

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики
Кафедра автоматизації енергетичних процесів**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Володимир ВОЛОЩУК
«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: «Автоматизація підігрівача деаерованої води для теплофікаційної установки АЕС»

Виконав :

Студент 4 курсу, групи ТА-12

Сухоносенко Ілля Юрійович _____

Керівник:

Доцент, к.т.н.

Голінко Ігор Михайлович _____

Консультант з розділу «Охорона праці»:

Доцент, к.т.н.

Каштанов Сергій Федорович _____

Рецензент: _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики

Кафедра автоматизації енергетичних процесів

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Володимир ВОЛОЩУК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Сухоносенку Іллі Юрійовичу

1. Тема проєкту «Автоматизація підігрівача деаерованої води для теплофікаційної установки АЕС», керівник проєкту Голінко Ігор Михайлович, доцент, к.т.н., затверджені наказом по університету від «02» червня 2025 р. № 1875-с
2. Термін подання студентом проєкту «11» червня 2025 р.
3. Вихідні дані до проєкту: Система автоматизації підігрівача деаерованої води як частина теплофікаційної установки АЕС. Матеріали з переддипломної практики, технічні характеристики та літературний огляд математичної моделі та системи автоматизації підігрівача деаерованої води.
4. Зміст пояснювальної записки: 1.Опис системи підігрівача деаерованої води як частина теплофікаційної установки АЕС 2.Математичне моделювання регулювання рівня в корпусі підігрівача 3.Розробка контуру регулювання рівня

конденсату в підігрівачі 4.Технічна реалізація САР рівня конденсату в підігрівачі 5.Охорона праці 6.Техніко-економічний розрахунок ефективності.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Функціональна схема автоматизації (1 арк. ф.А2х1.5); схема принципова електрична (1 арк. ф. А4х4); креслення загального виду щита автоматизації (1 арк. ф. А4х3); схема з'єднань та підключень зовнішніх проводок (1 арк. ф. А4х4), специфікація обладнання (3 арк. ф. А3).

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Каштанов С.Ф., доцент, к.т.н	20.05	06.06

7. Дата видачі завдання 13.05.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1.	Отримання теми дипломного проєкту	13.05	
2.	Опис системи підігрівача деаерованої води як частина теплофікаційної установки АЕС	16.05	Розділ 1
3.	Створення схеми автоматичної функціональної, схеми електричної принципової	17.05	Аркуш 1, Аркуш 2
4.	Математичне моделювання регулювання рівня в корпусі підігрівача	22.05	Розділ 2
5.	Розробка контуру регулювання температури в приміщенні	28.05	Розділ 3
6.	Охорона праці	29.05	Розділ 5
7.	Технічна реалізація САР рівня конденсату в підігрівачі	04.06	Розділ 4
8.	Створення креслення загального виду щита автоматизації, схема з'єднань та підключень зовнішніх проводок	06.06	Аркуш 3, Аркуш 4
9.	Техніко-економічний розрахунок ефективності	08.06	Розділ 6
10.	Подання ДП на перевірку	09.06	

Студент

Ілля, Сухоносенко

Керівник

Ігор, Голінко

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт виконаний на тему: «Автоматизація підігрівача деаерованої води для теплофікаційної установки АЕС». В ході виконання проєкту була розроблена система автоматичного регулювання для підтримання значення рівня конденсату в підігрівачі.

Для даної роботи було виконано ряд поставлених задач. Для першого розділу було виконано опис системи регулювання рівня конденсату в підігрівачі, де розглянули принцип роботи, переваги та недоліки системи, контури регулювання, а також основні характеристики САР. Після чого в другому розділі було проведено математичне моделювання рівня конденсату в підігрівачі звідки було отримано модель об'єкта керування. В третьому розділі проведено розрахунок регулятора двома методами та обрано найкращий, також розраховано надійність системи. Четвертий розділ присвячений створенню програмного забезпечення та розробці веб-інтерфейс оператора в Node-RED. В п'ятому розділі наведено заходи для охорони праці та уникненню травматичних та аварійних ситуацій. Розділ номер шість показує економічну ефективність системи та кошторис для її побудови.

Ключові слова: рівень конденсату в підігрівачі, регулювання рівня, теплофікаційна система.

ANNOTATION

The diploma project was carried out on the topic: "Automation of the deaeration water heater for the NPP heating plant". During the project, an automatic control system was developed to maintain the condensate level in the heater.

A number of tasks were completed for this work. For the first section, a description of the condensate level control system in the heater was performed, which considered the principle of operation, advantages and disadvantages of the system, control circuits, as well as the main characteristics of the ACS. After that, in the second section, mathematical modeling of the condensate level in the heater was carried out, from which a model of the control object was obtained. In the third section, the controller was calculated using two methods and the best one was selected, and the reliability of the system was also calculated. The fourth section is devoted to the creation of software and the development of a web operator interface in Node-RED. The fifth section provides measures for labor protection and the avoidance of traumatic and emergency situations. Section number six shows the economic efficiency of the system and the estimate for its construction.

Keywords: condensate level in the heater, level control, heating system.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЕС – атомна електростанція;

БАТС – бак-акумулятор тепломережі;

ВВЕР – водно-водяний енергетичний реактор;

ВМ – виконавчий механізм;

ДТС – деаератор тепломережі;

ЕДТС – ежектор деаератора тепломережі;

НРДТ – насос рециркуляції деаератора тепломережі;

ОК – об'єкт керування;

ОК ПДВ – охолоджувач конденсату підігрівача деаерованої води

ПВВ – підігрівач водопровідної води;

ПДВ – підігрівач деаерованої води;

ПЛК – програмований логічний контролер;

САР – система автоматичного регулювання;

HMI – human-machine interface;

SCADA – supervisory control and data acquisition;

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматизація підігрівача деаерованої води
для теплофікаційної установки АЕС»

Київ – 2025 року

3MICT

ВСТУП	10
1. ОГЛЯД СИСТЕМИ ТЕПЛОФІКАЦІЇ АЕС.....	11
1.1 Стан технологічного процесу теплофікації в Україні на теперішній час	11
1.2 Аналіз процесу системи теплофікації.....	13
1.3 Аналіз контурів керування системи теплофікації	16
1.3.1 Регулювання температури	17
1.3.2 Регулювання рівня конденсату у підігрівачі	23
1.4 Основні характеристики підігрівача ПСВ-125-7-15	24
1.5 Постановка задачі автоматизації підігрівача ПСВ-125-7-15.....	27
2. РОЗРОБКА АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ РІВНЯ КОНДЕНСАТУ ДЛЯ ПІДІГРІВАЧА ПСВ-125-7-15	29
2.1 Аналітичне моделювання рівня конденсату підігрівача ПСВ-125-7-15	29
2.2 Розрахунок коефіцієнтів підігрівача ПСВ-125-7-15.....	31
2.3 Моделювання перехідних характеристик для розширеного ОК	34
2.4 Апроксимація розширеного ОК спрощеною математичною моделлю	36
3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ КОНДЕНСАТУ В ПІДІГРІВАЧІ ПСВ-125-7-15	38

Зам. інв.	2.4 Апроксимація розширеного ОК спрощеною математичною моделлю36									
	3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ КОНДЕНСАТУ В ПІДГРІВАЧІ ПСВ-125-7-15 38									
Підпис і дата							ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П			
Інв. №	Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата	Пояснювальна записка	Літ .	Аркуш	Аркушів
	Розроб.	СухоносенкфЮ.						ДП	7	80
	Перевірів	Голінко І.М.						НН ІАТЕ, ТА - 12		
	Т. контр.									
	Н. контр.	Голінко І.М.								
	Затв .	Волощук В.А.								

3.1 Структура системи регулювання рівня конденсату в підігрівачі	
ПСВ-125-7-15	38
3.2 Розрахунок системи регулювання рівня конденсату в підігрівачі	
ПСВ-125-7-15 за методом налаштування по лямбда-параметру	40
3.3 Розрахунок системи регулювання рівня конденсату в підігрівачі	
ПСВ-125-7-15 за методом мінімізації інтегральної квадратичної похибки ..	41
3.4 Аналіз результатів для налаштування системи регулювання рівня.....	43
3.5 Обчислення надійності системи.....	45
4. ПРОЄКТНІ РІШЕННЯ З АВТОМАТИЗАЦІЇ ПІДІГРІВАЧА	
ПСВ-125-7-15.....	49
4.1 Технічні рішення для автоматизації підігрівача ПСВ-125-7-15	49
4.2 Реалізація програмованого регулювання рівня у підігрівачі	
ПСВ-125-7-15	52
4.3 Реалізація інтерфейсу оператора системи регулювання рівня у підігрівачі	
ПСВ-125-7-15	54
4.3.1 Мета створення інтерфейсу в Node-RED	55
4.3.2 Інтерфейс в Node-RED	56
5. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	64
5.1. Технічні рішення та організаційні заходи з радіаційної безпеки	
на АЕС.....	65
5.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки експлуатації	
технологічного устаткування та засобів автоматизації	

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		

спроектованої системи	68
5.3. Електробезпека.....	68
5.4. Пожежна безпека та профілактика.....	71
5.4.1. Технічні рішення системи запобігання пожежі.....	71
5.4.2. Технічні рішення системи протипожежного захисту	72
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПІДГРІВАЧА	
ДЕАЕРОВАНОЇ ВОДИ В ТЕПЛОФІКАЦІЙНІЙ УСТАНОВЦІ АЕС.....	74
ВИСНОВКИ	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	79

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		

1. ВСТУП

Особливої актуальності в сучасних умовах набувають питання раціонального використання енергоресурсів, підвищення надійності теплопостачання та впровадження автоматизованих систем управління на об'єктах енергетики. Зважаючи на зростаючу вартість енергоносіїв, обмеження у виробництві теплової енергії та постійні загрози пошкодження критичної інфраструктури, уваги заслуговують теплофікаційні системи, які забезпечують теплопостачання і при цьому не потребують додаткових грошових або технологічних вкладень, як приклад теплофікаційні системи атомних електростанцій.

Одним з елементів таких систем є підігрівачі деаерованої води, які забезпечують підтримку температури мережевої води. Автоматизація керування підігрівачами дозволяє зменшити втрати тепла, стабілізувати теплові режими, запобігти аварійним ситуаціям через гідроудари та значні перепади тиску, а також оптимізувати роботу турбінного та допоміжного обладнання.

Підвищення ефективності теплофікаційних систем досягається впровадженням локальних систем автоматизованого регулювання, для підтримання рівня, температури та тиску в технологічних вузлах, зокрема в підігрівачах, деаераторах та насосних станціях. Такі системи дозволяють досягти стабільної роботи в умовах змінних теплових навантажень та підвищити загальну енергоефективність теплофікаційного циклу.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		10

2. ОГЛЯД СИСТЕМИ ТЕПЛОФІКАЦІЇ АЕС

1.1 Стан технологічного процесу теплофікації в Україні на теперішній час

Аналізуючи глобальне споживання енергії на основі звітів Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА), можна зробити висновок, що ця інформація надає важливе розуміння споживання енергії, що допомагає у вирішенні поточних енергетичних питань та розвитку стійких енергетичних рішень. Ці дані відіграють ключову роль у формуванні політик, що спрямовані на зменшення викидів парникових газів, підвищення енергоефективності та розвиток поновлюваних джерел енергії. Основні тенденції в Європі охоплюють поступову відмову від викопного палива, децентралізацію енергопостачання, інвестиції у відновлювані джерела енергії (ВДЕ), а також цифровізацію енергосистем.

Станом на 2025 рік Україна залишається одним із провідних виробників електроенергії в Східній Європі, зберігаючи значний енергетичний потенціал завдяки диверсифікованій структурі джерел генерації. За статистикою, зображеною на рис. 1.1 видно, що найбільшу частку в структурі виробництва електроенергії займають атомні електростанції (АЕС), які забезпечують близько 52% загального обсягу генерації. Теплові електростанції (ТЕС) та теплоелектроцентралі виробляють приблизно 32% електроенергії. Водночас, частка відновлюваних джерел енергії у структурі генерації електроенергії в Україні у березні 2025 року склала майже 9%.

Незважаючи на значний потенціал, українська енергетика стикається з низкою серйозних викликів. Одним з основних завдань є модернізація енергетичних систем, які в багатьох випадках мають вичерпаний технічний ресурс. З початком повномасштабної війни у 2022 році та через численні ракетні обстріли об'єктів критичної енергетичної інфраструктури постала гостра потреба у відновленні та технічному переоснащенні енергетичних об'єктів. Модернізація, впровадження нових технологій та заміна зношеного

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		11

обладнання дозволяють не лише підвищити енергоефективність, але й зменшити негативний вплив на довкілля.



Рис. 1.1. Стан виробництва електроенергії в Україні

У сучасних умовах особливу увагу приділяють зниженню власного споживання енергії на теплових і атомних електростанціях, що сприяє підвищенню загального коефіцієнта корисної дії енергетичних циклів. Одним з перспективних напрямків модернізації є використання новітніх теплообмінників і високоефективних систем теплофікації. Їх впровадження сприятиме підвищенню надійності роботи ТЕС і АЕС, зменшенню експлуатаційних витрат та зниженню викидів шкідливих речовин в атмосферу.

На сучасному етапі розвитку енергетики України та Європи системи теплофікації продовжують відігравати ключову роль у забезпеченні централізованого теплопостачання для промислових підприємств, громадських будівель і житлового сектору. Проте значна частина існуючих теплофікаційних систем в Україні характеризується високим ступенем зношеності основного та допоміжного обладнання, а також низьким рівнем енергоефективності.

Більшість об’єктів побудовані у 1960–1980-х роках і не відповідають сучасним вимогам щодо гнучкості, точності регулювання теплового навантаження та екологічної безпеки. У поєднанні з кліматичними змінами,

урбанізацією та необхідністю зменшення викидів CO₂, це обумовлює потребу в комплексній модернізації та впровадженні нових рішень у сфері теплофікації.

Впровадження сучасних теплофікаційних систем дозволяє:

- знизити питомі витрати енергоресурсів завдяки використанню вискоєфективних теплообмінних апаратів, попереднього підігріву теплоносіїв і рекуперації тепла;
- зменшити втрати тепла в мережах через перехід до закритих схем циркуляції, ізоляції трубопроводів та реконструкції тепломагістралей;
- гнучко керувати тепловим навантаженням, з урахуванням погодних умов, споживчого попиту та графіків енергогенеруючих установок;
- інтегрувати відновлювані джерела енергії, зокрема теплові насоси, сонячні колектори, біоенергетику.

Автоматизовані системи управління є критично важливим елементом сучасної теплофікації. Їх головне призначення полягає у комплексному управлінні технологічними процесами, включаючи контроль, регулювання, сигналізацію, архівацію даних і взаємодію з іншими енергетичними системами.

Системи автоматизації здійснюють безперервний моніторинг основних параметрів теплоносія, таких як температура, тиск, витрата та рівень у резервуарах і підігрівачах. Завдяки цьому можливе виявлення відхилень у режимі роботи обладнання на ранніх стадіях, що дозволяє оперативно реагувати на аварійні або нестандартні ситуації, не допускаючи пошкоджень обладнання або перебоїв у тепlopостачанні.

1.2 Аналіз процесу системи теплофікації

Розглянемо систему вироблення тепла для потреб обігріву на прикладі однієї з турбоагрегатних установок енергоблоку ВВР-440. До складу обладнання системи входять:

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		13

- турбоагрегатна установка, з II, IV та VI відборів якої гріюча пара з температурами 255°C, 235°C та 220°C відповідно надходить в систему теплофікації;
- основні та пікові бойлерні установки для підігріву води для системи теплофікації;
- обладнання (БПГВ, БАТС, ПСВ, ПДВ, ПВВ та ін.), яке очищує, дегазує, підігріває воду для різних потреб системи теплофікації;
- мережеві насоси;
- системи відображення інформації, вимірювань, контролю, управління технологічними процесами системи теплофікації.

Відпуск тепла споживачам здійснюється за рахунок циркуляції мережевої води по замкнутому контуру: теплові споживачі - мережеві насоси - бойлерна установка - теплові споживачі. Віддавши тепло споживачам мережева вода (зворотня) перекачується мережевими насосами через бойлерну установку, де до неї підводиться тепло, і знову повертається до теплових споживачів. Підведення тепла до мережевої води в бойлерній установці здійснюється за рахунок подачі пари з 4-го і 6-го відборів турбін або з загальностанційного колектора 4,6-ата.

На рис. 1.2 наведене обладнання, яке споживає гріючу пару з загальностанційного колектору 4,6-ата.

У випадку підвищеного споживання пари з колектору 4,6-ата, додаткове підживлення колектора може бути організоване від двох турбін і більше.

Гріюча пара з колектору 4,6-ата надходить в міжтрубний простір баків ПДВ і ЕДТС. В трубний простір ЕДТС надходить вода з ПВВ, де відбувається очищення води від кисню. Далі ця вода поступає в ДТС, де відбувається дегазація та видалення корозійно-агресивних і інертних газів з води за рахунок підвищення її температури. Якщо після виходу з ДТС, вода не потребує додаткового нагрівання, вона поступає в пряму або зворотну мережу. Якщо

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		14

після виходу з ДТС, вода потребує додаткового нагрівання, вона поступає в трубний простір ПДВ.

В ПДВ відбувається нагрів води до потрібної температури за рахунок передачі тепла від гріючої пари з колектору 4,6-ата. Нагріта вода після ПДВ надходить в ДТС. Так як надходить нагріта вода, то для очищення гарячої води потрібно менше витрат гріючої пари.

Насосами НРДТ деаерована вода з ДТС надходить в трубний простір ОК ПДВ, в міжтрубний простір надходить конденсат гріючої пари з ПДВ, який додатково охолоджується для запобігання термічним перевантаженням обладнання, підтримки ефективного теплового балансу та уникненню втрат деаерованої води через випаровування. В ПДВ відбувається остаточний підігрів води до необхідної температури.

При малих витратах води на підживлення тепломережі, частина підживлювальної води надходить в БАТС, звідки при підвищених витратах підживлювальної води поступає в пряму або зворотну мережу.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		15

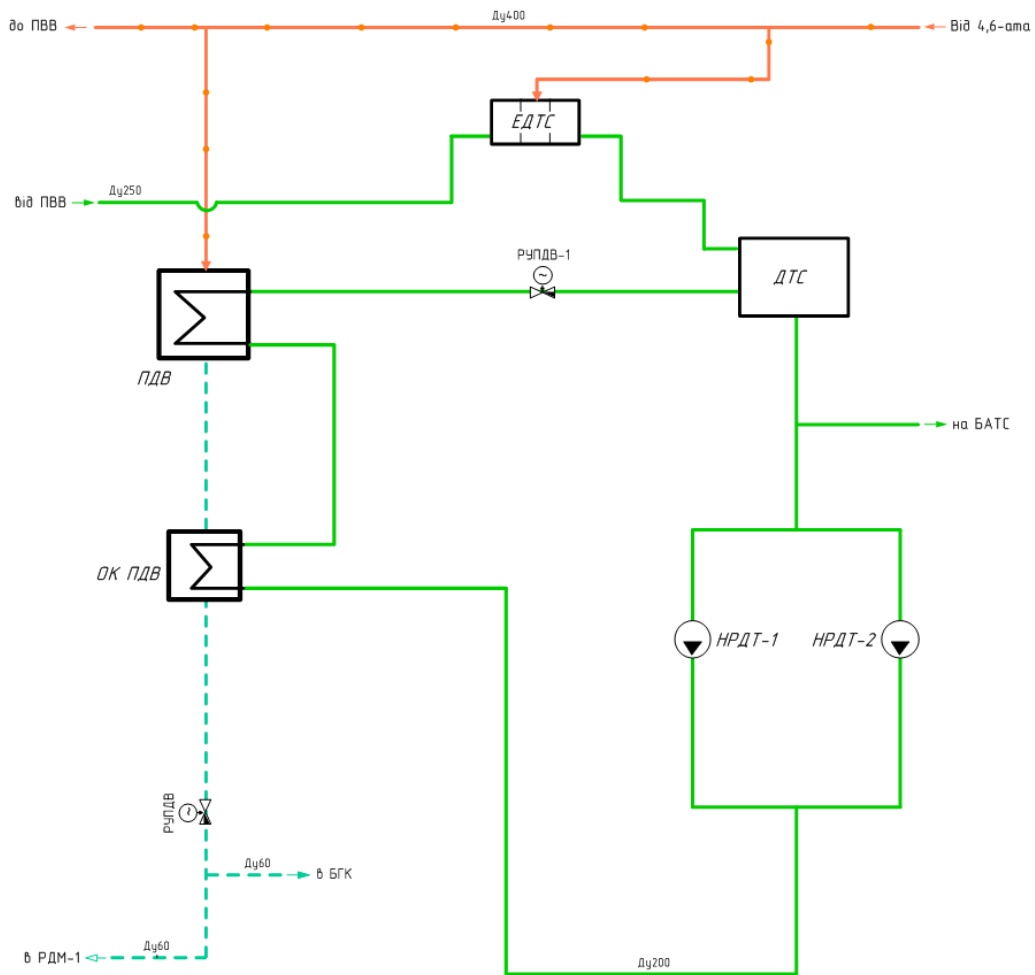


Рис. 1.2. Система підігріву деаерованої води

1.3 Аналіз контурів керування системи теплофікації

Теплофікаційна установка є ключовим елементом системи централізованого теплопостачання та виконує функцію нагріву мережевої води до встановлених параметрів температури, з урахуванням поточних метеорологічних умов. Підтримання стабільної температури теплоносія на виході установки є основним завданням автоматичного регулювання. Для досягнення цієї мети часто застосовуються регулятори, які коригують задане значення температури в залежності від температури зовнішнього повітря, що дозволяє більш точно підтримувати потрібну температуру води на теплопостачання до споживачів.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		16

Окрім основного каналу регулювання температури, у складі теплофікаційної установки важливо реалізувати контроль рівня конденсату в паровому просторі підігрівачів. Надмірне накопичення конденсату може призвести до виникнення гідроудару — явища, при якому різке зростання тиску через наявність води в паровому об'ємі спричиняє механічні навантаження на елементи системи. Це, у свою чергу, створює ризик пошкодження трубопроводів, теплообмінного обладнання або навіть турбіни електростанції, що є критично небажаним.

Додатковими параметрами, які необхідно враховувати під час проектування системи автоматичного керування, є тиск у мережевому трубопроводі та водно-хімічний стан конденсату. Підтримка тиску в межах нормативних значень (для енергоблоків 1,2 не більше 1 МПа) дозволяє уникнути гідравлічних збоїв і перевантажень насосного обладнання. Регулювання водно-хімічного режиму (ВХР) конденсату — ще один важливий аспект, що включає контроль за рН, вмістом домішок, електропровідністю тощо. Відповідність параметрів ВХР технологічним нормам забезпечує можливість повторного використання конденсату без шкоди для обладнання, підвищує його надійність та зменшує експлуатаційні витрати.

У підсумку, ефективне функціонування теплофікаційної установки залежить від узгодженого автоматичного керування температурою, рівнем конденсату, тиском і хімічним складом теплоносія. Комплексне регулювання цих параметрів дозволяє забезпечити енергоефективну, безпечну та довговічну роботу системи теплопостачання.

1.3.1 Регулювання температури

Для ефективного функціонування системи централізованого теплопостачання необхідно забезпечити стабільну подачу гарячої води до споживачів із температурою, що відповідає поточним тепловим навантаженням. Це досягається різними методами регулювання температури мережевої води. Найпоширеніші серед них є: дроселювання гріючої пари,

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		17

перепуск частини води в обвід та метод підтоплення.

1. Метод дроселювання гріючої пари

Цей метод полягає у регулюванні кількості пари, що надходить до корпусу підігрівача через паропровід. На рис. 1.3 зображено регулювання цим методом. Вода на виході із підігрівача вимірюється датчиками температури (поз. 1а). Результат вимірювання подається на регулятор(поз. 1б), який порівнює вимірювану температуру із заданою та в залежності від результату подає сигнал на ВМ (поз. 1в). ВМ керує дросельною заслінкою або регулюючим клапаном, що змінює об'єм гріючої пари, яка безпосередньо впливає на інтенсивність теплообміну з мережевою водою. Коли витрата подачі пари збільшується, зростає й температура води на виході, оскільки теплообмін відбувається інтенсивніше. При зменшенні подачі — температура падає. Керування здійснюється автоматизовано.

Перевага методу дроселювання гріючої пари в основному закладається у відносній простоті реалізації, а його надійність дозволяє інженерам досягати стабільної роботи системи, забезпечуючи точне регулювання температури води через точний контроль подачі пару для процесу нагріву.

Недоліком методу є те, що для досягнення оптимальних результатів потрібно складні системи зворотного зв'язку, що потребує додаткових зусиль та ресурсів. Також метод може бути менш ефективним при раптових змінах температури води або інших умовах. В окремих ситуаціях, метод дроселювання може бути неефективним і навіть шкідливим для обладнання, в тому й числі для роботи турбіни, через утворення суттєвих коливань тиску гріючої пари, при регулюванні потоку.

						ТА- 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		18

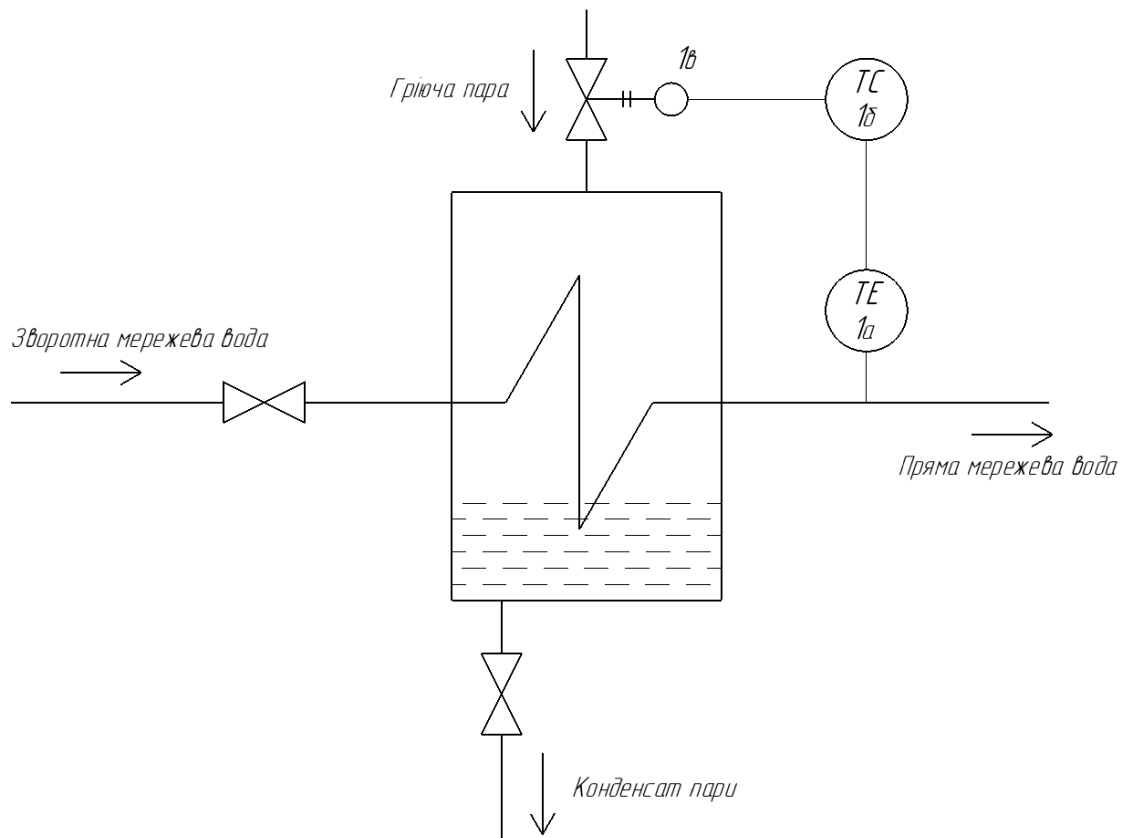


Рис. 1.3. Регулювання температури методом дроселювання гріючої пари

2. Метод перепуску частини води в обвід

У цьому методі регулювання досягається змішуванням частини холодної мережевої води, яка обминає підігрівач, з гарячою водою після теплообмінника. Такий підхід дозволяє точно керувати температурою на виході без прямого впливу на подачу гріючої пари. Для реалізації методу застосовують двоходові або триходові клапани. На рис. 1.4 зображується керування шляхом відкриття або закриття клапана на обвідній лінії. Датчик температури (поз. 1а) вимірює температуру води на виході із підігрівача. Результат вимірювання надходить на регулятор (поз. 1б), який порівнює виміряну температуру із заданою та в залежності від результату подає керуючий сигнал на ВМ, що стоїть на обвідній лінії (поз. 1в). ВМ змінюючи положення, впливає на витрату зворотної води, яка змішується з водою на виході із підігрівача, за рахунок чого змінюється кінцева температура води на виході із підігрівача. На рис. 1.5 — триходовий клапан розподіляє потік води між підігрівачем та обводом одночасно,

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк. 19
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		

забезпечуючи плавніше регулювання. Регулювання із використання триходового клапану працює за тим же принципом, що і з двоходовим.

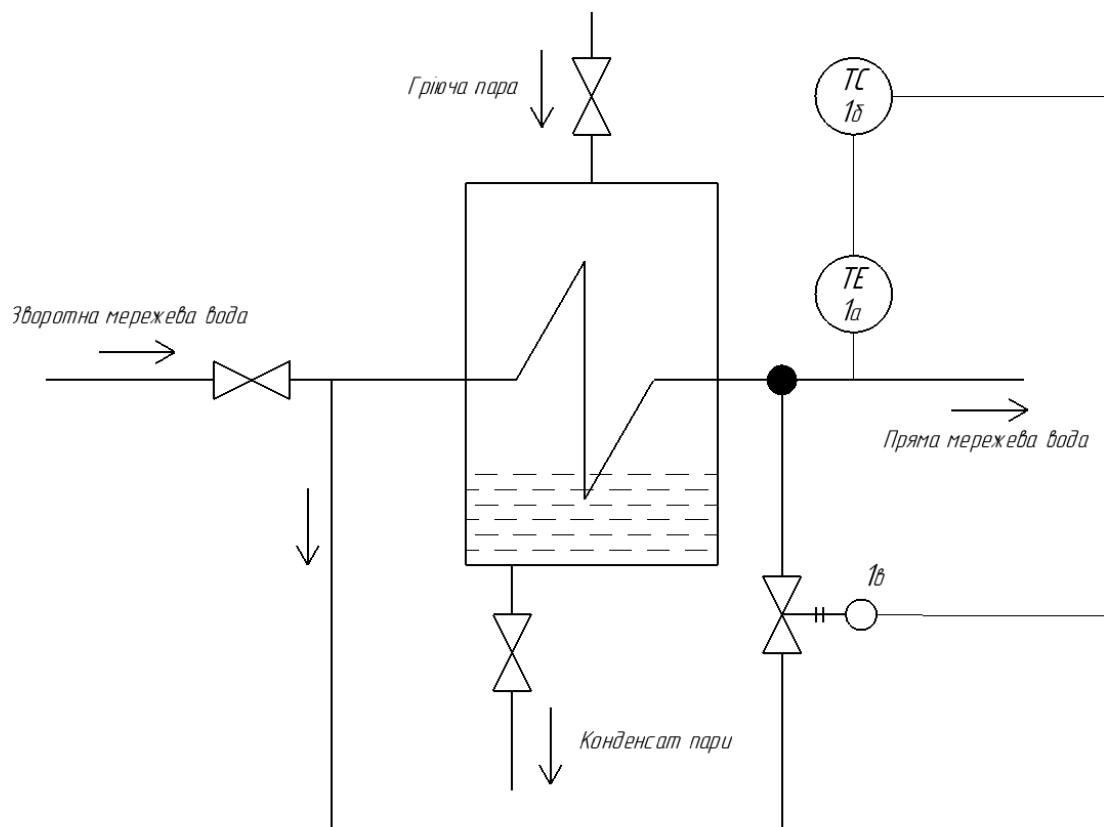


Рис. 1.4. Регулювання температури методом перепуску частини води із використанням двоходового клапану

Перевагою методу є його повна незалежність від парового тракту: зміна температури відбувається шляхом маніпулювання тільки водяним потоком. Це дозволяє уникати коливань тиску в системі гріючої пари, що особливо важливо в установках, де пара також використовується в турбіні. Крім того, метод забезпечує швидке реагування системи на зміни теплового навантаження і добре працює в умовах частих температурних коливань.

Недоліком є складність конструкції. Системи з триходовими клапанами вимагають ретельного гідравлічного розрахунку, синхронізації витрат і точного балансування. Неправильна настройка може призвести до неефективного змішування або гідравлічного дисбалансу в контурі. Також у разі великих

перепадів температур вхідної води цей метод може вимагати більших енергетичних витрат на підігрів холодної води, що тимчасово зменшує загальну енергоефективність.

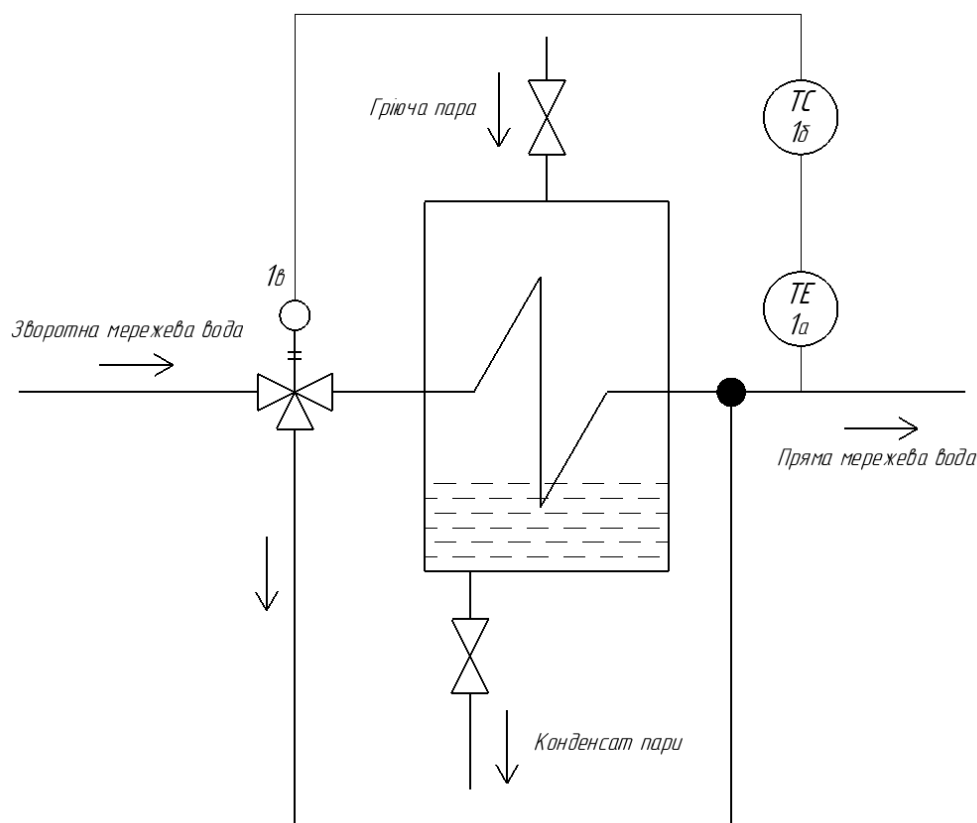


Рис. 1.5. Регулювання температури методом перепуску частини води із використанням триходового клапану

3. Метод підтоплення

На рис. 1.6 зображене регулювання температури в залежності від рівня конденсату в корпусі підігрівача. Датчик температури (рис. 1.6, поз. 1а) вимірює температуру води на виході із підігрівача. Результат вимірювання надходить на контролер (рис. 1.6, поз. 1б), який порівнює поточну температуру із завданням і в залежності від розбіжності, видає керуючий сигнал на ВМ (рис. 1.6, поз. 1в). ВМ змінює положення клапана, за рахунок чого змінюється рівень конденсату в корпусі підігрівача. Зміна рівня конденсату безпосередньо впливає на ефективність теплообміну: при підвищеному рівні частина

теплообмінної поверхні занурена у конденсат, що утворює ізоляційний шар і зменшує теплопередачу. Зниження рівня збільшує площу контакту пари з теплообмінними трубами, підсилюючи нагрів води.

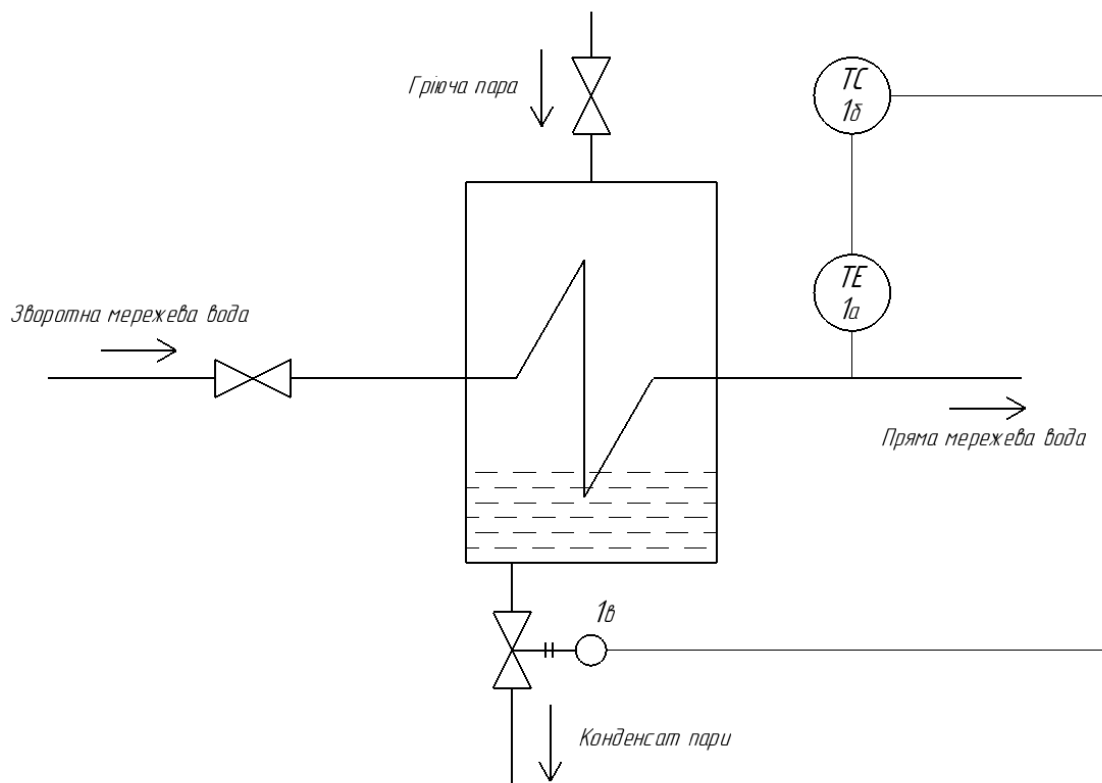


Рис. 1.6. Регулювання температури методом підтоплення.

Перевагою цього методу є висока точність регулювання температури завдяки прямому впливу на площу теплообміну без змін у витраті пари або води. Також, на відміну від дроселювання, метод не порушує тиск у паровій магістралі, що дозволяє стабільно працювати турбінам з відбором пари.

Недоліком є підвищена складність реалізації системи зворотного зв'язку. Рівень конденсату повинен контролюватися з високою точністю — у випадку перевищення допустимого рівня можливе потрапляння рідини в парову частину, що може спричинити гідроудар і пошкодження турбіни. Необхідна наявність високоточних рівнемірів, швидкодіючих регулюючих клапанів та

захисних алгоритмів, що ускладнює технічне обслуговування й підвищує вартість впровадження.

1.3.2 Регулювання рівня конденсату у підігрівачі

У процесі теплообміну між парою та водою в мережевих підігрівачах відбувається утворення конденсату гріючої пари. Рівень конденсату потребує постійного контролю, адже його кількість безпосередньо впливає на ефективність теплообміну.

Занадто низький рівень конденсату призводить до збільшення об'єму гріючої пари у міжтрубному просторі підігрівача, і відповідно перегріву мережевої води, а також може викликати пошкодження трубопроводу або корпусу підігрівача. З іншого боку, надмірний рівень конденсату заважає теплообміну, що зменшує теплопередачу та також може призвести до гідроудару через різке падіння температури гріючої пари. Гідроудар може пошкодити трубопроводи, фланцеві з'єднання і, що найнебезпечніше, — викликати руйнування лопатей турбіни через потрапляння конденсату через пошкодженні частини теплообмінника в корпус турбоагрегата.

З метою запобігання вищенаведених випадків, у системі передбачено автоматичне регулювання рівня конденсату зображене на рис. 1.7. У разі підвищення рівня вище допустимого, датчики рівня (поз. 1а) подають сигнал на регулятор, який відкриває дренажний клапан (поз. 1в). Надлишковий конденсат зливається в конденсатозбірник або іншу приймальну ємність. Таким чином підтримується заданий рівень у робочому діапазоні.

Коли ж необхідно підвищити рівень, керуючий сигнал закриває клапан, що дозволяє накопиченню певного об'єму конденсату в корпусі.

						ТА- 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		23

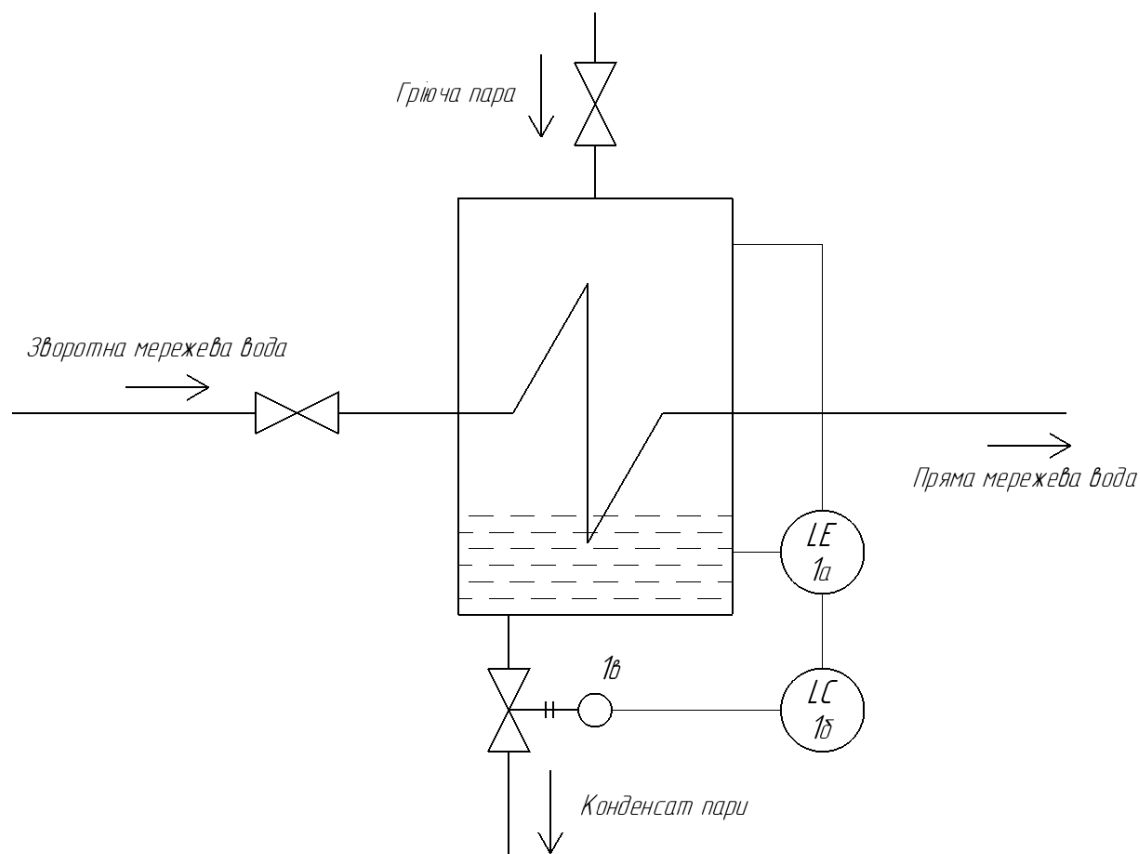


Рис. 1.7. Регулювання рівня.

Подібна система керування, яка включає в себе датчики рівня, регулятор і швидкодіючий дренажний клапан, є критично важливою частиною схеми безпечної експлуатації підігрівачів. Вона не лише гарантує стабільність процесу теплообміну, але й відіграє ключову роль у захисті турбомеханічного обладнання від аварійних ситуацій.

1.4 Основні характеристики підігрівача ПСВ-125-7-15

Підігрівач деаерованої води являє собою кожухотрубний циліндричний теплообмінник вертикального типу, основними вузлами якого є: корпус, трубна система, верхня і нижня (плаваюча) водяна камера (рис. 1.8).

Трубна система складається з двох трубних дошок, каркасу, прямих теплообмінних труб, кінці яких розвальцовані в трубних дошках. Каркас трубної системи має поперечні сегментні перегородки, які направляють потік пари в корпусі і одночасно служать проміжними опорами для теплообмінних

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк. 24
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		

трубок. Для запобігання руйнуванню теплообмінних трубок від дії струменя пара, навпроти парового патрубка встановлений відбійний щит. Верхня водяна камера складається з циліндричної обичайки, до верхньої частини якої приварене еліптичне днище, а до нижньої частини приварений фланець для з'єднання з трубою системою і корпусом. Водяна камера оснащена патрубками підведення і відведення деаерованої води. Внутрішній об'єм камери розділений трьома перегородками на відсіки, завдяки яким вода здійснює чотири ходи. Нижня водяна камера складається з еліптичного днища і фланця для з'єднання з трубою системою. У підігрівачі вода рухається по трубках, а гріюча пара, через патрубок у верхній частині корпусу, надходить в міжтрубний простір.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		25

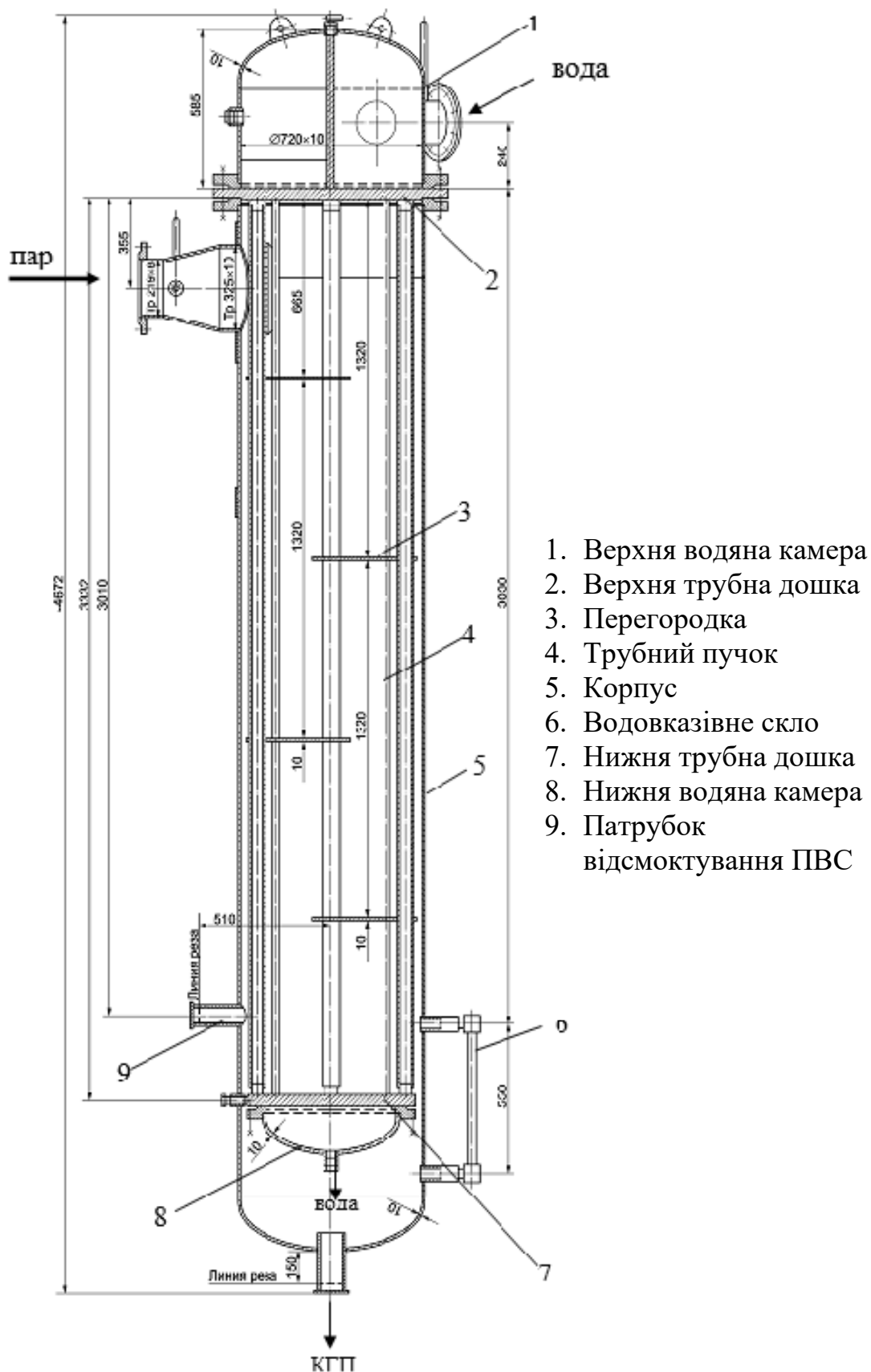


Рис. 1.8. Конструкція підігрівача ПСВ-125-7-15 деаерованої води.

						ТА - 12426.0019	.001.АТХ.	П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата				26

Таблиця 1.1. Технічні дані складових частин для системи теплофікації

Позначення	Тип	Основні технічні дані
ПДВ	ПСВ-125-7-15	Площа поверхні нагрівання, м²125 Робочий тиск: - корпусу, кгс/см² (МПа).....7(0,69) - трубної системи, кгс/см² (МПа).....15(1,47) Робоча температура, °С.....400 Витрата мережевої води, т/год.....400 Витрата гріючої пари, т/год.....18,4 Гідравлічний опір по мережевій воді, м.....4 Об'єм: - корпус, м³.....4,3 - трубної системи, м³.....1,96
ОК ПДВ	ОВ-40М	Площа поверхні нагрівання, м²40 Робочий тиск: - корпусу, кгс / см²7 - трубної системи, кгс/см²26 Робоча температура, °С164 Витрата води, т/год90 Витрата гріючої пари, т/год20 Гідравлічний опір по воді, м1,2 Об'єм: - корпусу, м³.0,785 - трубної системи, м³.....0,35
ДТС	ДСВ-400	Робочий тиск: кгс/см²(абс.).....0,075÷0,5 Робоча температура, °С.....80 Температура теплоносія, °С.....70÷150 Витрата холодної води, т/год.....150 Витрата гарячої води, т/год.....250 Об'єм, м³.....14,2

1.5 Постановка задачі автоматизації підігрівача ПСВ-125-7-15

На основі аналізу технологічного процесу теплопостачання та принципу роботи підігрівачів деаерованої води, у цьому проєкті ставиться задача

						ТА - 12426.0019	.001.АТХ.	П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата				27

автоматизованого регулювання рівня конденсату гріючої пари в корпусі підігрівача. Забезпечення сталого рівня конденсату є ключовим фактором для стабільної роботи теплообмінного обладнання, запобігання гідроударам та підтримки заданих параметрів теплопередачі.

Реалізація системи автоматичного керування має забезпечити:

- точне підтримання рівня конденсату в корпусі підігрівача на заданому рівні незалежно від змін вхідного тиску пари, витрати або температурних коливань;
- енергоефективну та надійну роботу теплообмінного обладнання з мінімальним людським втручанням.

Для реалізації поставленої задачі необхідно виконати такі етапи:

- розробити аналітичну математичну модель динаміки зміни рівня конденсату в підігрівачі, враховуючи теплофізичні властивості, витратні характеристики і динаміку клапана. Побудувати на основі цієї моделі розширений об'єкт керування, з урахуванням виконавчого механізму, датчика та транспортного запізнення, та виконати її апроксимацію у вигляді простої ланки з метою подальшого налаштування регулятора;
- провести розрахунок параметрів ПІ-регулятора за методами, які дозволяють забезпечити швидкодію та точність у регулюванні рівня;
- розробити автоматизовану систему керування на базі ПЛК, з реалізацією логіки регулювання в середовищі розробки, а також створити інтерфейс оператора для моніторингу та керування;
- оформити документацію з охорони праці, яка регламентує правила безпечного монтажу, пусконаладження та обслуговування системи автоматизації підігрівача.

провести оцінку економічної доцільності впровадження автоматизації, включаючи розрахунок окупності, зменшення витрат на експлуатацію та підвищення ефективності роботи системи в порівнянні з ручним або неавтоматизованим режимом.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		28

3. РОЗРОБКА АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ РІВНЯ КОНДЕНСАТУ ДЛЯ ПІДІГРІВАЧА ПСВ-125-7-15

3.1 Аналітичне моделювання рівня конденсату підігрівача ПСВ-125-7-15

Отримаємо математичну модель підігрівача деаерованої води за допомогою аналітичного метода, взявши за основу модель ділянки рівня однорідної рідини. Схема підігрівача, зі зображеними вхідними та вихідними матеріальними потоками, показана на рис. 2.1.

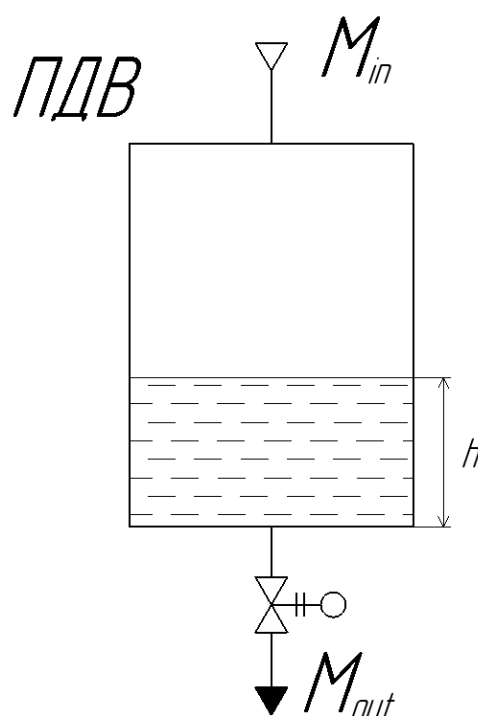


Рис. 2.1. Схема ПДВ з вхідними та вихідними матеріальними потоками

Підтримання рівня конденсату в корпусі підігрівача в діапазоні h , відбувається за рахунок впливу виконавчого механізму, що змінює прохідний переріз клапана. Рівень рідини в підігрівачі залежить від:

- M_{in} – витрати гріючої пари з колектору 4,6-ата на вхід корпусу підігрівача;
- M_{out} – конденсату який зливається в РДМ або БГК.

						ТА - 12426.0019	.001.АТХ.	П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата				29

Запишемо загальний вигляд рівняння матеріального балансу у часі для залежності витрат на вході та виході з підігрівача. За елементарний проміжок часу dt маємо рівняння масового балансу у вигляді:

$$F \cdot \frac{dh(t)}{dt} = M_{in} - M_{out}, \quad (2.1)$$

F – площа міжтрубного простора підігрівача деаерованої води, m^2 ;

$$F = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - nd_2^2), \quad (2.2)$$

d_1 – зовнішній діаметр корпусу підігрівача, м;

d_2 – діаметр трубок підігрівача, м;

n – загальна кількість трубок підігрівача;

$h(t)$ – рівень конденсату, м;

M_{in} – витрати гріючої пари на вході підігрівача, m^3/c ;

M_{out} – витрати конденсату на виході підігрівача, m^3/c .

Витрата конденсату на виході підігрівача залежить від відсотка відкриття клапана, що описується залежністю:

$$M_{out}(t) = \mu \cdot S_v \cdot \sqrt{h(t) - p_{out}(t)}, \quad (2.3)$$

S_v – площа клапана, m^2 ;

μ – коефіцієнт витрати, m^3/c .

Так як параметр регулювання знаходиться під коренем, робимо висновок, що вираз (2.3) є нелінійним. Здійснюємо лінеаризацію залежності (2.3) при нульових умовах:

$$\Delta M_{out} = \mu \cdot \sqrt{h - p_{out}} \cdot \Delta S_v + \frac{\mu \cdot S_v \cdot \Delta h}{2\sqrt{h - p_{out}}}, \quad (2.4)$$

Підставимо вираз (2.4) у (2.1):

$$F \cdot \frac{d\Delta h}{dt} = \Delta M_{in} - \left(\mu \cdot \sqrt{h - p_{out}} \cdot \Delta S_v + \frac{\mu \cdot S_v \cdot \Delta h}{2\sqrt{h - p_{out}}} \right) \quad (2.5)$$

Приведемо (2.5) до стандартного вигляду:

$$\frac{F}{\frac{\mu \cdot S_v}{2\sqrt{h - p_{out}}}} \cdot \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = \frac{\Delta M_{in}}{\frac{\mu \cdot S_v}{2\sqrt{h - p_{out}}}} - \frac{\mu \cdot \sqrt{h - p_{out}} \cdot \Delta S_v}{\frac{\mu \cdot S_v}{2\sqrt{h - p_{out}}}} \quad (2.6)$$

або в остаточному вигляді:

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П			Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата				30

$$T \cdot \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = K_1 \Delta M_{in} - K_2 \Delta S_v, \quad (2.7)$$

$$\text{де } T = \frac{F \cdot 2\sqrt{h-p_{out}}}{\mu \cdot S_v}, K_1 = \frac{2\sqrt{h-p_{out}}}{\mu \cdot S_v}, K_2 = \frac{2h-2p_{out}}{S_v}$$

Запишемо (2.7) у просторі Лапласа:

$$T \cdot s \cdot \Delta h(s) + \Delta h(s) = K_1 \Delta M_{in} - K_2 \Delta S_v \quad (2.8)$$

або:

$$\Delta h(s) \cdot (T \cdot s + 1) = K_1 \Delta M_{in} - K_2 \Delta S_v \quad (2.8)$$

Відповідно отримаємо наступні передатні функції:

$$W_{\Delta M_{in} \rightarrow h}(s) = \frac{K_1}{Ts+1} \quad (2.9)$$

$$W_{\Delta S_v \rightarrow h}(s) = -\frac{K_2}{Ts+1} \quad (2.10)$$

3.2 Розрахунок коефіцієнтів підігрівача ПСВ-125-7-15

У пункті 2.1 було отримано передатну функції каналів регулювання та збурення. Виконаємо моделювання перехідних процесів за цими каналами для підігрівача ПСВ-125-7-15. Основні технічні характеристики підігрівача ПСВ-125-7-15, які необхідні для розрахунку коефіцієнтів (2.9) та (2.10) наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Технічні параметри теплообмінника

Назва параметру	Позначення	Значення параметру	Розмірність
Зовнішній діаметр корпусу	D	1,02	м
Висота підігрівача	H	5,43	м
Кількість теплообмінних трубок	n	640	шт
Внутрішній діаметр корпусу	d_1	1	м
Діаметр теплообмінних трубок	d_1	0,019	м
Номінальний рівень конденсату	h	0,740	м

Тиск конденсату на виході корпусу підігрівача	p_{out}	0,0052	МПа
Витрата гріючої пари на вході підігрівача	M_{in}	0,0472	м ³ /с
Витрата конденсату на виході підігрівача	M_{out}	0,239	м ³ /с
Коефіцієнт витрати конденсату	μ	0,018	м ^{1/2} /с
Поперечна площа клапана	S_v	0,0625	м ²

Розраховуємо коефіцієнти моделі за допомогою програмного пакету Matlab. Для розрахунків розроблена програма, лінсинг якої надано нижче

```
% Технічні параметри
D=1.02;
H=5.43;
n=640;
d_1=1;
d_2=0.019;
h=0.740;
p_out=0.53;
M_in=0.0472;
M_out=0.239;
u=0.018;
S_v=0.0625;

% Площа міжтрубного простору підігрівача
F=pi*(d_1^2-n*d_2^2)/4;

% Параметри передатних функцій
T=(F*2*sqrt(h-p_out))/u*S_v;
K_1=(2*sqrt(h-p_out))/u*S_v;
K_2=(2*h-2*p_out)/S_v;
```

Розрахунки коефіцієнтів показані на рис. 2.2.

Перед розрахунками переведемо розмірність тиску конденсату на виході підігрівача з МПа у мН₂О (де 1 мН₂О = 0,0098 МПа). Тобто $p_{out} = 0,53$ мН₂О.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		32

Name ▲	Value
D	1.0200
d_1	1
d_2	0.0190
F	0.6039
h	0.7400
H	5.4300
K_1	3.1823
K_2	6.7200
M_in	0.0472
M_out	0.2390
n	640
p_out	0.5300
S_v	0.0625
T	1.9219
u	0.0180

Рис. 2.2. Розраховані коефіцієнти

Підставимо розраховані коефіцієнти у передатні функції:

$$W_{\Delta M_{in} \rightarrow h}(s) = \frac{3,1823}{1,9219s+1} \quad (2.11)$$

$$W_{\Delta S_v \rightarrow h}(s) = -\frac{6,72}{1,9219s+1} \quad (2.12)$$

Передатні функції являються аперіодичною ланкою першого порядку. За передатною функцією каналу збурення (2.11) видно, що рівень конденсату буде збільшуватися. Передатна функція каналу регулювання (2.12) показує, що при відкритті клапана, рівень конденсату в міжтрубному просторі підігрівача буде зменшуватися.

Структурна схему відповідних каналів у середовищі Simulink зображено на рис. 2.4. Отримані перехідні характеристики за каналами регулювання та збурення зображено на рис. 2.5.

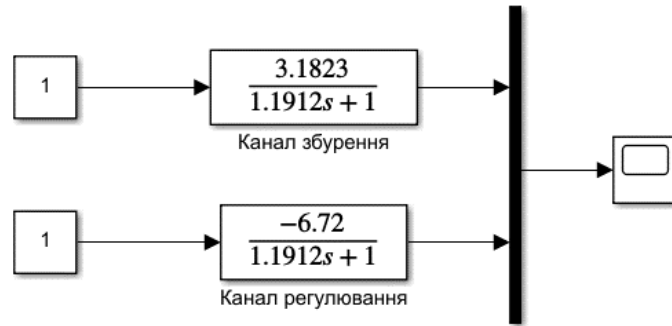


Рис. 2.4. Структурна схема за каналами регулювання та збурення

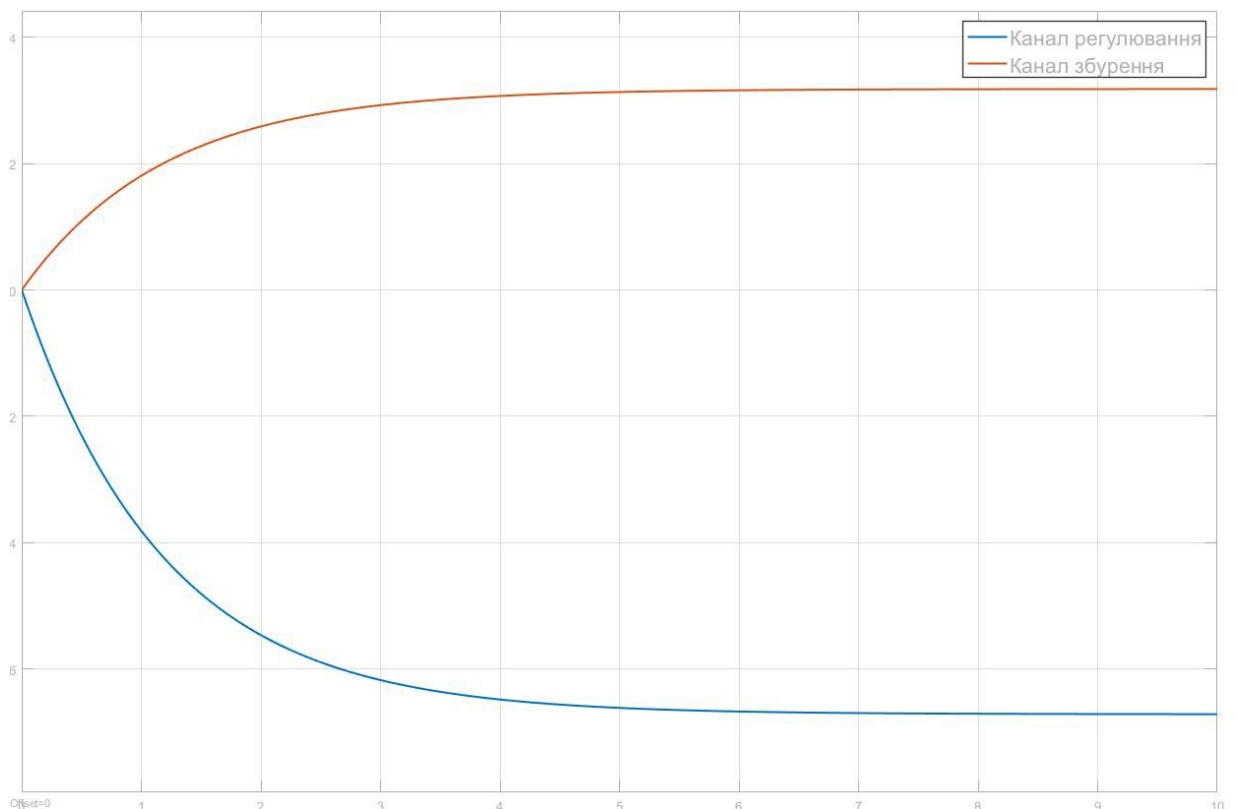


Рис. 2.5. Перехідна характеристика підтримання рівня конденсату в підігрівачі за каналами регулювання та збурення

3.3 Моделювання перехідних характеристик для розширеного ОК

У п. 2.1 та п. 2.2 було розраховано та отримано коефіцієнти аналітичної моделі ОК. Для отримання математичної моделі наближеної до реальних умов

моделі необхідно додатково врахувати вплив виконавчого механізму та датчика які є суттєвими компонентами динамічного процесу.

Зокрема, датчик рівня в цій системі є датчиком гідростатичного тиску, для якого характерна висока швидкодія — тиск у ньому змінюється практично миттєво. У зв'язку з цим інерційність такого датчика вважається незначною, а тому при моделюванні вона не враховується.

У контурі керування використовується ВМ – МЕО-250/25-0,25. Це електромашинний ВМ із системою відстежування вихідного валу, що керується двома дискретними сигналами. Номінальний час повного ходу вихідного валу становить 25 секунд. Для полегшення розрахунків, апроксимуємо математичну модель ВМ до аперіодичної ланки першого порядку:

$$W_{\text{ВМ}}(s) = \frac{1}{6,25s+1} \quad (2.13)$$

Розширюємо модель ОК в Simulink та додаємо у структурну схема канала регулювання та передатну функцію ВМ. Розширена структурна схема канала регулювання зображена на рис. 2.6.

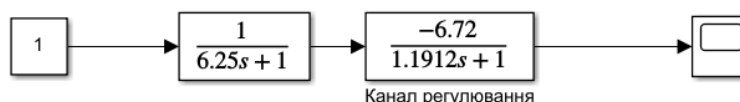


Рис. 2.6. Структурна схема розширеного ОК за каналом регулювання

За результатами імітаційного моделювання отримаємо перехідну характеристику розширеного ОК за каналом регулювання. Перехідна характеристика розширеного ОК зображена на рис. 2.7.

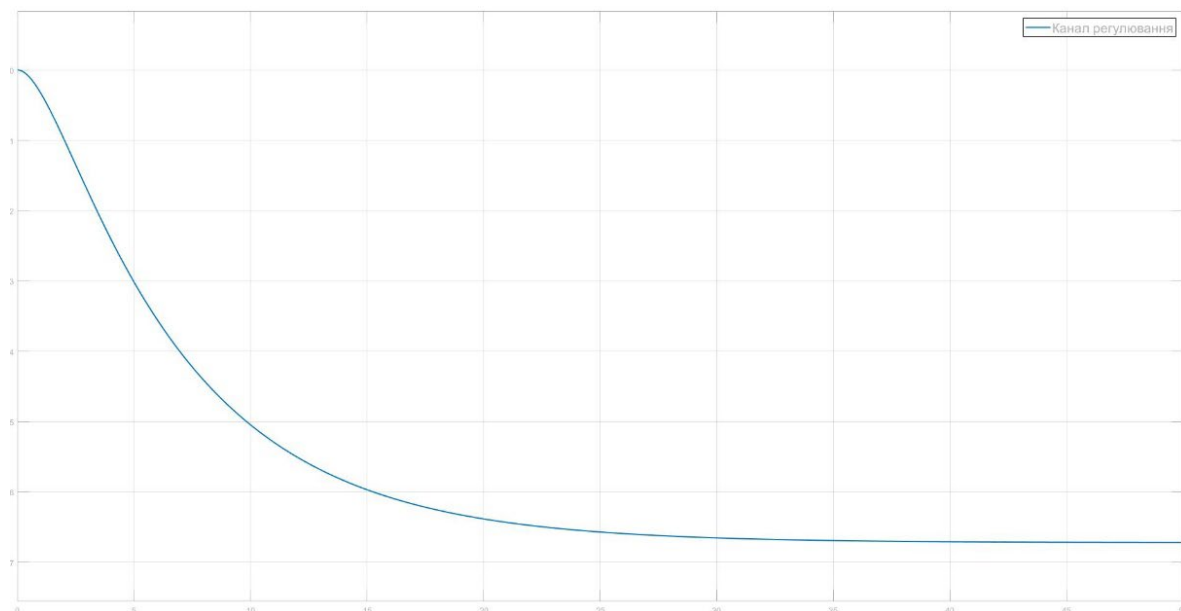


Рис. 2.7. Перехідна характеристика розширеного ОК за каналом регулювання

Перехідна характеристика розширеного ОК швидше виходить на кінцеве значення.

3.4 Апроксимація розширеного ОК спрощеною математичною моделлю

Після побудови моделі розширеного ОК виникає необхідність її спрощення. Це спрощення є доцільним з огляду на подальший синтез регулятора та забезпечення зручності в аналітичних розрахунках.

Динамічна поведінка перехідної характеристики моделі, реалізованої в середовищі Simulink, наближається до аперіодичної ланки першого порядку з транспортним запізненням. На основі цього модель доцільно апроксимувати передатною функцією такого типу:

$$W(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s}, \quad (2.14)$$

де K - коефіцієнт передачі об'єкта;

T – стала часу об'єкта;

τ – транспортне запізнення об'єкта.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк. 36
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		

Апроксимація ОК буде здійснюватися за допомогою метода 2/3. Стала часу знаходиться в точці перетину прямої, паралельній осі абсцис, з віссю ординат. Пряма, паралельна осі абсцис, починається з точки, яка дорівнює добутку коефіцієнта передачі об'єкта та числу 2/3, що в нашому випадку дорівнює приблизно $t = 4.48$ с. Пряма перетинає вісь ординат у точці рівній приблизно $T = 7.8$ с. Для компенсації впливу коефіцієнта вищого порядку, введемо транспортне запізнення, рівне $\tau = 0.8$ с.

Підставимо ці значення у рівняння (2.14):

$$W(s) = \frac{-6,72}{7,8s+1} e^{-0.8s}, \quad (2.15)$$

Побудуємо структурну схему апроксимованої моделі у Simulink та знімемо перехідну характеристику. Апроксимована модель зображена на рис.

2.8. Перехідна характеристика зображена на рис. 2.9.

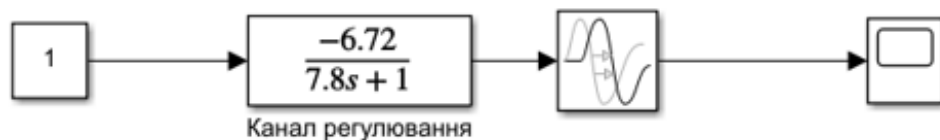


Рис. 2.8. Структурна схема апроксимованої моделі в Simulink

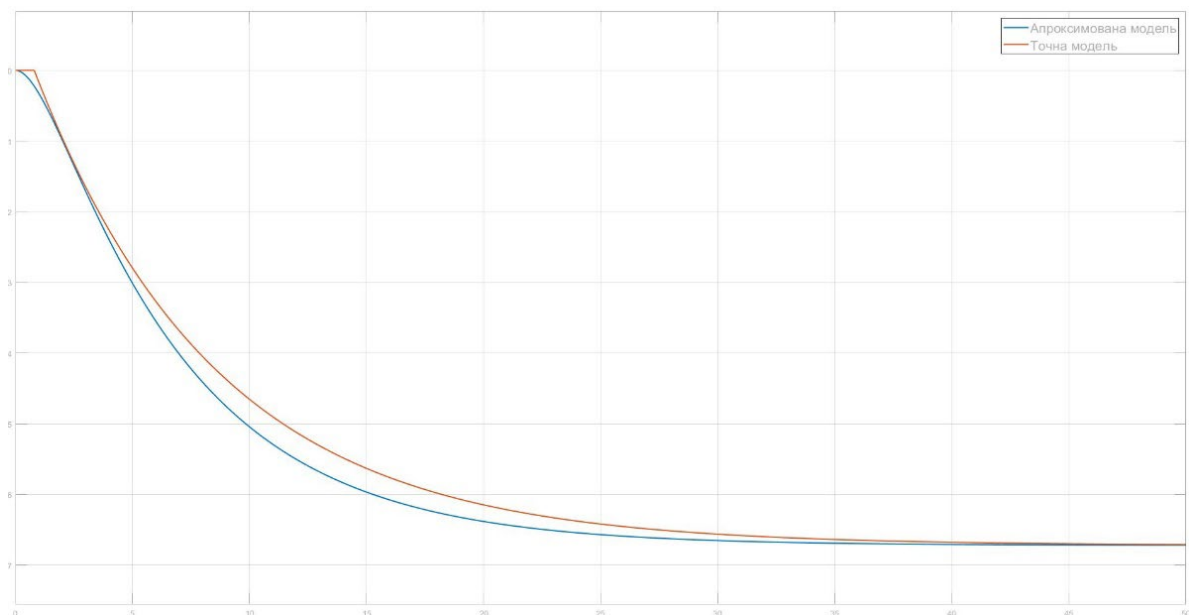


Рис. 2.9. Перехідна характеристика апроксимованої моделі

4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ КОНДЕНСАТУ В ПІДІГРІВАЧІ ПСВ-125-7-15

3.1 Структура системи регулювання рівня конденсату в підігрівачі ПСВ-125-7-15

У минулому розділі була розроблена аналітична модель розширеного ОК. У цьому розділі буде реалізовано одноконтурну систему регулювання рівнем конденсату в підігрівачі деаерованої води. Такий підхід забезпечує необхідний баланс між надійністю, стабільністю роботи та простотою реалізації, що є особливо важливим у зональних системах керування підігрівачем води.

Одноконтурна система дозволяє ефективно та точно регулювати рівень в межах одного підігрівача, ізолювано від впливів інших контурів чи змін у іншого обладнання теплофікації. Завдяки своїй лінійній структурі вона легко налагоджується та супроводжується в експлуатації. Це робить її оптимальним варіантом для побудови місцевих регуляторів рівня, наприклад, у системах теплових пунктів та бойлерних установок. Структура системи відповідає класичній схемі автоматичного регулювання і складається з наступних основних елементів:

- регулятор, що формує керуючу дію;
- виконавчий механізм, який впливає на об'єкт;
- об'єкт керування — підігрівач деаерованої води;
- чутливий елемент, який вимірює регульований параметр та забезпечує зворотний зв'язок.

На рис. 3.1 подано структурну схему цієї одноконтурної автоматичної системи регулювання (АСР), де:

- $U_{\text{зав.}}$ — задавальний вплив (встановлений рівень);
- D — зовнішнє збурення;
- $U_{\text{вих.}}$ — регульований вихід (фактичний рівень у підігрівачі).

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		38

У якості збурення розглядається подача гріючої пари у міжтрубний простір підігрівача, що викликає зміну рівня конденсату пари. Таким чином, систему можна аналізувати за двома основними каналами:

- канал керування ($U_{\text{зав.}} \rightarrow U_{\text{вих.}}$) — від завдання до виходу;
- канал збурення ($D \rightarrow U_{\text{вих.}}$) — від зовнішніх впливів до реакції системи.

Такий підхід дозволяє забезпечити надійне підтримання рівня навіть у присутності зовнішніх теплових коливань.

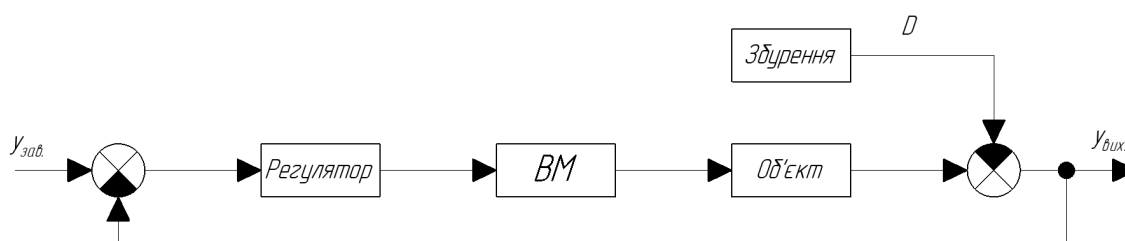


Рис. 3.1. Структурна схема САР підтримання рівня конденсату в корпусі підігрівача

У ролі керуючого пристрою обрано ПІ-регулятор, оскільки він є найбільш доцільним для систем, що мають інерційний характер поведінки з наявністю запізнення, як у випадку з підігрівачем. Пропорційна складова регулятора забезпечує оперативне реагування на зміни рівня, тоді як інтегральна складова дозволяє усувати статичну похибку, яка може виникати в умовах сталих збурень (наприклад, змін конденсатоутворення або коливань тиску пари).

Вибір методу розрахунку параметрів ПІ-регулятора є критично важливим для ефективності системи, особливо у випадках, коли нестабільне регулювання рівня конденсату може призвести до негативних наслідків, таких як порушення теплообміну або ризик гідроудару. Надто повільна чи нестабільна система регулювання може спричинити переповнення або недолив конденсату, що негативно позначається на надійності роботи турбоагрегату або теплофікаційної мережі.

Для розрахунку параметрів регулятора будуть застосовані два методи, що враховують інерційність системи:

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		39

- метод налаштування по лямбда-параметру – дозволяє задати бажану швидкодію через параметр λ ;
- метод Minimum ISE - Hazebrook and Van der Waerden(1950).

3.2 Розрахунок системи регулювання рівня конденсату в підігрівачі ПСВ-125-7-15 за методом налаштування по лямбда-параметру

Для початку розрахуємо параметри ПІ-регулятора за методом налаштування по лямбда-параметру, який є доцільним для систем із інерційною ланкою першого порядку.

Суть цього метода полягає в заданні бажаної швидкодії через параметр λ – параметр продуктивності, що визначає, скільки часу контролер може витратити на переміщення змінної процесу з точки А в точку Б.

ПІ-регулятор, налаштований таким чином, теоретично завершить зміну заданого значення приблизно за 4λ секунд під час роботи в режимі замкнутого циклу.

Використовуємо стандартні формули налаштування ПІ-регулятора за методом лямбда-параметра для об'єкта, представленого у вигляді аперіодичної ланки першого порядку із запізненням:

$$W(s) = \frac{-6.72}{7.8s+1} e^{-0.8s} \quad (3.1)$$

Розрахуємо ПІ-регулятор зі значенням $\lambda = 0.5$ с:

$$K_p = \frac{T}{K(\lambda+\tau)} = \frac{7.8}{6.72(0.5+0.8)} = 0.89 \quad (3.2)$$

$$K_i = T = 7.8 \quad (3.3)$$

Розрахувавши параметри регулятора (3.2) та (3.3), будемо структурну схему підтримання рівня конденсату в корпусі підігрівача з використанням ПІ-регулятора, яка показана на рис. 3.2. Отримуємо криву перехідного процесу, який показано на рис.3.3.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		40

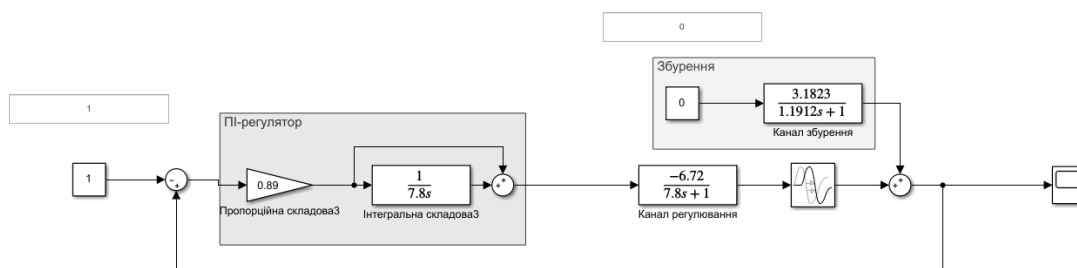


Рис. 3.2. Одноконтурна САР рівня конденсату в корпусі підігрівача

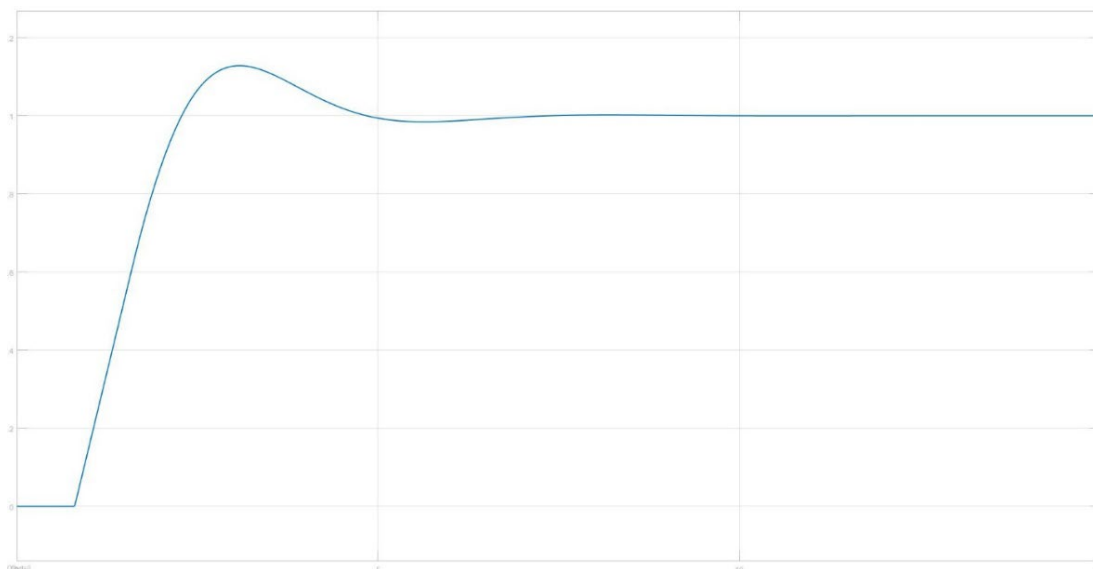


Рис. 3.3. Перехідний процес одноконтурної САР

3.3 Розрахунок системи регулювання рівня конденсату в підігрівачі ПСВ-125-7-15 за методом мінімізації інтегральної квадратичної похибки

Тепер виконаємо розрахунок параметрів ПІ-регулятора за допомогою інженерного методу Minimum ISE - Hazebroek and Van derWaerden, основні коефіцієнти розрахунку якого показані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Коефієнти для розрахунку ПІ-регулятора

Назва методу	K_p	K_i	Умова використання
Minimum ISE - Hazebroek and Van derWaerden(1950)	$\frac{T}{K \cdot \tau} \left(0.74 + 0.3 \frac{\tau}{T} \right)$	$1.43 \cdot T$	$\frac{\tau}{T} \leq 0.2$

Виконаємо розрахунок параметрів ПІ-регулятора:

$$K_p = \frac{7.8}{6.72 \cdot 0.8} \left(0.74 + 0.3 \cdot \frac{0.8}{7.8} \right) = 1.19 \quad (3.4)$$

$$K_i = 1.43 \cdot 7.8 = 11.15 \quad (3.5)$$

Будуємо структурну схему, яка показана на рис. 3.4. Отримуємо криву перехідного процесу, який показано на рис. 3.5.

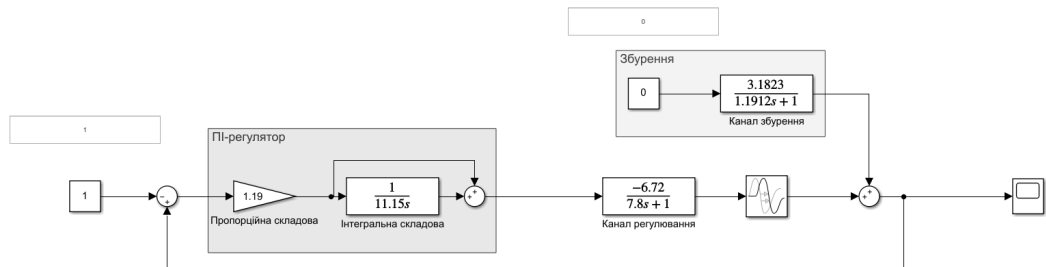


Рис. 3.4. Одноконтурна САР рівня конденсату в корпусі підігрівача

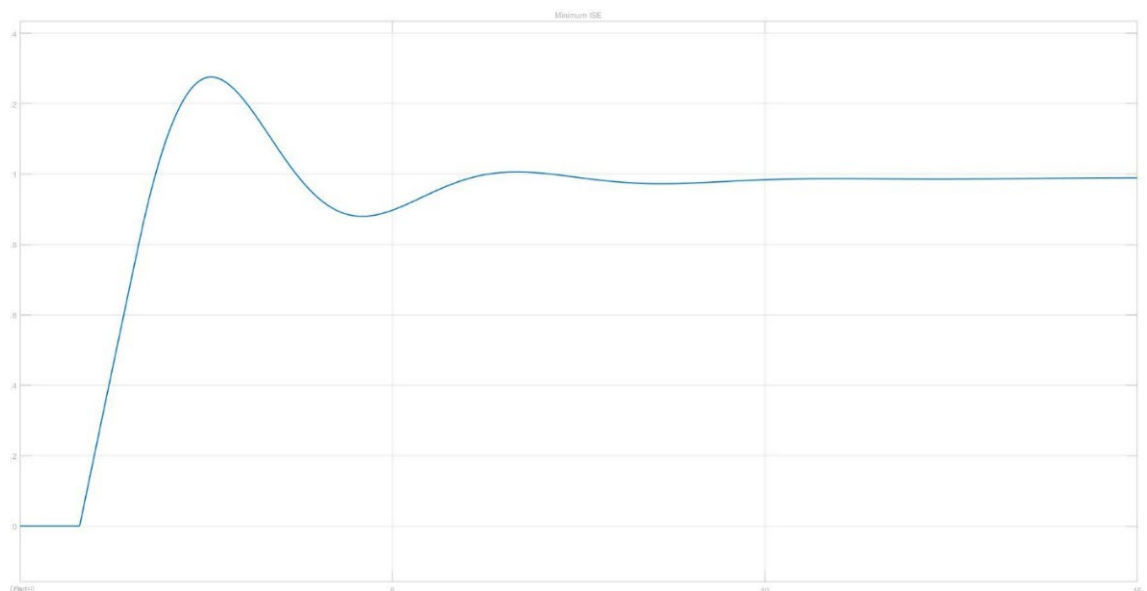


Рис. 3.5. Перехідний процес одноконтурної САР

3.4 Аналіз результатів для налаштування системи регулювання рівня

З метою оцінки ефективності автоматичного регулювання рівня конденсату в корпусі підігрівача деаерованої води проведемо порівняльний аналіз роботи ПІ-регуляторів, налаштованих відповідно за двома різними методами: метод налаштування по лямбда-параметру та метод мінімізації інтегральної квадратичної похибки, запропонованого Hazebroek і Van der Waerden у 1950 році. Основною метою такого аналізу є визначення, який із регуляторів забезпечує найкращі динамічні характеристики системи відповідно до вимог стабільного і точного керування об'єктом.

Для досягнення об'єктивності, оцінювання проводиться за основними критеріями якості: динамічною похибкою, показником перерегулювання, ступенем затухання, а також тривалістю перехідного процесу. Аналіз здійснюється за каналом керування.

Порівняння ефективності регуляторів реалізовано шляхом побудови моделі керування у середовищі Simulink, де на основі однакової динамічної моделі об'єкта виконано моделювання перехідних процесів для обох методів налаштування. Отримані графіки дозволили провести попередній візуальний аналіз, після чого виконано кількісне обчислення критеріїв якості, що й стало основою для остаточного вибору найдоцільнішого методу налаштування ПІ-регулятора у контексті поставленого технологічного завдання.

Вигляд реалізованої моделі показано на рис. 3.6.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		43

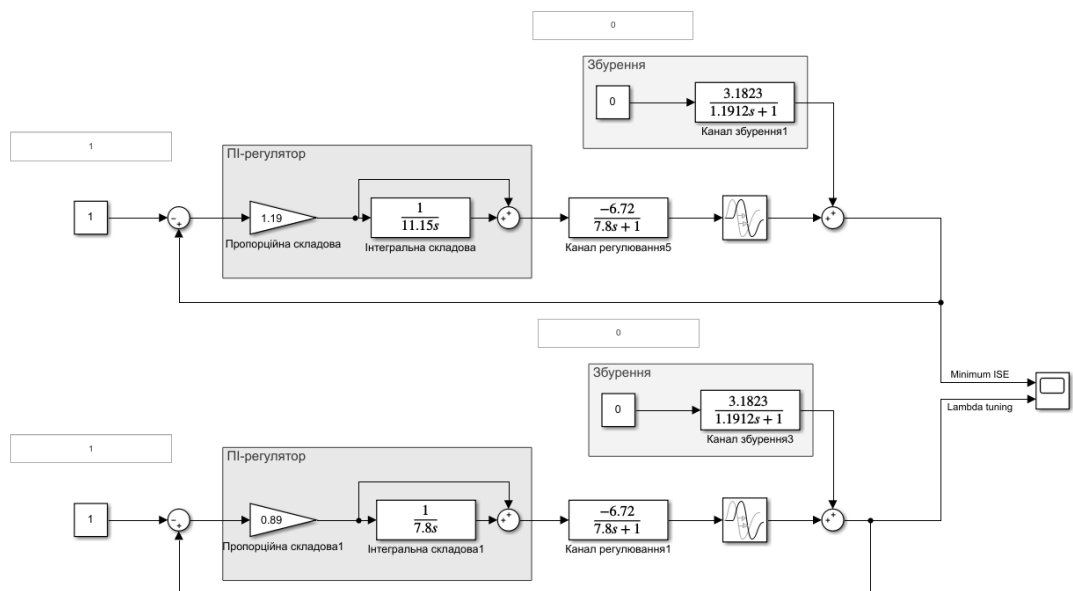


Рис. 3.6. Структурна схема порівняння процесу регулювання двох одноконтурних САР

Після побудови отримуємо криві перехідних характеристик за каналом керування та оцінюємо їх за критеріями якості. Перехідні характеристики показані на рис. 3.7.

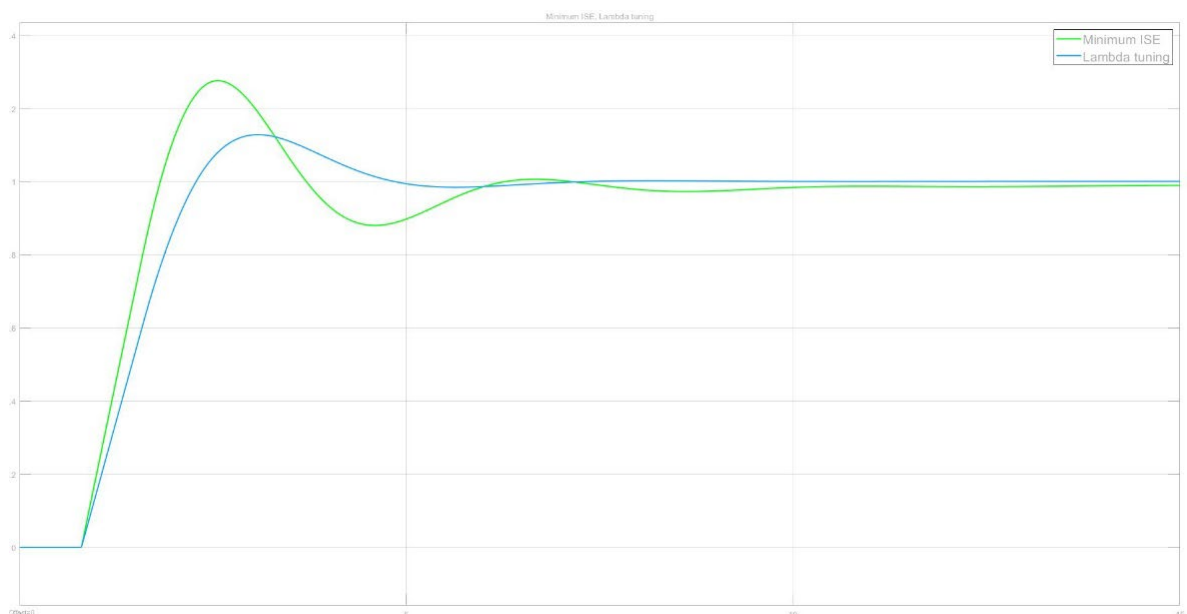


Рис. 3.7. Перехідні характеристики одноконтурних САР

Розраховуємо критерії якості:.

Метод налаштування по лямбда-параметру:

						ТА - 12426.0019	.001.АТХ.	П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата				44

$$\Delta_d = y_1 - y(\infty) = 1.128 - 1 = 0.128 \quad (3.6)$$

$$\sigma = \frac{y_1 - y(\infty)}{y(\infty) - y(\infty)_{-1}} \cdot 100\% = \frac{1.128 - 1}{1 - 0} \cdot 100\% = 13\% \quad (3.7)$$

$$\psi = \frac{y_1 - y_3}{y_1} = \frac{1.128 - 1.002}{1.128} = 0.112 \quad (3.8)$$

$$t_{\text{пп}} = 7 \quad (3.9)$$

Метод мінімізації інтегральної квадратичної похибки:

$$\Delta_d = y_1 - y(\infty) = 1.276 - 1 = 0.276 \quad (3.10)$$

$$\sigma = \frac{y_1 - y(\infty)}{y(\infty) - y(\infty)_{-1}} \cdot 100\% = \frac{1.276 - 1}{1 - 0} \cdot 100\% = 28\% \quad (3.11)$$

$$\psi = \frac{y_1 - y_3}{y_1} = \frac{1.276 - 1.006}{1.276} = 0.212 \quad (3.12)$$

$$t_{\text{пп}} = 12 \quad (3.13)$$

Таблиця 3.2. Критерії якості перехідних процесів за каналом регулювання

Критерій якості	λ -параметр	Minimum ISE
Динамічна похибка	0.128	0.276
Перерегулювання	13%	28%
Оцінка коливальності	0.112	0.212
Час перехідного процесу	7	12

Отже, виходячи з порівняння методу налаштування за параметром лямбда та експрес методом Minimum ISE – Hazebroek and Van der Waerden за рис. 3.7 і табл. 3.2, видно, що метод налаштування за параметром лямбда має кращі показники усюди. Отже можна зробити висновок, що найкращим варіантом буде саме регулятор розрахований через цей метод.

3.5 Обчислення надійності системи

Виконаємо аналіз надійності контуру автоматичного регулювання конденсату пари в корпусі підігрівача. До складу контуру входять: датчик різниці тисків, модуль аналогових входів, ПЛК, пускач та виконавчий механізм,

						ТА- 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		45

які функціонують як єдина система. Схема даного контуру наведена на рисунку 3.8.



Рис. 3.8. Структурна схема одноконтурної САР конденсатом пари в корпусі підігрівача

Система може функціонувати протягом півроку та виконує функцію забезпечення комфортної температури, її надійність може мати дуже важливе значення. Відмова будь-якого елемента може призвести до збоїв у підтриманні температурного режиму. Тому обґрунтований розрахунок показників надійності є необхідним для подальшої оцінки ефективності та безперервності роботи.

Для оцінки загальної надійності виконаємо розрахунок імовірності безвідмовної роботи системи, визначимо середній час напрацювання на відмову та проаналізуємо вплив кожного з компонентів на загальний показник надійності. Орієнтуючись на наведені виробниками значення, приймаємо середній час безвідмовної роботи системи: $T_{cp}^* = 40\,000$ год.

Це відповідає приблизно чотирьом з половиною рокам безперервної експлуатації. Крім того, коефіцієнт готовності системи становить: $K_{гот}^* = 0.9995$.

Це означає, що система буде працювати практично без зупинок, а час простою на обслуговування та ремонт — мінімальний, що дуже важливо для систем теплофікації.

Вихідні дані щодо надійності окремих компонентів показані в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Середній наробіток на відмові окремих компонентів

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк. 46
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		

Компнент	Найменування	Середній наробіток на відмову
датчик різниці тисків	Сафір 2440	450 000 год.
модуль аналогових входів	WAGO 750-455	300 000 год.
ПЛК	WAGO PFC200	350 000 год.
пускач	ВА-4/3	400 000 год.
виконавчий механізм	МЕО-250/25-0,25-КА	400 000 год.

На основі цих даних можливо розрахувати надійність контуру у вигляді послідовного з'єднання елементів, використовуючи відповідні ймовірнісні методики. Розрахуємо надійність контуру:

$$\lambda = \sum_{m=1}^n \lambda_m = \frac{1}{450000} + \frac{1}{300000} + \frac{1}{350000} + \frac{1}{400000} + \frac{1}{400000} = 0.000016 \text{ 1/год} \quad (3.14)$$

Отже середній час напрацювання на відмову становить:

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0.000016} = 62\,842 \text{ год.} \quad (3.15)$$

$T_{cp} > T_{cp}^*$, отже структура виконавчих каналів надійна.

Ймовірність безвідмовної роботи системи за період часу $\tau = 2160$ год, що дорівнює трьом місяцям:

$$P_{\delta}(\tau) = e^{\frac{-\tau}{T_{cp}}} = e^{-\lambda \cdot \tau} \approx 1 - \lambda \cdot \tau = 0.965 \approx 97\% \quad (3.16)$$

Середній час відновлення працездатності системи становить:

$$K_{\text{гот}} = \frac{T_{cp}}{T_{cp} \cdot T_B} \rightarrow T_B = \frac{T_{cp}}{K_{\text{гот}}^*} - T_{cp} = \frac{62842}{0.9995} - 62842 = 3.14 \text{ год.} \quad (3.17)$$

На основі проведених розрахунків отримано ключові показники надійності системи автоматичного регулювання рівня конденсату пари в корпусі підігрівача деаерованої води. Інтенсивність відмов виконавчого каналу становить 0.000016 1/год, а середній час напрацювання на відмову дорівнює 62842 години.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П			Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата				47

Для оцінки надійності системи цей показник було порівняно з заданим нормативним значенням, яке становить 40000 годин. Оскільки фактичне значення надійності системи перевищує встановлений поріг більш ніж на 50%, це свідчить про її високу надійність, а також про те, що її конструкція та компоненти забезпечують значний запас міцності та стабільності в умовах тривалої експлуатації.

Згідно з розрахунками, ймовірність безвідмовної роботи системи протягом трьох місяців становить 97%, що є стабільним показником для автоматизованих промислових систем регулювання. Це дозволяє впевнено стверджувати, що система здатна ефективно функціонувати у звичайному експлуатаційному середовищі без необхідності частого технічного втручання.

У разі відмови будь-якого елемента, середній час відновлення працездатності становить 3.14 години, що відповідає технічним вимогам та забезпечує оперативне відновлення функціонування системи з мінімальними перервами у її роботі.

Таким чином, за сукупністю техніко-експлуатаційних характеристик, можна зробити висновок, що система автоматичного регулювання конденсату пари, відповідає нормативним вимогам і є придатною до тривалого використання.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		48

5. ПРОЄКТНІ РІШЕННЯ З АВТОМАТИЗАЦІЇ ПІДГРІВАЧА ПСВ-125-7-15

4.1 Технічні рішення для автоматизації підігрівача ПСВ-125-7-15

Раціональна та безперебійна експлуатація підігрівача води в системі теплофікації вимагає постійного та точного моніторингу технічних параметрів, які безпосередньо впливають на ефективність і безпеку його функціонування. Основним завданням є підтримання цих параметрів у межах заданих значень, що відповідають номінальним умовам роботи обладнання. До таких параметрів належать: тиск і температура теплоносія, рівень води в теплообмінному апараті і витрата пари та конденсату.

Порушення регулювальних меж навіть одного з параметрів призводить до розбалансування технологічного процесу, виникненню аварійних ситуацій та зниження загальної ефективності або взагалі повній зупинці теплообміну. Вчасне виявлення таких відхилень завдяки автоматизованому контролю дозволяє оперативно реагувати на несправності, здійснювати адаптивне регулювання, а також запобігати потенційним пошкодженням обладнання.

Тому для забезпечення нормативної роботи теплоносія у системі теплофікації, необхідно забезпечити контроль наступних параметрів:

- **рівень води у деаераторі тепломережі** (поз. 1а). Вимірюється за допомогою датчика різниці тисків «Сафір 2440», з уніфікованим вихідним сигналом 4..20 мА, з діапазоном вимірювання 0..63 кПа;
- **температура води на виході із деаератора тепломережі** (поз. 2а, 2б). Вимірюється за допомогою перетворювача термоелектричного «ТХА-1690-015-92» та перетворюється у уніфікований сигнал 4..20 мА за допомогою «ПВУ-0197/К»;
- **тиск води після насосів НРДТ** (поз. 3а). Вимірюється за допомогою датчика різниці тисків «Сафір 2450», з уніфікованим вихідним сигналом 4..20 мА, з діапазоном вимірювання 0..1.6 МПа;

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		49

- **витрата води після насосів НРДТ** (поз. 4а, 4б). Вимірюється за допомогою діафрагми зі сталі 12Х18Н10Т та перетворюється у уніфікований сигнал 4..20 мА за допомогою «Сафір 2430 Ф» з діапазоном вимірювання 0..160 т/год;
- **рівень води у підігрівачі деаерованої води** (поз. 5а). Вимірюється за допомогою датчика різниці тисків «Сафір 2440», з уніфікованим вихідним сигналом 4..20 мА, з діапазоном вимірювання 0..63 кПа;
- **температура води на виході із ПДВ** (поз. 6а, 6б). Вимірюється за допомогою перетворювача термоелектричного «ТХА-1690-015-92» та перетворюється у уніфікований сигнал 4..20 мА за допомогою «ПВУ-0197/К»;
- **витрата води після насосів ОК ПДВ** (поз. 7а, 7б). Вимірюється за допомогою діафрагми зі сталі 12Х18Н10Т та перетворюється у уніфікований сигнал 4..20 мА за допомогою «Сафір 2430 Ф» з діапазоном вимірювання 0..160 т/год;
- **перевірка роботи насосів НРДТ** (поз. 8а, 9а). Вимірюється за допомогою датчика різниці тисків «Сафір 2430 Р» та передає стан насосів на дискретний вхід контролера по протоколу HART;
- **керування трифазним виконавчим механізмом регулювання рівня в ПДВ** (поз. 5г). Відбувається за допомогою «ВА-4/3». Призначений для прямого або реверсивного пуску трифазних асинхронних електродвигунів (ЕД) змінного струму виконавчих механізмів регулюючої запірної та іншої арматури потужністю від 0,06 до 3,5 кВт, захисту ЕД від коротких замикань, перевантажень та зникання фаз, видачі сигналу аварії за її виникненні. управляючого сигналу 24 В;
- **регулювання рівня в ПДВ** (поз. 5д). Регулюється за допомогою «МЕО-250/25-0,25-КА». Призначений для переміщення регулювальних органів у системах автоматичного керування технологічними процесами на об'єктах використання атомної енергії та в системах безпеки АЕС;
- **керування трифазним виконавчим механізмом регулювання рівня в ДТС** (поз. 1г). Відбувається за допомогою «ВА-4/3»;

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк. 50
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		

- **регулювання рівня в ПДВ (поз. 5д).** Регулюється за допомогою «МЕО-250/25-0,25-КА»;
- **запуск насосного обладнання (поз. 8г, 9г).** Запускається за допомогою електродвигуна «АІР80В2». Загальнопромислові асинхронні трифазні електродвигуни змінного струму серії АІР використовуються при комплектації електроприводами механізмів та агрегатів у різних галузях промисловості, на підйомниках та транспортерах, у системах промислової вентиляції, для приводу промислових насосів та інших типах обладнання.
- **насос рециркуляції деаератора тепломережі.** «Насос Д 200-95». Насос - відцентровий, одноступеневий, горизонтальний має спіральний корпус з двостороннім напівспіральним підведенням води до робочого колеса і роз'ємом в горизонтальній площині. У нижній частині корпусу розташовані всмоктувальний і напірний патрубки. Вал насоса встановлений в корпусі на двох підшипникових опорах. Робоче колесо насаджено на вал на шпонці і укріплено направляючою і захисною втулками. Завдяки двосторонньому підводу води до колеса гідравлічні осьові зусилля взаємно врівноважуються без спеціальних пристроїв. Ущільнення валу - сальникові, м'яким набиванням. При обертанні робочого колеса розвивається відцентрова сила, під тиском якої вода між лопатками колеса проходить до його периферії і, виходячи з колеса, надходить в спіральну камеру, а з неї - в напірний патрубок.

У межах даного проєкту для реалізації автоматизованої системи керування підігрівачем деаерованої води у складі теплофікаційної установки обрано програмований логічний контролер WAGO PFC200 (750-8212/000-001). Цей контролер належить до сучасної серії PFC200 виробництва WAGO, що підтримує програмування у середовищі CoDeSys V3 згідно з міжнародним стандартом IEC 61131-3.

WAGO PFC200 є багатофункціональним ПЛК, орієнтованим на промислові застосування, зокрема для критично важливих систем

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		51

автоматизації, таких як об'єкти теплофікації на АЕС. Він поєднує надійність, розширюваність і широкі комунікаційні можливості, такі як Ethernet, Modbus TCP/RTU/UDP, OPC UA, MQTT, RS-232 та RS-485, що робить його придатним для побудови як автономних та мережевих SCADA-систем і веб-інтерфейсів.

Контролер має вбудовані 2 Ethernet-порти, SD-карту, цифрові та аналогові інтерфейси розширення, а також підтримує гарячу заміну модулів вводу/виводу завдяки модульній конструкції серії WAGO-I/O-SYSTEM 750.

Для зчитування основних технологічних параметрів, таких як рівень конденсату, температура та тиск води, до базового контролера було підключено два модулі аналогових входів 750-455 (4AI, 4–20 мА), які забезпечують високу роздільну здатність (до 16 біт) і стабільне оцифрування сигналів у реальному часі. Також для зчитування теперішнього стану насосів, до контролера було підключено модуль дискретних входів 750-402 (4DI, 24VDC).

Управління насосами, та виконавчими механізмами здійснюється через дискретні виходи, реалізовані за допомогою модуля 750-530 (8DO, реле). Усі керуючі впливи виконуються за допомогою дискретних сигналів, що спрощує архітектуру керування і забезпечує високу надійність.

У цьому рішенні не передбачається використання аналогових виходів, тому ніяких додаткових модулів аналогового виходу не передбачається.

WAGO PFC200 також підтримує вбудовану веб-візуалізацію, що може бути використана як резервна панель доступу для оперативного персоналу.

4.2 Реалізація програмованого регулювання рівня у підігрівачі ПСВ-125-7-15

Середовищем для програмування контролера WAGO PFC200 є CoDeSys V3. Програма для підтримання рівня конденсату написана на CFC та ST. У процесі програмування передбачено створення окремих функціональних блоків, кожен з яких відповідатиме за конкретний підпроцес у системі автоматизованого керування.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		52

На рис. 4.1 зображується програма для підтримки рівня конденсату в корпусі підігрівача.

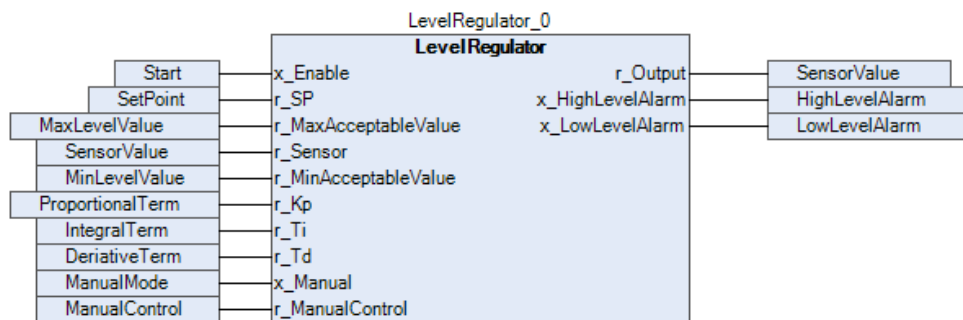


Рис. 4.1. Програма регулювання рівня у підігрівачі деаерованої води

Програма складається з функціонального блоку *LevelRegulator*, який має наступні входи та виходи:

- *x_Enable* – увімкнення регулятора;
- *r_SP* – завдання регулятору;
- *r_MaxAcceptableValue* – максимально допустимий рівень конденсату в корпусі підігрівача;
- *r_Sensor* – теперешній рівень конденсату в корпусі підігрівача;
- *r_MaxAcceptableValue* – мінімальний допустимий рівень конденсату в корпусі підігрівача;
- *r_Kp* – пропорційний коефіцієнт регулятора;
- *r_Ti* – інтегрувальний коефіцієнт регулятора;
- *r_Td* – коефіцієнт диференціювання регулятора;
- *x_Manual* – переведення регулятора у ручний режим керування;
- *r_ManualControl* – відсоток відкриття клапана, при ручному керуванні.

Функціональний блок *LevelRegulator* в свою чергу складається з функціональних блоків ПІД-регулятора, транспортного запізнення, аперіодичної ланки та алгоритму виклику аварії у випадку виходу теперішнього рівня конденсату в корпусі підігрівача за допустимі межі. Структура функціонального блоку *LevelRegulator* показана на рис. 4.2.

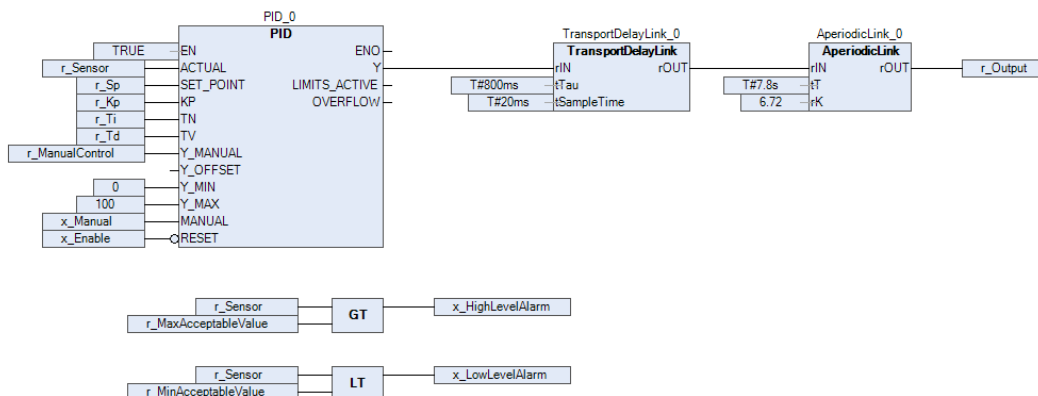


Рис. 4.2. Структура функціонального блоку регулювання рівня конденсату

4.3 Реалізація інтерфейсу оператора системи регулювання рівня у підігрівачі ПСВ-125-7-15

Для реалізації інтерфейсу оператора системи керування рівнем конденсату у кропусі підігрівача теплофікаційної системи було обрано людино-машинний інтерфейс, реалізований за допомогою середовища Node-RED. Це рішення дозволяє швидко створити адаптивний інтерфейс, який функціонує через браузер або мобільний пристрій та забезпечує інтерактивну взаємодію з контролером у реальному часі.

Node-RED — це безкоштовне графічне середовище розробки з відкритим вихідним кодом, створене компанією IBM, яке дозволяє будувати логіку автоматизації за допомогою зручного веб-інтерфейсу. Воно побудоване на платформі Node.js і використовує потоки, де користувач зв'язує вузли, які виконують логіку обробки, передачі даних або візуалізації. Підтримує взаємодію з MQTT, Modbus, OPC UA, REST API та іншими популярними протоколами та має інтеграцію з базами даних, що дозволяє архівувати стан системи за певний проміжок часу. Також інтегрується з панелями керування, графіками, повідомленнями та ін.

Було створено два ключові вікна інтерфейсу, які забезпечують доступ до основних параметрів системи:

						ТА - 12426.0019 .001.ATX. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		54

1. вікно регулятора, що відображає значення параметра регулювання та дає можливість зміни параметрів ПІ-регулятора (K_p , T_i) у режимі реального часу;
2. вікно датчиків та насосів, що містить індикацію стану насосного обладнання (вкл/викл), покази датчиків (рівень, тиск, температура), а також інтерфейс ручного керування насосами та виведення повідомлень про відмови або тривоги.

На рис. 4.3 зображається вікно регулятора, де можна налаштувати параметри регулятора та подивитися значення параметра регулювання на графіку.

4.3.1 Мета створення інтерфейсу в Node-RED

На відміну від класичних SCADA-систем, які вже впроваджені на АЕС і реалізовані на сертифікованому обладнанні, запропоноване рішення в Node-RED не дублює існуючі SCADA-функції. Його основна мета — створення спеціалізованого мобільного інтерфейсу для обслуговуючого персоналу з можливістю швидкого доступу до основних технологічних параметрів, що дозволяє оперативно їх контролювати та своєчасно реагувати на зміни у роботі обладнання .

Розроблений у Node-RED інтерфейс орієнтований на обслуговуючий персонал, що безпосередньо відповідає за моніторинг і технічне обслуговування підігрівачів, та дає змогу:

- оперативно переглядати стан ключових параметрів системи підігріву: рівень конденсату в корпусі підігрівача деаерованої води, рівень води в деаераторі тепломережі, температуру деаерованої води на виході із підігрівача, температуру води на виході з деаератора, тиск води після насосів;
- візуалізувати динаміку основних параметрів у реальному часі у вигляді графіків;

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		55

- встановлювати та змінювати параметри регулятора безпосередньо з мобільного пристрою, що забезпечує адаптацію системи до поточних умов роботи.
- віддалено запускати або зупиняти насосне обладнання, та переглядати його стан у режимі реального часу;
- можливість отримувати сповіщення про аварійні ситуації або вихід параметрів за межі допустимого діапазону у вигляді push-сповіщень або повідомлень через телеграм бота;
- фіксувати історію подій та аварій, включаючи журнал увімкнення/вимкнення насосів, перевищення регулюючих параметрів та архівувати ці дані у базі даних, що дозволить зберігати статистику для подальшого аналізу.

Усі ці можливості дозволяють підвищити ефективність технічного обслуговування, зменшити час реакції на критичні події, а також забезпечити більш комфортні умови роботи персоналу без постійного фізичного перебування у залі або на місці встановлення підігрівача.

Завдяки адаптивній верстці, інтерфейс однаково ефективно працює на моніторі ПК, планшеті або смартфоні через браузер.

4.3.2 Інтерфейс в Node-RED

У вікні «Регулятор» реалізовано відображення значення параметра регулювання — рівня конденсату в корпусі підігрівача. Цей параметр зчитується через протокол Modbus TCP/IP із відповідного регістра контролера, обробляється, масштабується та виводиться на графік у середовищі Node-RED Dashboard.

На рис. 4.3 показана частина алгоритму, де через протокол Modbus TCP передається теперішнє значення рівня конденсату і виводиться на графік

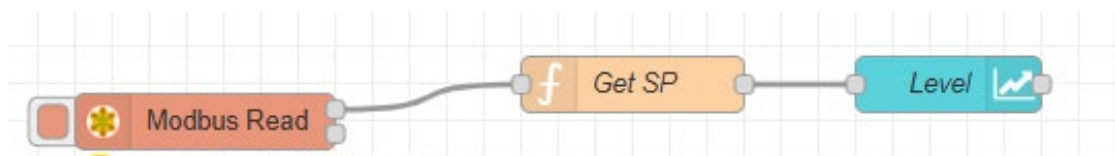


Рис. 4.3. Отримання теперішнього значення рівня та вивід його на графік

						ТА - 12426.0019 .001.ATX. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		56

Алгоритм складається з трьох вузлів:

- вузол «Modbus Read», який ініціює зчитування даних із заданого регістра контролера за протоколом Modbus TCP. Він конфігурується для періодичного опитування конкретного адресного простору, нашому випадку це Input Register, де зберігається значення рівня. Налаштування вузла наведено на рис. 4.4;
- вузол «Get SP», це функціональний вузол типу *Function*, у якому виконується математична обробка значення зчитаного регістра. Зокрема, дане значення масштабується шляхом множення на коефіцієнт точності 0.1, щоб привести його у фізично коректні одиниці вимірювання;
- вузол «Level», це візуалізаційний елемент типу *Chart* із бібліотеки node-red-dashboard версії 2.0, який виводить отримане значення на графік у реальному часі.

Рис. 4.4. Налаштування вузла «Modbus Read»

На рис. 4.5 зображено частину алгоритму, яка реалізує наступні функції:

- зміна завдання регулятора;
- зміна параметрів регулятора;
- запис стану системи у базу даних;

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		57

- повідомлення у телеграм від чат бота про занадто низький або високий рівень конденсату у підігрівачі.

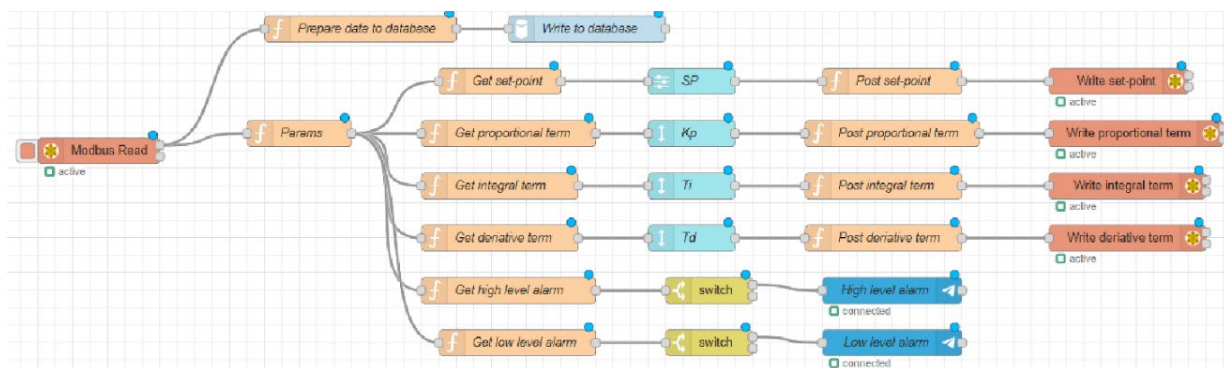


Рис. 4.5. Алгоритм налаштування регулятора

Алгоритм складається з наступних вузлів:

- вузол «Modbus Read», який ініціює зчитування даних із заданого регістра контролера за протоколом Modbus TCP. Він конфігурується для періодичного опитування конкретного адресного простору, нашому випадку це Input Register, де зберігається значення рівня;
- вузол «Params» це функціональний вузол типу *Function*, у якому виконується масштабування числових значень параметрів, отриманих з Modbus-регістрів, а також формує булеві значення з бітових регістрів. Значення розділяються по окремих напрямках, залежно від типу. Код вузла показаний на рис. 4.6;
- вузол «Prepare data to database» це функціональний вузол типу *Function*, у якому формується JSON-запит із ключовими параметрами системи. Код вузла показаний на рис. 4.7;

```

1  var CodesysParams = {
2      xStart : null,
3      xManualControl : null,
4      xHighLevelAlarm : null,
5      xLowLevelAlarm : null,
6      rSP : null,
7      rPV : null,
8      rKp : null,
9      rTi : null,
10     rTd : null,
11     rManualValue : null,
12 };
13
14 CodesysParams.xStart = (msg.payload[0] & 1) !== 0;
15 CodesysParams.xManualControl = (msg.payload[0] & 2) !== 0;
16 CodesysParams.xHighLevelAlarm = (msg.payload[0] & 4) !== 0;
17 CodesysParams.xLowLevelAlarm = (msg.payload[0] & 8) !== 0;
18 CodesysParams.rSP = msg.payload[1] / 10;
19 CodesysParams.rPV = msg.payload[2] / 10;
20 CodesysParams.rKp = msg.payload[3] / 10;
21 CodesysParams.rTi = msg.payload[4] / 10;
22 CodesysParams.rTd = msg.payload[5] / 10;
23 CodesysParams.rManualValue = msg.payload[6] / 10;
24
25 msg.payload = CodesysParams;
26
27 return msg;

```

Рис. 4.6. Код масштабування числових значень параметрів та перетворення бітових регістрів у булеві значення

- вузол «Write to database» це вузол запису у базу даних, який є частиною бібліотеки `node-red-contrib-stackhero-influxdb-v2` – бібліотека для формування зв'язку між Node-RED та InfluxDB. Налаштування вузла показані на рис. 4.8;
- обробка параметрів регулятора:
 - вузли «Get set-point», «Get proportional term», «Get integral term», «Get derivative term» – функціональні вузли, які виділяють відповідні значення з масиву Modbus та масштабують їх;
 - вузли «SP», «Kp», «Ti», «Td» – елементи виводу із бібліотеки `node-red-dashboard`, які показують поточні значення кожного параметра;

- вузли «Post set-point», «Post proportional term», «Post integral term», «Post derivative term» – функції, що приймають нові значення від користувача з інтерфейсу та формують пакет для запису у відповідні Modbus-реєстри;
- вузли «Write set-point», «Write proportional term», «Write integral term», «Write derivate term» – вузли запису Modbus Write, які передають нові значення параметрів у контролер;

```

1  var CodesysParams = {
2      xStart: (msg.payload[0] & 1) !== 0,
3      xManualControl: (msg.payload[0] & 2) !== 0,
4      xHighLevelAlarm: (msg.payload[0] & 4) !== 0,
5      xLowLevelAlarm: (msg.payload[0] & 8) !== 0,
6      rSP: msg.payload[1] / 10,
7      rPV: msg.payload[2] / 10,
8      rKp: msg.payload[3] / 10,
9      rTi: msg.payload[4] / 10,
10     rTd: msg.payload[5] / 10,
11     rManualValue: msg.payload[6] / 10,
12 };
13
14 msg.payload = {
15     bucket: 'HeatsupplySystem',
16     precision: 'ms',
17     data: [
18         {
19             measurement: 'ObjectValues',
20             tags: {
21                 param: 'control',
22                 system: 'ObjectSystem'
23             },
24             fields: {
25                 xStart: CodesysParams.xStart ? 1 : 0,
26                 xManualControl: CodesysParams.xManualControl ? 1 : 0,
27                 xHighLevelAlarm: CodesysParams.xHighLevelAlarm ? 1 : 0,
28                 xLowLevelAlarm: CodesysParams.xLowLevelAlarm ? 1 : 0,
29                 rSP: CodesysParams.rSP,
30                 rPV: CodesysParams.rPV,
31                 rKp: CodesysParams.rKp,
32                 rTi: CodesysParams.rTi,
33                 rTd: CodesysParams.rTd,
34                 rManualValue: CodesysParams.rManualValue
35             },
36             timestamp: Date.now()
37         }
38     ]
39 };
40
41 return msg;

```

Рис. 4.7. Код формування JSON-запиту із ключовими параметрами системи

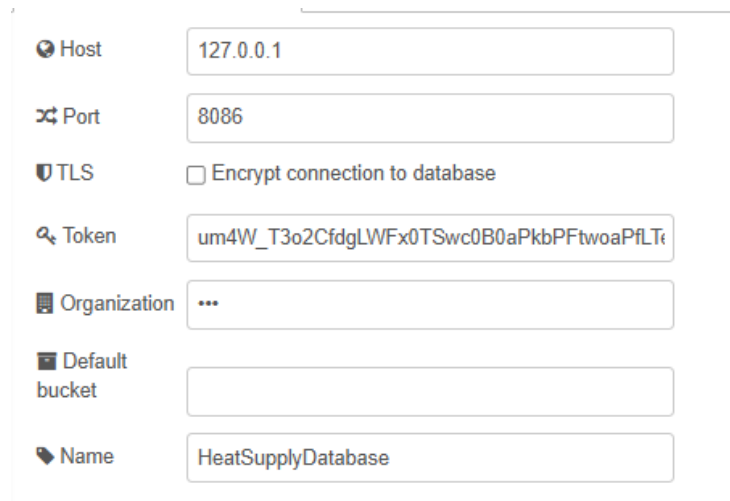


Рис. 4.8. Налаштування вузла запису у базу даних

- аналіз аварійних сигналів рівня:
 - вузли «Get high level alarm» та «Get low level alarm» – функції, які перетворюють числові значення рівня у логічні булеві змінні на основі порогових значень рівня;
 - вузли «switch» – логічні вузли, що направляють сигнали в залежності від рівня аварій;
 - вузли «High level alarm» і «Low level alarm» – виводять повідомлення про перевищення або зниження допустимого рівня у телеграм, є частиною бібліотеки node-red-contrib-telegrmbot.

На рис. 4.9 виходить інтерфейс, де можна налаштувати регулятор та переглядати теперішнє значення регулюючого параметру.

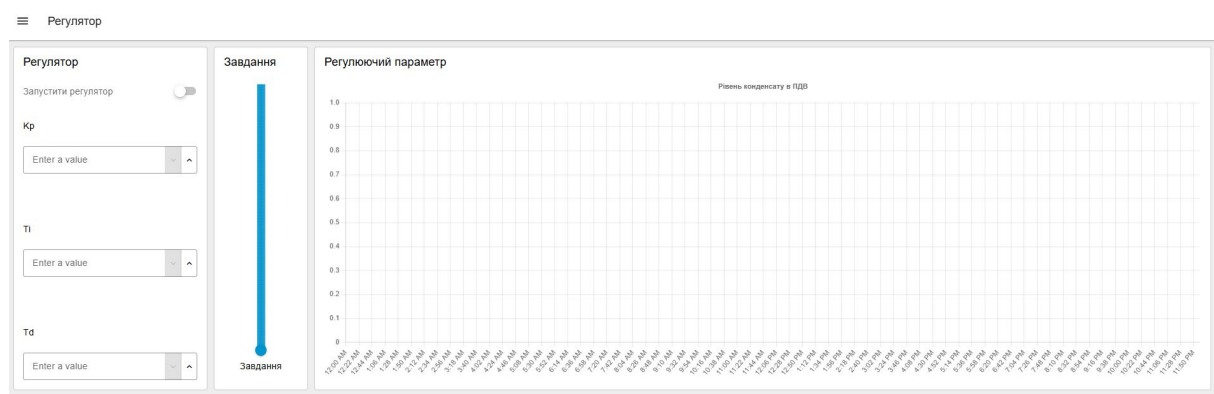


Рис. 4.9. Вікно регулятора

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк. 61
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		

На рис. 4.10 представлена частина логіки вікна «Датчики та насоси» середовища Node-RED, відповідальна за отримання станів системи керування, ручного режиму, обробку сигналів пуску та управління насосами. Усі дані зчитуються з Modbus-регістрів, обробляються у вигляді логічних значень та масштабуються до числового вигляду для подальшого використання в інтерфейсі або запису до контролера.

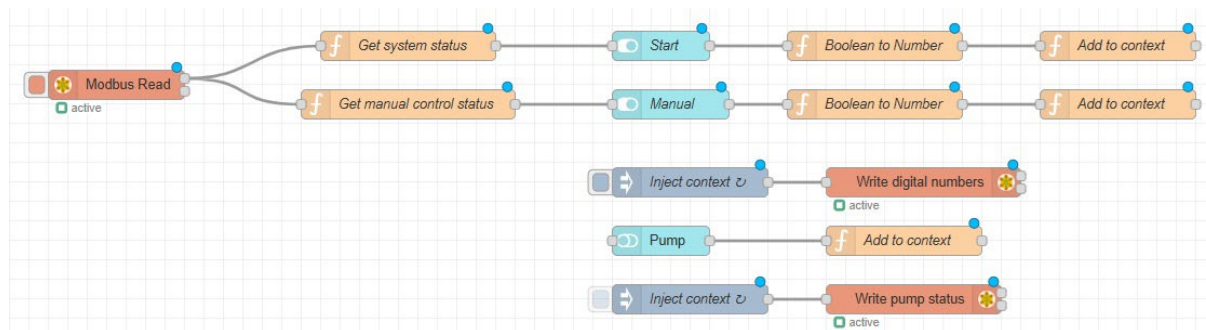


Рис. 4.10. Алгоритм зміни стану системи та насосів

- вузол «Modbus Read», який ініціює зчитування даних із заданого регістра контролера за протоколом Modbus TCP;
- вузол «Get system status» зчитує біт, що сигналізує про активність автоматичного режиму керування;
- вузол «Get manual control status» зчитує біт, що відповідає за ввімкнення ручного режиму керування
- вузли «Start» та «Manual», що являються вузлами типу ui_switch з бібліотеки node-red-contrib-dashboard та дозволяють вмикати/вимикати систему та ручний режим;
- вузол «Boolean to Number», що перетворюють булеві значення true/false на числові 1 або 0. Це потрібно для зручного запису у загальний контекст;
- вузол «Add to context» це функціональний вузол, який додає перетворені значення у контекстну змінну, що полегшує запис булевих змінних у регістр Modbus;
- вузол «Inject context» записує контекстну зміну у регістр Modbus.

На рис. 4.11 зображається вікно датчиків та насосів, де можна побачити теперішні значення датчиків, та увімкнути\вимкнути насоси.

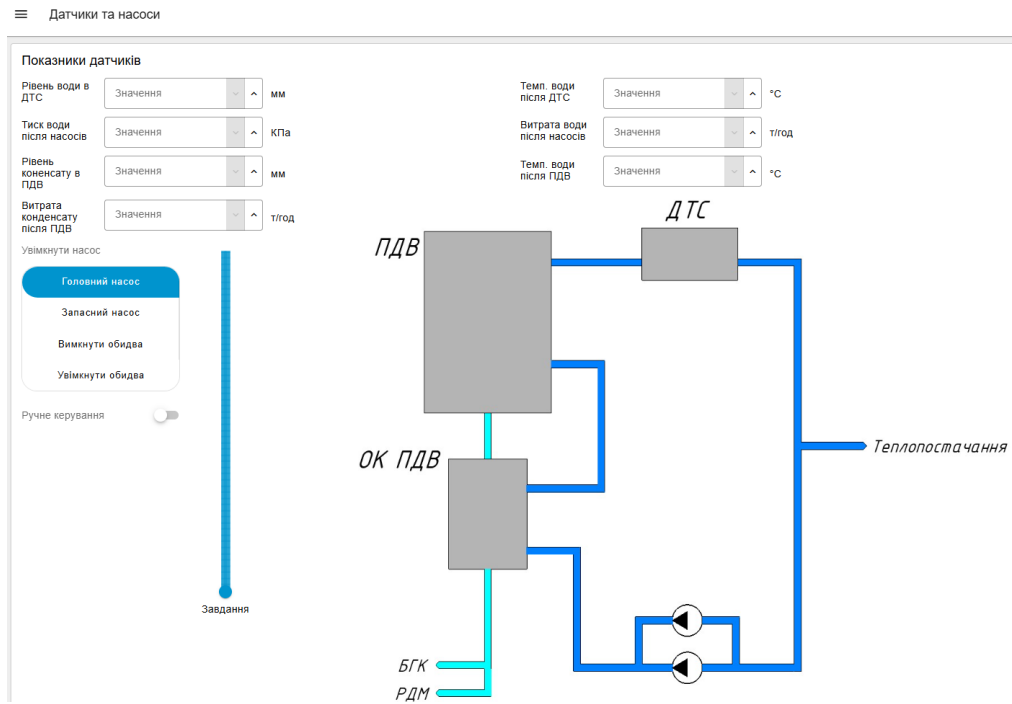


Рис. 4.11. Вікно датчиків та насосів

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є однією з найважливіших складових будь-якого виробничого процесу, а особливо в галузі ядерної енергетики, де наслідки порушення вимог безпеки можуть мати критичний характер. Забезпечення безпечних умов праці — це не лише правовий обов'язок роботодавця, але й основа для збереження здоров'я і життя працівників та стабільної роботи технологічних об'єктів.

В умовах сучасного розвитку енергетичного комплексу України, зокрема атомної енергетики, питання охорони праці набувають особливої актуальності. Робота на АЕС пов'язана з впливом таких небезпечних факторів, як іонізуюче випромінювання, високі температури, тиск, електричний струм, робота в обмежених просторах тощо. Саме тому організація охорони праці має бути чітко структурованою, багаторівневою та інтегрованою у всі виробничі процеси.

Особливе значення охорона праці має для фахівців, що займаються експлуатацією, обслуговуванням і ремонтом енергетичного устаткування. Вони повинні не лише знати принципи безпечної роботи, але й постійно удосконалювати свої знання, проходити інструктажі, медогляди та навчання. Системний підхід до безпеки праці — це запорука ефективної та безпечної експлуатації енергоблоків АЕС, а також соціальної відповідальності перед суспільством.

У даному розділі представлені пропозиції щодо технічних рішень та організаційних заходів, які стосуються виконання діючих вимог з радіаційної безпеки на АЕС та дотримання вимог безпеки при експлуатації засобів автоматизації і технологічного устаткування спроектованої системи, а також визначені основні заходи з пожежної безпеки і профілактики.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		64

5.1. Технічні рішення та організаційні заходи з радіаційної безпеки на АЕС

До роботи в зоні контрольованого доступу (ЗКД) допускаються особи, які:

- не молодше 18 років;
- не мають медичних протипоказань;
- пройшли медичне обстеження;
- пройшли навчання та перевірку знань правил радіаційної безпеки в обсязі, зазначеному в посадовій інструкції;
- освоїли прийоми використання засобів індивідуального захисту та індивідуального дозиметричного контролю;
- пройшли інструктаж на робочому місці.

У кожного працівника, який пройшов медичний огляд, повинна бути зроблено запис у посвідченні про перевірку знань. Запис робить цеховий лікар по закінченні проходження медичного огляду. Забороняється перебування в зоні сурового режиму і допуск до роботи з джерелом іонізуючого випромінювання особам з простроченим терміном чергового медичного огляду.

В основу планування території всіх виробничих будівель і приміщень АЕС покладено гігієнічний принцип: їх поділ на зони в залежності від характеру технологічних процесів, обладнання, розташовуваного характеру і можливій мірі забруднення приміщень радіоактивними речовинами (принцип зонування).

Основним організаційно-технічним принципом забезпечення радіаційної безпеки є суворе дотримання режиму зон і контроль за перетином кордонів зон персоналом та радіоактивними речовинами.

Вся на території промислового майданчика АЕС за ступенем впливу іонізуючих випромінювань умовно ділиться на зону контрольованого доступу (ЗКД) і зону вільного доступу (ЗВД).

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		65

Прохід в ЗКД АЕС і вихід з неї здійснюється тільки через санпропускники, є розділовими санітарно-гігієнічних пристроями між ЗВД і ЗКД. Санпропускник призначений для повного переодягання, санітарної обробки персоналу, радіаційного контролю тіла, спецодягу, збору і відправлення спецвзуття, спецодягу в спецпрачечную на дезактивацію.

Вхід в ЗКД здійснюється тільки через санпропускники з обов'язковим переодяганням персоналу. Залежно від ступеня радіаційного впливу, для запобігання невинновданого опромінення персоналу та попередження розповсюдження радіоактивного забруднення, всі приміщення зони сурового режиму АЕС діляться на три категорії.

Всі роботи в умовах фактичного (у тому числі, коли потужність дози зовнішнього опромінення на робочому місці перевищує 24 мкЗв/год, а також коли отримана доза за період виконання робіт може перевищити 0,1 мЗв) або можливу радіаційну небезпеку повинні виконуватися з дотриманням наступних організаційних заходів:

- оформлення роботи дозиметричних нарядом;
- призначення осіб, відповідальних за безпечне проведення робіт;
- визначення радіаційної обстановки на робочому місці; ~ підготовка робочого місця та допуск до роботи;
- нагляд при виконанні роботи;
- переведення на інше робоче місце;
- оформлення перерв у роботі;
- оформлення закінчення роботи.

Списки відповідальних працівників, які мають право видачі дозиметричних нарядів і бути керівниками робіт з ним, щорічно затверджуються керівництвом підприємства.

Дозиметричний наряд діє до повного закінчення робіт або до досягнення працівниками індивідуальних доз, дозволених дозиметричним нарядом, але не більше 6 календарних днів з реєстрацією щоденного допуску до роботи.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		66

При роботах на обладнанні, виведеному в ремонт, повинні бути виконані наступні технічні заходи:

- проведені необхідні відключення (технологічні та електричні) та вжиті заходи, що перешкоджають помилкової або мимовільної подачі середовищ з радіоактивними речовинами на місце виробництва робіт, а також введення в дію ремонтovanого обладнання;
- виявлено чинники радіаційного впливу на місці виробництва робіт;
- організовані в необхідному обсязі санітарні шлюзи;
- проведена попередня дезактивація;
- організовані ремонтні зони (тимчасове або стаціонарне обладнання робочих місць);
- вжито заходів для локалізації і видалення (захоронення) радіоактивних відходів.

В основу планування території всіх виробничих будівель і приміщень АЕС покладено гігієнічний принцип: їх поділ на зони в залежності від характеру технологічних процесів, обладнання, розташовуваного характеру і можливій мірі забруднення приміщень радіоактивними речовинами (принцип зонування).

Основним організаційно-технічним принципом забезпечення радіаційної безпеки є суворе дотримання режиму зон і контроль за перетином кордонів зон персоналом та радіоактивними речовинами.

Приміщення санпропускників розділені на два відділення: "чисте" і "брудна" і позначені відповідними написами.

Всі працюючі в ЗКД повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту, з урахуванням радіаційних умов на робочому місці.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		67

5.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки експлуатації технологічного устаткування та засобів автоматизації спроектованої системи

Підігрівач деаерованої води, що входить до складу теплофікаційної установки АЕС, використовується для підвищення температури деаерованої води за рахунок використання відбору пари з турбіни. Він працює під надлишковим тиском, а температура гріючої пари та води досягає високих значень, що створює низку умов, які безпосередньо впливають на необхідність забезпечення заходів охорони праці.

Підігрівач є апаратом кожухотрубного типу з вертикальним розташуванням, в якому циркулюють гріюча пара та деаерована вода. Основні потенційні небезпеки під час експлуатації пов'язані з високою температурою гріючого середовища, надлишковим тиском у трубній та водяній частинах, а також можливими витоками пари або конденсату. З огляду на це, конструкція та експлуатація ПДВ вимагає наявності термоізоляції гарячих елементів, надійного регулювання рівня конденсату та захисту від перевищення тиску.

Крім того, теплофікаційна система, до складу якої входить ПДВ, функціонує в умовах циклічних температурних навантажень і має безперервний режим роботи, що накладає додаткові вимоги до технічного обслуговування, своєчасної профілактики зношення, а також до кваліфікації обслуговуючого персоналу.

5.3. Електробезпека

Обране для спроектованої САР електротехнічне устаткування та умови його експлуатації відповідають вимогам ПУЕ-2017, НПАОП 40.1-1.21-98, НПАОП 40.1-1.01-97, НПАОП-40.1-1.32-01, ДСТУ 7237:2011 та Технічний регламент з безпеки низьковольтного електричного обладнання (постанова Каб. Міністрів України №1149 від 23.10.2009 р.), а також ДСТУ Б В.2.5-82:2016. «Інженерне обладнання будинків і споруд. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд».

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		68

Передбачена проектом апаратура САР та силове електротехнічне устаткування повинні експлуатуватися відповідно до паспортних даних, які визначають номінальні значення струмів і напруг живлення.

Для живлення засобів автоматизації використовується трифазна електромережа з заземленою нейтраллю, з робочою напругою 220/380 В та частотою 50 Гц. Використовується система захисного заземлення TN (підсистема TN-C-S).

Дана система захисного заземлення виключає можливість ураження персоналу електричним струмом при пробії на корпус ЕУ однієї з фаз електромережі, що забезпечується завдяки швидкому вимиканню ділянки електромережі, на якій виникло замикання фази на корпус, за рахунок використання пристроїв максимального струмового захисту.

Для виконання діючих вимог з електробезпеки, все силове технологічне електроустаткування САР згідно з ДСТУ ІЕС 61140:2015 має І клас за електрозахистом, а засоби автоматизації (блоки ПЛК, екранні пристрої, давачі, виконавчі пристрої, блоки живлення тощо) системи управління мають відповідно І, ІІ та ІІІ класи.

ЕУ мають затискачі заземлювальні та відповідні знаки заземлення. Значення опору між заземлювальним затискачем та кожною доступною до дотику металевою неструмовідною частиною ЕУ, яка може опинитися під напругою в разі пошкодження ізоляції, не повинно перевищувати 0,1 Ом.

Для захисту людей від помилкових дій та випадкового дотику до струмовідних частин ЕУ при їх монтажі, обслуговуванні та експлуатації застосовані розподільні щити в металевих шафах в закритому виді, клемні колодки мають бути захищеними спеціальними щитками, електрокабелі мати різнокольорову ізоляцію провідників та відповідне кольорове маркування комутаційних елементів БЩУ, таблички та написи з позначенням робочих напруг, попереджувальні знаки.

Згідно ДСТУ 7237:2011 для забезпечення захисту від випадкового дотику людини до струмовідних частин ЕУ застосовані такі види захисту:

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		69

- основне (робоче) ізолювання струмовідних частин (захисне ізолювання);
- додаткове, посилене, подвійне ізолювання струмовідних частин;
- захисні оболонки;
- захисні огорожі (тимчасові або стаціонарні);
- безпечне розташування струмовідних частин;
- ізолювання робочого місця;
- мала напруга; захисне вимкнення;
- попереджувальна сигналізація (звукова, світлова тощо);
- блокування;
- встановлення знаків безпеки;
- електрозахисні засоби; засоби індивідуального захисту.

Для запобігання ураженню електричним струмом під час дотику до металевих неструмовідних частин, які можуть бути під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, застосовані окремо або в поєднанні такі види захисту:

- захисне заземлення (система TN-C-S);
- автоматичне вимкнення живлення;
- зрівнювання потенціалів;
- застосування обладнання відповідного класу за електрозахистом;
- захисний електричний поділ кіл;
- системи наднизької напруги (безпечної, захисної).

При обслуговуванні оперативним персоналом електроустановок, що знаходяться під напругою (при неможливості їх знеструмити) використовуються наступні засоби захисту від дії електричного струму, це:

- захисні екрани;
- переносні заземлення, огорожі;
- засоби індивідуального захисту :
- діелектричні рукавички, боти, килимки та підставки;
- монтерський інструмент з ізольованими ручками;
- оперативні та струмовимірювальні кліщі, штанги.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		70

5.4. Пожежна безпека та профілактика

Устрій, експлуатація і ремонт обладнання системи повинні відповідати вимогам пожежної безпеки.

Не дозволяється при роботах в місцях установки засобів САР використовувати відкриті джерела полум'я в різних цілях (сварні роботи, пайка кабелю та т.і.) без оформлення допуску на виробництво вогневих робіт.

В зоні обслуговування системи присутні горючі матеріали, такі як кабельна ізоляція, ущільнювальні елементи, а також теплоізоляційні покриття, що можуть спричинити розповсюдження полум'я у разі займання. Водночас, джерелами потенційного займання можуть бути електричні дуги, замикання або перегрів обладнання внаслідок несправностей. Згідно з ДСТУ Б.В.1.1-36:2016 виробничі приміщення, де розміщено теплофікаційне обладнання, відносяться до категорії В за вибухопожежною небезпекою. Робочі зони БЩУ, в яких розміщено кабельні траси згідно НПАОП 40.1-1.32-01 класифікуються як пожежонебезпечні і мають клас П-Па.

При загорянні засобів САР повинні застосовуватися засоби, які призначені для гасіння пожеж класу «Е», це горіння електроустановок під напругою. Це вуглекислотні (ВВК) та порошкові (ВП) вогнегасники. При виникненні пожежі необхідно:

- негайно повідомити про пожежу в ДПРЧ по телефону 101;
- приступити до гасіння пожежі;
- повідомити про пожежу керівництву та продовжувати ліквідацію пожежі до приїзду пожежних.

5.4.1. Технічні рішення системи запобігання пожежі

Важливим засобом запобігання пожежі є контроль температури на електрообладнанні, насосах та електродвигунах. Установлення термореле, теплових розчіплювачів та пристроїв захисту від перенавантаження дозволяє автоматично відключити живлення у разі перегріву чи короткого замикання.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		71

Щити керування та розподільчі пристрої обладнуються індикаторами температури і аварійними сигналами.

З метою зниження ризику займання в кабельних каналах, розділяються силові та контрольні кабелі, які укладаються у вогнестійких металевих коробах або з застосуванням спеціальних вогнезахисних герметиків на проходках. Додатково виконується екранування кабелів, прокладених у зонах підвищеної температури, що унеможливило їх розігрів до критичних меж.

Ще одним важливим заходом є регулярне технічне обслуговування обладнання. Персонал станції проводить планові огляди стану електроізоляції, щільності з'єднань, герметичності з'єднань парових трубопроводів. При наявності підтікання чи забруднення ізоляції негайно вживаються заходи щодо їх усунення.

Система вентиляції та кондиціонування, що забезпечує охолодження електроцитів, також перевіряється на справність, адже перегрів повітря може стати каталізатором загоряння.

5.4.2. Технічні рішення системи протипожежного захисту

У разі виникнення загоряння в теплофікаційній установці АЕС, реалізується багаторівнева система протипожежного захисту, яка включає як автоматичні, так і ручні засоби локалізації та ліквідації вогню. Одним з ключових елементів є автоматична пожежна сигналізація, яка реагує на появу диму або підвищення температури вище встановленого порогу. Сигнал з детекторів передається на центральний пункт керування, де запускаються алгоритми оповіщення та аварійного знеструмлення.

Для кабельних каналів, насосних відділень і електрощитових передбачено системи газового пожежогасіння (наприклад, CO₂, FK-5-1-12, аерозолі), які дозволяють ефективно ліквідувати займання без завдання шкоди електрообладнанню. У вибраних приміщеннях встановлюються також порошкові модулі пожежогасіння із температурними активаторами.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		72

На території обслуговування розміщено вуглекислотні та порошкові вогнегасники, розраховані на гасіння пожеж класу «Е». Кожен вогнегасник має бирку з терміном останньої перевірки, а персонал проходить інструктаж з їх застосування.

Панелі аварійного вимкнення живлення (включаючи кнопки “Стоп аварійний” червоного кольору) встановлюються в ЗВД, що дозволяє оперативно припинити подачу енергії на обладнання у разі пожежі.

Всі засоби пожежогасіння, сигналізації та аварійного знеструмлення перевіряються щокварталу, згідно з вимогами НПАОП 0.00-1.69-13 та регламентів атомної станції. Інформація про стан протипожежного захисту реєструється в журналі оперативного обслуговування і контролюється відповідальною особою.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		73

6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПІДГРІВАЧА ДЕАЕРОВАНОЇ ВОДИ В ТЕПЛОФІКАЦІЙНІЙ УСТАНОВЦІ АЕС

Для визначення економічної ефективності підігрівача деаерованої води в теплофікаційній установці АЕС потрібно скласти кошторис обладнання. У таблиці 5.1 наведено кошторис, в якому наведені витрати на обладнання

Таблиця 5.1. Кошторис на обладнання

№	Найменування	Кіль.	Од. вим.	Вартість, грн	Загальна вартість, грн
1	Датчик різниці тисків Сафір 2440	2	шт.	8000	16000
2	ТХА-1690-015-92	2	шт.	2400	4800
3	Перетворювачі вимірювальні ПВП-0305	2	шт.	4500	9000
4	Датчик різниці тисків Сафір 2450	1	шт.	8000	8000
5	Діафрагма сталь 12Х18Н10Т	2	шт.	1500	3000
6	Датчик різниці тисків Сафір 2440 Ф	2	шт.	10000	20000
7	Датчик різниці тисків Сафір 2430 Р	2	шт.	9000	18000
8	Програмований логічний контролер Wago PFC200	1	шт.	45000	45000
9	Модулі аналогових входів Wago 750-455	2	шт.	35000	70000
10	Модулі дискретних виходів Wago 750-530	2	шт.	7000	14000
11	Модуль дискретних входів Wago 750-402	1	шт.	1800	1800
12	Промисловий ПК ПС5150	1	шт.	16000	16000
13	Пристрій плавного пуску	2	шт.	15000	30000
14	Виконавчий механізм МЕО-250/25-0,25-КА	2	шт.	20000	40000
15	Блок живлення модульний АВЛМ1А24025	1	шт.	2500	2500
16	Блок живлення Сафір БП	3	шт.	3000	9000
17	Контакторна збірка 3РА2434-8XF32-1AL2	2	шт.	15000	30000
18	Електродвигун АІР80В2	2	шт.	3500	7000
19	Автоматичний вимикач 6А EZ9F34306	5	шт.	610	3050
20	Автоматичний вимикач 1А А9F74101	4	шт.	718	2872
21	Щит ЩЩ-ЗД 900х700х400	1	шт.	2600	2600
22	DIN-рейки з перфорацією 40х8	3	шт.	320	960
23	Перфокороб 60х40	4	шт.	410	1640
24	Клемники 24 VDC Wago 002-1301 Topjob S	50	шт.	35	1750
25	Кабель контрольний КВВГг 3х1	500	м.	10	5000
26	Кабель силовий КВВГг 5х4	300	м.	100	30000
27	Кабель силовий КВВГг 5х2,5	500	м.	50	25000
28	Провід контрольний ПВ 1х1,5	5	м.	6	30
29	Імпульсні трубки PTFE ø10х1,5 DIN 8075	200	м.	15	3000
30	Загальна вартість				420002

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П			Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата				74

Після розрахунку сумарної ціни усіх приладів системи автоматизації, розрахуємо одноразові витрати.

Для початку розрахуємо загальні витрати на електроенергію:

$$B_{ел} = C_{ел} \cdot T_p \cdot N_{п} \quad (5.1)$$

де $C_{ел}$ – тариф на електроенергію, 4.32 грн/год;

час роботи на рік $T_p = 2880$ год;

потужність обладнання $N_{п} = 8$ кВт.

Підставляємо ці значення у (5.1) та отримаємо витрати на електроенергію:

$$B_{ел} = 4.32 \cdot 2880 \cdot 8 = 99532.8 \text{ грн/рік} \quad (5.2)$$

Витрати на ремонтні роботи обладнання системи регулювання підігрівачем деаерованої води:

$$B_{ел} = 0.12 \Delta K_{об} \quad (5.3)$$

де $\Delta K_{об}$ – вкладений капітал на обладнання для системи автоматизації, 420002 грн.

Підставляємо це значення у (5.3) та отримаємо витрати на електроенергію:

$$B_{рем} = 0.12 \cdot 420002 = 50400.24 \text{ грн/рік} \quad (5.4)$$

Витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу підігрівача деаерованої води:

$$B_{зп} = n_{п} T_{роб} Sal \quad (5.5)$$

де $n_{п}$ – кількість обслуговуючого персоналу підігрівача деаерованої води, $n_{п} = 5$ людей;

$T_{роб}$ – час роботи персоналу, 12 місяців;

Sal – зарплата одного працівника, 8000 грн.

Підставляємо ці значення у (5.5) та отримаємо витрати на електроенергію:

$$B_{зп} = 5 \cdot 12 \cdot 8000 = 480000 \text{ грн/рік} \quad (5.6)$$

						ТА- 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		75

Тепер розрахуємо загальні витрати на обслуговування підігрівача деаерованої води:

$$\Delta B_{\text{заг}} = B_{\text{ел}} + B_{\text{зп}} + B_{\text{рем}} = 99532.8 + 480000 + 50400.24 = 629933.04 \text{ грн/рік} \quad (5.7)$$

Економія витрат при впровадженні підігрівача деаерованої води:

$$E_{\text{в}} = E_{\text{к}} - \Delta B_{\text{заг}} \quad (5.8)$$

де $E_{\text{к}}$ – економічні витрати від системи теплофікації АЕС, 800000 грн.

Підставляємо ці значення у (5.8) та отримаємо витрати на електроенергію:

$$E_{\text{в}} = 800000 - 629933.04 = 170066.96 \text{ грн/рік} \quad (5.9)$$

Щорічна економічна ефективність підігрівача деаерованої води:

$$E_{\text{еф}} = E_{\text{в}} - 0.15 \Delta K_{\text{об}} = 170066.96 - 63000.3 = 107066.7 \text{ грн/рік} \quad (5.10)$$

Термін окупності підігрівача деаерованої води:

Теплофікаційна установка та її елементи є ефективними, якщо їх термін окупності становить 4 роки. $T_{\text{ок}}^* = 4$ роки.

$$T_{\text{ок}} = \frac{\Delta K_{\text{об}}}{E_{\text{в}}} = \frac{420002}{170066.96} = 2.47 \approx 2 \text{ роки } 6 \text{ місяців} \quad (5.11)$$

За розрахунками слідує, що система автоматизації підігрівача деаерованої води теплофікаційної установки АЕС окупиться приблизно за 2 роки та 6 місяців, що менше за поріг ефективності в $T_{\text{ок}}^* = 4$ роки. Отже впровадження підігрівача деаерованої як частини теплофікаційної установки АЕС є вигідним рішенням.

						ТА- 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		76

ВИСНОВКИ

У рамках написання цього бакалаврського проєкту досліджується підігрівач деаерованої води теплофікаційної установки АЕС на прикладі підігрівача ПВС-125-7-15 з Рівненської АЕС. Реалізовано повний цикл моделювання, налаштування та програмної реалізації системи автоматичного регулювання рівня конденсату в підігрівачі деаерованої води, що є ключовим елементом теплофікаційної установки атомної електростанції.

На першому етапі був виконаний розрахунок аналітичної моделі підігрівача деаерованої води. В результаті аналізу динамічних властивостей об'єкта було отримано модель у вигляді аперіодичної ланки другого порядку без запізнення. Для спрощення подальших розрахунків регулятора, дана модель була апроксимована до ланки першого порядку з транспортним запізненням, що дозволило значно спростити аналіз і синтез системи керування.

На другому етапі було розраховано параметри ПІ-регулятора за двома методами синтезу, а саме:

- метод налаштування по лямбда-параметру (Lambda-tuning);
- метод Minimum ISE за Hazebroek and Van der Waerden 1950 року.

У ході комп'ютерного моделювання перехідних процесів обох систем у середовищі MATLAB/Simulink було проведено порівняння динамічних показників якості, таких як перерегулювання, час перехідного процесу, динамічна похибка та оцінка коливальності. Аналіз показав, що регулятор, налаштований за методом Lambda-tuning, забезпечує швидший і стійкіший перехідний процес, що підтверджує його доцільність для регулювання рівня у підігрівачі.

Була виконана програмна реалізація контуру керування у CoDeSys v3.5. Програма виконує наступні функції:

- керування об'єктом завдяки ПІ-регулятору, параметри якого можна змінювати;

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		77

- програмно реалізує апроксимовану модель у вигляді аперіодичної ланки першого порядку. Модель у програмі дозволяє відлагодити роботу регулятора та перевірити систему на стабільність.

Для візуалізації, моніторингу та віддаленої взаємодії з системою було розроблено інтерфейс оператора в середовищі Node-RED. Основні функції НМІ-інтерфейсу:

- задання уставки та параметрів ПІ-регулятора у реальному часі;
- виведення графіку зміни рівня у підігрівачі;
- індикація аварійних подій.
- Крім того, система Node-RED виконує:
- архівацію технологічних параметрів у базі даних InfluxDB для подальшого їх аналізування;
- відправлення аварійних повідомлень у Telegram через чат-бот, що забезпечує підвищення оперативності реагування обслуговуючого персоналу.

На завершальному етапі було виконано техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження автоматизації підігрівача деаерованої води. Загальні капіталовкладення склали 420 002 грн. При розрахунковій щорічній економії експлуатаційних витрат у розмірі 170 067 грн термін окупності системи склав 2 роки та 6 місяців, що відповідає нормативним критеріям ефективності та обґрунтовує впровадження даної системи в умовах АЕС.

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		78

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Інструкція з експлуатації. Система теплофікаційної установки. Система номінальної експлуатації. Блок № 1, 2. 112-Е-ТЦ-1 – с. 236;
2. Навчальний посібник. Системи підживлення тепломережі та паропостачання власних потреб 4,6-ата – с. 35;
3. Кизим М. О., Котляров Є. І., Хаустова В. Є. Аналіз тенденцій розвитку централізованого теплопостачання в Україні, 2021 – с. 20;
4. Перелік вимірювальних каналів реакторного та турбінного відділень. 152-31-ПЕ-1,2ЦТАВ – с. 205;
5. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС – с. 304.
6. Aidan O`Dwyer Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules 2nd edition – с. 545;
7. Інструкція з експлуатації. Контрольно-вимірювальні прилади. Система важлива для безпеки. Блоки №1,2. 152-7-Е-ЦТАВ – с. 288;
8. Контролер другого покоління Wago PFC200. URL: <https://www.wago.com/global/plcs-%E2%80%93-controllers/controller-pfc200/p/750-8212> (date of access: 05.06.2025);
9. Каталог ЭТ ЧАО СНПО Импульс. URL: <https://impulse.ua/download/katalogi/2020/%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%20%D0%AD%D0%A2%20%D0%A7%D0%90%D0%9E%20%D0%A1%D0%9D%D0%9F%D0%9E%20%D0%98%D0%BC%D0%BF%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81.pdf> (date of access: 05.06.2025);
10. Коммутационные аппараты Контактторы и контакторные сборки для коммутации электродвигателей. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:f614b441-9b33-4033-8d6c-796a1c930d1b/ic10-03-2017-2018-ru.pdf> (date of access: 05.06.2025);
11. ДАТЧИКИ ТИСКУ «САФІР» Настанова щодо експлуатування ИТЕК.406233.001 НЕ. URL: <https://manometr-kharkiv.com/wp->

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		79

[content/uploads/2021/10/%D0%A1%D0%B0%D1%84%D1%96%D1%80_%D0%9D%D0%95_21.1.pdf](https://thermo.lviv.ua/wp-content/uploads/2021/10/%D0%A1%D0%B0%D1%84%D1%96%D1%80_%D0%9D%D0%95_21.1.pdf) (date of access: 05.06.2025);

12. Науково-виробниче об'єднання «Термоприлад». Каталог. Прилади для вимірювання та контролю температури. URL: <https://thermo.lviv.ua/wp-content/uploads/2019/05/Povnyj-katalog-ukr.pdf> (date of access: 05.06.2025);

						ТА - 12426.0019 .001.АТХ. П	Арк.
							80
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		