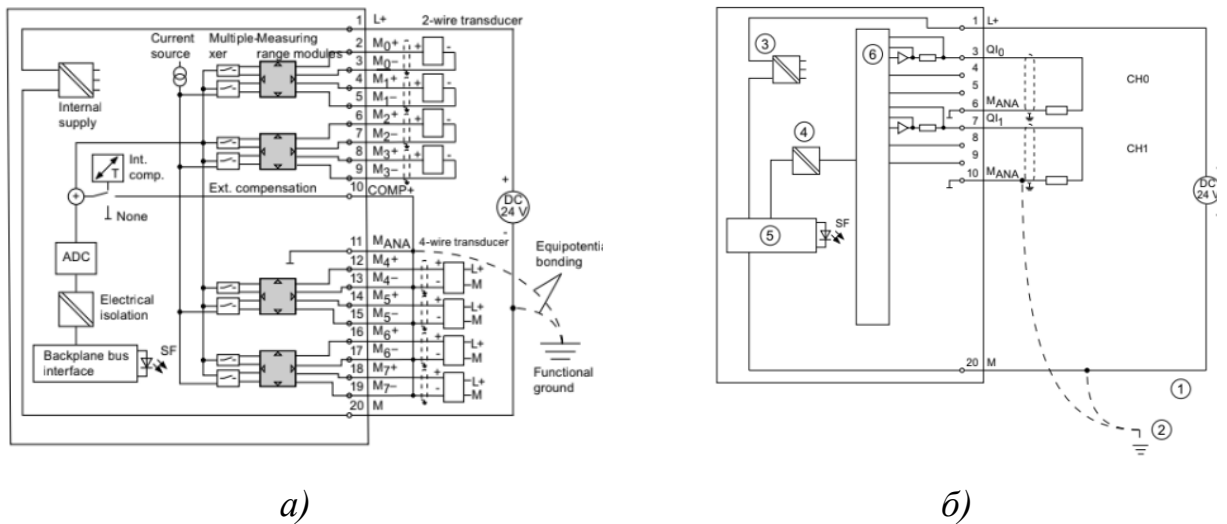


Рисунок 3.18 Схема приєднання вхідних та вихідних сигналів до каналів вводу/виводу:

- а) модуля аналогових вхідних сигналів типу SM-331;
- б) модуля аналогових вихідних сигналів типу SM-332.

3.2.2 Конфігурування мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації

Згідно з функціональною схемою автоматизації, для впровадження системи автоматизованого керування технологічним процесом необхідно забезпечити відповідну кількість вхідних та вихідних сигналів [20]. Розрахована кількість дискретних/аналогових вхідних та вихідних сигналів:

- загальна кількість дискретних вхідних сигналів: $DI_{3AD} = 8$;
- загальна кількість дискретних вихідних сигналів: $DO_{3AD} = 12$;
- загальна кількість аналогових вхідних сигналів: $AIN_{3AD} = 18$;
- загальна кількість аналогових вихідних сигналів: $AOUT_{3AD} = 2$.

З урахуванням цієї потреби обрано такі компоненти мікропроцесорного засобу автоматизації:

- мікропроцесорний програмований модуль керування типу CPU 314-2 DP (6ES7 314-6CF00-0AB0) – 1 шт.;
- блок живлення PS 307 (6ES7 307-1EA01-0AA0) $I_H = 5A$, $U_H = 230V$ AC – 1 шт.;
- модуль аналогових вхідних сигналів типу SM331 AI8x12Bit (6ES7 331-7KF02-0AB0) – 2 шт.;
- модуль аналогових вихідних сигналів типу SM332 AO2x12Bit (6ES7 332-5NB01-0AB0) – 1 шт..

Ця конфігурація забезпечить наступну кількість вхідних/вихідних сигналів:

- дискретні вхідні сигнали: $DI = 24 > DI_{3AD} = 8$;
- дискретні вихідні сигнали: $DO = 16 > DO_{3AD} = 12$;
- аналогові вхідні сигнали: $AIN = 21 > AIN_{3AD} = 18$;
- аналогові вихідні сигнали: $AOUT = 4 > AOUT_{3AD} = 2$.

Як показує порівняльний аналіз, обрана конфігурація мікропроцесорного обладнання повністю відповідає технічним вимогам, що висувуються до системи автоматизованого керування технологічним процесом.

Структурні схеми підключення центрального процесорного модуля та периферійних модулів, згідно з технічною документацією [21], наведено на рисунках 3.17 та 3.18.

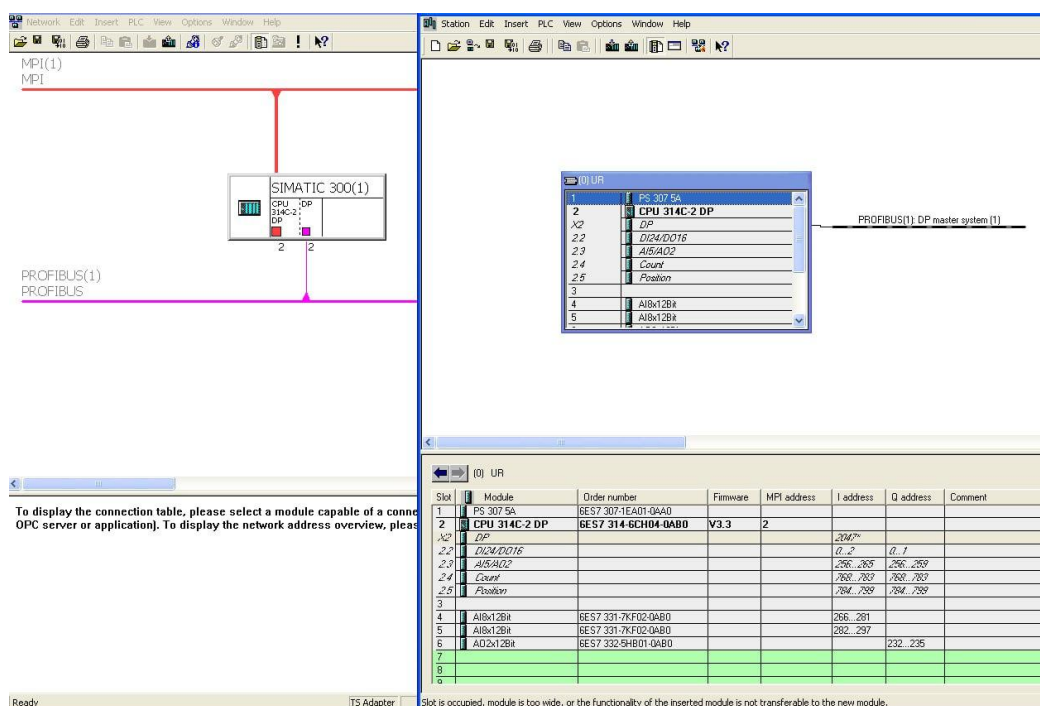


Рисунок 3.20 Вікно налаштування конфігурації мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації серії Simatic S7-300 в програмному забезпеченні Step 7

3.3 Специфікація технічних засобів автоматизації

Таблиця 3.1

№ п/п	№ позиції	Назва параметра	Місце встановлення	Назва та коротка технічна характеристика ТЗА	Тип	Кількість
1	2	3	4	5	6	7
1	1-1 2-1 6-1 8-3 10-1 11-1 13-1 15-1 16-1 17-1	Тиск	по місцю	ПВП тиску Danfoss MBS 1700 1811-A1AB04-0. Діапазон вимірювання відносного тиску (манометричного) від 0 до 6 бар; вихідний сигнал 4-20 мА	Danfoss MBS 1700 1811-A1AB04-0	10

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7
2	3-1 3-3 5-1 7-1 12-1 18-1	Температура	по місцю	ПВП температури РегМик ПТУ-ТХАУ-002-Т-К-0,2. Діапазон вимірювання від 0 до 150°C; уніфікований вихідний сигнал 4-20 мА постійного струму.	РегМик ПТУ-ТХАУ-002-Т-К-0,2	6
3	3-2	Витрата	по місцю	Магнітоіндуктивний витратомір серії МІМ-12-Р 10 Н G5 С3Т 0. Діапазон вимірювання 0.1-25 л/хв; вихідний аналоговий сигнал 4-20 мА	МІМ-12-Р 10 Н G5 С3Т 0	1
4	4-1 8-1 8-4 9-1 14-1 14-2 14-3 14-4 14-6	Тиск	по місцю	Реле перепаду тиску Danfoss YNS-106X. Діапазон налаштування уставки перепаду тиску: 0,25-3,5 бар	Danfoss YNS-106X	9
5	19-1	Температура	по місцю	ПВП температури та вологи AUTONICS THD-R-C. Прилад працює від джерела живлення 24 В DC, споживаючи до 2.4 Вт, і має час відгуку 10 секунд. Він підтримує діапазон вимірювання температури від -19.9 до 60.0 °C і вологості від 0 до 99.9% RH. Точність вимірювання температури складає ±1.0 °C; уніфікований вихідний сигнал 4-20 мА постійного струму.	AUTONICS THD-R-C	1
6	8-2		по місцю	Частотний перетворювач VLT Micro Drive FC51 призначений для керування електродвигунами з максимальною потужністю 0.75 кВт та номінальним струмом 4.2 А. Пристрій працює на однофазному вході з напругою 200-240 В та виходом 230 В. Він має компактні габарити 150x70x148 мм та відповідає класу захисту IP20, що забезпечує базовий захист від пилу.	VLT Micro Drive FC51	1

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7
7	14-2 14-4		по місцю	Прилад плавного пуску VLT Soft Starter MCD 100. Пристрій підтримує навантаження двигуна до 15 А, має регульований час прискорення та уповільнення в діапазоні від 0 до 10 секунд, а початковий крутний момент можна налаштувати до 85%. Він також обладнаний функцією швидкого старту (відриву), працює з універсальною керуючою напругою 208–240 В АС/DC, автоматично визначає відсутність фаз і адаптується до частоти мережі 50/60 Гц. Для зручності контролю стану передбачена світлодіодна індикація. Пристрій дозволяє необмежену кількість запусків і зупинок на годину при навантаженні до 15 А	VLT Soft Starter MCD 100	2
8	7-2 19-3		по місцю	Редукторний електропривід АМЕ655 працює від напруги живлення 24 або 230; +10 до -15%; пост. або змін. струму. Керуючий сигнал: 4-20 мА або імпульсний. Вихідний сигнал 4-20 мА. Клас захисту IP 54	AME655	2
9			по місцю	Насос серії RE SLWQB60 має потужність 370 Вт, працює від мережі 220 В, забезпечує продуктивність 40 літрів на хвилину та швидкість обертання ротора 3600 обертів на хвилину. Розмір вхідного та вихідного з'єднання становить 3/4"	RE SLWQB60	3
10			на щиті	Індикаторний світлодіодний пристрій Lovato 8 LP2T ILB4P	Lovato 8 LP2T ILB4P	6
11	15-2		по місцю	Електропривід АМЕ10 призначений для керування регулюючими клапанами в системах опалення, вентиляції та кондиціонування. Він працює з сигналами 4-20 мА або 0-10 В, що дозволяє точно регулювати положення клапана для підтримання заданих параметрів температури або тиску.	AME10	1

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7
12			по місцю	Регулюючий двоходовий клапан Danfoss VFS2. Робочий тиск 25 бар. Максимальна температура 200 °С. Пропускна здатність 63 м ³ /год	Danfoss VFS2	2
13			по місцю	Сідельний регулювальний клапан VS2. Сідельні регулювальні клапани VS2 застосовують в системах опалення, гарячого водопостачання, тепlopостачання вентиляційних установок та кондиціонерів, а також у теплових пунктах.	VS2	1
14			на щиті	Мікропроцесорний програмований модуль керування типу CPU 314-2 DP (6ES7 314-6CF00-0AB0)	CPU 314-2 DP (6ES7 314-6CF00-0AB0)	1
15			на щиті	Блок живлення PS 307 (6ES7 307-1EA01-0AA0) ІН= 5А, UН= 230В АС	PS 307 (6ES7 307-1EA01-0AA0)	1
16			на щиті	Модуль аналогових вхідних сигналів типу SM331 AI8x12Bit (6ES7 331-7KF02-0AB0)	SM331 AI8x12Bit (6ES7 331-7KF02-0AB0)	2
17			на щиті	Модуль аналогових вихідних сигналів типу SM332 AO2x12Bit (6ES7 332-5HB01-0AB0)	SM332 AO2x12Bit (6ES7 332-5HB01-0AB0)	1

Висновки: у результаті проведеного аналізу було обґрунтовано вибір та структуровано застосування вимірювальних перетворювачів і виконавчих механізмів у всіх технологічних контурах системи тепlopостачання та гарячого водопостачання. Обрані засоби автоматизації забезпечують точне вимірювання основних параметрів (тиску, температури, витрати, перепаду тиску), їхню індикацію, реєстрацію, а також ефективно керування регулюючими органами.

Використання типових та уніфікованих датчиків, таких як Danfoss MBS 1700 і РегМик ПТУ-ТХАУ-002, дозволяє знизити експлуатаційні витрати, спростити монтаж і технічне обслуговування, а також забезпечити централізований контроль параметрів системи через програмований контролер. Наявність розгалуженої системи сигналізації та резервування (наприклад, дублювання насосів) підвищує загальну надійність і безпеку роботи автоматизованої системи.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗГОРНУТИМ СПОСОБОМ ТА ЇЇ ОПИС

Функціональна схема автоматизації ІТП з багатоконтурними теплообмінниками, розгорнутий вигляд якої представлений на графічному плакаті №1 включає реалізацію таких контурів:

Контур 1. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на вході теплоносія в систему

Вимірювання тиску на вході теплоносія в систему відбувається за допомогою датчика тиску 1-1, який подається на аналоговий вхід програмного контролера SIMATIC S7-300.

Окрім цього передбачено на автоматизованому робочому місці (АРМ) індикацію та реєстрацію тиску теплоносія на вході в систему.

Контур 2. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на виході теплоносія з системи

Вимірювання тиску на виході теплоносія з системи відбувається за допомогою датчика тиску 2-1, який подається на аналоговий вхід програмного контролера SIMATIC S7-300.

Окрім цього передбачено на АРМ індикацію та реєстрацію тиску теплоносія на виході з системи.

Контур 3. Вимірювання, індикація та реєстрація кількості теплової енергії

В третьому контурі вимірюється температура теплоносія на вході і виході з системи опалення за допомогою перетворювача температури 3-1 та 3-3, витрата рідини вимірюється за допомогою магнітоіндуктивного витратоміру 3-2, після чого сигнал надходить до програмного контролера SIMATIC S7-300 для визначення споживання тепла системою.

Окрім цього на АРМ передбачено індикацію та реєстрацію температури теплоносія на вході та виході з системи, а також його витрати.

Контур 4. Сигналізації та контролю перепаду тиску на водяному фільтрі

Вимірювання перепаду тиску мережевої води на водяному фільтрі здійснюється за допомогою реле перепаду тиску 4-1, яке формує дискретний сигнал, що подається на дискретний вхід ПЛК, який згідно програми функціонування при перевищенні гранично допустимої межі за верхнім рівнем, формує керуючий сигнал, який в свою чергу вмикає світлову індикацію типу – Lovato electric 8LP2T ILB4P.

Окрім цього передбачено на АРМ передбачено сигналізацію та контроль перепаду тиску на водяному фільтрі;

Контур 5. Вимірювання, індикація та реєстрація температури теплоносія на вході в теплообмінник гарячого водопостачання

У контурі вимірюється температура теплоносія на вході в теплообмінник гарячого водопостачання за допомогою перетворювача температури 5-1, який подається на аналоговий вхід ПЛК.

Окрім цього передбачено на АРМ індикацію та реєстрацію температури теплоносія на вході в теплообмінник ГВП.

Контур 6. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на вході в теплообмінник гарячого водопостачання

Вимірювання тиску на вході в теплообмінник гарячого водопостачання відбувається за допомогою датчика тиску 6-1, який подається на аналоговий вхід ПЛК.

Окрім цього передбачено на АРМ індикацію та реєстрацію тиску теплоносія на вході в теплообмінник ГВП.

Контур 7. Сигналізація та регулювання температури в теплообміннику гарячого водопостачання

Вимірювання температури теплоносія в теплообміннику гарячого водопостачання відбувається за допомогою перетворювача температури 7-1, сигнал поступає на контролер. Далі за програмою функціонування контролер формує регулюючу дію, яка надходить до аналогового входу (4-20 мА) редукторного електроприводу 7-2 для регулювання температури теплоносія, що подається в теплообмінник системи опалення. У разі відхилень температури нижче або вище

допустимого рівня активується сигналізація, яка реалізована за допомогою світлодіодних індикаторів ILB4P.

Окрім цього на АРМ передбачено індикацію, реєстрацію та сигналізацію температури теплоносія на виході з теплообмінника гарячого водопостачання, а також формування регулюючої дії в ручному режимі керування.

Контур 8. Сигналізації та регулювання тиску на виході з системи гарячого водопостачання

Вимірювання тиску в системі гарячого водопостачання здійснюється за допомогою датчика тиску 8-3. Потім сигнал передається на програмований логічний контролер SIMATIC S7-300, який відповідно до заданої програми формує керуючий сигнал, який подається на аналоговий вхід частотного перетворювача 8-2. У разі відхилень тиску нижче допустимого рівня також активується сигналізація, яка реалізована за допомогою світлодіодних індикаторів ILB4P.

Крім того, у разі значного перепаду тиску мережевої води на водяному фільтрі реле перепаду тиску 8-4 формує дискретний сигнал на вхід контролера SIMATIC S7-300. Контролер, згідно з програмою, надсилає керуючий сигнал, що активує світлову індикацію за допомогою Lovato Electric 8LP2T ILB4P та одночасно подає сигнал на дискретний вхід частотного перетворювача CFM110, який зупиняє роботу насоса для захисту системи.

Окрім цього передбачено:

- на АРМ: індикацію, реєстрацію та сигналізацію тиску на виході з системи ГРП та контроль перепаду тиску на водяному фільтрі, а також формування сигналу керування ПЧ;
- на ПЛК: алгоритм дискретного керування для увімкнення / вимкнення ПЧ.

Контур 9. Сигналізації та контролю перепаду тиску на водяному фільтрі

Контроль перепаду тиску мережевої води на водяному фільтрі здійснюється за допомогою реле перепаду тиску 9-1, яке подає формує дискретний сигнал, який подається на дискретний вхід ПЛК, який згідно програми функціонування при перевищенні гранично допустимої межі за верхнім рівнем, формує керуючий

сигнал, який в свою чергу вмикає світлову індикацію типу – Lovato electric 8LP2T ILB4P.

Окрім цього на АРМ передбачено сигналізацію та контроль перепаду тиску на водяному фільтрі.

Контур 10. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на вході в систему гарячого водопостачання

Вимірювання тиску на вході в систему гарячого водопостачання вимірюється за допомогою датчика тиску 10-1, який подається на аналоговий вхід програмного контролера SIMATIC S7-300.

Окрім цього передбачено на АРМ індикацію та реєстрацію тиску теплоносія на вході в систему ГВП.

Контур 11. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на вході в теплообмінник опалення

Вимірювання тиску на вході в теплообмінник опалення відбувається за допомогою датчика тиску 11-1, який подається на аналоговий вхід програмного контролера SIMATIC S7-300.

Окрім цього передбачено на АРМ індикацію та реєстрацію тиску теплоносія на вході в теплообмінник опалення.

Контур 12. Вимірювання, індикація та реєстрація температури на вході в систему опалення

Вимірювання температури на вході в систему опалення водопостачання відбувається за допомогою перетворювача температури 12-2, який подається на аналоговий вхід програмного контролера SIMATIC S7-300.

Вимірювання температури в приміщенні відбувається за допомогою датчика температури 12-1. Сигнали поступають на програмний контролер SIMATIC S7-300, після чого згідно з програмою регулювання керуючий сигнал з ПЛК надходить до аналогового входу (4-20 мА) редукторного електроприводу 12-3 для регулювання температури теплоносія, що подається в теплообмінник системи опалення.

Окрім цього передбачено на АРМ індикацію та реєстрацію температури теплоносія на вході в СО, а також температури в приміщенні.

Контур 13. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на вході в систему опалення

Вимірювання тиску на вході в систему опалення водопостачання відбувається за допомогою датчика тиску 13-1, який подається на аналоговий вхід програмного контролера SIMATIC S7-300

Окрім цього передбачено на АРМ індикацію та реєстрацію тиску теплоносія на вході в СО.

Контур 14. Керування циркуляційними насосами системи опалення

Робота циркуляційних насосів в системі опалення контролюється таймером ПЛК SIMATIC S7-300, який формує на виходах дискретний сигнал, що подається на пристрої плавного пуску 14-2 та 14-4, які керують роботою відповідного насоса типу – RE SLWQB60-220V. Також здійснюється контроль перепаду тиску на кожному насосі у разі поломки циркуляційного насоса, реле перепаду тиску 14-1 та 14-3, в свою чергу формує дискретний сигнал, який подається на дискретний вхід ПЛК SIMATIC S7-300. В цьому випадку одразу вмикається другий двигун не залежно від того, який з них повинен працювати.

Регулювання перепаду тиску мережевої води на водяному фільтрі здійснюється за допомогою реле перепаду тиску 14-6, яке подає формує дискретний сигнал, який подається на дискретний вхід ПЛК, який згідно програми функціонування формує дискретні сигнали на пристрої плавного пуску 14-2 та 14-4, які керують насосами типу – RE SLWQB60-220V, щоб зупинити їхню роботу.

Окрім цього передбачено:

- на АРМ: сигналізацію та контроль перепаду тиску на водяних насосах та фільтрі, а також формування сигналу керування пристроями плавного пуску;
- на ПЛК: алгоритм дискретного керування для увімкнення / вимкнення пристроїв плавного пуску.

Контур 15. Контур керування байпасною лінією підживлення системи опалення

За допомогою датчика тиску 15-1, вимірюється тиск води при виході з розширювального баку, якщо тиск низький датчик формує аналоговий сигнал на SIMATIC S7-300, який згідно програми функціонування формує сигнал, що надходить до електроприводу 15-2 для регулювання тиску охолодженого теплоносія.

Окрім цього на АРМ передбачено індикацію та реєстрацію тиску на виході з РБ.

Контур 16. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску в розширювальному бачку

Вимірювання тиску в розширювальному бачку відбувається за допомогою датчика тиску 16-1, який подається на аналоговий вхід програмного контролера SIMATIC S7-300.

Окрім цього передбачено на АРМ індикацію та реєстрацію тиску РБ.

Контур 17. Вимірювання, індикація та реєстрація тиску на виході з системи опалення

Вимірювання тиску на виході з системи опалення відбувається за допомогою датчика тиску 17-1, який подається на аналоговий вхід програмного контролера SIMATIC S7-300.

Окрім цього передбачено на АРМ індикацію та реєстрацію тиску теплоносія на виході з СО.

Контур 18. Вимірювання, індикація та реєстрація температури на виході з системи опалення

У вісімнадцятому контурі вимірюється температура теплоносія на виході з системи опалення за допомогою перетворювача 18-1, який подається на аналоговий вхід програмного контролера SIMATIC S7-300.

Окрім цього передбачено на АРМ індикацію та реєстрацію температури теплоносія на виході з СО.

Функціональна схема автоматизації ІТП з багатоконтурними теплообмінниками наведена на графічному плакаті №1 цієї бакалаврської кваліфікаційної роботи.

Висновки: функціональна схема автоматизації ІТП розроблена з урахуванням багатоконтурного підходу, забезпечує повний контроль та ефективне керування усіма ключовими параметрами теплотехнічної системи. Представлена структура передбачає реалізацію 18 окремих контурів, кожен з яких виконує важливу роль у забезпеченні надійної, енергоефективної та безпечної роботи ІТП.

Контури вимірювання та реєстрації тиску і температури (контури 1, 2, 5, 6, 10, 11, 12, 13, 16, 17, 18) дозволяють здійснювати безперервний моніторинг стану теплоносія на різних етапах його циркуляції – від входу до виходу із систем гарячого водопостачання та опалення. Це, в свою чергу, забезпечує оперативне реагування на будь-які зміни параметрів і запобігає аварійним ситуаціям.

Контури сигналізації та контролю перепадів тиску на водяних фільтрах і насосах (контури 4, 8, 9, 14) покликані захищати систему від перевантаження, засмічення та відмов елементів. Реалізовані алгоритми контролю та індикації забезпечують підвищення рівня надійності і довговічності експлуатації обладнання.

Регулювання параметрів у режимі реального часу (контури 7, 8, 12, 14, 15) дозволяє адаптувати роботу ІТП до змінних умов експлуатації, підтримуючи задані рівні температури і тиску завдяки використанню програмованого логічного контролера SIMATIC S7-300 та відповідних виконавчих механізмів.

Особливо важливою є інтеграція АРМ, яке забезпечує централізовану індикацію, реєстрацію, сигналізацію та ручне втручання в роботу ІТП. Це підвищує рівень зручності експлуатації, спрощує обслуговування системи та сприяє своєчасному виявленню несправностей.

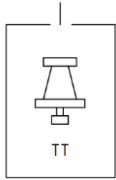
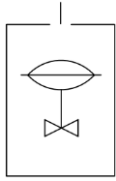
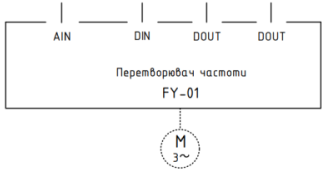
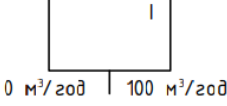
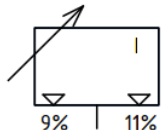
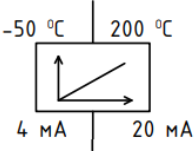
РОЗДІЛ 5

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

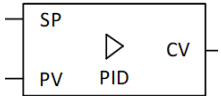
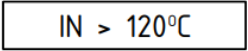



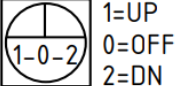
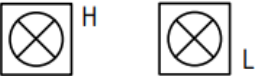
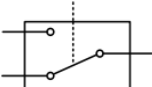
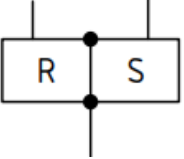

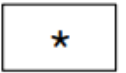
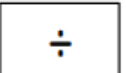
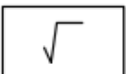
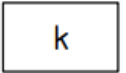
5.1 Алгоритми функціонування контурів системи автоматизації

Для побудови алгоритмів функціонування контурів регулювання, вимірювання та індикації системи автоматизації ІТП з багатоконтурними теплообмінниками у відповідності до функціональної схеми автоматизації, спрощений вигляд якої представлено в розділі 1 на рисунку 1.2 використано графічні блоки, що наведені в таблиці 5.1 [22].

Таблиця 5.1

Графічне зображення функціонального елемента	Функціональне призначення
1	2
	<p>первинний вимірювальний перетворювач, давач, чутливий елемент, пристрій збору інформації про технологічний параметр;</p>
	<p>виконавчий механізм з аналоговим керуючим сигналом в комплекті з регулюючий органом.</p>
	<p>частотно-керовані пристрої (перетворювачі частоти, пристрої плавного пуску).</p>
	<p>аналоговий індикатор технологічного параметру</p>
	<p>здавач аналогового сигналу з обмеженням діапазону по двох значеннях</p>
	<p>лінійне перетворення (масштабування) аналогового сигналу</p>

Продовження таблиці 5.1

1	2
	ПІД-регулятор
	елементи порівняння аналогового сигналу та заданого значення, або двох аналогових сигналів на більше / менше / рівність
	кнопка «пуск» (увімкнення)
	кнопка «стоп» (вимкнення)
	перемикач режимів роботи регулятора або схеми керування
	перемикач на два положення з проміжним вимкненим станом
	світло-сигнальний індикатор сигналізації по верхній/нижній.
	селектор аналогових або дискретних сигналів
	тригер SR (реле з запам'ятовуванням попереднього стану)
	арифметичне віднімання числових сигналів
	арифметичне множення числових сигналів
	арифметичне ділення числових сигналів
	добування кореня квадратного з числового значення
	коефіцієнт або константа

Алгоритми функціонування системи автоматизованого керування ІТП з багатоконтурними теплообмінниками

Контур 1. Вимірювання тиску на вході теплоносія в систему.

Контур 2. Вимірювання тиску на виході теплоносія з системи.

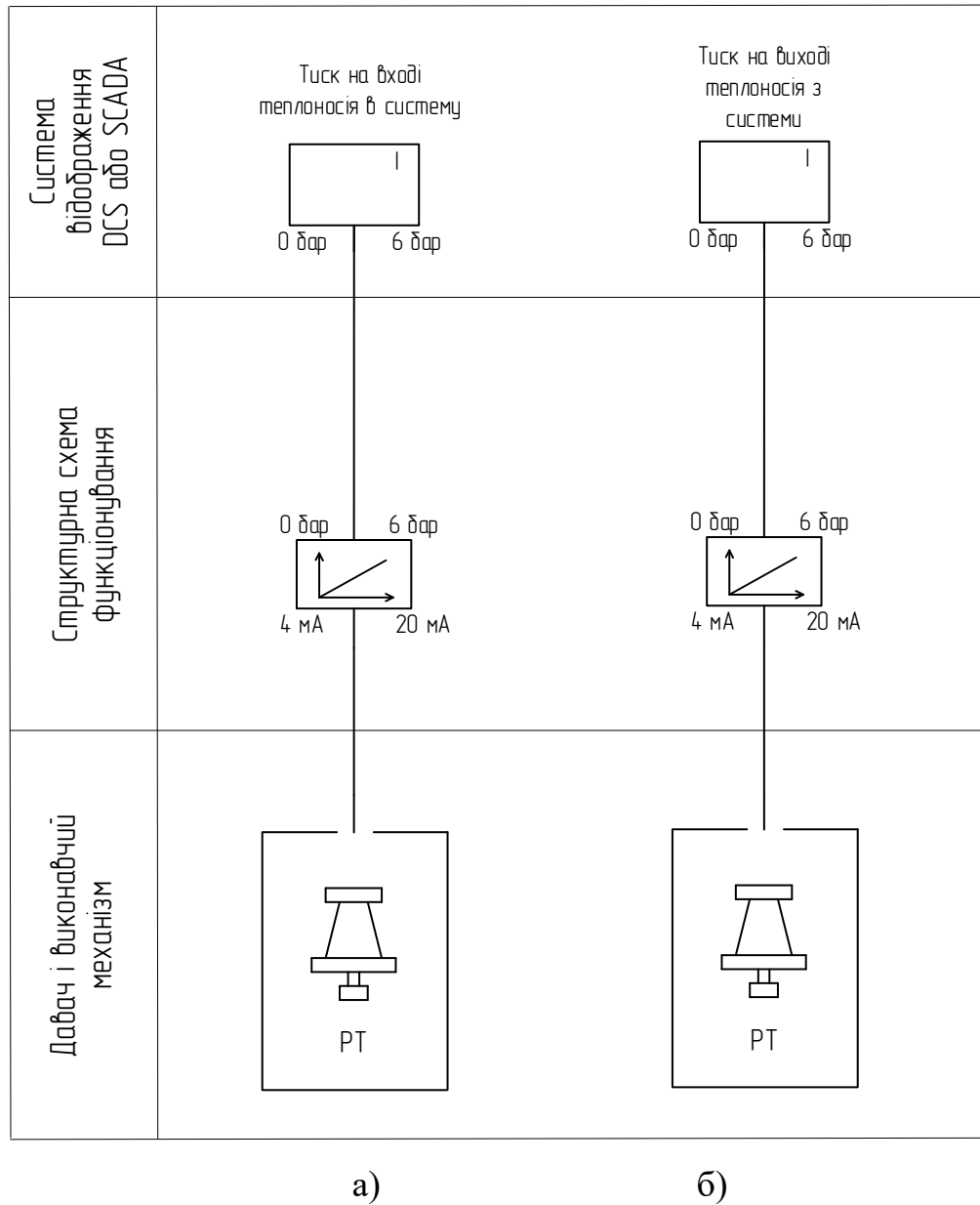


Рисунок 5.1 Алгоритм функціонування контуру:

а) №1 «Вимірювання тиску на вході теплоносія в систему»;

б) №2 «Вимірювання тиску на виході теплоносія з системи»

Контур 3. Вимірювання, індикація та реєстрація кількості теплової енергії.

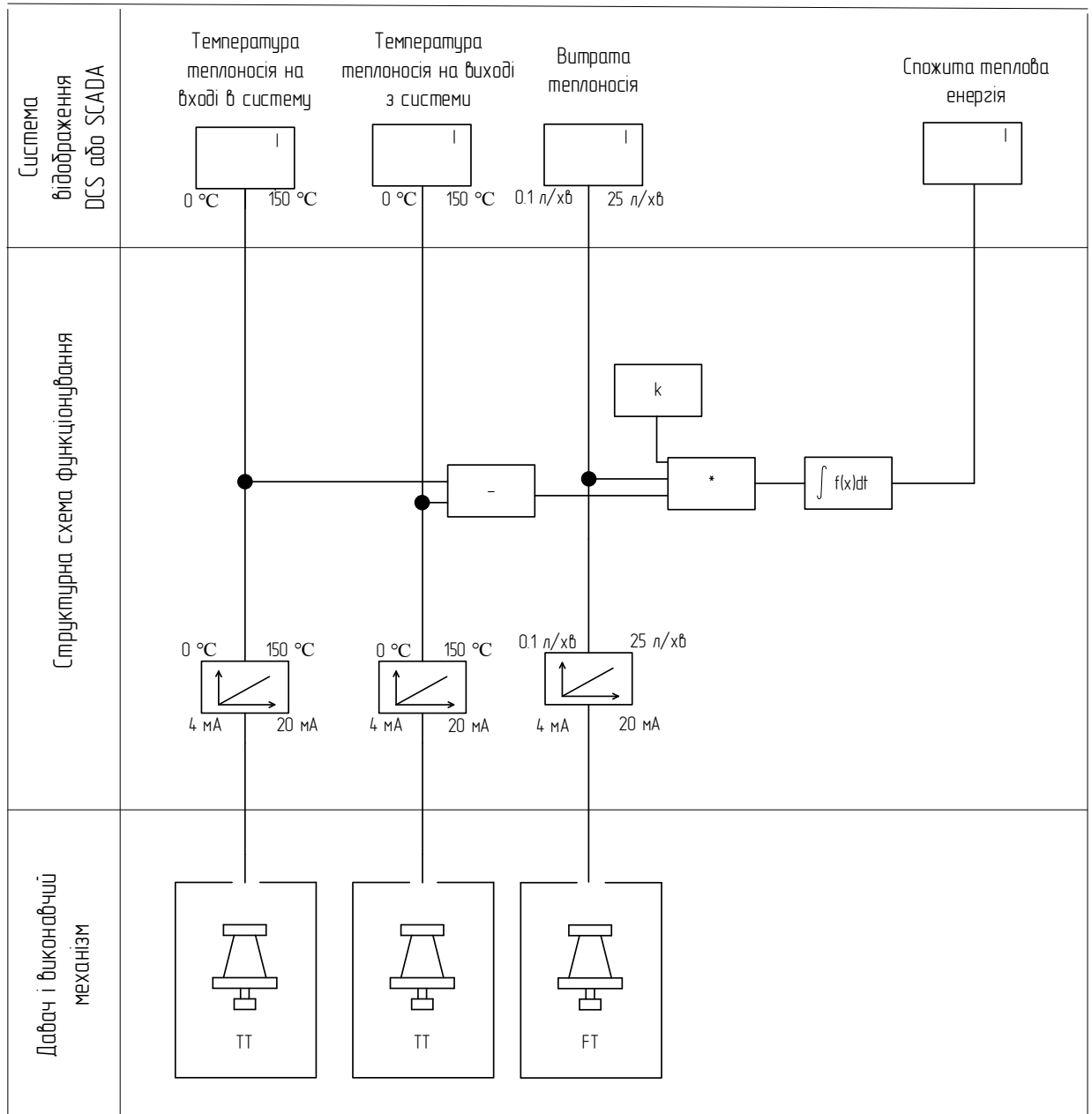


Рисунок 5.2 Алгоритм функціонування контуру №3 «Вимірювання, індикація та реєстрація кількості теплової енергії»

Контур 4. Сигналізації та контролю перепаду тиску на водяному фільтрі

Контур 5. Вимірювання температури теплоносія на вході в теплообмінник гарячого водопостачання

Контур 6. Вимірювання тиску на вході в теплообмінник гарячого водопостачання

Контур 7. Сигналізація та регулювання температури в теплообміннику гарячого водопостачання

Контур 8. Сигналізації та регулювання тиску на виході з системи гарячого водопостачання

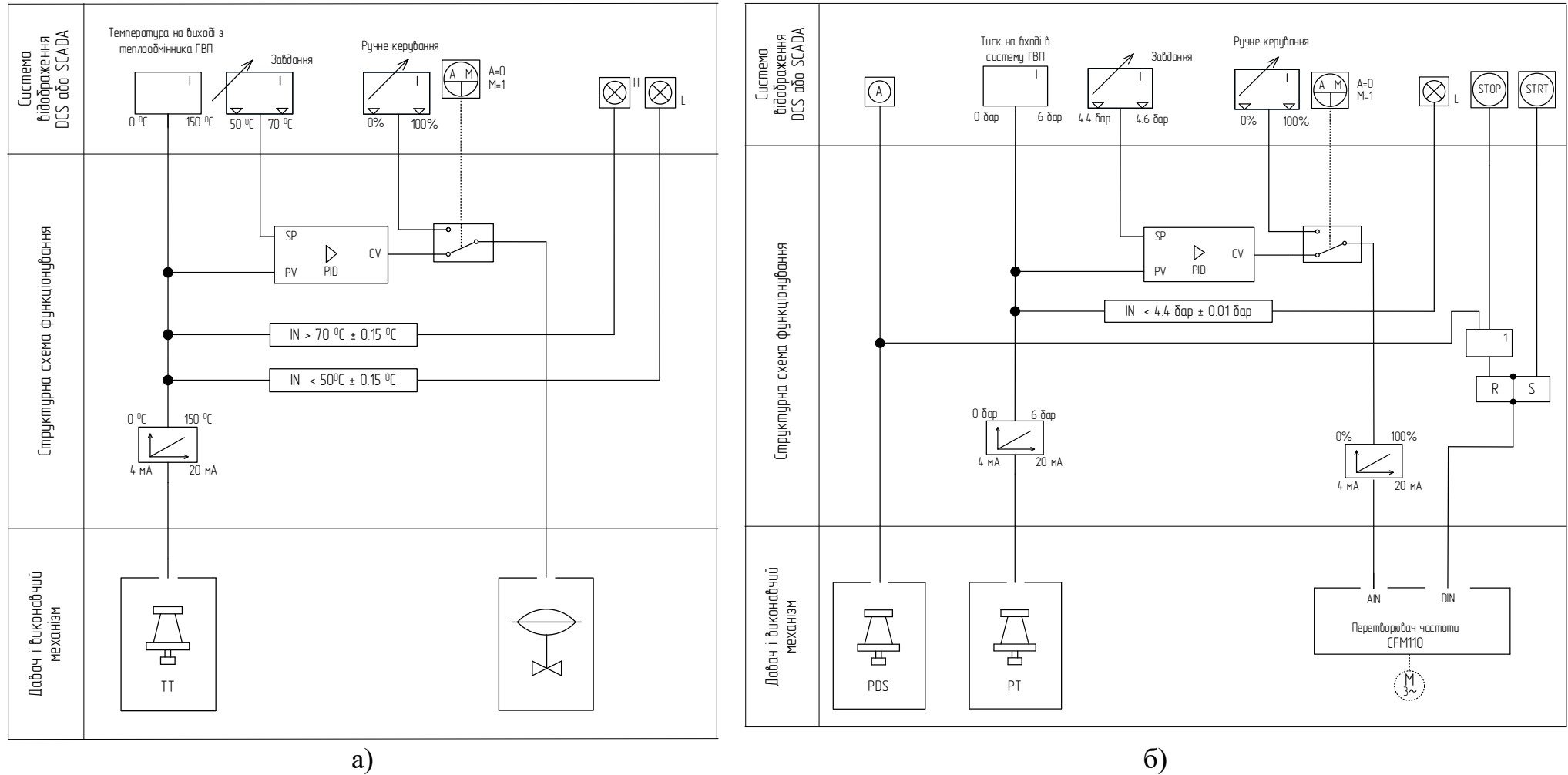


Рисунок 5.4 Алгоритм функціонування контуру:

а) №7 «Сигналізація та регулювання температури в теплообміннику гарячого водопостачання»;

б) №8 «Сигналізації та регулювання тиску на виході з системи гарячого водопостачання».

Контур 9. Сигналізації та контролю перепаду тиску на водяному фільтрі.

Контур 10. Вимірювання тиску на вході в систему гарячого водопостачання.

Контур 11. Вимірювання тиску на вході в теплообмінник опалення.

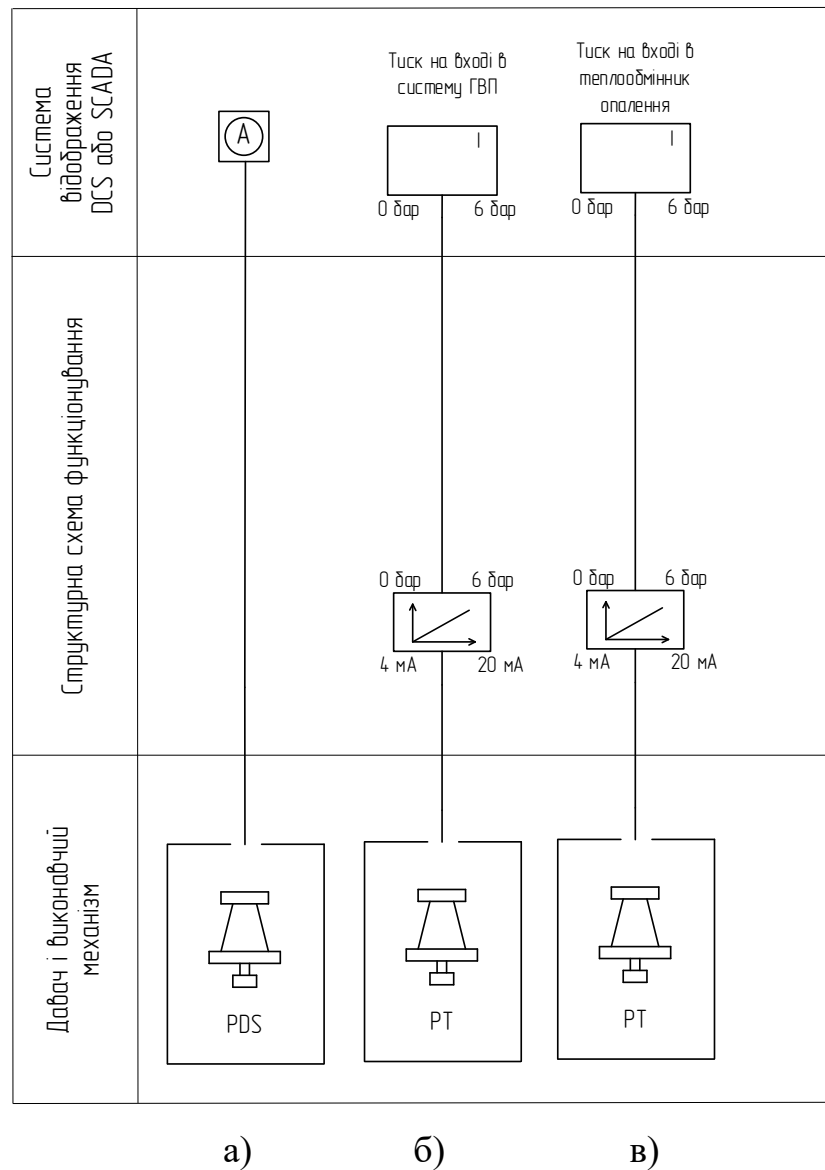


Рисунок 5.5 Алгоритм функціонування контуру:

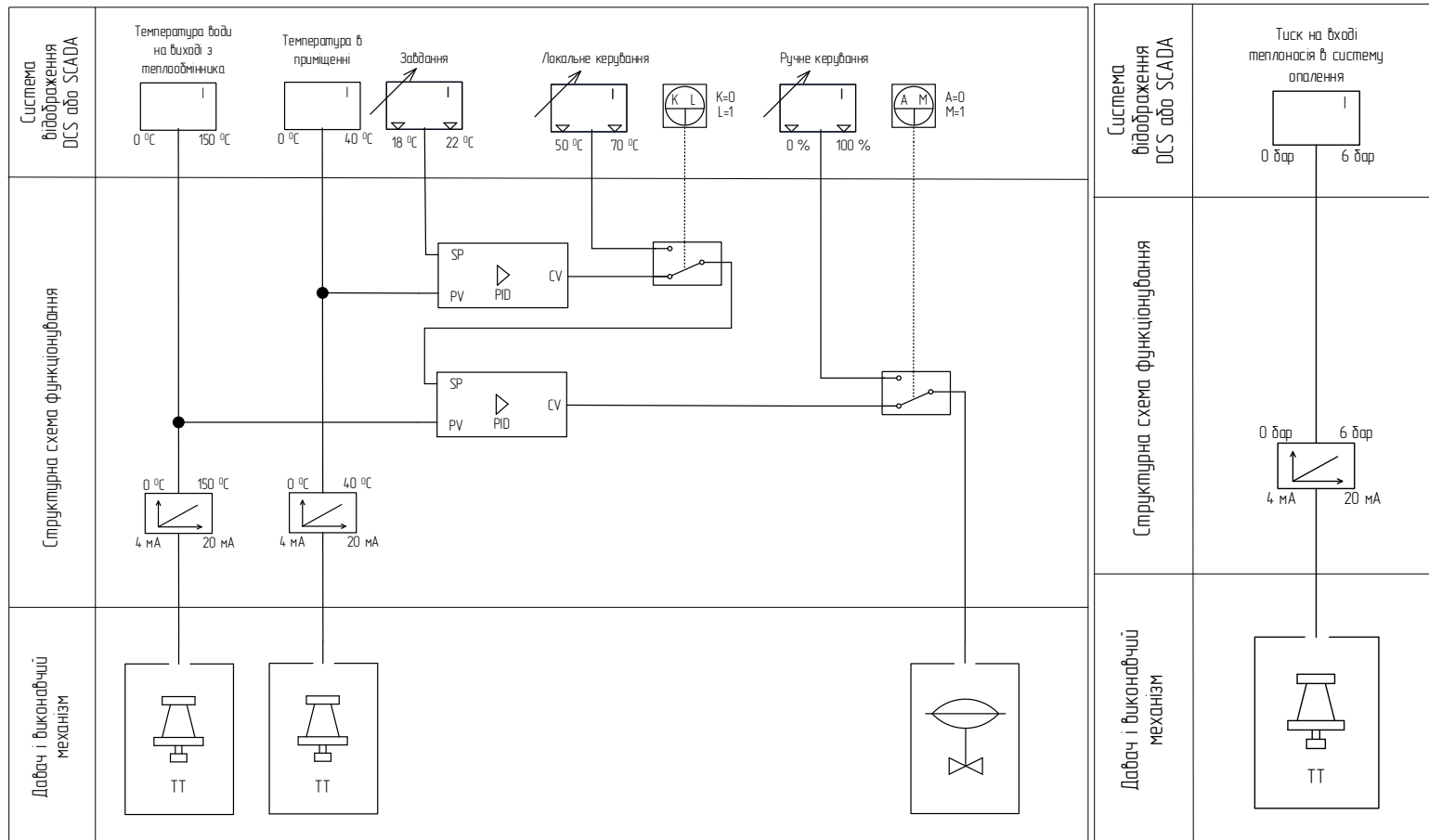
а) №9 «Сигналізації та контролю перепаду тиску на водяному фільтрі»;

а) №10 «Вимірювання тиску на вході в систему ГВП»;

б) №11 «Вимірювання тиску на вході в теплообмінник опалення»

Контур 12. Вимірювання температури на вході в систему опалення

Контур 13. Вимірювання тиску на вході в систему опалення



а)

б)

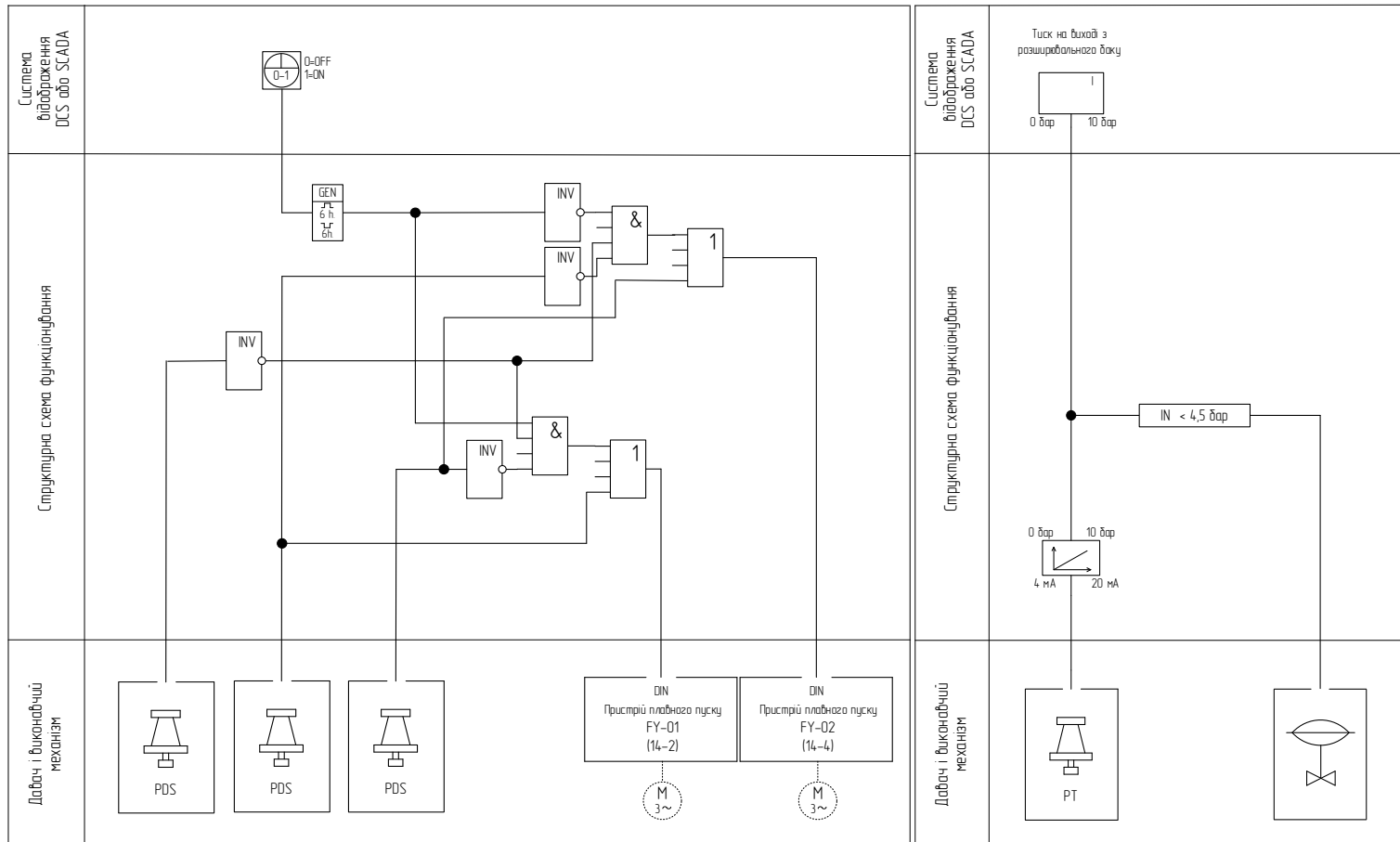
Рисунок 5.6 Алгоритм функціонування контуру:

а) №12 «Регулювання температури в системі опалення»;

б) №13 «Вимірювання тиску на вході в систему опалення».

Контур 14. Керування циркуляційними насосами системи опалення.

Контур 15. Контур керування байпасною лінією підживлення системи опалення.



а)

б)

Рисунок 5.7 Алгоритм функціонування контуру:

а) №14 «Керування циркуляційними насосами системи опалення»;

б) №15 «Контур керування байпасною лінією підживлення системи опалення».

Контур 16. Вимірювання тиску в розширювальному баці

Контур 17. Вимірювання тиску на виході з системи опалення

Контур 18. Вимірювання температури на виході з системи опалення

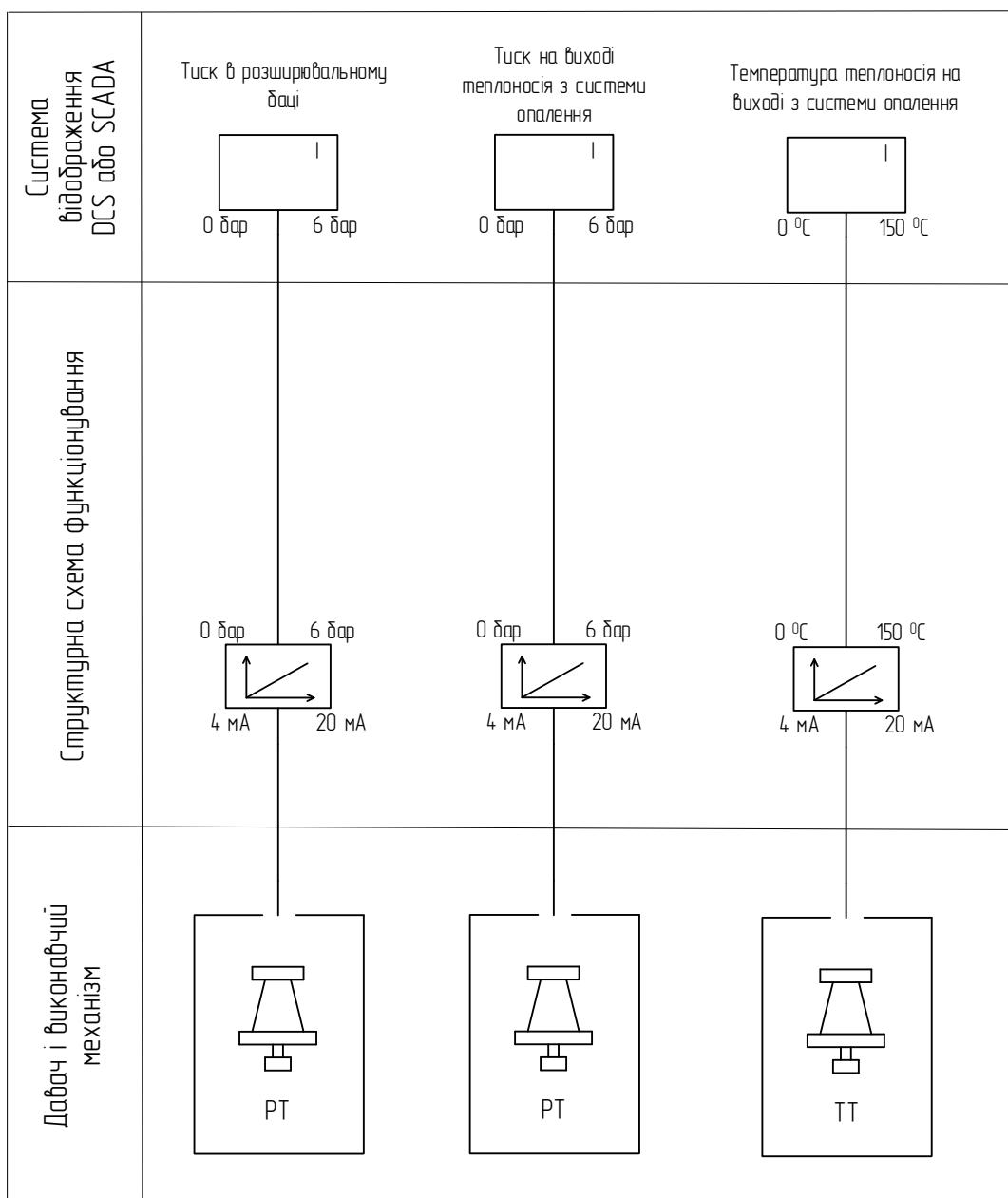


Рисунок 5.9 Алгоритм функціонування контуру

а) №16 «Пуску насосу за показами тиску на вході і виході з вузла підживлення»;

б) №17. «Вимірювання тиску на виході з системи опалення»;

в) №18 «Вимірювання температури на виході з системи опалення».

5.2 Програма функціонування мікропроцесорного програмного засобу автоматизації

При розробці програми функціонування мікропроцесорного програмного засобу автоматизації необхідно передбачити наступні процедури, а саме:

При розробці програми функціонування мікропроцесорного програмованого засобу автоматизації необхідно передбачити наступні процедури, а саме:

1. Обробку вхідного аналогового сигналу, а саме його перетворенням з формату Integer в формат Real, масштабування та фільтрування:

Для перетворення числового значення вхідного аналогового сигналу з формату Integer в формат Real та масштабування числового значення застосовуємо функціональний блок FC105. Який здійснює масштабування вхідного числового значення від аналогового цифрового перетворювача, в числове значення діапазону вимірювання первинного давача.

Уривок програми функціонування контуру масштабування представлено на рис. 5.11:

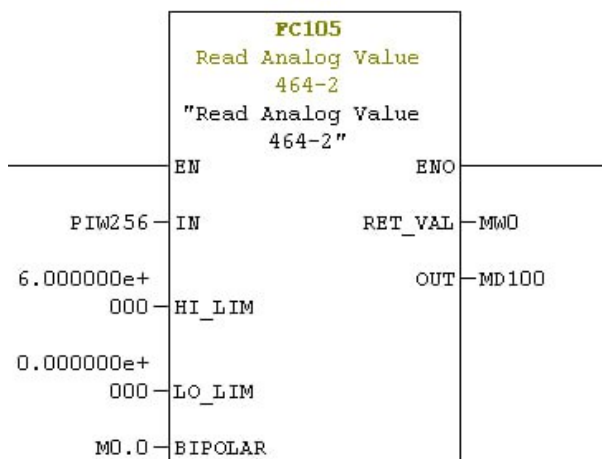


Рисунок 5.11 Уривок програми функціонування, який відображає процедуру обробки вхідного аналогового сигналу, а саме його перетворенням з формату Integer в формат Real, масштабування та фільтрування

PIW256 – аналоговий вхід від вимірювального перетворювача, HI_LIM – обмеження вихідного сигналу по максимумі; LO_LIM – обмеження вихідного

сигналу по мінімумі; Bipolar – 0 => 0 -27648 1=> -27648 – +27648; RET_VAL – вихідний сигнал в форматі Word; OUT – вихідний сигнал в форматі Real.

2. Алгоритм аналогового ПІД-регулятора:

Щоб реалізувати ПІД-закон регулювання застосовуємо функціональний блок FB41 “CONT_C”. Здійснюємо ініціалізацію змінних: SP_INT – внутрішнє значення уставки; PV_IN – ввід змінної процесу; MAN – ручне завдання; LMN – керуючий сигнал; LMN_PER – периферійний керуючий сигнал;

Уривок програми функціонування контуру ПІД-регулювання представлено на рис. 5.12:

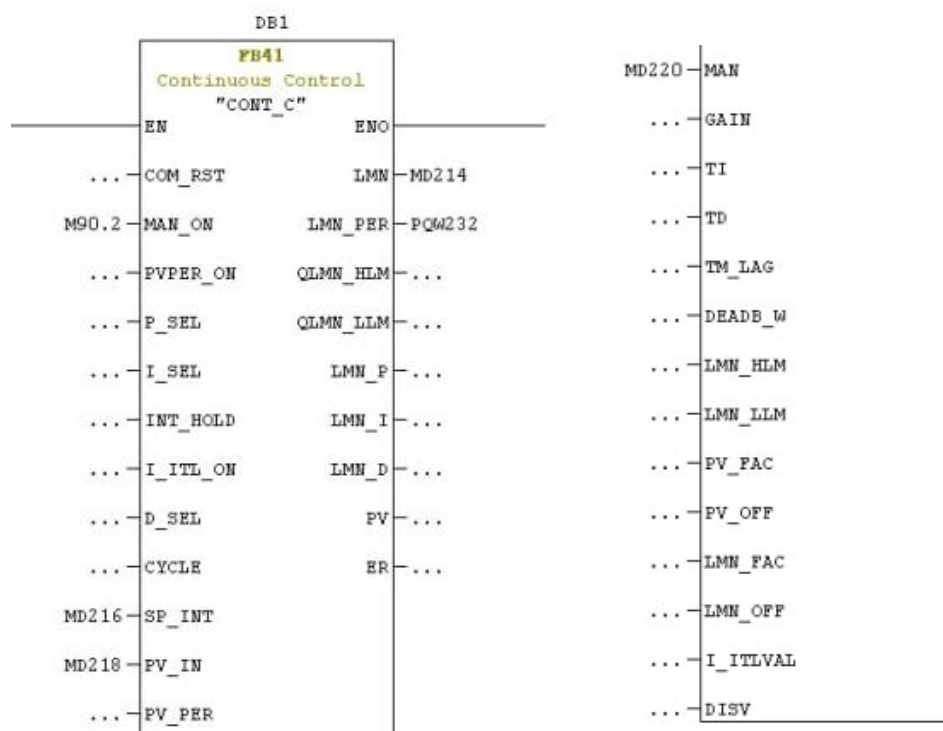


Рисунок 5.12 Уривок програми функціонування, який відображає процедуру ПІД-закону регулювання

3. Безударний перехід з автоматичного режиму в ручний:

Для реалізації цього блоку, вибираємо функціональний елемент переміщення даних між комірками пам'яті – MOVE, задаємо значення регістрі на вхід та вихід: MD214 – регістр керуючої дії в форматі REAL, MD220 – регістр ручного режиму керування.

Уривок програми функціонування контуру безударного переходу з автоматичного режиму в ручний представлено на рис. 5.13:

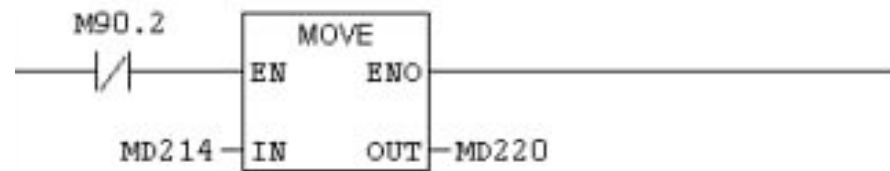


Рисунок 5.13 Уривок програми функціонування, який відображає процедуру переходу з автоматичного режиму в ручний

4. Формування аварійної сигналізації по нижній та верхній граничній межі; за значенням високого перепаду тиску:

Програма А (див. рис. 5.14) відповідає а формування аварійного повідомлення "по нижній критичній межі". Вона використовує два функціональні елементи порівняння "менше для REAL" (CMP<R), щоб відстежувати значення MD208. Аварійний сигнал Q103.5 активується, коли виміряне значення MD208 опускається нижче 4.985. Проте для того, щоб Q103.5 деактивувався і система повернулася до нормального стану, MD208 має піднятися вище 5.015. Ця різниця між порогом вмикання і вимикання сигналу (від 4.985 до 5.015) створює гістерезис, що запобігає нестабільному перемиканню сигналу, коли значення MD208 коливається близько критичної межі. Контакт Q103.5 у ланцюзі забезпечує самопідтримку та реалізацію цієї логіки гістерезису.

Програма Б формує аварійне повідомлення "по верхній критичній межі", також з урахуванням гістерезису. Вона використовує два функціональні елементи порівняння "більше для REAL" (CMP>R). Аварійний сигнал Q103.4 активується, коли значення MD208 піднімається вище 7.015. Для деактивації Q103.4 та повернення до нормального стану, MD208 має опуститися нижче 6.985. Подібно до Network 14, різниця між цими порогами (7.015 та 6.985) створює гістерезис, що забезпечує стабільність аварійного сигналу Q103.4.

Програма В формує аварійне повідомлення "по перевищеному значенню перепаду тиску на фільтрі/насосі". Це програма, яка прямо пов'язує дискретний вхід I100.1 з вихідним сигналом Q103.1. Якщо I100.1 (що вказує на перевищення перепаду тиску) стає активним, Q103.1 негайно активується. Якщо I100.1 деактивується, Q103.1 також миттєво вимикається.

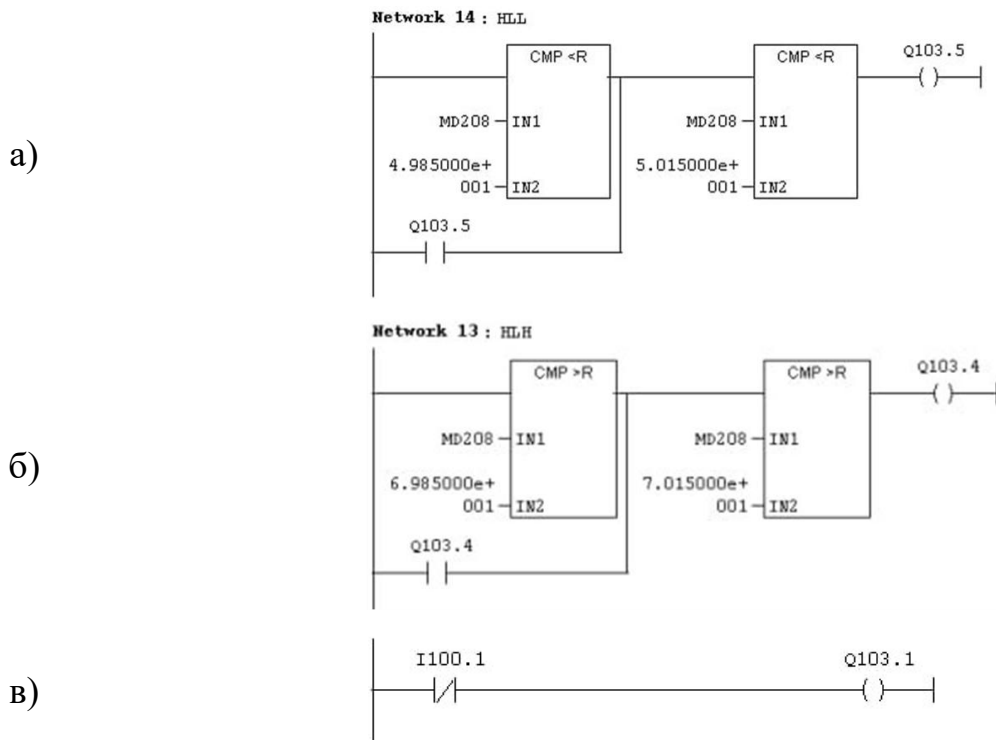


Рисунок 5.14 Уривок програми функціонування, який відображає формування аварійної сигналізації:

а) по нижній критичній межі (з рахуванням гістерезису);

б) по верхній критичній межі (з рахуванням гістерезису);

в) по перевищеному значенню перепаду тиску на фільтрі/насосі.

5. Алгоритм функціонування програми лічильника:

Програмний блок починається з функціонального елементу SUB_R. Цей елемент відповідає за операцію віднімання чисел з плаваючою комою. На його вхід IN1 подається значення з області пам'яті MD128 (зменшуване), а на вхід IN2 – значення з MD138 (від'ємник). При активації входу EN (Enable) відбувається обчислення, і результат віднімання записується у вихідну область пам'яті MD158 через вихід OUT. Вихід ENO (Enable Output) активується, підтверджуючи успішне завершення операції.

Наступним у послідовності є функціональний елемент MUL_R, призначений для множення чисел з плаваючою комою. На його вхід IN1 подається значення з області пам'яті MD148, яке виступає як перший множник. На вхід IN2 подається результат попередньої операції, як другий множник. Після активації EN і виконання

множення, результат записується у вихідну область пам'яті MD168, а ENO активується.

Завершує блок ще один функціональний елемент MUL_R. На його вхід IN1 надходить результат попередньої операції множення з MD168. На вхід IN2 подається константне значення 4.18. Ця константа є стандартним значенням питомої теплоємності води. Після активації EN та виконання множення, кінцевий результат записується у вихідну область пам'яті MD178, а ENO активується. Таким чином, цей останній крок переводить обчислене проміжне значення в фактичні одиниці теплової енергії.

Уривок програми функціонування контуру представлено на рис. 5.15:

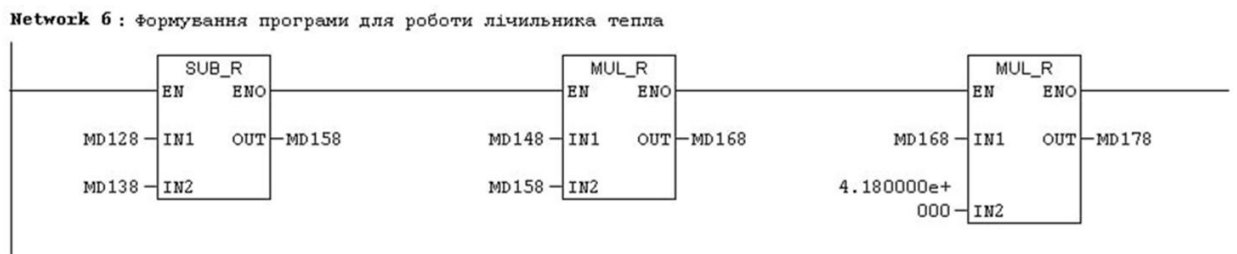


Рисунок 5.15 Уривок програми функціонування, який відображає роботу лічильника тепла

6. Алгоритм програми керування циркуляційними насосами:

Перша лінія керування насосом Q104.3 спрацьовує за кількох умов. Насамперед, необхідно, щоб вхід I100.3, що відповідає за перепад тиску на фільтрі перед насосами, був активним, вказуючи на його нормальний стан і відсутність значних забруднень. Крім того, насос Q104.3 може бути активований, якщо маркер M90.5 (сигнал від генератора імпульсів) та таймер T0 активні, що є частиною механізму ротації або періодичного запуску. Альтернативною умовою для запуску Q104.3 є ситуація, коли вхід I100.4 (перепад тиску на насосі Q104.4) неактивний, а також неактивний вхід I100.5 (перепад тиску на насосі Q104.3). Це може свідчити про несправність або зупинку насоса Q104.4, або бути умовою для запуску Q104.3 як основного, що не створив власного перепаду. Друга лінія керування насосом Q104.4 також має свої умови. Його активація відбувається, якщо таймер T0 активний, і при цьому активний вхід I100.5, що означає, що насос Q104.3 працює і створює необхідний перепад тиску. Додатково Q104.4 може увімкнутися, якщо його

власний перепад тиску (I100.4) неактивний, а також неактивний вхід I100.3 (перепад тиску на фільтрі). Ця гілка логіки може бути резервною або ж сигналізувати про необхідність роботи одного насоса за певних аварійних умов, наприклад, при забитому фільтрі.

При активації бітового маркера M90.5 одночасно запускаються два імпульсні таймери: T1 та T0. Обидва таймери налаштовані на відлік 45 одиниць часу, що, ймовірно, означає 45 секунд, хоча позначення "М" може вказувати і на мілісекунди або хвилини, що суттєво змінило б інтервали. Логіка їхнього підключення створює циклічний процес: коли один таймер завершує свій відлік, він, через свій нормально відкритий контакт, запускає себе знову або впливає на інший таймер. Це формує стабільний циклічний сигнал, який, ймовірно, подається на входи керування насосами в Network 27, забезпечуючи їхнє почергове вмикання або перемикування через певні проміжки часу.

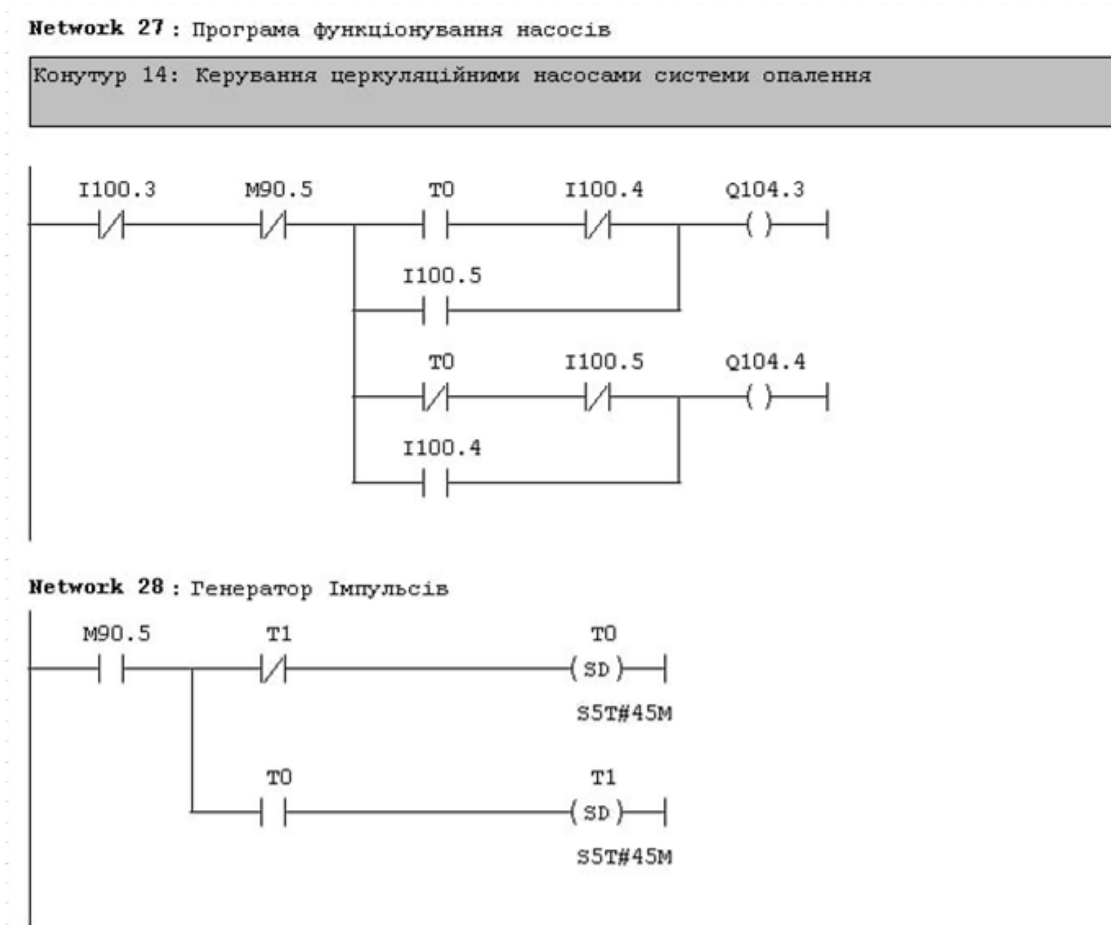


Рисунок 5.16 Уривок програми функціонування, який керування циркуляційними насосами

7. Алгоритм увімкнення та аварійного вимкнення насосу в системі ГВП:

Програма в Network 18 забезпечує включення частотного перетворювача, який керує насосом системи ГВП(Q104.4). При активації бітового маркера M99.0(кнопка «СТАРТ»), вихід Q104.4, що позначається як "(S)", встановлюється (Set). Це означає, що Q104.4 буде увімкнений і залишатиметься увімкненим, доки не буде скинутий окремою командою. Network 19 відповідає за сигналізацію про несправність водяного фільтра. Якщо дискретний вхід I100.1, який сигналізує про перевищення перепаду тиску на фільтрі стає активним, то вихід Q103.1 негайно активується. Цей вихід увімкне світлодіодний індикатор. Network 20 реалізує аварійну зупинку частотного перетворювача. Вихід Q104.4, що позначається як "(R)", буде скинутий (Reset), тобто частотний перетворювач буде вимкнений, якщо спрацює будь-яка з двох умов: активується бітовий маркер M99.1 (кнопка «СТОП») або активується вхід I100.1.

Уривок програми функціонування контуру представлено на рис. 5.17:

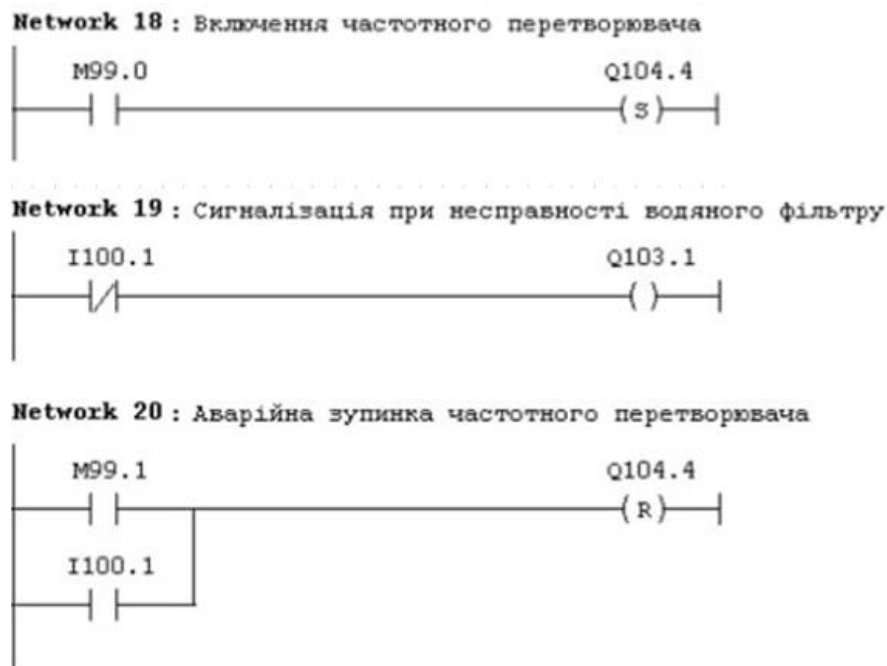


Рисунок 5.17 Уривок програми функціонування, який керування циркуляційними насосами

Розроблена програма функціонування функціонування мікропроцесорного програмного засобу автоматизації системи автоматизованого керування ІТП з

багатоконтурними теплообмінниками представлена на графічному плакаті №2 цього курсового проекту.

Висновки: було розроблено алгоритми функціонування комплексної системи автоматизації індивідуального теплового пункту з багатоконтурними теплообмінниками. Розділ послідовно розкриває алгоритми функціонування 18 окремих контурів системи автоматизації, що охоплюють вимірювання тиску та температури на різних ділянках системи опалення та гарячого водопостачання, обчислення теплової енергії, сигналізацію про перепад тиску на фільтрах, а також керування насосами та регулювання температури і тиску. Зокрема, детально описано алгоритм вимірювання, індикації та реєстрації кількості теплової енергії, що базується на послідовному відніманні, множенні та використанні константи питомої теплоємності для отримання кінцевого значення тепла.

Друга частина розділу присвячена програмі функціонування мікропроцесорного програмного засобу автоматизації, де виділено ключові процедури. До них належить обробка вхідного аналогового сигналу, що включає перетворення формату даних, масштабування та фільтрацію. Далі розглянуто реалізацію ПД-закону регулювання. Важливим аспектом є також забезпечення безударного переходу з автоматичного режиму керування в ручний за допомогою функціонального елемента MOVE, що запобігає різким змінам параметрів при перемиканні.

Особлива увага приділяється формуванню аварійних повідомлень, реалізованих через логіку з гістерезисом для нижньої та верхньої граничних меж та прямим сповіщенням про високий перепад тиску на фільтрі. Детально розписано алгоритм роботи лічильника тепла, що базується на логіці віднімання та множення. Також в розділі описано алгоритм програми керування циркуляційними насосами, що використовує логіку взаємодії з генератором імпульсів для почергової роботи та контролю перепаду тиску на фільтрах та самих насосах, забезпечуючи їх ефективну та надійну експлуатацію. Додатково, представлено алгоритм увімкнення та аварійного вимкнення насоса системи ГВП за допомогою частотного перетворювача.

РОЗДІЛ 6

РОЗРОБКА ТА ПИС ПРИНЦИПОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ З'ЄДНАНЬ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

У відповідності до розробленої функціональної схеми автоматизації системи керування процесом обпалювання колчедану, спрощений вигляд якої наведено в розділі 2 на рисунку 2.1, з урахуванням програми функціонування програмованого логічного контролера серії Simatic S7-300 та експлуатаційних вимог до технічних засобів автоматизації розроблено принципову схему електричних з'єднань периферійних пристроїв з мікропроцесорним програмованим засобом автоматизації.

Електрична схема з'єднань складається з:

1. електричної схеми живлення модулів ПЛК (рисунок 6.1);

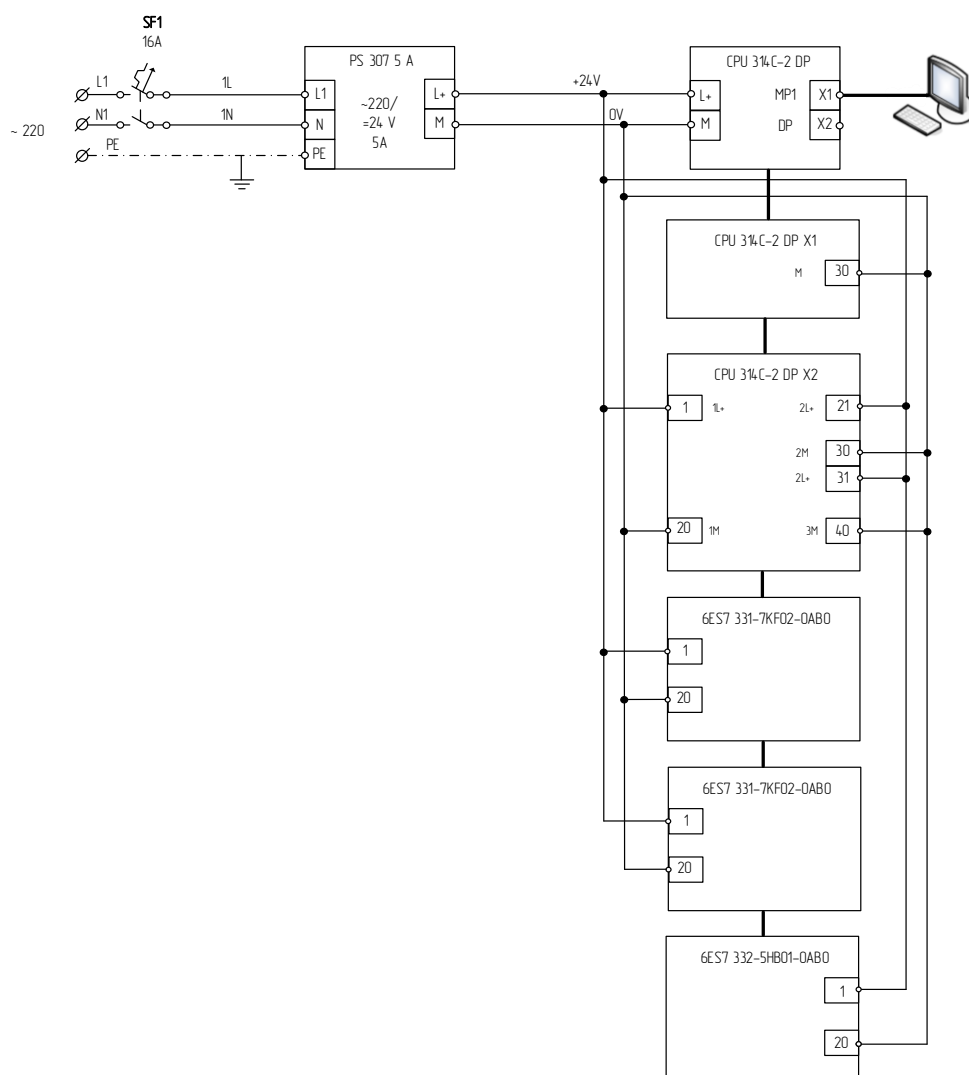


Рисунок 6.1 Принципова схема живлення модулів ПЛК SIMATIC S7-300

2. схеми приєднання первинних вимірювальних перетворювачів до каналів аналогового вводу Simatic S7-300 (рисунок 6.2), зокрема:

- датчиків тиску Danfoss MBS 1700 по двохпровідній схемі приєднання «на розрив»;
- датчика температури та вологи AUTONICS THD-R-C по двохпровідній схемі приєднання «на розрив»;
- перетворювача температури РегМик серії ПТУ-ТХАУ-002-Т-К-0,2 по двохпровідній схемі приєднання «на розрив».

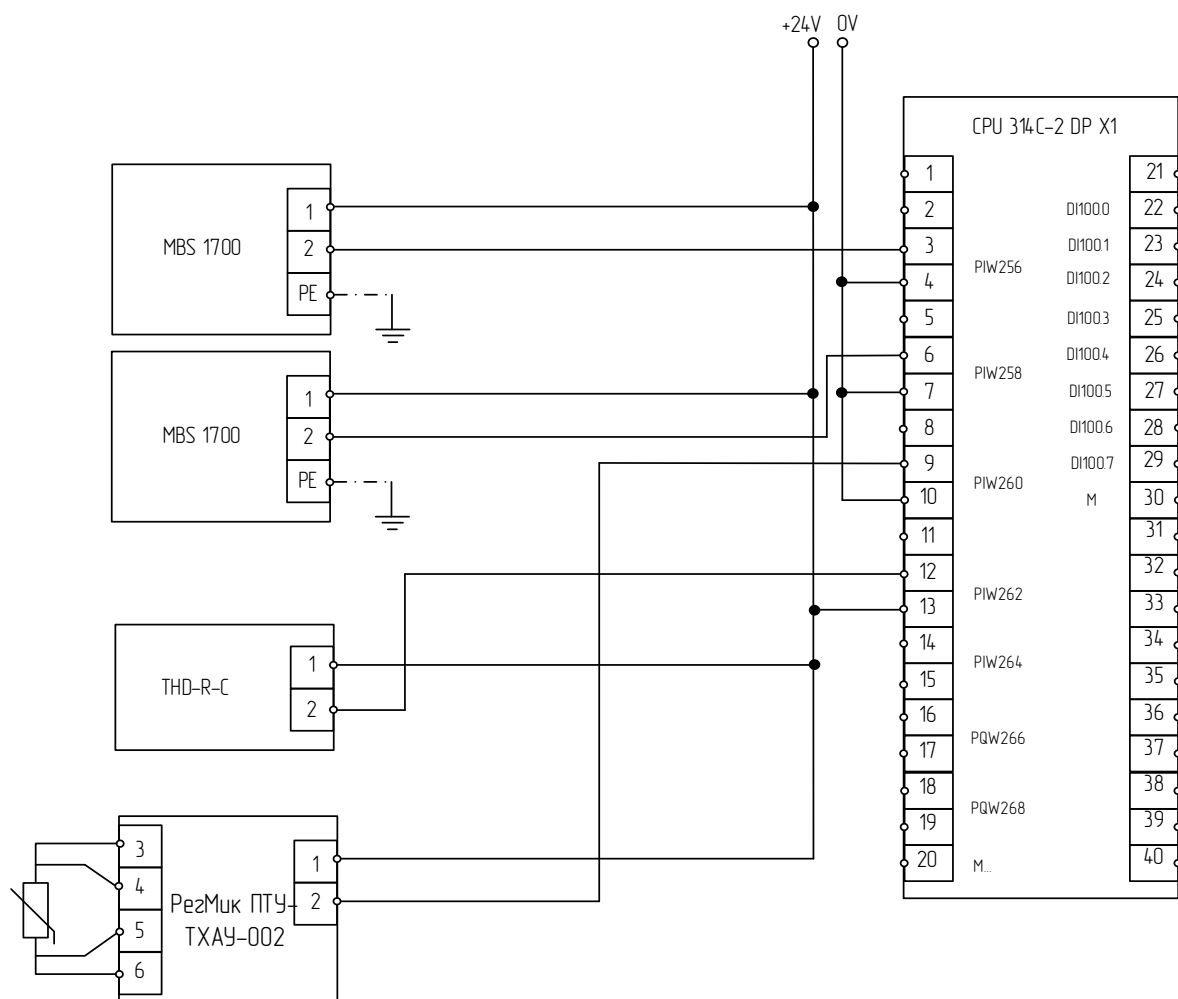


Рисунок 6.2 Уривок електричної схеми приєднання первинних вимірювальних та нормуючих перетворювачів до каналів аналогового вводу ПЛК

3. схеми приєднання первинних вимірювальних перетворювачів до каналів дискретного вводу Simatic S7-300 (рисунок 6.3), зокрема:

- реле перепаду тиску Danfoss YNS-C106.

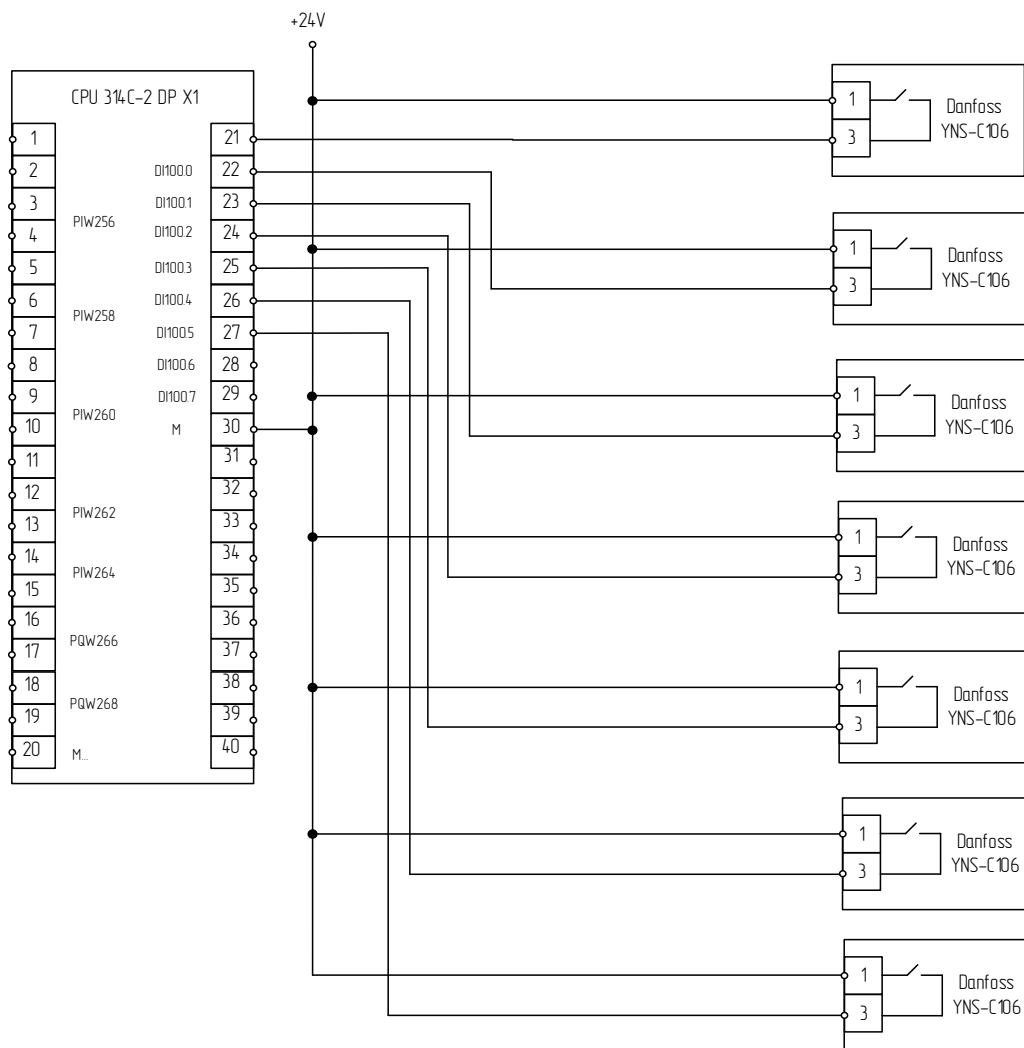


Рисунок 6.3 Уривок електричної схеми приєднання первинних вимірювальних та нормуючих перетворювачів до каналів дискретного вводу ПЛК

4. схеми підключення первинних вимірювальних перетворювачів до каналів аналогового вводу модуля розширення SM321 (рисунок 6.4), зокрема:
- перетворювачів температури РегМик серії ПТУ-ТХАУ-002-Т-К-0,2 по двохпровідній схемі приєднання «на розрив»;
 - магнітоіндуктивного витратоміра серії MIM-12-R 10 H G5 C3T 0.

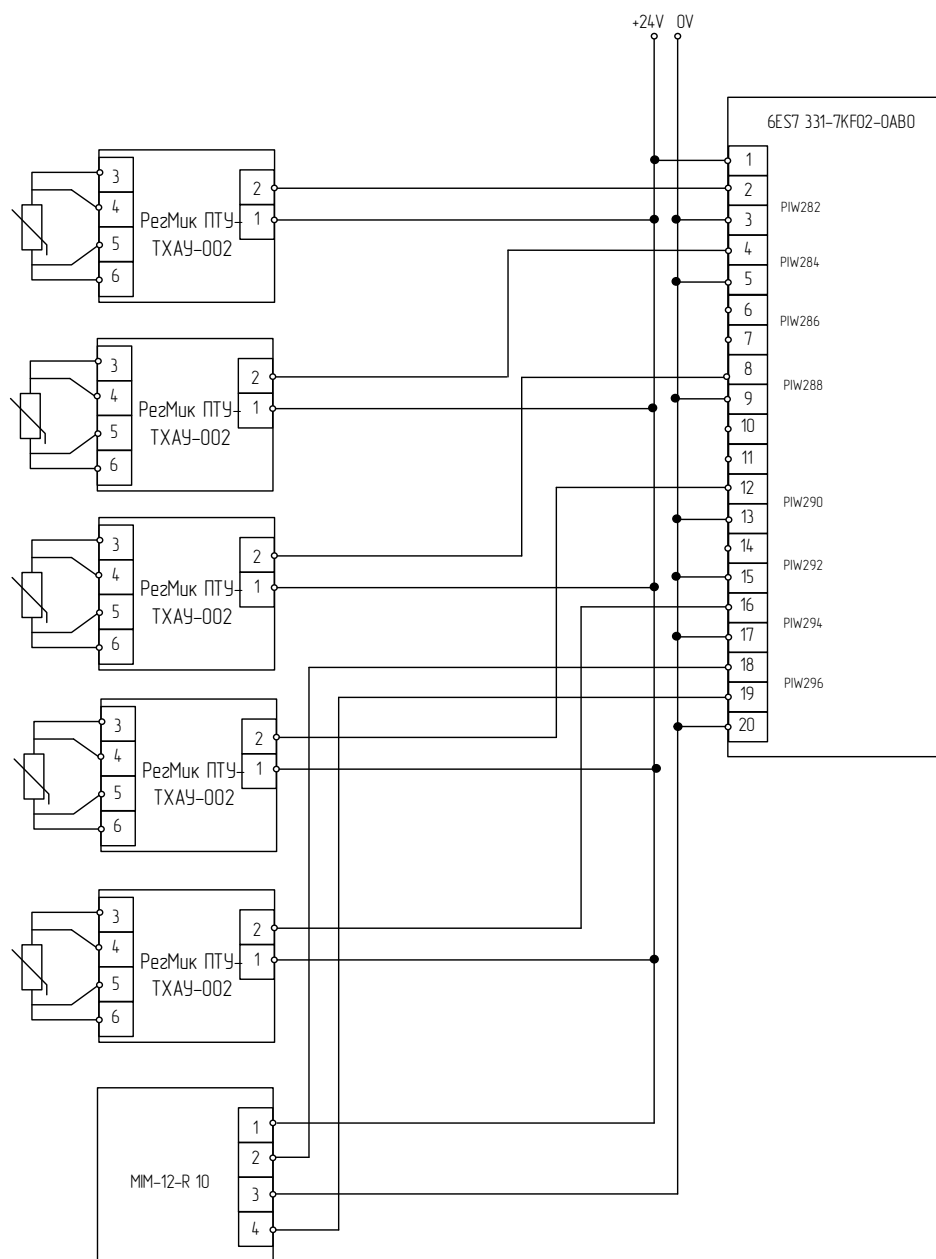


Рисунок 6.4 Уривок електричної схеми приєднання первинних вимірювальних та нормуючих перетворювачів до каналів аналогово вводу модуля розширення SM321

5. схеми підключення первинних вимірювальних перетворювачів до каналів аналогового вводу модуля розширення SM321 (рисунок 6.5), зокрема:
- датчиків тиску Danfoss MBS 1700 по двохпровідній схемі приєднання «на розрив».

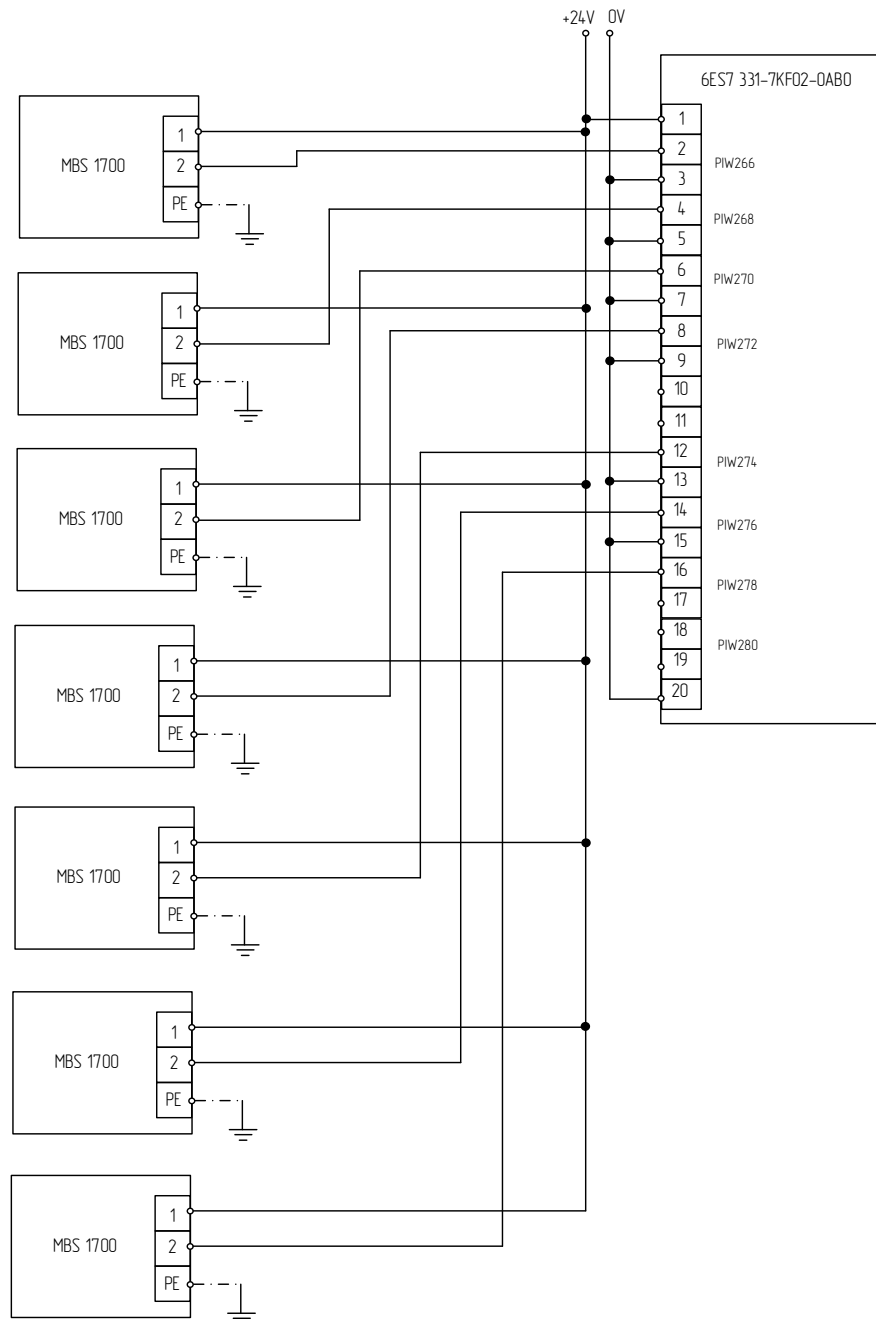


Рисунок 6.5 Уривок електричної схеми приєднання первинних вимірювальних та нормуючих перетворювачів до каналів аналогово вводу модуля розширення SM321

6. Схеми приєднання виконавчих пристроїв та світло-звукової сигналізації (рис. 6.6), зокрема:

- редукторних електроприводів АМЕ655;
- електроприводу АМЕ10;
- пристроїв плавного пуску серії MCD 100;
- частотного перетворювача VLT Micro Drive FC51;

- електромагнітних реле MER2-024DC.

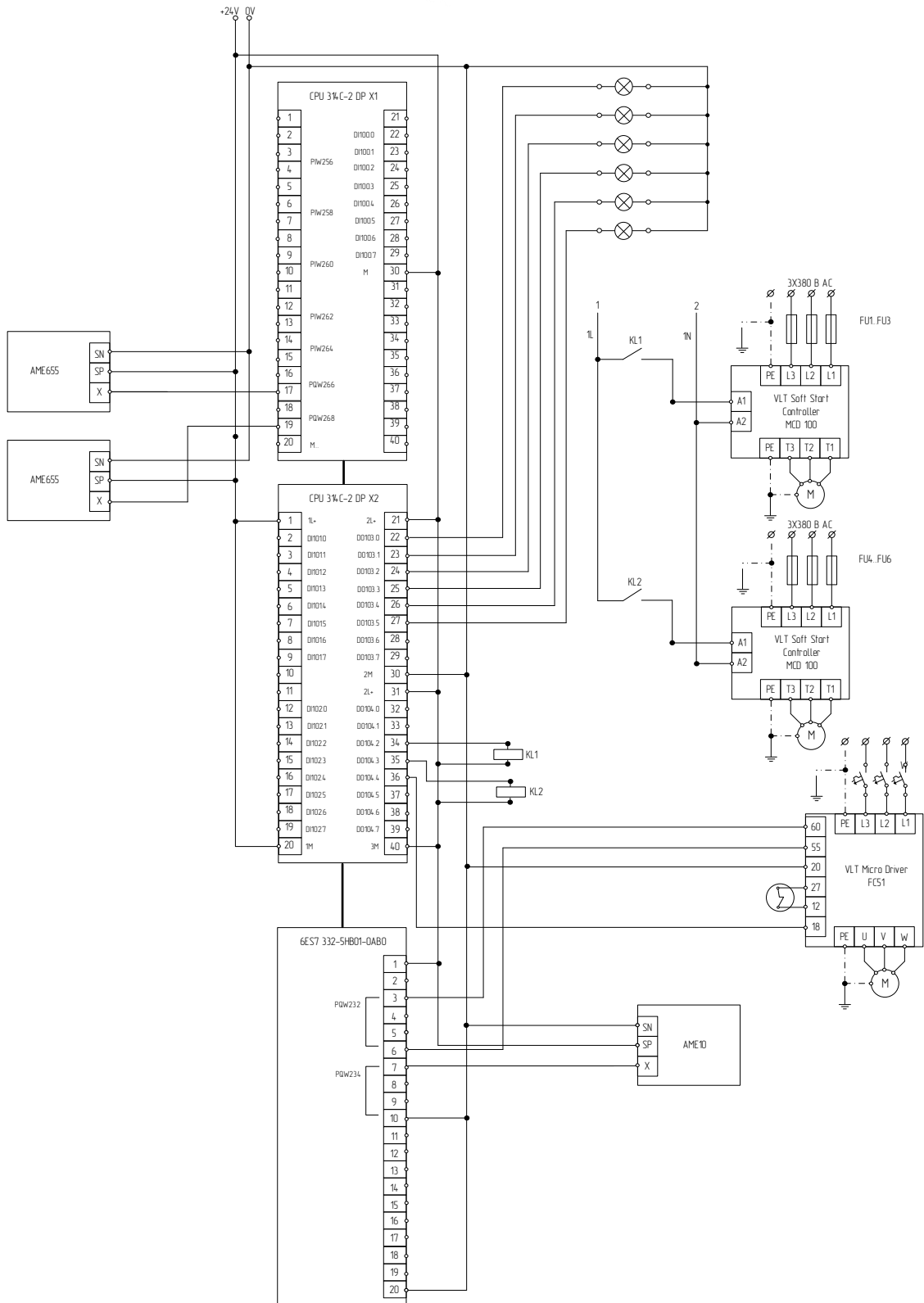


Рисунок 6.6 Уривок електричної схеми приєднання виконавчих пристроїв та світлової сигналізації

Загальна принципова електрична схема зовнішніх з'єднань системи автоматизованого керування представлена на графічному плакаті №3 цього курсового проекту.

Висновки: у цьому розділі було розроблено принципову електричну схему з'єднань системи автоматизованого керування процесом обпалювання колчедану. В основі розробки лежить функціональна схема автоматизації, представлена у попередньому розділі, а також вимоги до роботи програмованого логічного контролера Simatic S7-300 та технічних засобів автоматизації.

Схема включає підключення модулів ПЛК до джерел живлення, що забезпечує стабільну роботу контролера. Окрему увагу приділено підключенню первинних вимірювальних перетворювачів — таких як датчики тиску, температури, вологості та витрати — до каналів аналогового та дискретного вводу як самого ПЛК, так і його модулів розширення. Також передбачено схеми приєднання виконавчих пристроїв, зокрема електроприводів, пристроїв плавного пуску, частотних перетворювачів та світло-звукової сигналізації.

Розроблена схема забезпечує коректне функціонування всієї автоматизованої системи керування, дозволяючи забезпечити надійний зв'язок між контролером та всіма периферійними пристроями. Вона відповідає як функціональним, так і експлуатаційним вимогам, що дозволяє гарантувати ефективність, безпечність і стабільність роботи системи в цілому.

РОЗДІЛ 7

РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ОПАЛЮВАЛЬНОМУ ПРИМІЩЕННІ

7.1 Побудова моделі об'єкта регулювання

У цьому розділі здійснюється детальний розгляд та обґрунтування вибору конкретної структури системи автоматичного регулювання (САР) температури в опалювальному приміщенні, яка надалі буде використана як об'єкт для проведення моделювання, аналізу її динамічних характеристик, а також виконання необхідних технічних розрахунків. Враховуючи специфіку функціонування індивідуального теплового пункту, оснащеного багатоконтурними теплообмінниками, серед декількох можливих варіантів систем регулювання обрано саме каскадну схему автоматичного керування температурою повітря в опалюваному приміщенні. Особливість цієї системи полягає в її багаторівневій структурі, яка включає не лише основний контур, що орієнтований на безпосереднє регулювання температури повітря, але й допоміжний контур, який контролює температуру теплоносія на виході з теплообмінника ІТП.

Такий підхід до побудови системи автоматичного регулювання вибраний з урахуванням актуальних вимог до сучасних систем тепlopостачання, а також необхідності забезпечення високої якості регулювання температурних параметрів у приміщеннях. Стабільне підтримання мікроклімату в зоні обслуговування – одне з ключових завдань ІТП, тому врахування проміжної змінної дозволяє суттєво покращити якісні показники роботи САР.

Зокрема, реалізація каскадної структури забезпечує більш ефективне демпфування зовнішніх збурень, таких як раптові зміни температури зовнішнього повітря чи теплового навантаження в системі. Внаслідок цього зменшується час, необхідний для виходу системи на новий стаціонарний режим, скорочується амплітуда перехідного процесу, а також знижується ризик перевищення допустимих температурних меж. Крім того, використання допоміжного контуру

дозволяє знизити інерційність системи, що позитивно впливає на її чутливість і стабільність.

Схема цієї системи представлена у контурі №12 на аркуші №1 графічної частини кваліфікаційної роботи.

Для подальшого побудови моделі системи автоматичного регулювання та проведення її розрахунків необхідно мати початкові дані, які характеризують об'єкт керування та параметри, що підлягають регулюванню. Частина з цих параметрів вже надана у технологічній карті (див. таблицю 1.2). Оскільки система має каскадну структуру, подальший аналіз буде охоплювати як основну, так і допоміжну регульовані величини. Допоміжною регульованою величиною є температура теплоносія на виході з теплообмінника опалення Основна регульована величина – температура в опалювальному приміщенні, її задане значення – 18 °С. Регулююча дія – переміщення регулюючого органу (РО) в трубопроводі з теплоносієм з центрального теплового пункту перед теплообмінником системи опалення. Підставою для синтезу системи регулювання є експериментальна крива розгону по температурі в приміщенні, отримана зміною регулюючої дії на 11% ходу (див. табл. 7.1).

Згідно вимог технологічного регламенту система регулювання температури повітря в опалювальному приміщенні повинна задовольняти такі вимоги:

- Допустиме максимальне динамічне відхилення – $A_1=2^\circ\text{C}$;
- Допустима похибка регулювання – $\Delta_{\text{доп}}=0.5^\circ\text{C}$;
- Допустимий час регулювання – $t_p=400\text{c}$;
- Ступінь коливальності – $m=0.6$;
- Друга інтегральна оцінка перехідного процесу за збуренням – min .

Таблиця 7.1

Значення експериментальної кривої розгону температури в опалювальному приміщенні

Час, с	Температура, °С
1	2
0	18.001

1	2
60	18.005
120	18.01
180	18.13
240	18.4
300	18.75
360	19.1
420	19.41
480	19.620
540	19.778
600	19.860
660	19.92
720	20.0

Побудуємо графік експериментальної кривої розгону температури в опалювальному приміщенні, отриманої стрибкоподібною зміною регулювальної дії на 11% ходу РО [23].

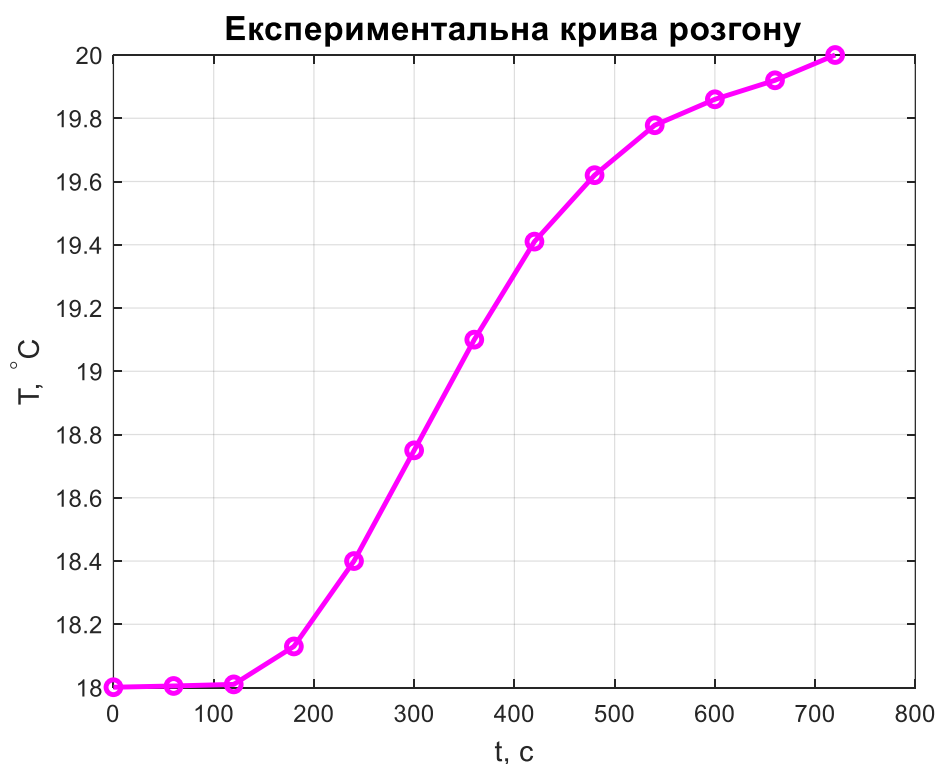


Рисунок 7.1 Графік експериментальної кривої розгону, отриманої стрибкоподібною зміною регулювальної дії на 11% ходу РО

Для зручності розрахунків експериментальну криву розгону об'єкта регулювання нормуємо значення кривої розгону за формулою:

$$h^B(t) = \frac{y^B(t) - y_H}{\Delta y} \quad (7.1)$$

де $y^e(\infty)$ – значення вихідної величини після завершення перехідного процесу;

y_H – початкове (номінальне) значення регульованої величини;

Δy – зміна заданого значення [23].

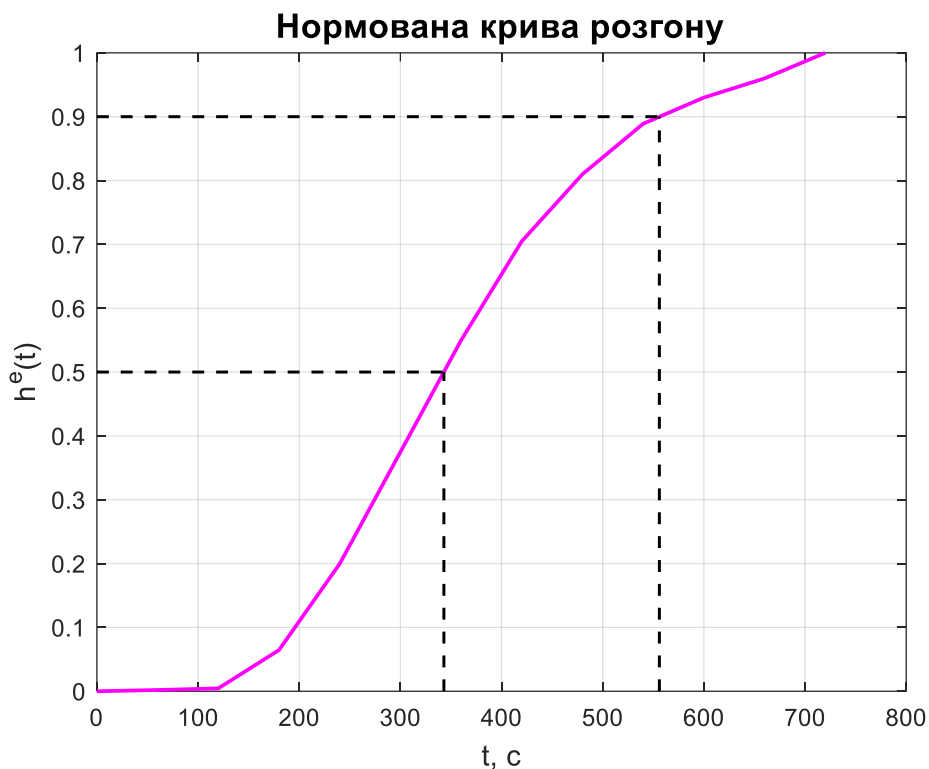


Рисунок 7.2 Графік нормованих значень кривої розгону

Виберемо для заданого об'єкта регулювання метод знаходження моделі у вигляді послідовно з'єднаних аперіодичних ланок першого порядку з однаковими сталими часу та ланки запізнення.

Передавальна функція моделі:

$$W(p) = \frac{e^{-p\tau}}{\prod_{i=1}^n \left(\frac{T_i}{i} p + 1 \right)}, \quad (7.2)$$

де τ – час запізнення;

n – кількість аперіодичних ланок;

T_i – сталі часу аперіодичних ланок.

Таблиця 7.2

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{t_{05}}{T}$	1.68	2.67	3.67	4.67	5.67	6.67	7.67	8.69	9.69
$\frac{t_{09}}{T}$	3.89	5.32	6.68	7.99	9.27	10.53	11.77	12.99	14.21
$\frac{t_{05}}{t_{09}}$	0.43	0.5	0.55	0.58	0.61	0.63	0.65	0.67	0.68

Параметри математичної моделі визначали за наступним алгоритмом:

1. Попередньо нормували експериментальну криву розгону згідно з описаною методикою.
2. Задали кількість аперіодичних ланок n . На основі таблиці 7.2 визначали відповідне значення відношення $\frac{t_{05}}{t_{09}}$.
3. За наведеним співвідношенням обчислювали час запізнення τ . Якщо розраховане значення τ виявлялось фізично некоректним, зменшували порядок системи n і повторювали розрахунок.
4. Для обраного n за таблицею 7.2 визначали значення $\frac{t_{05}-\tau}{T}$ і $\frac{t_{09}-\tau}{T}$, за якими знаходили значення T . У разі розбіжності обчислених значень використовували їх середнє арифметичне.
5. За отриманими параметрами n , T та τ формували перехідну функцію системи [23].

Отримані значення параметрів:

$$T = 73.46 \text{ с};$$

$$k = 0.1666;$$

$$\tau = 70.$$

Передавальна функція об'єкта регулювання(ОР):

$$W(p) = \frac{e^{-70p}}{(73.46p + 1)^4}.$$

Порівняння експериментальної та розрахункової кривих розгону

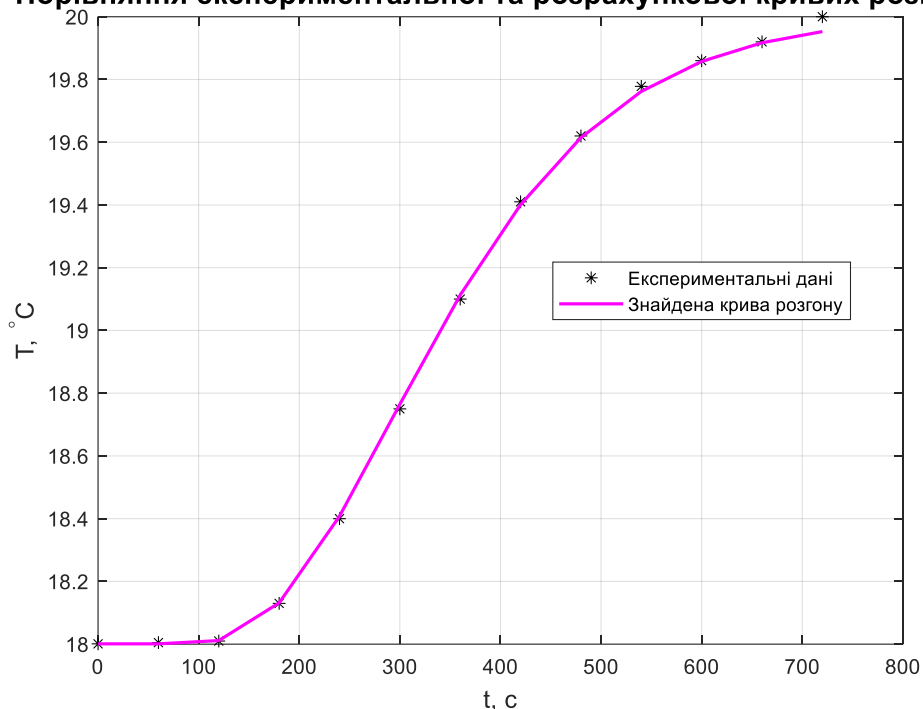


Рисунок 7.3 Графік порівняння розрахункової та експериментальної кривих розгону («*» – експериментальна, «-» – побудована за знайденою моделлю ОР)

Для перевірки точності апроксимації необхідно визначити ординати теоретичної перехідної функції $h(t_j)$ і порівняти їх з ординатами експериментальної кривої $h^e(t_j)$. Мірою точності апроксимації можна вважати максимальне значення різниці ординат:

$$\Delta = |h(t) - h^e(t)|_{max} \quad (7.3)$$

або ж максимальну абсолютну похибку:

$$\Delta_a = |y(t) - y^e(t)|_{max} \quad (7.4)$$

Де $y(t)$, $y^e(t)$ – теоретична та експериментальна крива розгону [23].

Точність апроксимації для об'єктів із самовирівнюванням вважається задовільною, якщо зведена похибка не перевищує 3%.

$$\delta = \frac{y(t_j) - y^e(t_j)}{\Delta y^e} \cdot 100\%, \quad (7.5)$$

де Δy^e – максимальна зміна вхідної величини.

Зведена похибка апроксимації $\delta_{max} = 2.36\%$. Отримана похибка не перевищує допустимого значення, тому модель є адекватною.

Код програми знаходження теоретичної моделі та визначення її адекватності, побудований в середовищі MATLAB, наведено нижче:

```

clc; clear; close all;
%% === Вихідні експериментальні дані ===
t = [0 60 120 180 240 300 360 420 480 540 600 660 720];
T = [18.001, 18.005, 18.01, 18.13, 18.4, 18.75, 19.1, 19.41, 19.620,
19.778, 19.860, 19.92, 20.000];
dx=11;
figure('Name','Графік 1','NumberTitle','off');
plot(t, T, 'om-', 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('t, c', 'FontSize', 12);
ylabel('T, ^\circC', 'FontSize', 12);
title('Експериментальна крива розгону', 'FontSize', 14);
Tk=20.0;
T_p=T(1); T_kin=Tk;
h=(T-T_p)/(T_kin-T_p);
k=(T_kin-T_p)/dx;
t05=343; t09=556;
figure('Name','Графік 2','NumberTitle','off');
plot(t, h, '-m', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot([0 t05], [0.5 0.5], '--k', [t05 t05], [0 0.5], '--k', 'LineWidth',
1.2);
plot([0 t09], [0.9 0.9], '--k', [t09 t09], [0 0.9], '--k', 'LineWidth',
1.2);
grid on;
xlabel('t, c', 'FontSize', 12);
ylabel('h^e(t)', 'FontSize', 12);
title('Нормована крива розгону', 'FontSize', 14);
t59=t05/t09;
n=4;
tau=70;
Ts=73.46;
h_r=zeros(size(t));
for j= 1:length(t)
if t(j)<tau
h_r(j)=0;
else
for i=0:(n-1)
h_r(j)=h_r(j)+1/factorial(i)*((t(j)-tau)/Ts)^i;
end
h_r(j)=1-exp(-(t(j)-tau)/Ts)*h_r(j);
end
end
Del_h=abs(h-h_r)*100;
[Del_h_max i]=max(Del_h)
T_r=h_r.*k*dx+T_p;
figure('Name','Графік 3','NumberTitle','off');
plot(t, T, '*k', 'DisplayName','Експериментальні дані'); hold on;

```

```

plot(t, T_r, '-m', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'Розрахункова
крива');
grid on;
xlabel('t, c', 'FontSize', 12);
ylabel('T, ^\circC', 'FontSize', 12);
title('Порівняння експериментальної та розрахункової кривих розгону',
'FontSize', 14);
legend('Location', 'best');
hold off;

```

7.2 Вибір структурної схеми системи регулювання температури в приміщенні та розрахунок параметрів регулятора

Синтез системи автоматичного регулювання розпочнемо з аналізу одноконтурної структури САР температури в опалювальному приміщенні. На цьому етапі використаємо ПД-регулятор, для якого здійснимо розрахунок оптимальних параметрів налаштування. У разі, якщо одноконтурна система не забезпечуватиме необхідного рівня якості регулювання, перейдемо до побудови та моделювання каскадної структури САР.

У каскадній системі регулювання передбачене використання двох регуляторів. Основний регулятор відповідає за підтримання головної регульованої величини (температури в опалювальному приміщенні) на заданому рівні. Допоміжний регулятор, у свою чергу, керує допоміжною величиною — температурою теплоносія на виході з теплообмінника, забезпечуючи швидке реагування на зміни регульовальної дії та покращення динамічних характеристик основного контуру.

Розрахунок параметрів налаштування ПД-регулятора відбувався за методом розширених частотних характеристик. Даний метод базується на амплітудно-фазовому критерії стійкості (критерій Найквіста), який можна інтерпретувати як критерій запасу стійкості, якщо замість звичайних частотних характеристик застосувати розширені частотні характеристики [23].

Розширена частотна характеристика елемента з відомою передавальною функцією визначається заміною в ній оператора Лапласа (7.6):

$$p = -m\omega \pm i\omega, \quad (7.6)$$

де ω – кругова частота;

$m = \alpha/\omega$ – ступінь коливальності, яка характеризує запас стійкості;

α – абсолютне значення дійсної частини комплексного кореня характеристичного рівняння.

Умова забезпечення заданого запasu стійкості формується на основі амплітудно-фазового критерію стійкості Найквіста, в якому застосовуються розширені частотні характеристики (7.7) розімкненої системи автоматичного регулювання [23].

$$W_{PC}(m, i\omega) = W_{OP}(m, i\omega)W_P(m, i\omega) = -1, \quad (7.7)$$

де $W_{OP}(m, i\omega) = U(m, \omega) + iV(m, \omega)$ – розширена амплітудно-фазова характеристика об'єкта регулювання;

$U(m, \omega), V(m, \omega)$ – розширені дійсна та уявна частотні характеристики об'єкта регулювання;

Для визначення запasu стійкості, застосуємо амплітудно-фазовий критерій стійкості. Враховуючи те, що в розімкнутій САР об'єкт регулювання та автоматичний регулятор з'єднані послідовно отримуємо систему рівнянь у вигляді:

$$\begin{cases} A_{OP}(m, \omega) \cdot A_{AP}(m, \omega) = 1; \\ \varphi_{OP}(m, \omega) + \varphi_{AP}(m, \omega) = -\pi. \end{cases} \quad (7.8)$$

Отже, маємо побудовану модель ОР у вигляді функції передачі (7.3), яка складається із послідовного з'єднання аперіодичної, коливної та ланки запізнення.

Розширена амплітудно-частотна характеристика (РАЧХ) і розширена фазо-частотна характеристика (РФЧХ) аперіодичної ланки першого порядку визначаються за такими формулами [23]:

$$A_a(m, \omega) = \frac{k_{OP}}{\sqrt{(1 - T_i\omega)^2 + T^2\omega^2}} \quad (7.9)$$

$$\varphi_a(m, \omega) = \begin{cases} -\arctg \frac{T\omega}{1 - Tm\omega}, \text{ при } \omega \leq \frac{1}{mT} \\ -\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{Tm\omega - 1}{T\omega}, \text{ при } \omega > \frac{1}{mT} \end{cases} \quad (7.10)$$

РАЧХ і РФЧХ ланки запізнення визначаються за такими формулами:

$$\begin{aligned} A_\tau(m, \omega) &= e^{m\omega\tau}; \\ \varphi_\tau(m, \omega) &= -\omega\tau; \end{aligned} \quad (7.11)$$

Оскільки, при послідовному з'єднанні АЧХ перемножуються, а ФЧХ додаються, тому отримаємо:

$$\begin{aligned} A_{OP}(m, \omega) &= A_\tau(m, \omega) \cdot A_a(m, \omega) \cdot A_a(m, \omega) \cdot A_a(m, \omega) \cdot A_a(m, \omega); \\ \varphi_{OP}(m, \omega) &= \varphi_\tau(m, \omega) + \varphi_a(m, \omega) + \varphi_a(m, \omega) + \varphi_a(m, \omega) + \varphi_a(m, \omega); \end{aligned} \quad (7.12)$$

Отримавши залежності було розраховано ПІД-регулятор для одноконтурної САР температури в опалювальному приміщенні. Програма наведена нижче:

```

clc; clear all;
m=0.6;
T1 = 73.46; tau=70; k=0.1666;
w = 0:0.001:0.015;
p = -w .* m + i .* w;
W = k * exp(-p * tau) ./((T1 .* p + 1).*(T1 .* p + 1).*(T1 .* p + 1).*(T1 .* p + 1));
fiOR = phase(W);
fi_W1 = -pi/2 + atan(m);
fi_W2 = -pi;
x1 = [w(1) w(end)];
y1 = [fi_W1 fi_W1];
[w1,yi1] = polyxpoly(x1,y1,w,fiOR)
x2 = [w(1) w(end)];
y2 = [fi_W2 fi_W2];
[w2,yi2] = polyxpoly(x2,y2,w,fiOR)
yLim = ylim();
figure(4);
plot(w, fiOR, '-m', 'LineWidth', 2); hold on;
plot([w(1) w1], [yi1 yi1], '--k', 'LineWidth', 1.5);
plot([w(1) w2], [yi2 yi2], '--k', 'LineWidth', 1.5);
plot([w2 w2], [yi2 yLim(1)], '--k', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('\it\omega, рад/с\rm', 'FontSize', 12, 'FontName', 'Helvetica');
ylabel('\it\phi_{OP}, рад\rm', 'FontSize', 12, 'FontName', 'Helvetica');
title('Частотна характеристика', 'FontSize', 14, 'FontName', 'Helvetica');
grid on;

```

Передавальна функція ПІД-регулятора має наступний вигляд:

$$W(p) = k_p + \frac{k_p}{T_{i3}p} + T_d p; \quad (7.13)$$

де T_d – час диференціювання.

В загальному випадку границя заданого запасу стійкості є деякою поверхнею в тривимірному просторі параметрів налаштування k_p , $\frac{k_p}{T_{i3}}$, T_d . Якщо один з параметрів зафіксувати, то розрахунок зводиться до визначення двох інших

параметрів налаштування. Так, якщо задатись часом диференціювання T_d , то значення двох інших параметрів налаштування ПД-регулятора k_p , $\frac{k_p}{T_{i3}}$ розраховуються за формулами:

$$\begin{cases} \frac{k_p}{T_{i3}} = -\frac{\omega\sqrt{m^2+1}(m \cdot \cos \gamma(m, \omega) - \sin \gamma(m, \omega))}{A_{OP}(m, \omega)} + T_d \omega^2 (m^2 + 1); \\ k_p = \frac{\sqrt{m^2+1} \cdot \cos \gamma(m, \omega)}{A_{OP}(m, \omega)} + 2T_d m \omega. \end{cases} \quad (7.14)$$

Для заданих значень m , T_d в площині параметрів k_p , $\frac{k_p}{T_{i3}}$ будується границя області запасу стійкості, з якої визначають оптимальні значення параметрів налаштування $(k_p)_{\text{опт}}$, $(\frac{k_p}{T_{i3}})_{\text{опт}}$. Для стабільної роботи системи регулювання доцільно мати значення параметрів налаштування ПД-регулятора, щоби задовольняли умову:

$$0 \leq \frac{T_d}{T_{i3}} \leq 0.5 \quad (7.15)$$

Якщо умова не виконується, то необхідно зменшити час диференціювання і повторити розрахунок.

Побудуємо границю області запасу стійкості одноконтурної САР температури в повітря в приміщенні з ПД-регулятором. Для цього використовуємо програму наведену нижче:

```

clc; clear all;
T1 = 73.43;
tau = 70;
k = 0.1666; m = 0.6;
w1 = 0.0026; w2 = 0.0073;
Td = 100;
w = w1:0.00001:w2;
p = -w .* m + i .* w;
W = k * exp(-p * tau) ./((T1 .* p + 1).*(T1 .* p + 1).*(T1 .* p + 1).*(T1 .* p + 1));
AOR = abs(W);
fiOR = phase(W);
y = abs(fiOR) + atan(m) - pi;
kP_Tiz = w .* sqrt(m^2 + 1) .* (m .* cos(y) - sin(y)) ./ AOR + w.^2 .* (m^2 + 1) .* Td;
kP = sqrt(m^2 + 1) * cos(y) ./ AOR + 2 * Td * m * w;
t = 0:2000;

```

```

for i = 1:length(w)
WOR = tf(k, [T1 1], 'InputDelay', 60) * tf(1, [T1 1]) * tf(1, [T1 1])*
tf(1, [T1 1])* tf(1, [T1 1]);
WAR = tf(kP_Tiz(i), [1 0]) + tf(kP(i)) + tf([Td 0], 1);
Wsar = feedback(WOR, WAR);
y = step(Wsar, t) * 20;
q = trapz(t, y.^2);
S(i) = q;
end
Jmin = min(S);
id = find(Jmin == S);
kPOpt = kP(id)
kP_TizOpt = kP_Tiz(id)
Tiz = kPOpt / kP_TizOpt
pb = Td *kP_TizOpt./ kPOpt^2
xLim = xlim();
yLim = ylim();
figure(5)
plot(kP, kP_Tiz, kPOpt, kP_TizOpt, '*'...
); grid;
xlabel('k_{P}');
ylabel('k_{P}/T_{iz}');
% Побудова графіка залежності другої інтегральної оцінки від kP
figure(5);
plot(kP, kP_Tiz, '-m', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(kPOpt, kP_TizOpt, 'ko', 'MarkerSize', 8, 'LineWidth', 2);
xlabel('\itk_{P}\rm', 'FontSize', 12, 'FontName', 'Helvetica');
ylabel('\itk_{P}/T_{iz}\rm', 'FontSize', 12, 'FontName', 'Helvetica');
title('Пошук оптимального регулятора', 'FontSize', 14, 'FontName',
'Helvetica');
legend('Графік залежності', 'Оптимальна точка', 'Location', 'Best');
grid on;
% Додатково позначимо оптимальну точку
figure(6);
plot(kP, S, '-m', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(kPOpt, Jmin, 'ko', 'MarkerSize', 8, 'LineWidth', 2);
xlabel('\itk_P\rm', 'FontSize', 12, 'FontName', 'Helvetica');
ylabel('\itJ = \int y^2(t)\, dt\rm', 'FontSize', 12, 'FontName',
'Helvetica');
title('Залежність інтегрального критерію якості від \itk_P\rm',
'FontSize', 14, 'FontName', 'Helvetica');
legend('J(k_P)', 'Оптимальне значення', 'Location', 'Best');
grid on;

```

У ході оптимізації параметрів ПІД-регулятора як критерій якості регулювання застосовувалася друга інтегральна квадратична оцінка, яка враховує енергію похибки за весь перехідний процес. Мінімальне значення цієї оцінки за результатами моделювання становить $J_2=239.49$, що свідчить про високий рівень динамічної точності системи.

З отриманої границі області заданого запасу стійкості визначено оптимальні параметри налаштування ПІД-регулятора одноконтурної лінійної САР, які забезпечують мінімальне значення другої інтегральної оцінки:

$$J_2 = \int_0^t \Delta x^2(t) dt \quad (7.16)$$

де Δx – похибка регулювання.

Згідно з формулою (7.15):

$$0 \leq \frac{100}{209.65} \leq 0.5$$

Оскільки, $0 \leq 0.1315 \leq 0.5$, то умова виконується.

В цьому випадку, оптимальними параметрами налаштування регулятора будуть ті параметри, при яких друга інтегральна оцінка буде мінімальною. Програму для розрахунку мінімальної інтегральної квадратичної оцінки наведена вище. Результати виконання програми продемонстровані графіками, зображеними на рисунках 7.3, 7.4.

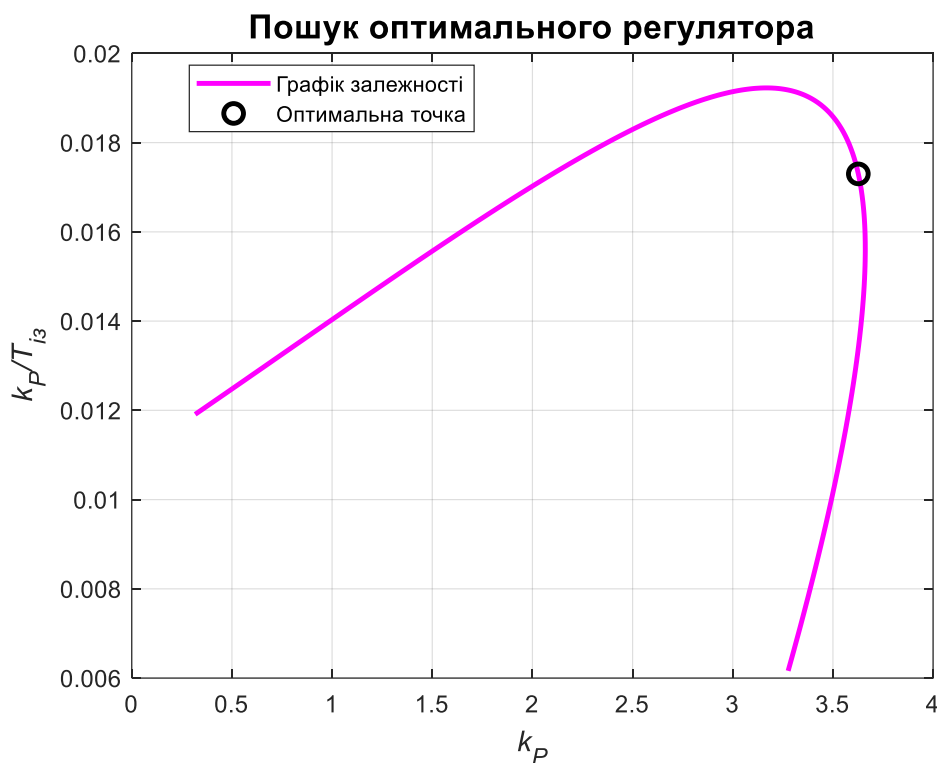


Рисунок 7.3 Границя області запасу стійкості САР з ПІ-регулятором

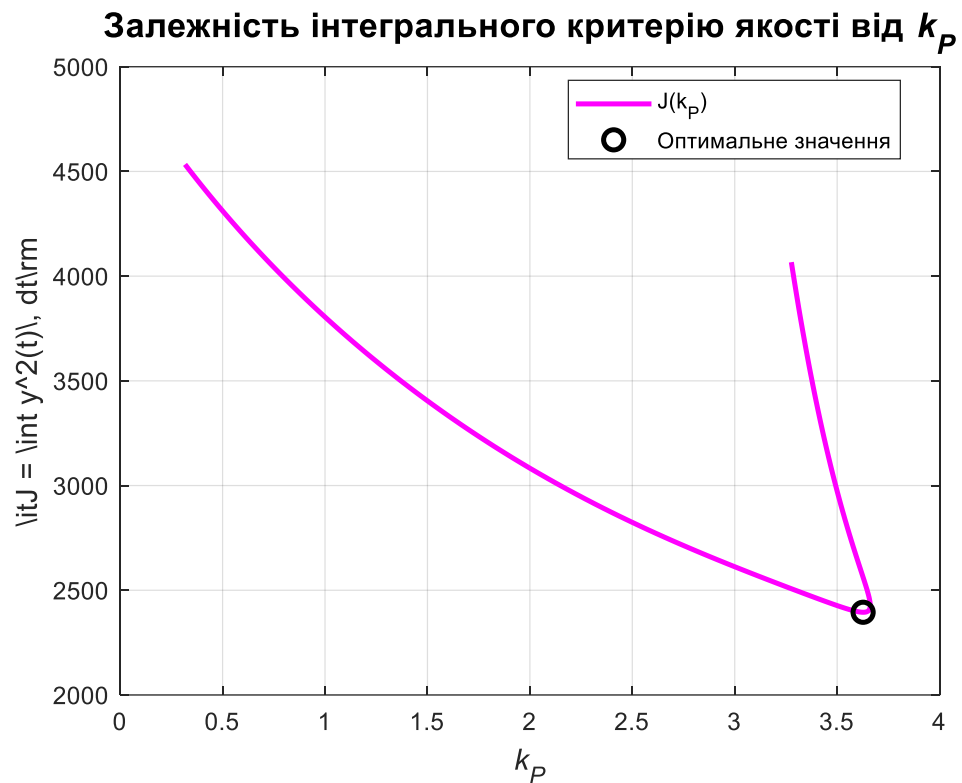


Рисунок 7.4 Графік залежності інтегральної квадратичної J_2 від k_p

Виходячи з розрахованих оптимальних значень параметрів регулятора, була отримана його передавальна функція, яка враховує дію пропорційної, інтегральної та диференціальної складових та надалі використано при побудові моделі системи в Simulink.

$$W(p) = 3.6267 + \frac{3.6267}{209.6544p} + 100p$$

На основі побудованої моделі ОР та визначених оптимальних параметрів ПІД-регулятора створена імітаційна модель одноконтурної САР в середовищі Simulink. Метою моделювання є аналіз динамічних характеристик САР шляхом дослідження перехідних процесів за різними вхідними величинами САР, зокрема, при стрибкоподібній зміні положення РО на 20% ходу та зміні заданого значення температури на 2 °С.

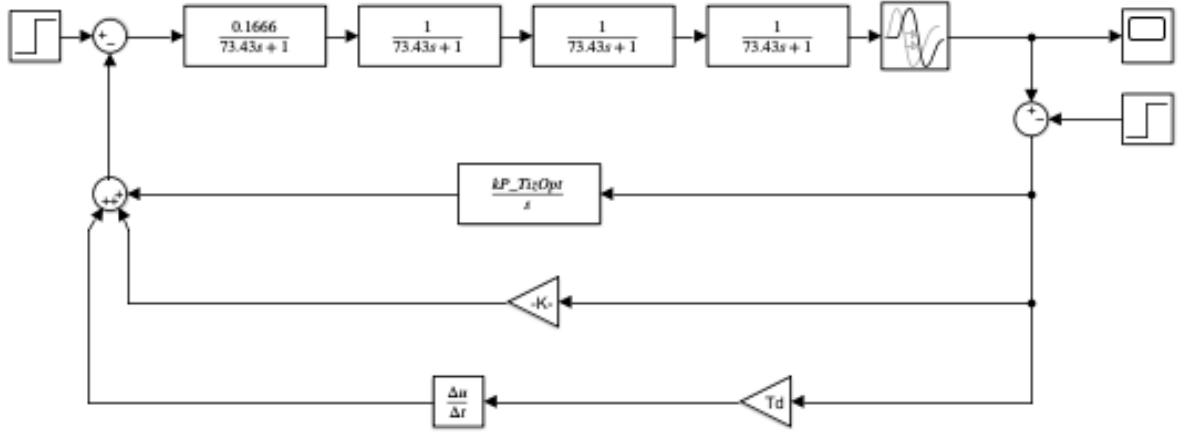


Рисунок 7.5 Модель САР з ПІД-регулятором в середовищі Simulink

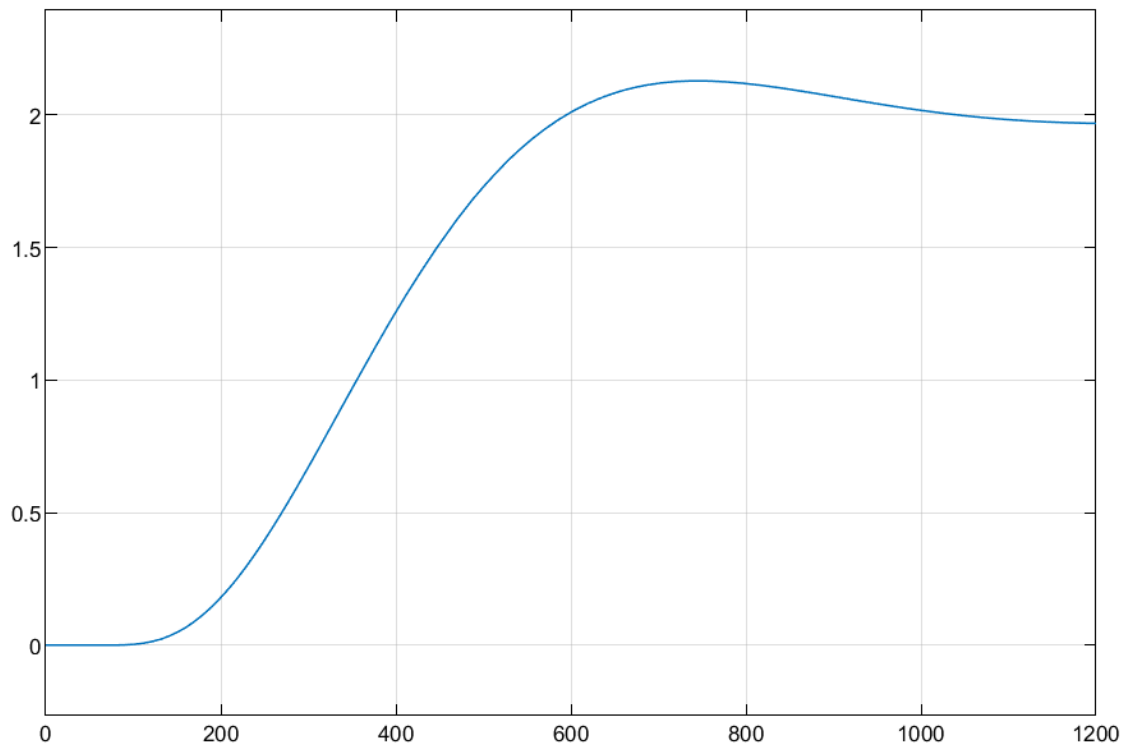


Рисунок 7.6 Перехідний процес САР з ПІД-регулятором при зміні заданого значення регульованої величини на 2°C

З графіка перехідної характеристики визначаємо максимальне динамічне відхилення становить $x_{\max} = 0.12^{\circ}\text{C}$, час регулювання $t_p = 446$ с.

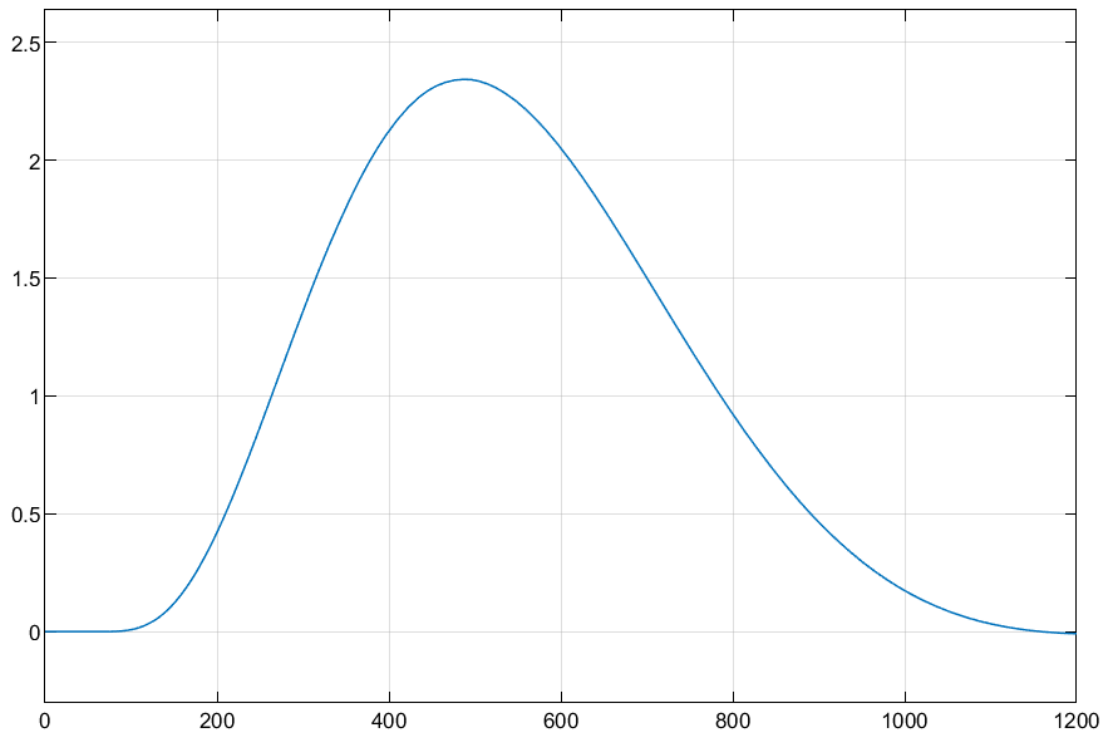


Рисунок 7.7 Перехідний процес САР з ПІД-регулятором з максимальною стрибкоподібною зміною регульовальної дії 20% ходу РО

З графіка перехідної характеристики визначаємо, що максимальне динамічне відхилення становить $x_{\max} = 2.34\text{ }^{\circ}\text{C}$, час регулювання $t_p = 888\text{с}$.

Як видно з визначених показників якості регулювання каналами зміни заданого значення та регульовальної дії, одноконтурна система автоматичного регулювання температури в опалювальному приміщенні є стійкою, однак не відповідає вимогам до якості регулювання. Зокрема, як по каналу регулюючої дії, так і по зміні заданого значення, спостерігаються надмірні динамічні відхилення та тривалість перехідних процесів. Ці значення перевищують допустимі межі, тому можна дійти висновку, що доцільно впровадити каскадну САР для покращення характеристик якості регулювання.

7.3 Синтез каскадної системи регулювання

Після виконання розрахунків та моделювання роботи одноконтурної системи автоматичного регулювання температури в опалювальному приміщенні було встановлено, що така структура не забезпечує необхідної точності та стабільності процесу регулювання. Аналіз отриманих перехідних процесів продемонстрував

низьку швидкодію, що свідчить про недостатню ефективність одноконтурної САП навіть з ПД-регулятором для даного типу об'єкта керування.

У зв'язку з цим було прийнято обґрунтоване рішення щодо переходу до більш складної, проте ефективнішої структури — каскадної системи автоматичного регулювання. Такий підхід дозволяє поліпшити якість керування завдяки використанню двох регуляторів, які взаємодіють між собою на різних рівнях регулювання.

В якості основного регулятора, що забезпечує підтримання заданої температури в контрольованій зоні, застосовано ПД-регулятор, який дозволяє ефективно компенсувати як статичні, так і динамічні відхилення. Допоміжним регулятором обрано П-регулятор, який керує проміжною величиною — наприклад, температурою теплоносія в системі опалення — і забезпечує швидку реакцію системи на зміни збурювальних факторів.

Передавальна функція допоміжного об'єкта регулювання:

$$W(p) = \frac{0.7}{(39p + 1)^3}.$$

Згідно з ітераційною методикою розрахунку каскадних САП [23] передавальна функція ОР за основною регульованою величиною в першому наближенні дорівнює:

$$W^{e(1)} \cong \frac{W(p)}{W_1(p)} \quad (7.17)$$

де верхній індекс (1) — означає номер ітерації;

$W(p)$ — передавальна функція ОР за основною регульованою величиною

$W_1(p)$ — передавальна функція ОР за допоміжною регульованою величиною;

1. На першому етапі за передавальною функцією ОР (7.17) визначають параметри налаштування основного регулятора $W_{АР}$ при цьому вони не залежать від характеристик допоміжного регулятора $W_{АР1}$.

2. Використовуючи отримані параметри основного регулятора $W_{АР}$, переходять до розрахунку параметрів допоміжного регулятора $W_{АР1}$. Для цього обчислюють передавальну функцію еквівалентного об'єкта за формулою:

$$W_1^{e(1)} = W_1(p) - W(p) \cdot W_{AP}(p) \quad (7.19)$$

У вищевказану формулу підставляються параметри налаштування основного регулятора, розраховані на першому кроці.

3. Здійснюється друга ітерація, в якій уточнюються параметри налаштування основного регулятора для еквівалентного об'єкта з передавальною функцією:

$$W^{e(1)} = \frac{W_{AP1}(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_{AP1}(p)} \cdot W(p) \quad (7.20)$$

В цю формулу підставляються значення параметрів налаштування допоміжного регулятора.

4. Тоді знову розраховуються параметри допоміжного регулятора за передавальною функцією еквівалентного об'єкта за формулою(7.19), при цьому підставляючи значення параметрів налаштування основного регулятора, розрахованого в попередньому кроці.

Згідно з цим алгоритмом ітераційний процес повторюють потрібну кількість разів [23].

Для визначення параметрів налаштування основного та допоміжного регуляторів у каскадній системі регулювання був застосований метод РЧХ, алгоритм виконання якого прописаний вище у розділі.

Для цього було застосовано середовище MATLAB. Основним регулятором вибраний ПІД-регулятор, а допоміжним — П-регулятор. Програмний код наведено нижче.

```
clear all; clc;
m=0.6;
k_op = 0.1666; T = 73.43; tau_op=70;
k_op1=0.7; T1=39;
w=[0.005:0.0001:0.0107];
disp('=====1 iteracia =====')
disp(' PID reguliator')
% Розширена ФЧХ для еквівалентного об'єкта регулювання
p=-m*w+i*w;
W_op=k_op./(T.*p+1).^4.*exp(-tau_op.*p);
W_op1=k_op1./(T1.*p+1).^3;
W_ek=W_op./W_op1;
Fi_ek=phase(W_ek);
A_ek=abs(W_ek);
figure(1)
```

```

    plot(w,Fi_ek),grid
    % Розрахунок параметрів налаштування kp і kp/Ti для основного ПІД-
    регулятора
    Td=100;
    hama=abs(Fi_ek)+atan(m)-pi;
    kp_Ti=w.*sqrt((m^2)+1).*(m*cos(hama)-
    sin(hama))./A_ek+(w.^2).*(1+(m.^2)).*Td;
    kp=(sqrt((m.^2)+1)).*cos(hama)./A_ek+2.*Td.*m.*w;
    [kp_Timax,jmax]=max(kp_Ti)
    kpmax=kp(jmax)
    % Перевірка виконання умови параметра Td для ПІД регулятора
    Timax=kpmax/kp_Timax ;
    Td_PID=Td*kp_Timax/kpmax^2
    % Побудова графіка границі запасу стійкості САР
    figure(2)
    plot(kp,kp_Ti,'k',kpmax,kp_Timax,'or','markerfacecolor','r','LineWidth',1
    ); grid;
    xlabel('\itk_p','FontSize',12,'FontName','Helvetica');
    ylabel('\it{k_p}/{T_i}','FontSize',12,'FontName','Helvetica');
    disp('P reguliator')
    w1=[0.005:0.0001:0.0207];
    % Розширена ФЧХ для еквівалентного об'єкту регулювання
    p=-m*w1+1i*w1;
    W_op=k_op./(T*p+1).^4.*exp(-tau_op.*p);
    W_op1=k_op1./(T1*p+1).^3;
    W_ap = kpmax + kp_Timax ./ p+Td*p;
    W_ek1=W_op1-W_op.*W_ap;
    Fi_ek1=phase(W_ek1);
    figure(3)
    plot(w1,Fi_ek1),grid
    % Розрахунок kp для допоміжного П-регулятора
    w_pi=0.0206;
    p1=-m*w_pi+1i*w_pi;
    W_op_v=k_op/(T*p1+1)^4.*exp(-tau_op*p1);
    W_op1_v=k_op1/(T1*p1+1)^3;
    W_ap_v = kpmax + kp_Timax / p1+Td*p1;
    W_ek1_v=W_op1_v-W_op_v*W_ap_v;
    A_ek1=abs(W_ek1_v);
    W_ar1=1/A_ek1
    %pause
    disp('=====2 iteracia =====')
    disp('PID reguliator')
    w=[0.003:0.0001:0.0089];
    % Розширена ФЧХ для еквівалентного об'єкта регулювання
    p=-m*w+1i*w;
    W_op=k_op./(T*p+1).^4.*exp(-tau_op*p);
    W_op1=k_op1./(T1*p+1).^3;
    W_ek=W_op.*W_ar1./(1+W_ar1.*W_op1);
    Fi_ek=phase(W_ek);
    A_ek=abs(W_ek);
    figure(1)

```

```

    plot(w,Fi_ek),grid,
% Розрахунок параметрів налаштування kp і kp/Ti для основного ПІД-
регулятора
Td=100;
hama=abs(Fi_ek)+atan(m)-pi;
kp_Ti=w.*sqrt((m^2)+1).*(m*cos(hama)-
sin(hama))./A_ek+(w.^2).*(1+(m.^2)).*Td;
kp=(sqrt((m.^2)+1)).*cos(hama)./A_ek+2.*Td.*m.*w;
[kp_Timax,jmax]=max(kp_Ti)
kpmax=kp(jmax)
% Перевірка виконання умови параметра Td для ПІД регулятора
Timax=kpmax/kp_Timax ;
Td_PID=Td*kp_Timax/kpmax^2
% Побудова графіка границі запасу стійкості САР
figure(2)
plot(kp,kp_Ti,'k',kpmax,kp_Timax,'or','markerfacecolor','r','LineWidth',1
); grid;
xlabel('\itk_p','FontSize',12,'FontName','Helvetica');
ylabel('\it{k_p}/{T_i}','FontSize',12,'FontName','Helvetica');
disp('P reguliator')
    w1=[0.005:0.0001:0.0207];
% Розширена ФЧХ для еквівалентного об'єкту регулювання
p=-m*w1+1i*w1;
W_op=k_op./(T*p+1).^4.*exp(-tau_op.*p);
W_op1=k_op1./(T1*p+1).^3;
W_ap = kpmax + kp_Timax ./ p+Td*p;
W_ek1=W_op1-W_op.*W_ap;
    Fi_ek1=phase(W_ek1);
figure(3)
plot(w1,Fi_ek1),grid
% Розрахунок kp для допоміжного П-регулятора
    w_pi=0.02;
    p1=-m*w_pi+1i*w_pi;
W_op_v=k_op/(T*p1+1)^4.*exp(-tau_op*p1);
W_op1_v=k_op1/(T1*p1+1)^3;
W_ap_v = kpmax + kp_Timax / p1+Td*p1;
W_ek1_v=W_op1_v-W_op_v*W_ap_v;
A_ek1=abs(W_ek1_v);
    W_ar1=1/A_ek1
%pause
disp('=====3 iteracia =====')
disp('PID reguliator')

w=[0.003:0.0001:0.0089];
% Розширена ФЧХ для еквівалентного об'єкта регулювання
p=-m*w+1i*w;
W_op=k_op./(T*p+1).^4.*exp(-tau_op.*p);
W_op1=k_op1./(T1*p+1).^3;
W_ek=W_op.*W_ar1./(1+W_ar1.*W_op1);
    Fi_ek=phase(W_ek);
    A_ek=abs(W_ek);

```

```

figure(1)
plot(w,Fi_ek),grid,
% Розрахунок параметрів налаштування kp і kp/Ti для основного ПІД-
регулятора
Td=100;
hama=abs(Fi_ek)+atan(m)-pi;
kp_Ti=w.*sqrt((m^2)+1).*(m*cos(hama)-
sin(hama))./A_ek+(w.^2).*(1+(m.^2)).*Td;
kp=(sqrt((m.^2)+1)).*cos(hama)./A_ek+2.*Td.*m.*w;
[kp_Timax,jmax]=max(kp_Ti)
крmax=kp(jmax)
% Перевірка виконання умови параметра Td для ПІД регулятора
Timax=крmax/kp_Timax ;
Td_PID=Td*kp_Timax/крmax^2
% Побудова графіка границі запасу стійкості САР
figure(2)
plot(kp,kp_Ti,'k',крmax,kp_Timax,'or','markerfacecolor','r','LineWidth',1
); grid;
xlabel('\itk_p','FontSize',12,'FontName','Helvetica');
ylabel('\it{k_p}/{T_i}','FontSize',12,'FontName','Helvetica');
disp('P regulator')
w1=[0.005:0.0001:0.0207];
% Розширена ФЧХ для еквівалентного об'єкту регулювання
p=-m*w1+1i*w1;
W_op=k_op./(T*p+1).^4.*exp(-tau_op.*p);
W_op1=k_op1./(T1*p+1).^3;
W_ap = крmax + kp_Timax ./ p+Td*p;
W_ek1=W_op1-W_op.*W_ap;
    Fi_ek1=phase(W_ek1);
figure(3)
plot(w1,Fi_ek1),grid
% Розрахунок kp для допоміжного П-регулятора
    w_pi=0.02;
    p1=-m*w_pi+1i*w_pi;
W_op_v=k_op/(T*p1+1)^4.*exp(-tau_op*p1);
W_op1_v=k_op1/(T1*p1+1)^3;
W_ap_v = крmax + kp_Timax / p1+Td*p1;
W_ek1_v=W_op1_v-W_op_v*W_ap_v;
A_ek1=abs(W_ek1_v);
    w_ar1=1/A_ek1

```

В результаті виконання програми отримуємо наступні параметри налаштування допоміжного та основного регуляторів:

Параметри налаштування основного та допоміжного регуляторів

Регулятор	Показники	Перша ітерація	Друга ітерація	Третя ітерація
1	2	3	4	5
ПД	k_p	3.8491	4.9767	5.0291
	$\frac{k_p}{T_i}$	0.0282	0.0356	0.0364
	T_d	0.1901	0.1439	0.1439
П	k_p	1.0853	1.0240	1.0246

Отримана модель основного ПД-регулятора:

$$W(p) = 5.0291 + \frac{0.0364}{p} + 0.1439p.$$

Отримана модель допоміжного П-регулятора:

$$W(p) = 1.0246.$$

7.4 Моделювання та дослідження каскадної системи регулювання

Після проведення попереднього аналізу об'єкта регулювання та розрахунку параметрів основного та допоміжного регуляторів було реалізовано математичну модель каскадної системи автоматичного регулювання температури повітря в опалювальному приміщенні. Особливістю цієї системи є використання каскадної структури з внутрішнім зворотним зв'язком за температурою теплоносія, що дозволяє покращити динамічні властивості та зменшити негативний вплив зовнішніх збурень на основний регульований параметр — температуру повітря в приміщенні.

Моделювання проводилося в середовищі Simulink, що входить до складу MATLAB. Основний регулятор зовнішнього контуру відповідає за досягнення та підтримання бажаної температури в приміщенні, тоді як допоміжний регулятор внутрішнього контуру стабілізує температуру теплоносія, який надходить до

опалювального приладу. Такий підхід дозволяє компенсувати інерційність об'єкта та забезпечити швидшу і точнішу реакцію системи на збурення. Для реалізації цього підходу була створена структурна схема каскадної САР, наведена на рисунку 7.11.

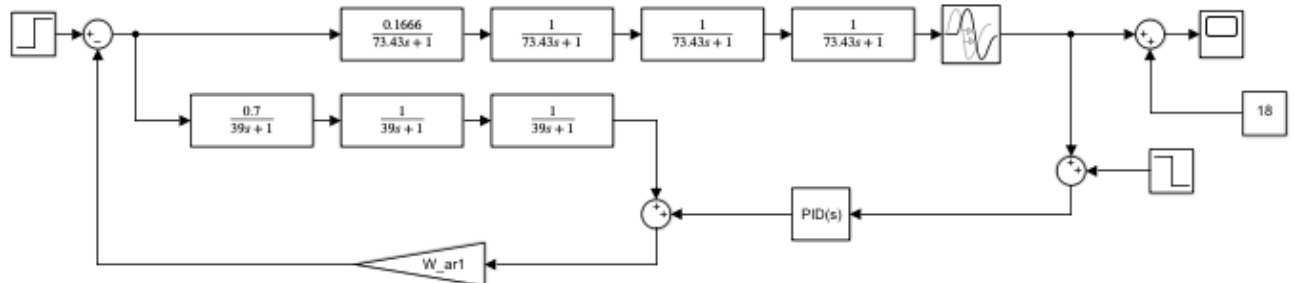


Рисунок 7.8 Структурна схема розрахованої каскадної САР температури в опалювальному приміщенні з додатковим параметром по температурі теплоносія в системі опалення, створена в середовищі Simulink

Під час дослідження моделі каскадної САР було виконано аналіз впливу параметра допоміжного регулятора П-регулятора на показники її роботи, зокрема шляхом цілеспрямованого збільшення передавального коефіцієнта пропорційного регулятора складової до $k_p=3$. Це дозволило досягти швидшої реакції системи на зміни вхідного сигналу, скоротити час перехідного процесу та покращити динамічну поведінку при короткочасних збуреннях. Для проведення детального аналізу та порівняння ефективності роботи розрахованої каскадної САР, були побудовані графіки перехідних процесів у відповідь на зміну заданого значення регульованої величини. Зокрема, у першому випадку розглядається реакція систем на стрибкоподібну зміну заданої температури на $-2\text{ }^\circ\text{C}$. На рис. 7.9 представлено графіки перехідних процесів для каскадної САР з передавальним коефіцієнтом $k_p=1.0246$ і $k_p=3$ при зміні завдання на $-2\text{ }^\circ\text{C}$.

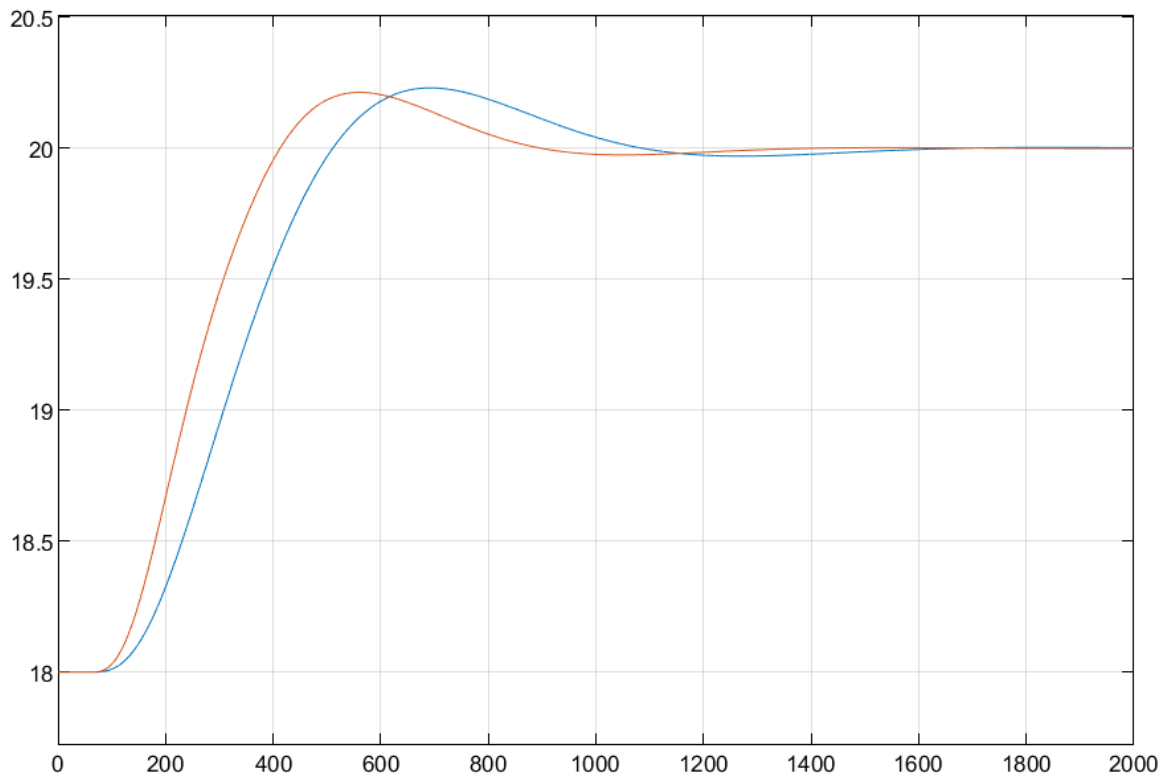


Рисунок 7.9 Перехідний процес каскадної САР з основним ПІД-регулятором та допоміжним П-регулятором при зміні заданого значення регульованої величини на 2 °С (блакитна – $k_p=1.0246$; червона – $k_p=3.0$)

З графіка перехідної характеристики визначаємо, що для k_p П-регулятора, рівним 1.0246 максимальне динамічне відхилення – $x_{\max} = 0.23$ °С, час регулювання $t_p = 373$ с. В свою чергу для системи з k_p П-регулятора, рівним 3.0, максимальне динамічне відхилення – $x_{\max} = 0.21$ °С, час регулювання $t_p = 253$ с.

Далі для аналізу чутливості систем до зміни регульовальної дії змодельованої реакцію на стрибкоподібну зміну, що відповідає 20% ходу регулюючого органу. На рис. 7.10 наведено відповідні графіки перехідних процесів.

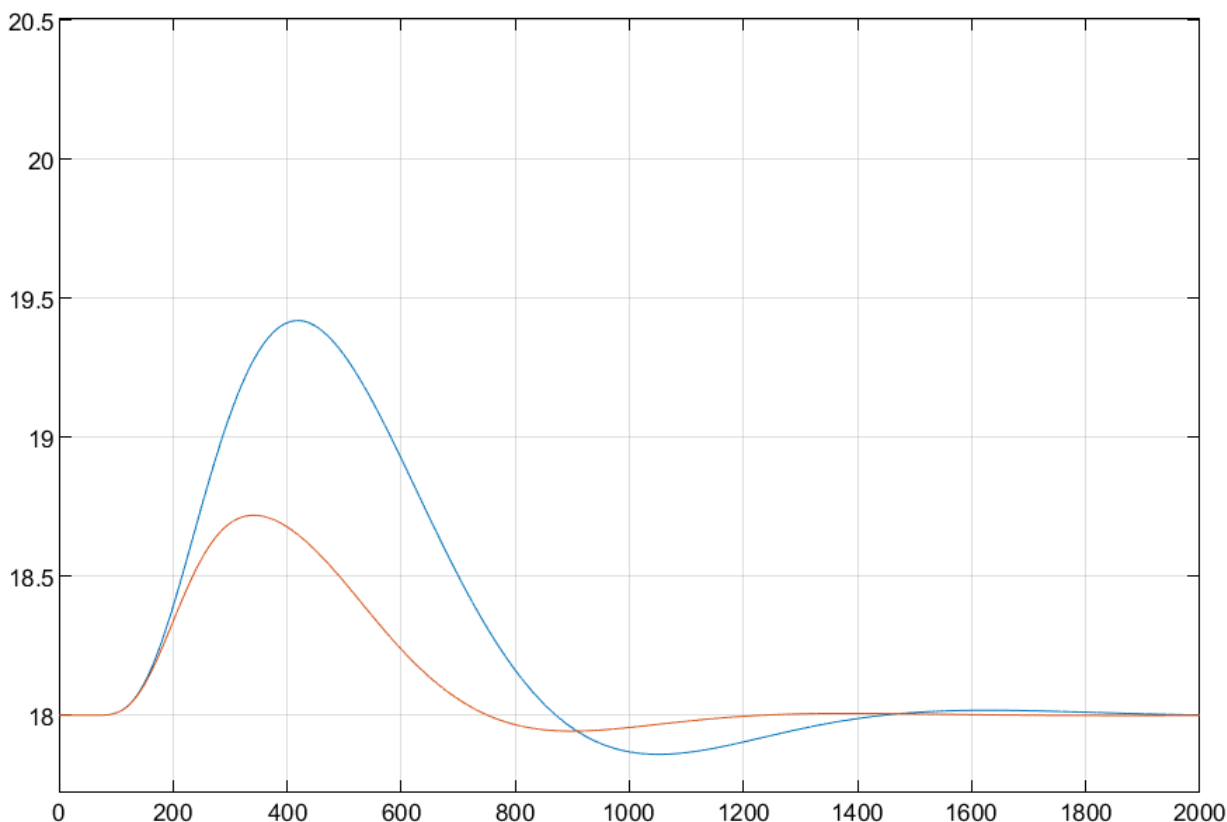


Рисунок 7.10 Перехідний процес каскадної САР з основним ПІД-регулятором та допоміжним П-регулятором при зміні регульованої дії на 20% ходу

РО(блакитна – $k_p=1.0246$; червона – $k_p=3.0$)

З графіка переходної характеристики визначаємо, що для k_p П-регулятора, рівним 1.0246 максимальне динамічне відхилення – $x_{\max} = 1.42\text{ }^\circ\text{C}$, час регулювання $t_p = 748$ с. В свою чергу для системи з k_p П-регулятора, рівним 3.0 максимальне динамічне відхилення – $x_{\max} = 0.75\text{ }^\circ\text{C}$, час регулювання $t_p = 453$ с.

Крім того, в рамках комплексного аналізу було досліджено динамічну поведінку температури теплоносія в системі за тих самих умов – як при зміні заданого значення температури на $-2\text{ }^\circ\text{C}$, так і при зміні регульованої дії на 20%. Це дозволило оцінити, як зміни в роботі регуляторів впливають на тепловий стан у відповідних ланках системи, зокрема на стабільність та точність підтримання температури теплоносія. Графіки цих переходних процесів наведені на рисунках 7.11 та 7.12.

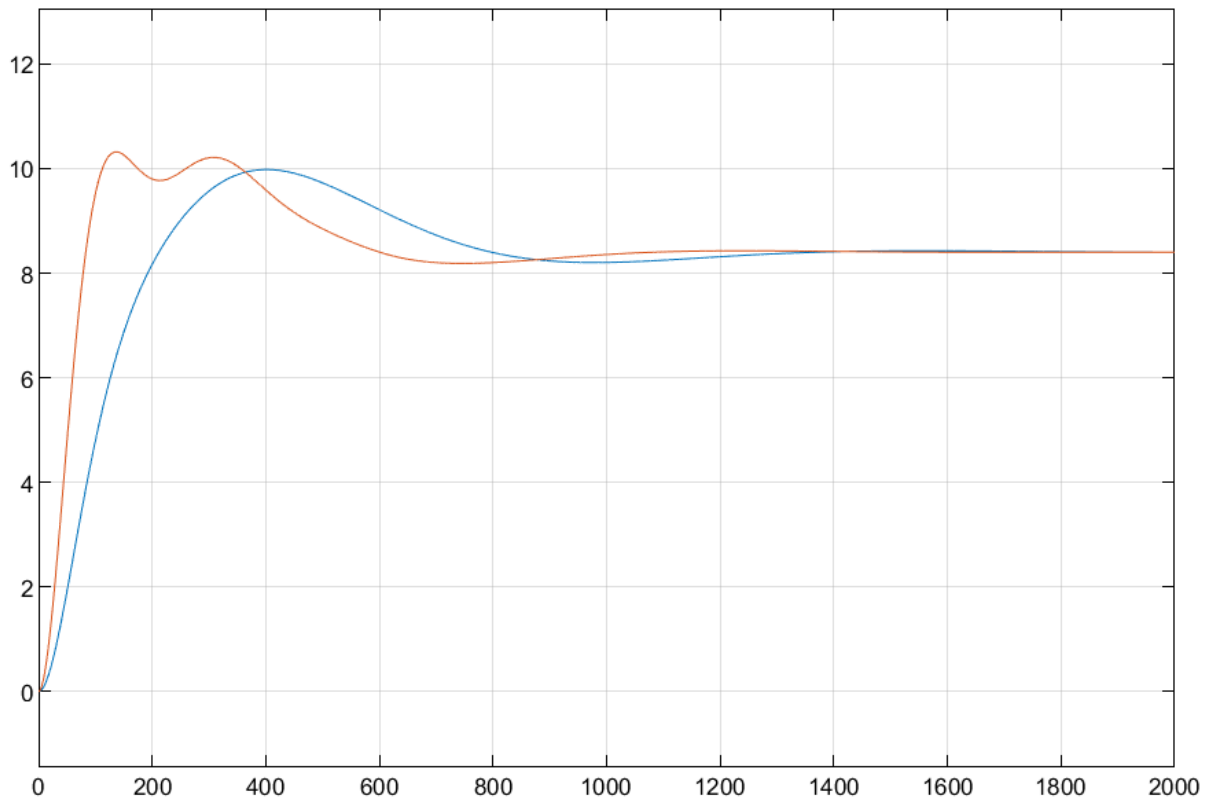


Рисунок 7.11 Перехідний процес температури теплоносія при зміні заданого значення регульованої величини на 2°C (блакитна – $k_p=1.0246$; червона – $k_p=3.0$)

З графіка перехідної характеристики визначаємо, що для k_p П-регулятора, рівним 1.0246 максимальне динамічне відхилення – $x_{\max}=1.5^{\circ}\text{C}$, час регулювання $t_p=672$ с. В свою чергу для системи з k_p П регулятора, рівним 3.0 максимальне динамічне відхилення – $x_{\max}=1.85^{\circ}\text{C}$, час регулювання $t_p=523$ с.

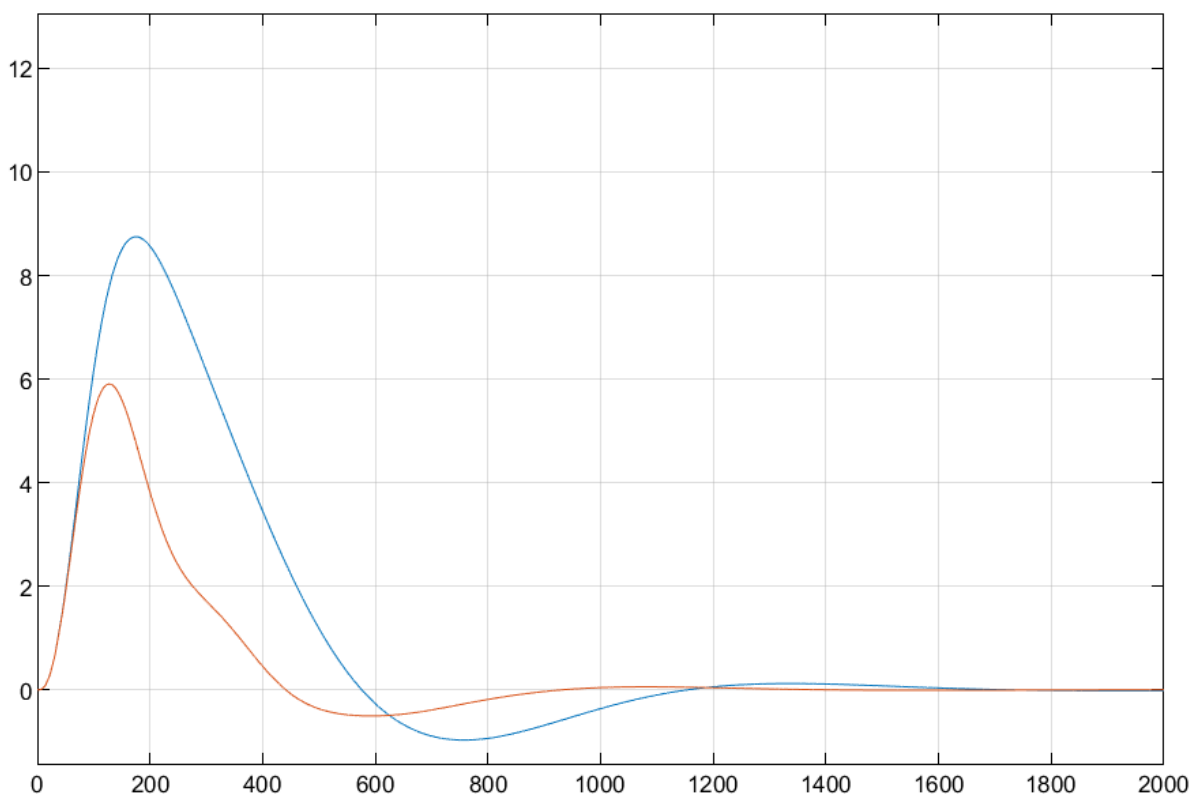


Рисунок 7.12 Перехідний процес температури теплоносія при зміні регульованої дії на 20% ходу РО (блакитна – $k_p=1.0246$; червона – $k_p=3.0$)

З графіка переходної характеристики визначаємо, що для k_p П-регулятора, рівним 1.0246 максимальне динамічне відхилення $x_{\max} = 8.42$ °C, час регулювання $t_p = 542$ с. В свою чергу для системи з k_p П-регулятора, рівним 3.0 максимальне динамічне відхилення $x_{\max} = 5.85$ °C, час регулювання $t_p = 400$ с.

Для оцінки ефективності впровадження каскадної структури в системі автоматичного регулювання було проведено порівняльне дослідження динамічних характеристик двох варіантів САР: звичайної одноконтурної системи та каскадної САР з П-регулятором де $k_p=3$. Основна мета такого порівняння — визначити, наскільки зміна структури регулювання та цілеспрямоване налаштування коефіцієнта k_p впливають на якість регулювання.

У каскадній САР параметр k_p було збільшено до значення 3, що забезпечило швидшу реакцію внутрішнього контуру на відхилення та дало змогу зменшити

інерційність системи в цілому. Це дозволяє оцінити потенційне покращення динамічної поведінки системи при збереженні стійкості.

Порівняння здійснюється за прямими показниками якості регулювання. Графіки реакції системи на зміну заданого значення та зміну регульованої дії подано нижче (рисунки 7.13, 7.14), що дає змогу візуально оцінити вплив каскадної структури з оптимізованим регулятором на покращення динамічних властивостей у порівнянні з базовою одноконтурною конфігурацією.

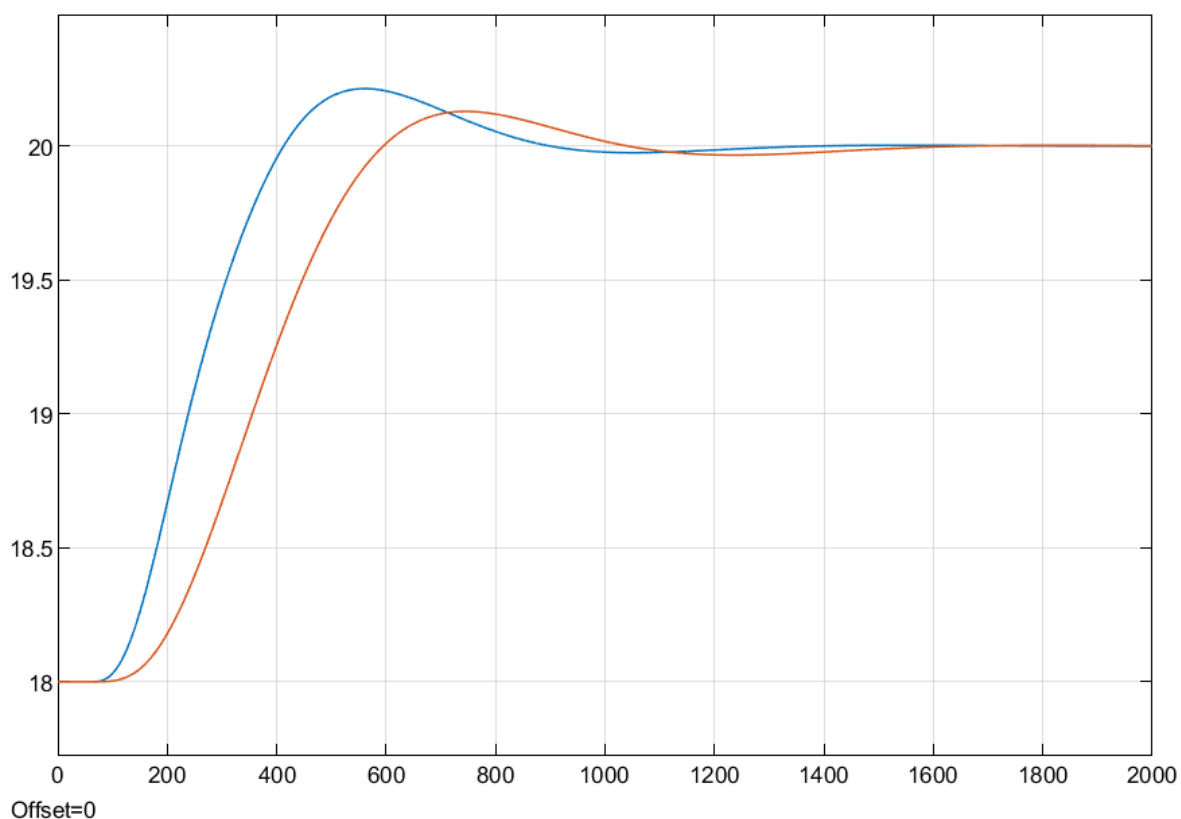


Рисунок 7.13 Перехідний процес САР теплоносія при зміні заданого значення регульованої величини на 2°C (блакитна – каскадна САР; червона – одноконтурна САР)

З графіка видно, що каскадна система забезпечує більш швидке реагування на зміну заданого значення температури, демонструючи зменшення часу переходного процесу. Це свідчить про підвищену швидкодію системи за рахунок ефективнішої роботи внутрішнього контуру, налаштованого для швидкого реагування на відхилення.

Крім того, попри дещо більшу амплітуду перерегулювання у каскадній САР, система швидше досягає усталеного значення та має менший час встановлення.

Одноконтурна САР, навпаки, демонструє більш плавну, але повільнішу динаміку, що може бути недостатньо ефективним у випадках, коли потрібна оперативна реакція на зміну вхідного сигналу.

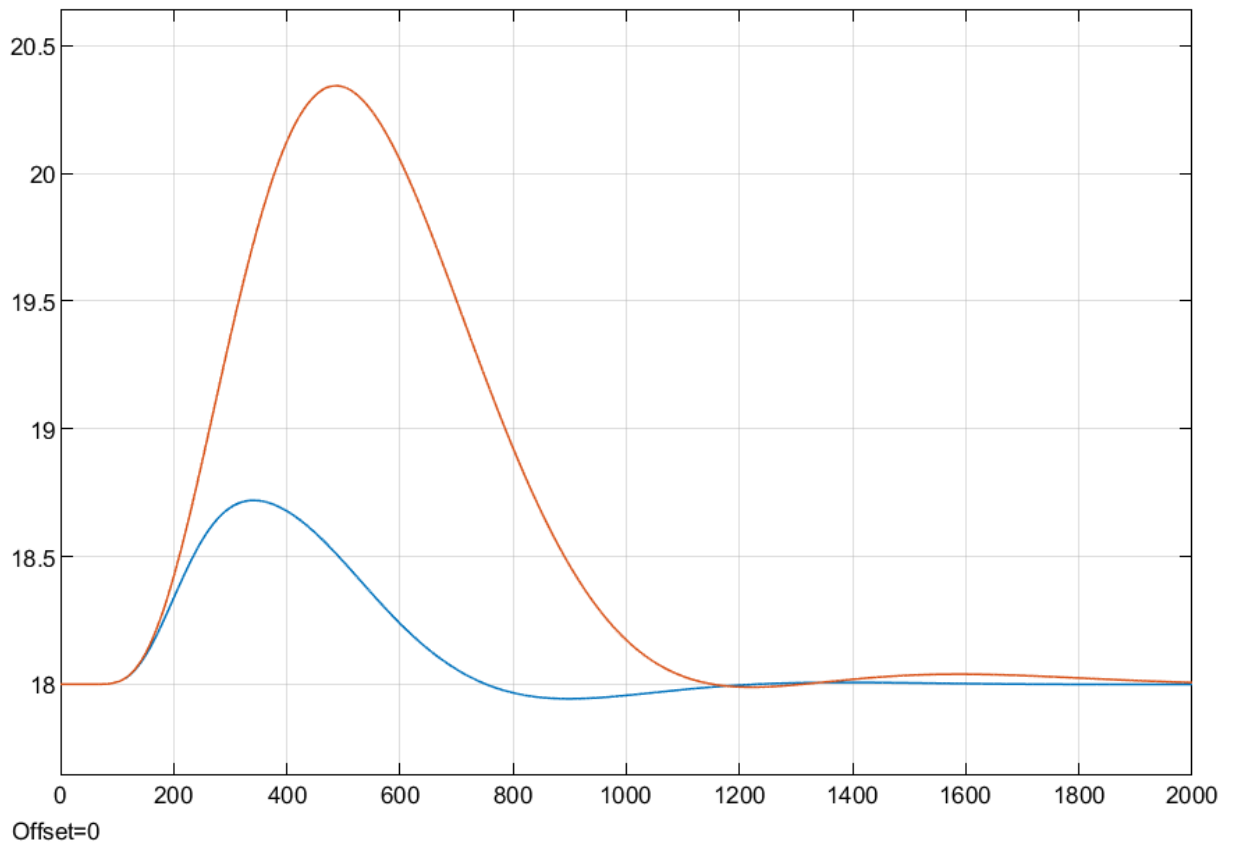


Рисунок 7.14 Перехідний процес САР температури при зміні регульованої дії на 20% ходу РО (блакитна – каскадна САР; червона – одноконтурна САР)

Як видно з графіка, каскадна САР значно краще пригнічує вплив збурення: її максимальне відхилення температури є суттєво меншим (приблизно на 1.8°C) порівняно з одноконтурною САР, у якої спостерігається виражене перерегулювання, що перевищує 2.5°C .

Також можна відзначити, що в каскадній САР коливання затухають швидше, і система раніше повертається до сталого значення температури, що характеризує її як більш стійку та швидкодіючу в умовах зовнішніх дестабілізуючих впливів.

Для оцінки ефективності різних структур систем автоматичного регулювання було проведено порівняльний аналіз їх динамічних характеристик за умов зміни зовнішніх збурень. Нижче наведено результати моделювання, які демонструють реакцію одноконтурної САР, розрахованої каскадної САР та модифікованої

каскадної САР на зміну ходу регулюючого органу та зміну температури в приміщенні (таблиці 7.3, 7.4). У таблицях подано ключові динамічні показники: підсилювального коефіцієнта регулятора k_p , співвідношення $\frac{k_p}{T_i}$ та стала часу диференціювання T_d . Ці дані дозволяють порівняти швидкодію, чутливість та стабільність кожної системи.

Таблиця 7.3

Порівняння динамічних показників перехідних процесів САР температури в опалювальному приміщенні

Зміна значення	Показники	Одноконтурна САР	Розрахована каскадна САР	Каскадна САР з уточненими параметрами
Зміна ходу РО на 20%	$x_{\max}, ^\circ\text{C}$	2.34	1.42	0.75
	t_p, c	888	748	453
Зміна температури в приміщенні на 2 $^\circ\text{C}$	$x_{\max}, ^\circ\text{C}$	0.12	0.23	0.21
	t_p, c	446	373	253

Таблиця 7.4

Порівняння динамічних показників перехідних процесів по температурі теплоносія на виході з теплообмінника в каскадній САР

Зміна значення	Показники	Розрахована каскадна САР	Каскадна САР з уточненими параметрами
Зміна ходу РО на 20%	$x_{\max}, ^\circ\text{C}$	8.42	5.85
	t_p, c	542	400
Зміна температури в приміщенні на 2 $^\circ\text{C}$	$x_{\max}, ^\circ\text{C}$	1.5	1.85
	t_p, c	672	523

Порівняльний аналіз динамічних показників перехідних процесів показує, що каскадна система автоматичного регулювання забезпечує кращі динамічні характеристики порівняно з одноконтурною. Подальше уточнення параметрів каскадної САР додатково покращує якість регулювання, зменшуючи максимальні відхилення та скорочуючи тривалість перехідних процесів як за збуренням у

вигляді зміни керувальної дії, так і при зміні температури в приміщенні. Це свідчить про доцільність використання каскадної структури та оптимізації її параметрів для підвищення ефективності системи.

Висновки: в цьому розділі було проведено всебічне дослідження процесу моделювання та синтезу системи автоматичного регулювання температури в опалювальному приміщенні. Основна увага була зосереджена на побудові математичної моделі об'єкта регулювання та визначенні ефективної структури системи з урахуванням сучасних вимог до енергоефективності, стабільності та швидкодії.

На основі аналізу варіантів структур систем автоматичного регулювання було обґрунтовано доцільність використання каскадної схеми. Ця схема передбачає наявність основного контуру, який регулює температуру повітря в приміщенні, та допоміжного контуру, який керує температурою теплоносія на виході з теплообмінника. Такий підхід дозволяє зменшити вплив збурень, зокрема змін зовнішньої температури або теплового навантаження, та підвищити точність і чутливість системи.

У процесі побудови моделі було використано дані експериментальної кривої розгону, отриманої в результаті стрибкоподібної зміни регулюючої дії. Після нормування цієї кривої було виконано апроксимацію у вигляді послідовного з'єднання аперіодичних ланок однакової сталої часу із запізненням. Отриману модель описано передавальною функцією, яка показала високу відповідність експериментальним даним — зведена похибка не перевищує 2.36%, що свідчить про достатню точність і адекватність моделі.

Для налаштування ПІД-регулятора було застосовано метод розширених частотних характеристик, що дозволив врахувати бажану ступінь коливальності системи. Це дало змогу забезпечити необхідний запас стійкості та покращити динамічну поведінку системи, зокрема зменшити перерегулювання, час переходу до сталого режиму та підвищити чутливість до зовнішніх змін.

Результати моделювання підтвердили ефективність запропонованого підходу: система змогла точно підтримувати задану температуру повітря в приміщенні, демонструючи покращені показники якості перехідного процесу.

Таким чином, синтезована каскадна САР є надійним і ефективним рішенням для підтримання теплового комфорту, яке може бути впроваджене в реальній системі автоматизації ІТП. Отримані результати закладають основу для подальшого вдосконалення систем автоматичного керування з використанням сучасних методів моделювання та аналізу.

РОЗДІЛ 8

ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Охорона праці є невід'ємною складовою сучасного виробництва, що впливає на соціальний та економічний стан суспільства. Незадовільний стан охорони праці може стати чинником соціальної напруги, впливаючи на формування політичного клімату в суспільстві. З економічної точки зору, погана охорона праці призводить до значних втрат як для окремих сімей, так і для суспільства в цілому. Протиріччя між суспільною корисністю праці та особистою трагедією працівника при травмуванні або загибелі на робочому місці підкреслює важливість забезпечення належних умов праці.

У цій бакалаврській кваліфікаційній роботі розглядається індивідуальний тепловий пункт з двома багатоконтурними теплообмінниками. ІТП є ключовим елементом у системах опалення та ГВП, забезпечуючи ефективне та безпечне використання теплової енергії. Основне обладнання даного об'єкту є: пластинчастий теплообмінник на ГВП та пластинчастий теплообмінник на систем опалення.

Складовими елементами є: ПВП, реле перепаду тиску, трубопроводи, насоси, клапани, регулювальні пристрої.

Умови експлуатації: обладнання встановлено в технічному приміщенні, що забезпечує захист від погодних умов та доступ до регулярного обслуговування.

Важливо враховувати фактори, що впливають на охорону праці при експлуатації ІТП. Зокрема, необхідно забезпечити безпечну експлуатацію водонагрівача, теплообмінників системи опалення фасадів, дотримуючись вимог гігієни праці та промислової санітарії, а також норм пожежної безпеки.

У даній розділі буде розглянуто питання забезпечення безпечної експлуатації індивідуального теплового пункту, включаючи такі аспекти:

- безпека експлуатації обладнання;
- гігієна праці та промислова санітарія (мікроклімат, склад повітря, шум, освітлення, вібрації, випромінювання);

- пожежна безпека.

Ці питання є критичними для забезпечення надійної та безпечної роботи ІТП, а також для мінімізації ризиків травмування працівників та пошкодження обладнання.

8.1 Технічні рішення щодо безпечної експлуатації засобів автоматизації

У процесі експлуатації індивідуального теплового пункту з багатоконтурними теплообмінниками особливу увагу необхідно приділяти забезпеченню безпеки засобів автоматизації. Ці засоби відіграють ключову роль у функціонуванні обладнання, оскільки забезпечують контроль параметрів теплоносія, підтримання температурних режимів та регулювання процесів теплообміну.

Основним напрямом технічного забезпечення безпеки є реалізація принципу резервування і дублювання функцій автоматики з метою запобігання аварійним ситуаціям. Засоби автоматизації мають бути обладнані захисними пристроями від короткого замикання, перенапруги, перегріву, а також від впливу електромагнітних завад. Для уникнення несанкціонованого доступу передбачено встановлення відповідного захисту програмного забезпечення та апаратних засобів.

Особливо важливим є розміщення щитів керування, контролерів, електроприводів у технічних приміщеннях із нормованими умовами мікроклімату, що унеможливають перегрів або вплив вологи. Також передбачається встановлення пристроїв безперебійного живлення (UPS), що забезпечують стабільну роботу автоматики навіть у разі знеструмлення об'єкта.

Крім того, усі автоматизовані системи повинні бути сумісні з чинними стандартами електробезпеки, мати відповідні сертифікати відповідності, а також бути обслуговуваними лише кваліфікованим персоналом. Усі елементи автоматизації повинні проходити регулярне технічне обслуговування, перевірку функціональності та калібрування згідно з регламентом.

8.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

З метою забезпечення нормативних умов праці в приміщенні індивідуального теплового пункту передбачено низку технічних рішень, що спрямовані на зменшення впливу шкідливих виробничих факторів. Для підтримання допустимого мікроклімату передбачається система вентиляції з механічним спонуканням, що забезпечує обмін повітря відповідно до норм. У зимовий період система підігріву повітря підтримує температуру в межах 17–19 °С, а влітку – забезпечується охолодження повітря до допустимих значень за допомогою кондиціонера. Вентиляційне обладнання обладнане фільтрами для очищення повітря від пилу та інших домішок.

Для обмеження рівня шуму від насосного обладнання та автоматики використовуються шумопоглинальні облицювання стін і стелі з перфорованих панелей, а також встановлюються віброгасильні опори під обладнанням. Звукоізоляція також передбачена для дверей і вентиляційних каналів. У щитовому приміщенні встановлюються перегородки зі звукоізолюючих матеріалів, що знижують рівень шуму до нормативних 60 дБА.

Освітлення приміщення реалізується за допомогою світлодіодних світильників, що забезпечують рівномірну освітленість не менше 200 лк. Світильники мають захисні екрани, що запобігають осліпленню, а електропроводка прокладена в металевих коробах із заземленням відповідно до вимог електробезпеки. Для аварійного освітлення передбачено автономні світильники з акумуляторним живленням, які вмикаються при знеструмленні.

Усі поверхні в приміщенні мають гладке оздоблення, що легко піддається прибиранню, з метою підтримання санітарно-гігієнічного стану. Матеріали оздоблення мають низьку емісію шкідливих речовин та відповідають гігієнічним вимогам. Для забезпечення особистої гігієни працівників передбачено облаштування побутового приміщення з умивальником, вентиляцією та штучним освітленням.

Вихідні положення

ІТП з двома багатоконтурними теплообмінниками працює в умовах автоматизації. Відсутність постійних робочих місць безпосередньо біля працюючого устаткування та керування технологічним процесом з приміщень щитових і кабін керування визначають основні умови, за яких вирішуються питання гігієни праці.

Вимоги до виробничої санітарії розглядаються для основних виробничих приміщень та приміщень постійного перебування персоналу. Важливими факторами є контроль мікроклімату, складу повітря, освітлення, рівня шуму і вібрації.

Для ІТП з двома багатоконтурними теплообмінниками, де як теплоносій використовується вода, всі елементи, тобто теплообмінники, є металевими. Розробка технічних рішень базується на таких вихідних положеннях:

- автоматизація роботи об'єкта;
- відсутність постійних робочих місць безпосередньо біля працюючого устаткування;
- керування технологічним процесом з приміщень щитових, кабін керування.

8.2.1 Мікроклімат

Параметри мікроклімату, що нормуються, включають температуру повітря (t , °C), відносну вологість повітря (W , %), швидкість його переміщення (V , м/с).

Оптимальні та допустимі параметри мікроклімату для умов, що розглядаються, наведені в таблиці 8.1 [24]:

Таблиця 8.1

Оптимальні та допустимі параметри мікроклімату

Категорія робіт	Період року	Оптимальні			Допустимі		
		t , °C	W , %	V , м/с	t , °C	W , %	V , м/с
Середньої тяжкості II-б	Теплий	10-22	40-60	0.3	15-29	до 75	до 0.5
	Холодний	17-19	40-60	0.2	13-23	до 75	до 0.4

Для дотримання нормативних параметрів мікроклімату передбачено такі заходи:

1. Монтаж системи кондиціонування для регулювання температури та відносної вологості до оптимальних значень;
2. Застосування вентиляційного обладнання з метою забезпечення належної циркуляції повітря та контрольованої швидкості його руху;
3. Установка теплових екранів для зменшення впливу теплового випромінювання від технічного обладнання.

8.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря в робочій зоні контролюється відповідно до гранично допустимих концентрацій (ГДК), що вимірюються в $\text{мг}/\text{м}^3$. У межах розглянутих умов потенційними джерелами забруднення є пил, для якого встановлено ГДК на рівні $10 \text{ мг}/\text{м}^3$ [25].

Для підтримання належного хімічного складу повітря в робочій зоні передбачено такі заходи:

1. Монтаж вентиляційної системи з елементами фільтрації;
2. Систематичний контроль якості повітря за допомогою спеціальних датчиків;
3. Застосування матеріалів з низьким рівнем емісії шкідливих речовин.

8.2.3 Виробниче освітлення

Освітлення виробничих приміщень є ключовим чинником у створенні безпечних і зручних умов праці. У межах даного проєкту, зокрема для виконання робіт розряду IVв, згідно з чинними нормативами, рівень освітленості має становити 200 лк [26]. Такий показник гарантує достатню кількість світла для виконання завдань різної складності. Недостатній рівень освітлення може спричинити втому, зниження працездатності та підвищення ризику виробничих травм, тоді як надлишкове світло — викликати зоровий дискомфорт і перевтому.

Для досягнення нормативного рівня освітленості передбачено такі заходи:

1. Використання люмінесцентних ламп з високою світловіддачею;

2. Оздоблення поверхонь стін і стелі світловідбивальними матеріалами;
3. Проведення регулярного обслуговування та перевірки системи освітлення.

Розрахунок аварійного освітлення в приміщенні індивідуального теплового пункту

Аварійне освітлення повинно створювати на поверхнях, що вимагають обслуговування, освітленість в 5 % від нормованої для загального освітлення. Тому норма аварійного освітлення в індивідуальному тепловому пункті повинно становити 2 люкс [26].

Розміри приміщення: довжина $A = 10$ м, ширина $B = 7$ м, висота $H = 3$ м.
Розрахуємо площу приміщення: $S = A \cdot B = 10 \cdot 7 = 70$ м²

Визначаємо висоту підвісу світильників над підлогою за формулою:

$$h_0 = H - h_c, \quad (8.1)$$

де:

H – це висота приміщення;

h_c – висота установки світильників стосовно землі.

$$h_0 = 3.0 - 0.3 = 2.7 \text{ м}$$

Висота підвісу світильника над робочою поверхнею визначається за формулою:

$$h_p = h_0 - h_{p1} = 3.8 - 0.8 = 3 \text{ м} \quad (8.2)$$

Рекомендована відстань між світильниками над робочою поверхнею рівнює:

$$L = 2 \cdot h_p = 2 \cdot 3 = 6 \text{ м} \quad (8.3)$$

Для визначення індексу використання світлового потоку необхідно обчислити індекс приміщення:

$$i = \frac{A \cdot B}{h(A + B)} = \frac{10 \cdot 7}{2.2(10 + 8)} = 1.77 \quad (8.4)$$

Розраховане значення округлюється до найближчого табличного i , прийнявши значення коефіцієнтів відбивання стелі і стін приміщення як 50 % і 50 % відповідно, з таблиці визначаємо значення використання світлового потоку $\eta =$

59 % Для аварійного освітлення обираємо світильники з люмінесцентним призматичним плафоном E.NEXT і люмінесцентними лампами MASTER TL-D Super 80 58W/830 1SL/25 зі світловим потоком 5240 лк.

$$N = \frac{E \cdot S \cdot K \cdot Z}{\Phi_{\text{л}} \cdot n \cdot \eta} = \frac{2 \cdot 70 \cdot 1.5 \cdot 1.1}{5240 \cdot 1 \cdot 0.59} = 0.075 \approx 1 \quad (8.5)$$

де:

E – мінімальна освітленість, люкс;

S – площа цеху, м²;

K – коефіцієнт запасу, який для даної ситуації рівний 1.5;

Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення, який для даної ситуації рівний 1.1;

$\Phi_{\text{л}}$ – світловий потік лампи;

n – коефіцієнт використання світлового потоку;

η – кількість ламп у світильнику.

Отже, для забезпечення аварійного освітлення приміщення необхідно використати один світильник.

8.2.4 Виробничий шум

Допустимі рівні звукового тиску, нормуються формулою:

$$L = \frac{20 \lg P_i}{P_0}, \text{ дБ}, \quad (8.6)$$

де

P_i – середньоквадратичне значення звукового тиску, Па за період часу, що розглядається;

P_0 – значення звукового тиску на нижньому порозі чутності.

Для умов, що розглядаються в роботі (непостійний широкополосний шум) [27]:

- Допустимий рівень звукового тиску для приміщення керування становить 60 дБА.

- Допустимий рівень звукового тиску для постійних робочих місць у виробничих приміщеннях - 80 дБА.

Основними джерелами шуму в ІТП є насосне обладнання та автоматизовані системи. Згідно з технічними характеристиками, очікуваний рівень звукового тиску може сягати 75 дБА.

Для дотримання допустимих рівнів шуму передбачені наступні заходи:

1. Монтаж панелей із шумопоглинаючими властивостями;
2. Застосування звукоізоляційних матеріалів у будівельних конструкціях;
3. Систематичний контроль шумових параметрів роботи обладнання.

Виробничі вібрації

Параметри, що характеризують виробничі вібрації, включають віброшвидкість (м/с) і віброприскорення (м/с²). Основним джерелом вібрацій в ІТП є насосні агрегати. Згідно з нормативними джерелами [28], можливі значення таких вібрацій становлять:

- Віброшвидкість: 0,1–0,5 м/с;
- Віброприскорення: 0,01–0,05 м/с².

Для забезпечення відповідності нормативним вимогам щодо вібрацій реалізовано такі рішення:

1. Застосування антивібраційних основ під обладнанням;
2. Укладання демпфуючих матеріалів для зниження передачі вібрацій;
3. Проведення регулярного моніторингу вібраційних характеристик техніки.

8.2.5 Виробничі випромінювання

У розглянутих умовах потенційними видами випромінювання є електромагнітні хвилі, що виникають внаслідок роботи електронного обладнання. Основними видами виробничого випромінювання в ІТП є:

- Інтенсивність електромагнітного поля — до 5 В/м;
- Інтенсивність інфрачервоного випромінювання — до 100 Вт/м².

Для забезпечення дотримання нормативних рівнів випромінювання передбачено такі заходи:

1. Застосування матеріалів з екранувальними властивостями для зниження впливу електромагнітного поля;

2. Установка електромагнітних фільтрів на потенційних джерелах випромінювання;
3. Періодичний контроль рівня випромінювання в межах робочої зони.

8.3 Пожежна безпека

Вихідні дані

Для забезпечення пожежної безпеки індивідуального теплового пункту з двома багатоконтурними теплообмінниками необхідно враховувати потенційні джерела пожежонебезпеки.

Основні матеріали та речовини, що використовуються в конструкції ІТП, мають низький рівень пожежонебезпеки:

1. Ємнісний водонагрівач і теплообмінники виготовлені з металу, який не підтримує горіння, тому не становить суттєвої загрози займання;
2. Трубопроводи, з'єднувальні елементи та ізоляційні матеріали зазвичай виготовляються з негорючих або важкогорючих матеріалів, що додатково знижує пожежний ризик;
3. Робочим середовищем в системі є вода — негорюча рідина, яка не може бути джерелом займання.

Таким чином, ІТП характеризується високим рівнем пожежної безпеки завдяки застосуванню негорючих конструкційних матеріалів і використанню води як теплоносія. Така конструкція істотно знижує ймовірність виникнення пожежонебезпечних ситуацій і забезпечує безпечну експлуатацію системи.

8.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежам

Система протипожежної профілактики спрямована на усунення умов, за яких може виникнути займання. Її принцип дії базується на тому, що пожежа можлива лише за одночасної наявності трьох елементів: горючої речовини, окисника та джерела запалювання. Якщо хоча б один із цих компонентів відсутній або його параметри знижено до безпечного рівня, ризик займання зникає.

До технічних заходів, спрямованих на запобігання пожежам, належать:

- Використання в конструкції ІТП негорючих або важкогорючих матеріалів;
- Унеможливлення утворення вибухонебезпечних середовищ;
- Використання електрообладнання у вибухозахищеному виконанні;
- Організація ефективної вентиляції для недопущення накопичення горючих парів і газів.

8.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Система протипожежного захисту має на меті запобігання поширенню вогню, своєчасне виявлення займання, створення умов для його ліквідації, захист персоналу від шкідливих та небезпечних факторів, пов'язаних із пожежею, а також збереження матеріальних ресурсів.

Основні технічні заходи протипожежного захисту включають:

- Визначення меж вогнестійкості та ступеня вогнетривкості будівельних конструкцій і споруд загалом;
- Дотримання нормативних відстаней між будівлями та іншими інфраструктурними об'єктами;
- Застосування вогнетривких конструкцій у системах вентиляції, опалення, кондиціонування та технологічному обладнанні;
- Використання оздоблювальних матеріалів із негорючих компонентів;
- Установка систем раннього виявлення пожежі, зокрема датчиків диму та температури;
- Монтаж автоматизованих установок пожежогасіння (водяних, газових, пінних);
- Забезпечення протидимового захисту та організація ефективної евакуації персоналу у разі виникнення пожежі.

Усі технічні рішення щодо запобігання пожежам і реалізації протипожежного захисту приймаються з урахуванням чинних нормативних документів і специфіки реальних виробничих умов.

Висновки: забезпечення охорони праці при експлуатації індивідуального теплового пункту з двома багатоконтурними теплообмінниками є ключовим

чинником для безпечного функціонування обладнання, збереження життя і здоров'я персоналу, а також стабільної роботи інженерних систем будівлі. У розділі було розглянуто низку технічних і організаційних заходів, що забезпечують відповідність умов праці нормативним вимогам.

У сфері гігієни праці та виробничої санітарії проаналізовано параметри мікроклімату, складу повітря, освітлення, шуму, вібрацій та випромінювань. Запропоновані технічні рішення – вентиляційні та фільтраційні системи, антивібраційні й звукоізолювальні матеріали, сучасне освітлення, засоби моніторингу – дозволяють підтримувати параметри робочого середовища в межах допустимих значень.

Визначено, що основні джерела шкідливих виробничих факторів в ІТП – це насоси, автоматика, джерела тепла та електромагнітні поля. Проте за умови впровадження відповідних інженерних рішень та автоматизації процесів їх вплив може бути значно мінімізованим.

Щодо пожежної безпеки, ІТП належить до категорії Д – тобто до об'єктів із мінімальним рівнем пожежонебезпеки. Це пояснюється застосуванням негорючих матеріалів (металу) і негорючої робочої рідини (води). Таким чином, ризик виникнення пожежі є вкрай низьким.

Отже, реалізація описаних у розділі технічних заходів дозволяє забезпечити високий рівень охорони праці, відповідність вимогам нормативних документів і створити безпечні умови для експлуатації ІТП, що є важливою складовою в сучасному технічно оснащеному середовищі.

РОЗДІЛ 9

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Економічний аспект тісно пов'язаний з проектуванням ІТП, оскільки він впливає на всі стадії реалізації проекту — від розробки до введення в експлуатацію. Вартісні параметри є визначальними для ефективного використання ресурсів, досягнення енергетичної ефективності та забезпечення довготривалої стабільності системи теплопостачання.

Проведення економічного аналізу варіантів реалізації проекту, витрат на обслуговування та потенційного прибутку дає змогу обрати найраціональніше з точки зору фінансів рішення. Такий підхід дозволяє сконцентрувати увагу на оптимізації витрат, зменшенні споживання енергії, підвищенні коефіцієнта корисної дії шляхом впровадження високоефективного обладнання та вдосконалених систем автоматичного управління. З огляду на стрімке зростання цін на енергоносії, значення економічності та енергоефективності значно зростає, що сприяє стійкому функціонуванню та конкурентоспроможності системи.

Економіка також суттєво впливає на вибір джерел енергії для ІТП. Аналіз економічної доцільності різних альтернатив дозволяє визначити найбільш ефективний та вигідний варіант. Зокрема, використання поновлюваних джерел енергії здатне зменшити залежність від дорогих викопних палив та знизити рівень шкідливих викидів, що позитивно позначається на загальних економічних показниках проекту.

Загальна вартість монтажу включає витрати на матеріали, енергоресурси, основну й додаткову оплату праці, а також накладні витрати, які можуть досягати 45% від повної вартості контрольно-вимірювальних приладів і автоматики (КВПіА). Додатково транспортні витрати можуть збільшити цю суму ще на 25%.

Відповідно до наданої специфікації обладнання для автоматизації, загальна вартість становить 522147,17. У цю суму включено повний комплект необхідних пристроїв для реалізації автоматизованого керування індивідуальним тепловим

пунктом, що забезпечує підвищення загальної ефективності функціонування системи теплопостачання та її економічності.

Застосування передових технологій та сучасних інженерних рішень при розробці та експлуатації ІТП дозволяє суттєво скоротити споживання енергоресурсів і зменшити витрати на обслуговування, що забезпечує економічну доцільність проекту у довгостроковому вимірі.

Таблиця 9.1

Кошторис витрат на автоматизації

№ п/п	Тип приладу	Назва приладу	Кількість	Вартість одного приладу, грн	Загальна вартість приладів даного типу, грн
1	2	3	4	5	6
1	ПВП тиску	Danfoss MBS 1700	10	5832.0	58320.0
2	ПВП температури	РегМик ПТУ-ТХАУ-002-Т-К-0,2	6	2800.0	16800.0
3	Магнітоіндуктивний витратомір	MIM-12-R 10 H G5 C3T 0	1	3832.0	3832.0
4	Реле перепаду тиску	Danfoss YNS-106X	9	9600.0	86400.0
5	ПВП температури та вологості	AUTONICS THD-R-C	1	4953.0	4953.0
6	Частотний перетворювач	VLT Micro Drive FC51	1	18300.0	18300.0
7	Прилад плавного пуску	VLT Soft Starter MCD 100	2	9900.0	19800.0
8	Редукторний електропривід	AME655	2	71328.0	142656.0

Продовження таблиці 9.1

1	2	3	4	5	6
9	Регулюючий двоходовий клапан	Danfoss VFS2	2	18900.0	37800.0
10	Водяний насос	RE SLWQB60	3	790.0	2370.0
11	Індикаторний світлодіодний	Lovato 8 LP2T ILB4P	6	30.0	180.0
12	Електропривід	AME10	1	29375.0	29375.0
13	Сідельний регулювальний клапан	VS2	1	6708.0	6708.0
14	Мікропроцесорний програмований модуль керування	CPU 314-2 DP (6ES7 314-6CF00- 0AB0)	1	35250.93	35250.93
15	Блок живлення	PS 307 (6ES7 307- 1EA01-0AA0)	1	13902.24	13902.24
16	Модуль аналогових вхідних сигналів	SM331 AI8x12Bit (6ES7 331-7KF02- 0AB0)	2	16500.0	33000.0
17	Модуль аналогових вихідних сигналів	SM332 AO2x12Bit (6ES7 332-5HB01- 0AB0)	1	12500.0	12500.0
	Всього				522147.17

Вартість монтажних робіт становить:

$$522147.17 \cdot 0.45 = 234966.226 \text{ грн.}$$

Транспортні витрати становлять:

$$522147.17 \cdot 0.25 = 130536.792 \text{ грн.}$$

Отже, кошторис витрат на автоматизації буде:

$$522147.17 + 234966.226 + 130536.792 = 887650.188 \text{ грн.}$$

Методика визначення амортизаційних відрахувань базується на залишковій вартості основних фондів, задіяних у процесі автоматизації, та встановлених норм амортизації, що становлять 40% від загальної вартості автоматизаційного обладнання.

Розрахунок річної суми амортизаційних відрахувань:

$$522147.17 \cdot 0.4 = 208858.868 \text{ грн.}$$

Обсяг споживаної електроенергії для освітлення індивідуального теплового пункту значною мірою залежить від площі приміщення, типу використовуваних світильників, їх кількості та тривалості роботи. Для попереднього розрахунку енергоспоживання можуть застосовуватись середні орієнтовні значення. У разі використання світлодіодних ламп належної потужності, середній рівень електроспоживання на освітлення приміщення ІТП складає близько 0,01–0,02 кВт/м². У рамках цього проекту передбачається встановлення 10 LED-ламп потужністю по 20 Вт кожна. Враховуючи те, що освітлення ІТП не вимагає постійної роботи, встановлено середній щоденний режим роботи освітлення — приблизно 2 години. При чинному тарифі на електроенергію в Україні — 4,32 грн/кВт·год — витрати на освітлення залишаються незначними.

Отже, використання енергоефективних освітлювальних приладів сприяє істотному зниженню експлуатаційних витрат, що позитивно впливає на загальну економічну ефективність функціонування автоматизованої системи теплопостачання.

Обчислення споживання електроенергії для освітлення:

$$10 \cdot 0.020 \frac{\text{кВт}}{\text{год}} \cdot 2 \text{ год} \cdot 365 \text{ днів} = 146 \frac{\text{кВт}}{\text{год}} \text{ за рік.}$$

Ціна на освітлення:

$$4.32 \cdot 146 = 630.72 \text{ грн.}$$

Проведемо розрахунок загального електроспоживання системи ІТП. Добове споживання енергії циркуляційними насосами системи опалення становить 17,76 кВт·год, а насосом системи гарячого водопостачання при середньому навантаженні — 8,88 кВт·год на добу. Слід зауважити, що контури опалення працюють лише

протягом опалювального сезону. Добове електроспоживання обладнання автоматизації становить 2 кВт·год.

Споживання електроенергії системою ІТП:

$$17.76 \frac{\text{кВт}}{\text{добу}} \cdot 180 \text{ днів} + (8.88 + 2) \frac{\text{кВт}}{\text{добу}} \cdot 365 = 7168 \frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{рік}}.$$

Різниця споживання електроенергії до і після введення ІТП в експлуатацію:

$$15300 - 7168 = 8132 \frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{рік}}.$$

Розрахуємо кількість зекономлених грошей за електроенергією:

$$8132 \cdot 4.32 = 351130.24.$$

Ціна споживання гігакалорій тепла до введення ІТП:

$$0.192 \cdot 94 \cdot 7 \cdot 931.21 = 117645.35 \text{ грн. .}$$

Ціна споживання гігакалорій після введення ІТП:

$$0.075 \cdot 94 \cdot 7 \cdot 931.21 = 45955.21 \text{ грн.}$$

Економія споживання тепла:

$$117645.35 - 45955.21 = 71690.14 \text{ грн.}$$

Термін окупності впровадженого ІТП:

$$\frac{887650.19 + 208858.87}{71690.14 + 351130.24} \approx 3 \text{ роки.}$$

Висновки: проведений економічний аналіз підтверджує доцільність впровадження індивідуального теплового пункту з автоматизованим керуванням. Завдяки ретельному розрахунку витрат на закупівлю, монтаж, транспортування та амортизацію обладнання, а також оцінці експлуатаційних витрат, було визначено загальну вартість реалізації проєкту на рівні 887650,19 грн. Разом із амортизаційними відрахуваннями у розмірі 208858,87 грн річна сума інвестицій становить понад 1 млн грн.

Однак впровадження енергоефективного обладнання та сучасних технологій керування дозволяє суттєво скоротити споживання як електроенергії, так і теплової енергії. Річна економія електроенергії становить близько 8132 кВт·год, що відповідає заощадженню коштів на суму 351130,24 грн. Економія на тепловій

енергії також є значною — понад 71 тис. грн на рік. У результаті загальна щорічна економія сягає понад 422 тис. грн, що дозволяє досягти терміну окупності проєкту приблизно за 3 роки.

Таким чином, впровадження ІТП є не лише технічно обґрунтованим, а й економічно вигідним рішенням, яке сприяє підвищенню ефективності використання енергоресурсів, зменшенню експлуатаційних витрат і підвищенню загальної стабільності та конкурентоспроможності системи тепlopостачання в довгостроковій перспективі.

ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було повністю реалізовано поставлену мету – розроблено комплексну систему автоматизації індивідуального теплового пункту з багатоконтурними теплообмінниками, що забезпечує ефективне, безпечне та енергоощадне функціонування систем опалення і гарячого водопостачання будівлі.

У першому розділі було проведено всебічний аналіз технологічного процесу ІТП як об'єкта керування. Було визначено основні вхідні, вихідні та збурюючі параметри, розраховано матеріальний і тепловий баланси, обґрунтовано номінальні значення ключових параметрів (тиску, температури, витрат теплоносія), а також сформовано структурну схему взаємозв'язків об'єкта керування.

У другому розділі розроблено функціональну схему автоматизації ІТП. Було обґрунтовано вибір координат регулювання, вимірювання, сигналізації, захисту та блокування. Проведено порівняльний аналіз методів регулювання температури (за відхиленням, збуренням та комбінований), з якого зроблено висновок про доцільність використання комбінованого підходу, а для практичного втілення обрано метод регулювання за відхиленням, як найбільш адаптивний до змін теплового навантаження.

У третьому розділі здійснено техніко-економічне обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації. Для кожного з 18 контурів системи обрано відповідні сенсори, виконавчі механізми, регулятори, програмовані логічні контролери, що забезпечують точне вимірювання та керування параметрами теплоносія. Надано повну специфікацію обладнання, технічні характеристики та опис принципів взаємодії.

У четвертому розділі представлено повну розгорнуту функціональну схему системи автоматизації з урахуванням усіх контурів керування та моніторингу. Схема охоплює як основні технологічні процеси, так і допоміжні елементи — аварійне блокування, сигналізацію, резервування та інше.

П'ятий розділ присвячено розробці програмного забезпечення. Було створено алгоритми функціонування системи, зокрема каскадне регулювання температури,

реалізоване на базі мікропроцесорного програмованого контролера SIMATIC S7-300. Описано логіку роботи контролера, взаємодію з периферійними пристроями та програмні модулі для кожного контуру.

У шостому розділі подано принципіві електричні схеми з'єднання технічних засобів автоматизації. Вони враховують вимоги до електробезпеки, надійності та можливості швидкої діагностики і обслуговування системи.

У сьомому розділі було виконано моделювання та дослідження одноконтурної системи автоматичного регулювання температури в опалювальному приміщенні на підставі побудованої математичної моделі об'єкта регулювання та математичної моделі ПД-регулятора з оптимальними параметрами налаштування. В результаті досліджень встановлено, що одноконтурна САР не задовольняє задані вимоги до якості.

З метою покращення динамічних властивостей системи було розроблено каскадну систему автоматичного регулювання з допоміжною регульованою величиною по температури теплоносія на виході з теплообмінника системи опалення, яка забезпечила вищу точність підтримання температури та зменшення тривалості перехідних процесів у порівнянні з одноконтурною системою регулювання. Проведено порівняльний аналіз каскадних САР, а також одноконтурної, що підтвердив доцільність застосування каскадної структури.

Виконане моделювання дозволило дослідити поведінку системи в умовах зміни заданого значення та стрибкоподібної зміни положення РО. Під час моделювання було підтверджено, що каскадна САР покращує якості регулювання системи та ідеально підходить під вимоги.

У восьмому розділі були розглянуті аспекти охорони праці при впровадженні та експлуатації автоматизованої системи. Проаналізовано можливі виробничі ризики, розроблено заходи з техніки безпеки, протипожежного захисту, санітарії та гігієни праці. Запропоновані заходи відповідають діючим нормативам і стандартам.

У дев'ятому розділі проведено економічне обґрунтування доцільності впровадження автоматизованої системи. Було визначено витрати на впровадження, експлуатаційні витрати, а також здійснено оцінку економічного ефекту від

зниження споживання енергоносіїв, зменшення кількості аварій та зниження витрат на технічне обслуговування. Розрахунки показали, що система окупається в оптимальні терміни.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Дейнеко, С. Індивідуальний тепловий пункт для багатоквартирного будинку: схеми та рішення. URL: <https://aw-therm.com.ua/individualnij-teplovij-punkt-shemi-ta-rishennya/>
2. Колієнко, А. Г. Регулювання відпуску теплоти в системах опалення багатоквартирного будинку. Київ, 2022 р. URL: https://www.mdi.org.ua/images/2022/15-12-22_presentation_OSBB_AGK.pdf
3. Ткаченко, С.Й., Чепурний, М.М., Степанов, Д.В. Розрахунки тепловий схем і основи проектування джерел тепlopостачання. Вінниця: ВНТУ. 2005. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/LANZ/Tkachenko_2005_137.pdf
4. ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція та кондиціонування". URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074971619479783152
5. Індивідуальний тепловий пункт системи опалення за незалежною схемою підключення. URL: <https://opeks.ua/ua/individualnij-teplovij-punkt-sistemi-opalennya-za-nezalezhnoyu-sxemoju-pidklyuchennya/>
6. ПВП тиску Danfoss MBS 1700 1811-A1AB04-0. URL: https://ianv.com.ua/image/catalog/literatura/Data_sheet_peretvoruvach_tisku-MBS1700-MBS1750.pdf
7. ПВП температури РегМик ПТУ-ТХАУ-002-Т-К-0,2. URL: https://regmik.ua/files/pdf/sensors/sensors%20with%20unif%20signal/PTU-THAU-002b-T-N_ukr.pdf
8. Магнітоіндуктивний витратомір серії MIM-12-R 10 H G5 C3T 0. URL: <https://www.scatts.co.uk/kobold-mim-12-10h-g5-c3t-0-mim-electromagnetic-flow-meter-0.1-25l-min.-g3-4-male-tft-display-m12-24v-dc.-outputs-4-20ma-npn-pnp-pp-pt1000-21479358320849#technical-documents>
9. ПВП температури та вологи AUTONICS THD-R-C. URL: [THD-series_EN.pdf](https://www.autonics.com.ua/ua/THD-series_EN.pdf)
10. Редукторний електропривід АМЕ655. URL: https://profimann.com.ua/images/companies/1/PDF/ame655-658sd-658su_UA.pdf?1587713194480

11. Danfoss VFS2 клапан регулюючий двоходовий. URL: https://profimann.com.ua/images/companies/1/PDF/vf2-3_ua_2016.pdf?1587738384357
12. Реле перепаду тиску Danfoss YNS-C106. URL: <https://profimann.com.ua/images/companies/1/PDF/YNS.pdf?1592916652222>
13. Частотний перетворювач VLT Micro Drive FC51. URL: <https://assets.danfoss.com/documents/276473/AQ348848915086en-000101.pdf>
14. Індикаторний світлодіодний пристрій Lovato 8 LP2T ILB4P. URL: <https://sever.cn.ua/product/3842-knopka-8-lp2t-b104-cervona-lovato.html>
15. Сідельний регулювальний клапан VS2. URL: <https://profimann.com.ua/images/companies/1/PDF/vs2.pdf?1588081030303>
16. Електропривід АМЕ10. URL: https://profimann.com.ua/images/companies/1/PDF/ame10%2C_20%2C_30_13%2C_23%2C_23su%2C_33_UA.pdf?1587718439291
17. Прилад плавного пуску VLT Soft Starter MCD 100. URL: <https://assets.danfoss.com/documents/230201/AD437153353153en-000101.pdf>
18. Насос серії RE SLWQB60. URL: <https://rewolt.com.ua/nasos-dlya-perekachki-vody-rewolt-12v-re-slwqb60-12v?srsltid=AfmBOorEvBdkRcVEcM7Gtz2fEpcZtB4nuGxxPoBC547d03JW-w5m27z>
19. Реле MER2-024DC. URL: https://www.eti.ua/images/product_db/documents/uk-UA/EVE-ETIREL.pdf#page=64
20. Програмний контролер SiMATIC S7-300, SIEMENS. URL: <https://eleksun.com.ua/uk/blog/article/programnyy-kontroler-simatic-s7-300-siemens>
21. Інструкція для модулів ПЛК. URL: https://vns.lpnu.ua/pluginfile.php?file=%2F3536430%2Fmod_folder%2Fcontent%2F0%2F%D0%86%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F%20%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%83%D0%B2%D0%B0%D1%87%D0%B0%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F%20%D0

https://vns.lpnu.ua/pluginfile.php?forcedownload=1&file=%2F2102072%2Fmod_assign%2Fintroattachment%2F0%2F%D0%9B%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B0%20%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0%201%20_%20%D1%96%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D1%96%D0%B9%D0%BD%D1%96%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8.pdf

22. Костик, І.В. Методичні вказівки для виконання лабораторної роботи №1 на тему «Практичне засвоєння правил графічного представлення алгоритмів функціонування контурів регулювання». URL: https://vns.lpnu.ua/pluginfile.php?forcedownload=1&file=%2F2102072%2Fmod_assign%2Fintroattachment%2F0%2F%D0%9B%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B0%20%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0%201%20_%20%D1%96%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D1%96%D0%B9%D0%BD%D1%96%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8.pdf

23. Крих, Г., Матіко, Г. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів. Лобраторний практикум: навчальний посібник. Видавництво Львівської політехніки. Львів, 2017. – 156 с.

24. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=14283

25. Гігієнічні регламенти хімічних речовин у повітрі робочої зони. //Наказ Міністерства охорони здоров'я України 14 липня 2020 року № 1596. URL:

26. ДБН В.2.5-28:2018. Природне та штучне освітлення. — К., Мінрегіон України, 2018. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074958732556240833?doc_type=2

27. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=48147

28. ДСТУ 12.1.012:2008 «Вібрація. Загальні вимоги по безпеці». URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=30043

29. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків, установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. URL:

https://education.profitteh.kiev.ua/pluginfile.php/978/mod_page/content/18/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3%20%D0%91%20%D0%92.1.1-36_2016%20%D0%92%D0%B8%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D0%BE%D1%80%D1%96%D0%B9%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BC%D1%96%D1%89%D0%B5%D0%BD%D1%8C%2C%20%D0%B1%D1%83%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%BA%D1%96%D0%B2%2C%20%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%BA%20%D0%B7%D0%B0%20%D0%B2%D0%B8%D0%B1%D1%83%D1%85%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%B6%D0%BD%D0%BE%D1%8E%20%D1%82%D0%B0%20%D0%BF%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%B6%D0%BD%D0%BE%D1%8E%20%D0%BD%D0%B5%D0%B1%D0%B5%D0%B7%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D1%8E.pdf