

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП -33.00.00.000 ПЗ

група АКП -23-1К

Володимир Адамовський

2025

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

Адамовський Володимир Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681.518

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення системи керування технологічним процесом котельної

(назва роботи)

установки

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

доцент О. В. Кучмистенко
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент В. С. Борин
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-23-1К В. В. Адамовський
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент Р. Б. Скрип'юк
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Допущено до захисту Завідуючий кафедри

доцент А. І. Лагойда
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

А.І. Лагойда.

« » 20 року

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

Адамовському Володимирі Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Розроблення системи керування технологічним процесом
котельної установки**

керівник роботи Скрип'юк Ростислав Богданович, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «07» травня 2025 року № 52/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025

3. Вихідні дані до роботи: матеріали переддипломої практики,
технічна література, інтернет-ресурс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити) Вступ. 1. Опис технологічного процесу котельної установки

2. Розробка функціональної схеми автоматизації котельної установки. 3. Вибір
технічних засобів автоматизації. 4. Моделювання системи автоматичного
регулювання водогрійного котла. Загальні висновки. Перелік посилань на
літературу.

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

1. БР.АКП-33.00.00.001 – Загальний вигляд водогрійного котла ПТВМ 30 М4

2. БР.АКП-33.00.00.002 – Спрощена функціональна схема водогрійного котла

3. БР.АКП-33.00.00.003 - Мікропроцесорний контролер Modicon M340.

4.БР.АКП-33.00.00.004 - Принципові електричні схеми зовнішніх з'єднань

контролера Modicon M340. 5.БР.АКП-38.00.00.005 – Експериментальні криві

розгону ОК. 6. БР.АКП-38.00.00.06 – Структурна схема моделювання САК,
реалізована в середовищі SIMULINK.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Опис технологічного процесу котельної установки	13.05.2025	
2	Розробка функціональної схеми автоматизації котельної установки	23.05.2025	
3	Вибір технічних засобів автоматизації	28.05.2025	
4	Моделювання системи автоматичного регулювання водогрійного котла	07.06.2025	
5	Оформлення бакалаврської роботи	12.06.2025	

Студент _____
(підпис)

В. В. Адамовський
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Р. Б. Скрип'юк
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 55 сторінок, 21 рисунок, 4 таблиці, 9 джерел.

Тема: «Розроблення системи керування технологічним процесом котельної установки».

Об'єкт дослідження: водогрійний котел типу «ПТВМ-30 М4».

Предмет дослідження: методи, засоби і технології автоматизації процесів котельної установки.

Мета роботи: підвищення рівня енергоефективності, надійності та технологічної стабільності функціонування котельної установки шляхом розроблення сучасної автоматизованої системи керування на основі використання мікропроцесорної техніки.

Результати роботи: проведено аналіз типових схем автоматизації котелень, визначено найбільш доцільні технічні рішення для впровадження. Запропоновано варіант автоматизації із використанням мікропроцесорного контролера Modicon M340 від компанії Schneider Electric. Розроблено структурну та функціональну схеми автоматизації, підготовлено принципову електричну схему зовнішніх з'єднань та складено специфікацію технічних засобів.

У роботі також розглянуто питання промислової безпеки при пуску та експлуатації котельної установки, проаналізовано економічний ефект від впровадження автоматизованої системи керування на базі сучасного обладнання.

Ключові слова: автоматизація технологічних процесів, функціональна схема, мікропроцесорний контролер, водогрійний котел, регулятор тиску, регулятор розрідження.

ANNOTATION

The bachelor's thesis includes: 55 pages, 21 figures, 4 tables, 9 sources.

Topic: "Development of a control system for the technological process of a boiler plant."

Object of research: water-heating boiler of the type "PTVM-30 M4."

Subject of research: methods, means, and technologies for automating the processes of a boiler plant.

Purpose of the work: to enhance the energy efficiency, reliability, and technological stability of the boiler plant operation by developing a modern automated control system based on microprocessor technology.

Results of the work: an analysis of typical automation schemes for boiler plants was conducted, and the most effective technical solutions for implementation were identified. An automation variant using the Modicon M340 microprocessor controller by Schneider Electric was proposed. A structural and functional automation scheme was developed, along with the main electrical connection diagram and a specification of the applied technical means.

The work also addresses industrial safety issues during the startup and operation of the boiler plant and provides an analysis of the economic impact of implementing the automated control system based on modern equipment.

Keywords: automation of technological processes, functional diagram, microprocessor controller, water-heating boiler, pressure regulator, vacuum regulator.

З М І С Т

	ст.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	8
1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ КОТЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ...	9
1.1 Загальні відомості про котельні установки... ..	9
1.2 Характеристика об'єкта керування	11
Висновок до розділу.....	13
2 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ КОТЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ	14
2.1 Вибір функціональної схеми та технічних засобів автоматизації.....	14
2.2 Розрахунок параметрів системи автоматичного регулювання.....	17
2.2.1 Побудова розгінної характеристики водогрійного котла.....	18
2.2.2 Розрахунок оптимальних коефіцієнтів регулятора.....	20
Висновок до розділу	22
3 ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	23
3.1 Опис характеристик мікропроцесорного контролера Modicon M340...23	
3.2 Опис принципової електричної схеми зовнішніх з'єднань контролера Modicon M340 для автоматизації водогрійного котла.....	26
3.2.1 Опис і призначення датчик-перетворювач тиску САПФІР-22-ДД ...	27
3.2.2 Принцип роботи перетворювача Сапфір-22ДД.....	30
Висновок до розділу.....	35

					БР.АКП-33.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Адамовський В.В.			Розроблення системи керування технологічним процесом котельної установки	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Скрип'юк Р.Б.					6	
Реценз.						ІФНТУНГ АКП-23-1К		
Н. Контр.		Борин В.С.						
Затверд.		Лагойда А.І.						

4 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА.....	36
4.1 Розрахунок параметрів динамічних моделей каналом регулюючої дії і каналом збурення та перевірка її адекватності	36
4.2 Розрахунок параметрів налаштування автоматичних регуляторів.....	44
4.3 Дослідження перехідних процесів в САК при оптимальних параметрах налаштування ПІ-регулятора	51
Висновок до розділу.....	53
 ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	54
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ЛІТЕРАТУРУ.....	55

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку промисловості та соціальної сфери автоматизація відіграє ключову роль, залишаючись пріоритетним напрямом удосконалення виробничих процесів. Зі зростанням технічного прогресу це поняття розширюється, охоплюючи новітні напрями, зокрема комп'ютерні технології, робототехніку та інші спеціалізовані галузі. Водночас основна мета автоматизації залишається сталою — зниження навантаження на людину або повна заміна ручної праці завдяки технічним засобам [1,2,3].

Автоматизовані системи котельних установок охоплюють автоматизоване керування, дистанційний моніторинг, технологічний захист, терморегулювання, технологічне блокування та систему сигналізації. Автоматичне регулювання дозволяє підтримувати стабільний перебіг безперервних технологічних процесів у парогенераторі, зокрема подачу води, процес горіння, контроль температури теплоносія та інші параметри.

У сучасних умовах підвищених вимог до енергоефективності, екологічної безпеки та надійності теплогенерувальних об'єктів автоматизація котельних установок набуває особливої актуальності. Котельні установки відіграють ключову роль у забезпеченні теплопостачання в промисловості, комунальній сфері та енергетиці, а стабільність їхньої роботи безпосередньо впливає на ефективність усього технологічного процесу.

Управління котельною установкою є складним і багатокомпонентним процесом, що потребує постійного моніторингу та оперативного реагування на зміну технологічних параметрів — таких як температура, тиск, витрата палива, вода та повітря. Використання автоматизованих систем керування дозволяє не лише знизити вплив людського чинника, а й оптимізувати витрати енергоресурсів, забезпечити стабільність горіння, підвищити безпеку та продовжити ресурс експлуатації обладнання.

					БР.АКП – 33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ КОТЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

1.1 Загальні відомості про котельні установки

Котельна установка являє собою конструктивно інтегрований комплекс, що включає котельний агрегат і допоміжне обладнання, функціонально об'єднані для забезпечення виробничого процесу теплогенерації. Котельний агрегат складається із сукупності технічних пристроїв, механізмів та функціональних елементів, що взаємодіють з метою генерування водяної пари або гарячої води заданих параметрів.

Ключовими складовими котла є топка, у якій відбувається згоряння палива, та теплообмінні поверхні, призначені для передачі теплоти теплоносієві. Просторове розташування топки відносно газоходів, де розміщено теплообмінні елементи, тобто компоновочне рішення котла, визначається характеристиками використовуваного палива, необхідною тепловою потужністю та вимогами до кінцевих параметрів пари або гарячої води [1, 2].

Розглянемо, наприклад, водогрійний котел типу ПТВМ-30М4 (перебудований трубчастий водогрійний модернізований), радіаційного типу, прямоточний, із замкненою П-подібною компоновкою нагрівальних поверхонь та примусовою циркуляцією теплоносія, що функціонує за десятиходовою схемою (рис. 1.1) [1]. Він призначений для отримання гарячу воду з температурою 150 °С та тиском 2,5 МПа, що застосовується у системах опалення, гарячого водопостачання, а також у виробничих технологічних процесах. Котел ПТВМ-30М4 є об'єктом з розгалуженою структурою та значними тепловими й динамічними інерціями, що потребує застосування сучасних методів автоматизованого керування [2].

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Основними задачами системи керування є:

- підтримання стабільної температури гарячої води, що виходить із котла;
- забезпечення оптимального співвідношення "паливо–повітря" для ефективного та економного горіння;
- безаварійне функціонування обладнання з урахуванням усіх технічних обмежень.

Конструкція топкової частини котла передбачає повне екранування за допомогою труб діаметром 60×3 мм, які розташовані з кроком $S = 64$ мм. У топковій камері змонтовано шість пальників для спалювання газомазутної суміші, встановлених парно по бокових стінках у протилежному один до одного положенні. Для ініціювання процесу горіння застосовуються запальні пристрої із вбудованим захистом. Пальники мають пропускну здатність 660 нормальних кубічних метрів газу за годину. Подача газу до пальників організована по периферії. Газ надходить під тиском близько 750 мм водяного стовпа. Діапазон регулювання теплової продуктивності котла складає від 20 % до 100 % від номінального значення.

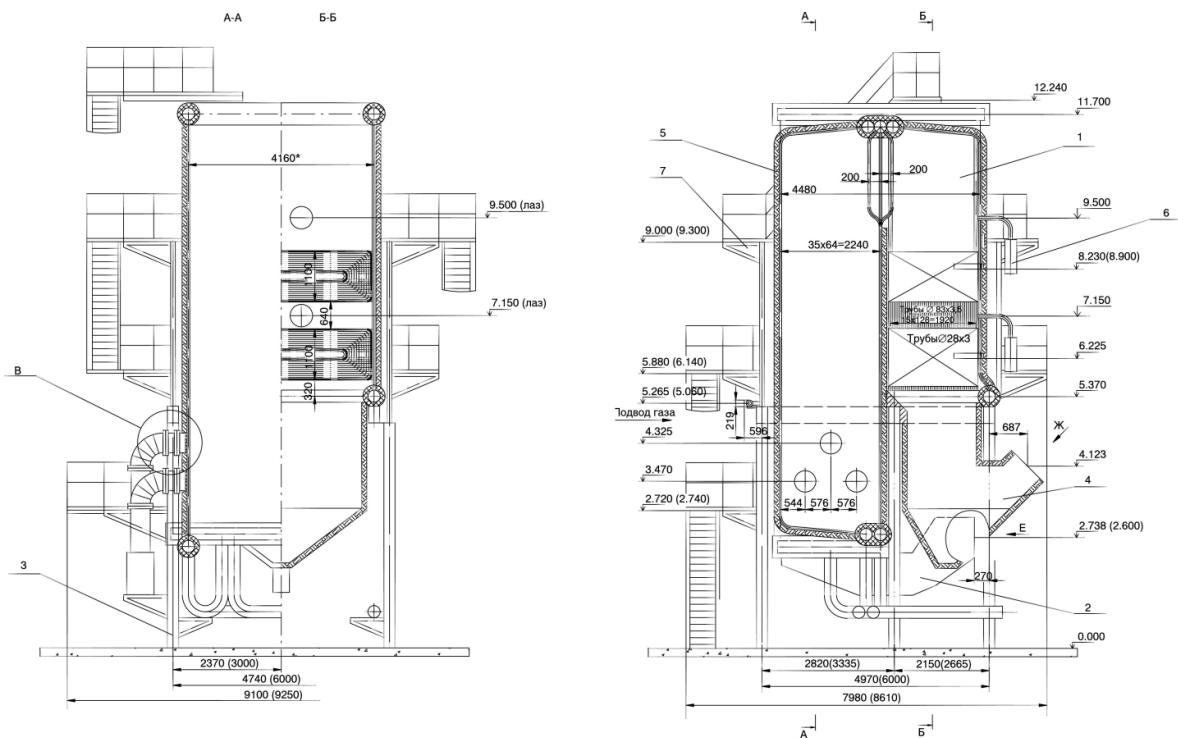


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд водогрійного котла ПТВМ-30 М4 [2]

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ		Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата			

Регулювання теплової продуктивності котла відбувається за рахунок зміни кількості задіяних у роботі пальників. Подавання повітря до топкової частини виконується через спільний повітряний короб із використанням вентиляційного агрегату. Протікання води через котел підтримується на стабільному рівні, тоді як при зміні теплового навантаження змінюється різниця температур між входом і виходом теплоносія з котла.

Циркуляція теплоносія всередині котла організована за десятиходовою схемою руху води.

1-й хід — надходження води через праву частину фронтального екрана (секція Ф-2), підйом вгору;

2-й хід — проходження по лівій частині фронтального екрана (секція Ф-1), рух води вниз;

3-й хід — підйом води по лівому бічному екрану топкової камери (секція Б-1);

4-й хід — опускання води по лівому бічному екрану (секція Б-3) з подальшим проходженням через конвективну частину;

5-й хід — підйом по задньому екрану (секція Б-5);

6-й хід — рух води вниз по задньому екрану (секція Б-6);

7-й хід — підйом води через правий бічний екран (секція Б-4) та другу частину конвективного блоку;

8-й хід — опускання по задньому екрану топки (секція З-1);

9-й хід — підйом по задньому екрану топки (секція З-2);

10-й хід — завершальний рух води вниз по лівому бічному екрану топки (секція Б-2), після чого вона подається до споживачів.

1.2 Характеристика об'єкта керування

Котельна установка є технологічним об'єктом, призначеним для перетворення енергії палива в теплову енергію шляхом нагрівання води або

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

утворення пари. Вона широко використовується в системах централізованого теплопостачання, промислових підприємствах, комунальних об'єктах та інших сферах, де необхідне стабільне та ефективне теплоенергозабезпечення [2].

Водогрійний котел призначений для підвищення температури води, яка використовується у системах гарячого водопостачання та опалення. Вода, що подається до споживачів, називається прямим потоком, а та, що повертається назад у котел після використання — зворотним. Для запобігання корозійним процесам та утворенню накипу застосовується попередньо хімічно очищена вода, оскільки природна містить розчинені гази, такі як кисень і вуглекислота, які можуть руйнувати металеві елементи котельного агрегату та трубопроводів. Використання неочищеної води сприяє утворенню накипу, що, у свою чергу, призводить до локального перегріву металу через зниження тепловідведення. Для компенсації втрат води, які неминуче виникають у процесі експлуатації, до зворотного потоку додається підживлювальна вода. Процес нагріву води здійснюється за рахунок тепла, яке утворюється внаслідок згоряння палива. На вхід у котел вода надходить із температурою близько 60 °С і після проходження через теплообмінні поверхні нагрівається до 90 °С.

Горіння являє собою хімічний процес взаємодії горючих компонентів палива з киснем, під час якого відбувається виділення тепла і зростання температури. До пальників котла подається газ і повітря. У камері пальника формується паливно-повітряна суміш, яка запалюється і передає теплову енергію у простір топкової камери. Під час згоряння утворюються продукти реакції — димові гази, які відводяться димососом і далі викидаються у атмосферу. Спалювання газового палива у котлі здійснюється факельним способом. Для забезпечення ефективного процесу горіння необхідно досягти якісного попереднього перемішування газу з повітрям, оптимального співвідношення компонентів із мінімальним надлишком повітря, а також розділення потоку суміші на окремі

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

струмені. Підігрів паливно-повітряної суміші та сам процес горіння відбуваються з високою швидкістю.

Для забезпечення стійкого процесу горіння димосос створює необхідний розріджений тиск у топці, що сприяє ефективному видаленню продуктів згоряння. При правильному співвідношенні витрати повітря і подачі палива процес спалювання досягає максимальної економічності.

Тепловий баланс котельного агрегату визначає розподіл теплової енергії, отриманої внаслідок згоряння палива, між корисно використаним теплом та тепловими втратами, що виникають під час роботи котельної установки.

Висновок до розділу

У даному розділі описано та проаналізовано технологічний процес котельної установки на прикладі водогрійного котла типу ПТВМ-30М4.

2 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ КОТЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Функціональна схема автоматизації є основним документом, що визначає структуру взаємодії окремих вузлів системи автоматичного контролю, регулювання та управління технологічним процесом, а також відображає оснащення об'єкта необхідними приладами і засобами автоматизації [6].

Приклад функціональної схеми автоматизації представлено на рис. 2.1. На схемі за допомогою умовних позначень зображено: основне технологічне обладнання, комунікації для транспортування рідин, газів і пари, а також встановлені засоби автоматизації [2].

Форма зображення технологічного обладнання у ФСА має передавати його конструктивну суть, при цьому елементи відображаються спрощено, без масштабування та деталізації другорядних конструкцій. В умовних позначеннях вказується інформація щодо контрольованих параметрів та типу їх обробки за допомогою спеціальних літерних кодів, які розміщують у символах або поряд із ними. Прилади, що виконують спільні функції, групуються у відповідні контури регулювання або контролю і на схемі з'єднуються суцільними лініями.

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Всі первинні та вторинні вимірювальні прилади позначаються колом, яке може бути поділено горизонтальною лінією. Наявність горизонтального діаметра свідчить про розміщення приладу на щиті (місцевому або центральному). Тип передавання даних від датчика визначається за літерним позначенням.

2.1. Вибір функціональної схеми та технічних засобів автоматизації

Функціональну схему автоматизації дозволяється поєднувати зі схемою електричних з'єднань (монтажною), що входить до складу основного комплексу документації, або з іншими схемами інженерних систем [2].

Для того щоб функціональна схема автоматизації ефективно виконувала свої завдання, її необхідно проєктувати з урахуванням особливостей конкретного технологічного процесу. Схема має враховувати можливі збурення, забезпечувати необхідну точність регулювання та швидкість реакції системи, а також відповідати сучасним вимогам та тенденціям, що застосовуються у даній галузі промисловості. На рис. 2.1 представлено спрощений варіант функціональної схеми автоматизації для водогрійного котла [2].

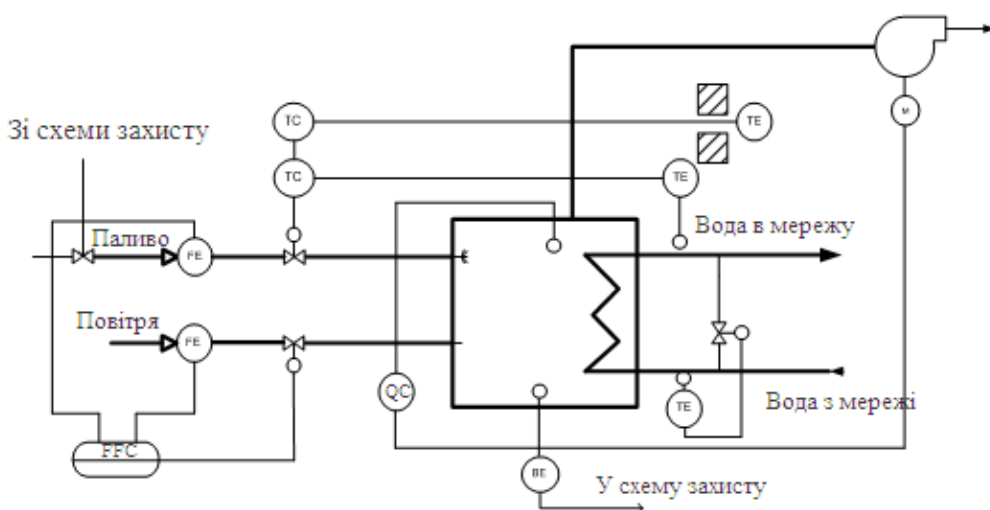


Рисунок 2.1– Спрощена функціональна схема водогрійного котла

У даній функціональній схемі автоматизації передбачено реалізацію наступних функцій:

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

із котла. Контроль параметра здійснюється за допомогою датчика Охумат-6, вихідний сигнал якого подається на перетворювач вимірюваних параметрів «Сапфір-22-ДВ», що формує уніфікований струмовий сигнал у діапазоні 0–20 мА. Далі сигнал надходить на мікропроцесорний контролер. Вихідний сигнал контролера передається на частотний перетворювач типу Danfoss VLT Micro Drive FC51, який у свою чергу регулює роботу вентилятора.

При впровадженні автоматизації у водогрійний котел слід враховувати, що одним із ключових технологічних параметрів є рівень розрідження. Цей параметр значною мірою визначається витратою палива.

Для досягнення максимальної ефективності процесу необхідно дотримуватись стабільного співвідношення паливно-повітряної суміші. Це забезпечується шляхом регулювання витрати повітря у відповідності до контрольованої витрати газу.

Крім того, важливим є підтримання заданих температурних параметрів технологічного потоку.

2.2 Розрахунок параметрів системи автоматичного регулювання

Побудуємо схему контуру регулювання температурних характеристик води. Одним із ключових параметрів роботи котла є температура води на виході з агрегату.

Система автоматичного регулювання (САР) має забезпечувати стабільне підтримання температури гарячої води на виході з котла в межах заданих значень. Регулювання температури здійснюється шляхом зміни витрати газу, що подається у котел через регулювальний клапан [3,4].

На основі функціональної схеми автоматизації котла розроблено схему контуру регулювання температури води на виході з котла (рис. 2.2) [4].

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

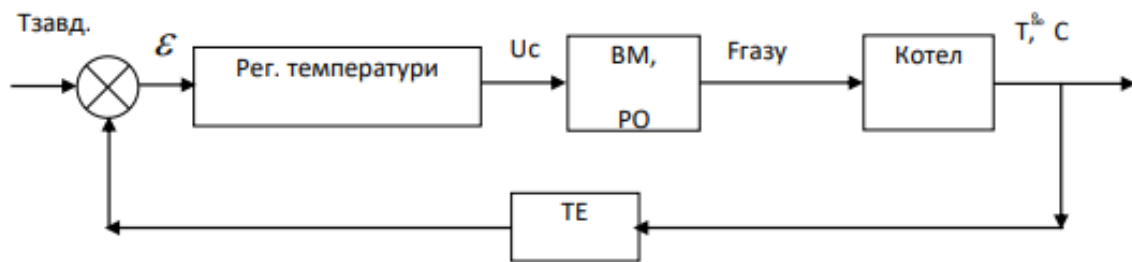


Рисунок 2.2 – Структурна схема регулювання температури води на виході котла

Виконаємо розрахунок передаточних функцій для кожного елемента, що представлений на рис. 2.2.

Датчик температури води

У якості датчика температури води на виході з котла застосовується пристрій із діапазоном вимірювання (0,3–1,8) МПа та вихідним струмовим сигналом у межах (4–20) мА.

Таким чином, передаточна функція датчика температури визначатиметься за формулою [3]:

$$W_1(p) = \frac{400 + 50}{20 + 4} = 28. \quad (2.1)$$

Регулятор температури води

Передаточна функція для ПІД-регулятора записується у такій формі:

$$W_2(t) = k_l + k_i \cdot \frac{1}{t} + k_d t. \quad (2.2)$$

Виконавчий механізм (ВМ) та регулюючий орган (РО)

Для регулювання витрати газу застосовується виконавчий механізм із регулюючим органом типу Kromschroeder VAS. Передаточна функція цієї системи (ВМ та РО) подається у наступному вигляді:

$$W_3(t) = \frac{k_3}{T_3 t + 1}. \quad (2.3)$$

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

2.2.1 Побудова розгінної характеристики водогрійного котла

Об'єкт керування (котел) для визначення динамічних характеристик котельного агрегату використано метод експериментального визначення динамічних властивостей об'єкта. Зміна температури гарячої води на виході котла здійснюється за рахунок регулювання витрати газу, що подається у топкову камеру шляхом впливу на регулювальний клапан.

На рис. 2.3 представлено графік перехідного процесу зміни температури гарячої води на виході з котла при зміні витрати газу на $\Delta F = 22 \text{ м}^3/\text{год}$ [3].

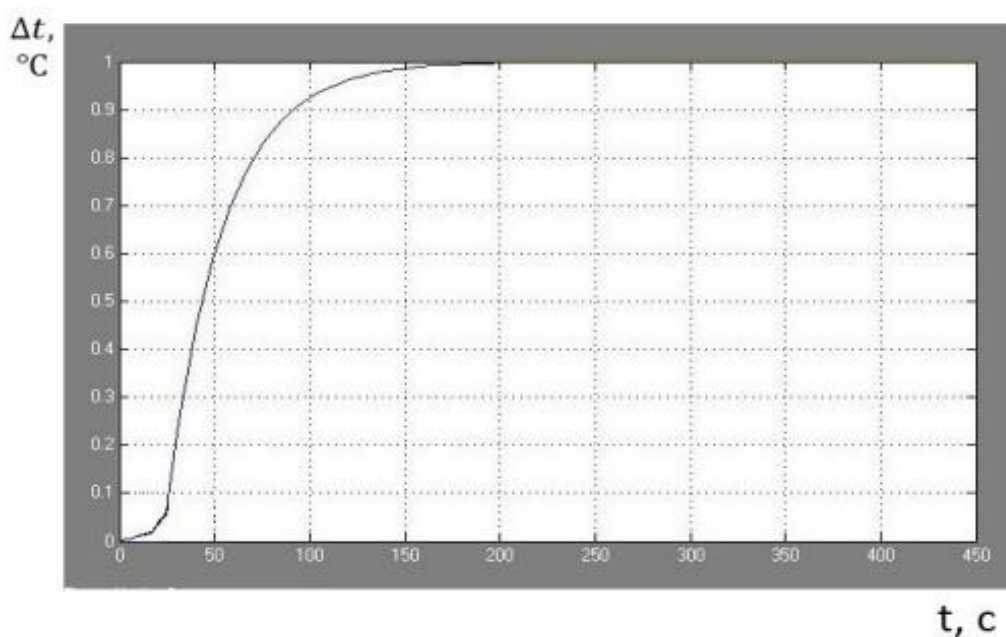


Рисунок 2.3 – Розгінна характеристика водогрійного котла

Дані для побудови розгінної характеристики наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Дані розгінних характеристики

t, с	0	20	40	50	60	70	80	90	100
$\Delta P, \text{МПа}$	0,000	0,005	0,049	0,060	0,063	0,079	0,086	0,090	0,093
t, с	150	200	210	225	230	250	270	290	330
$\Delta P, \text{МПа}$	0,098	0,091	0,099	0,100	0,1001	0,1001	0,1001	0,1001	0,1001

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Отримана розгінна характеристика відповідає перехідній характеристиці аперіодичної ланки з запізненням (рис. 3.4). У зв'язку з цим реальна залежність перехідного процесу $y(t)$ може бути апроксимована ділянкою запізнення τ та експоненційною функцією $y(t) = kx(1 - e^{-(t/T)})$.

Для побудови цієї характеристики було виконано низку додаткових побудов: проведено пряму a , яка проходить через усталене значення характеристики, а також дотичну пряму b [2,3].

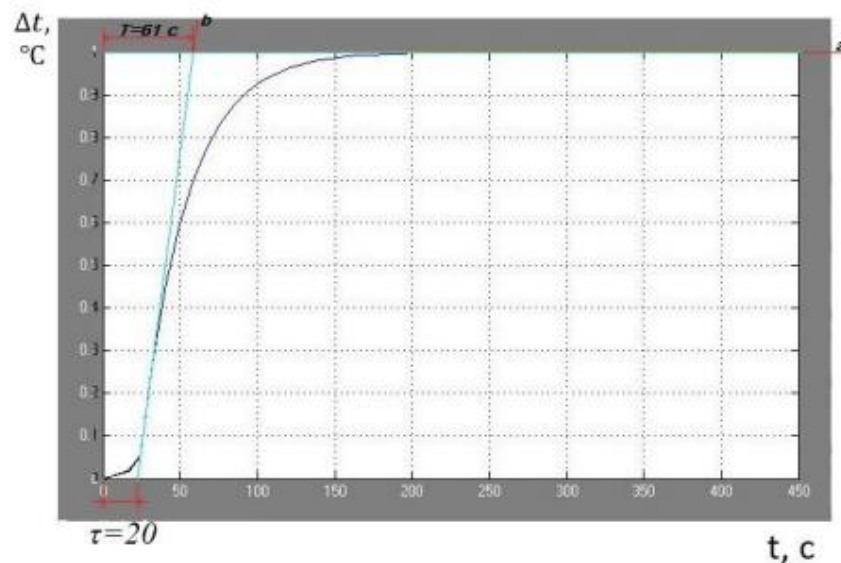


Рисунок 2.4 – Перехідна характеристика аперіодичної ланки із запізненням

Таким чином, розглянутий об'єкт можна описати як послідовне з'єднання двох елементів: ланки запізнення з часом τ та інерційної ланки першого порядку, що характеризується коефіцієнтом підсилення k і сталою часу T [3].

Загальна передаточна функція котла за каналом «витрата газу — температура води» матиме наступний вигляд:

$$W_4(t) = \frac{k_4}{T_4 t + 1} \cdot e^{-\pi} = \frac{20,46 \cdot 10^6}{61 t + 1} \cdot e^{-20 t} \quad (2.4)$$

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

2.2.2 Розрахунок оптимальних коефіцієнтів регулятора

Моделювання роботи системи автоматичного регулювання температури води на виході з котла буде виконано у програмному середовищі Matlab із використанням редактора Simulink. Для цього складено відповідну модель схеми(рис.2.5):

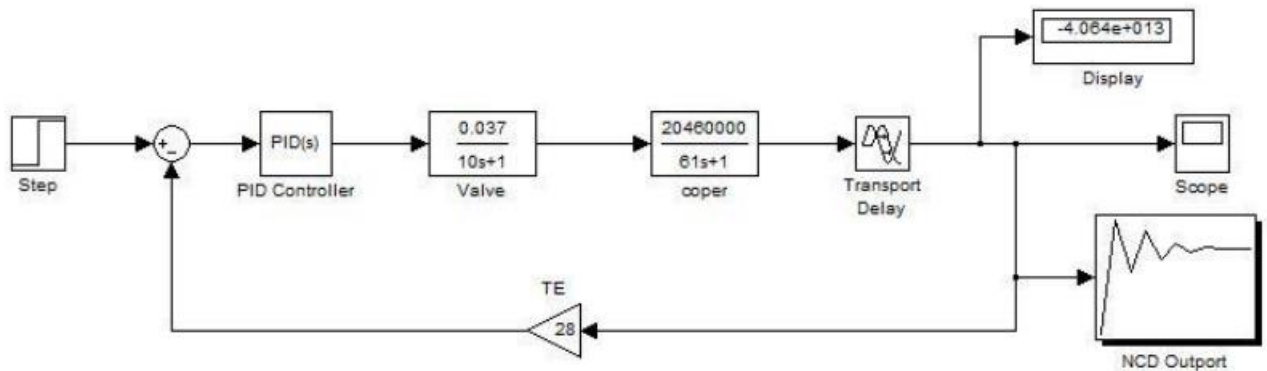


Рисунок 2.4 – Структурна схема САР температури води на виході котла

У якості задавального сигналу використано блок Step, що формує стрибкоподібну зміну вхідного сигналу. Оптимізація параметрів ПІД-регулятора виконується за допомогою блока NCD (рис. 2.5) [7].

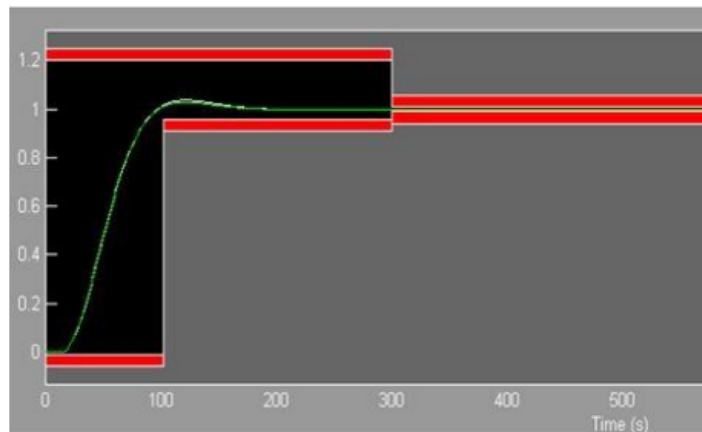


Рисунок 2.5 – Вікно блока NCD

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

```
kd =  
  
1.8192e+011  
  
ki =  
  
-1.5011e+013  
  
kp =  
  
2.0866e+011
```

Рисунок 2.6 – Оптимізовані значення коефіцієнтів ПІД-регулятора [7]

Отримані значення коефіцієнтів ПІД-регулятора вносимо у відповідний блок PID та виконуємо моделювання роботи системи керування (рис. 2.6) [7].

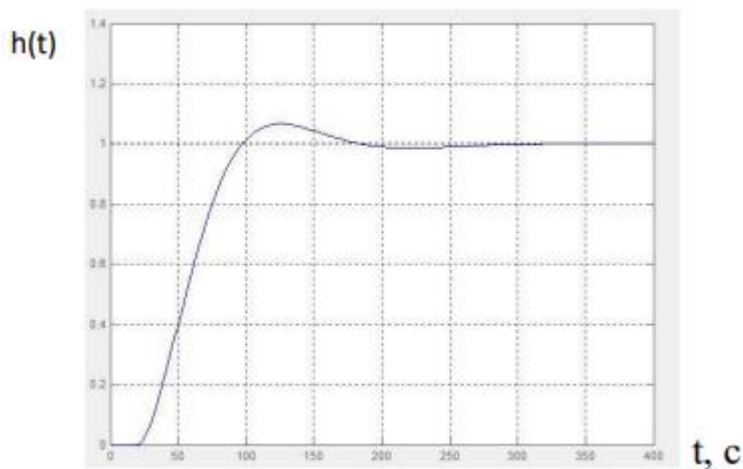


Рисунок 2.6 – Перехідна характеристика САР температури (температура – у відносних одиницях)

Система керування досягає усталеного значення, що свідчить про її стійкість. Основні показники якості перехідного процесу становлять: час регулювання $t = 319$ с, час запізнення $\tau = 20$ с, величина перерегулювання $\sigma = 14$ %, коливальність $n = 1$, усталена похибка дуст. = 0 % [3].

					БР.АКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Висновок до розділу

У другому розділі виконано розробку функціональної схеми автоматизації котельної установки, здійснено підбір оптимальних технічних засобів автоматизації та обладнання для водопідготовки, відповідно до особливостей даного типу котельні. Проведено розрахунок параметрів системи автоматичного регулювання та аналіз її роботи з використанням комп'ютерного моделювання.

Визначені параметри системи автоматичного регулювання дали змогу оцінити вхідні характеристики котельної установки до впровадження автоматизації з метою подальшого порівняльного аналізу.

					БР.АКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

3 ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1. Опис характеристик мікропроцесорного контролера Modicon M340

Для реалізації автоматизованого функціонування зазначених контурів використовується мікропроцесорний контролер Modicon M340 [5].



Рисунок 3.1 – Мікропроцесорний контролер Modicon M340

Програмований логічний контролер Modicon M340 вирізняється високою надійністю, потужністю та компактністю, що робить його оптимальним рішенням для підприємств, які працюють у таких галузях, як нафтогазова промисловість, пакувальне та обробне виробництво, текстильна та деревообробна промисловість, поліграфія, харчова промисловість, виробництво кераміки тощо.

Широкі можливості інтеграції з приводами Altivar та Lexium, графічними терміналами Magelis і модулями безпеки Preventa значно спрощують процес

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

налаштування та експлуатації обладнання виробництва Schneider Electric. Контролер Modicon M340 є ідеальним рішенням для Контролер Modicon M340 чудово підходить для спільного використання з програмованими логічними контролерами серій Modicon Premium і Modicon Quantum, забезпечуючи широкі можливості для автоматизації виробничих процесів та інфраструктурних систем із застосуванням технології Transparent Ready [5].

Стандартні та розширені процесорні модулі платформи автоматизації Modicon M340 забезпечують повноцінне керування всіма модулями, що встановлюються у шасі ПЛК, яке підтримує до 11 слотів для монтажу модулів дискретного вводу/виводу, аналогового вводу/виводу, а також спеціалізованих модулів.

У платформі доступні чотири варіанти процесорних модулів, які розрізняються за обсягом пам'яті, швидкістю обробки даних, типами та кількістю комунікаційних портів, а також максимально допустимою кількістю каналів вводу/виводу.

Кожен процесорний модуль комплектується картою пам'яті, яка використовується для:

- створення резервних копій програмного забезпечення (програм, символів і констант);
- активації стандартного веб-сервера через вбудований порт Ethernet класу B10 (Transparent Ready), залежно від конкретної моделі.

За необхідності стандартну карту пам'яті можна замінити на іншу карту, що підтримує аналогічні функції, за умови відповідності технічним вимогам:

- можливість створення резервних копій програмного забезпечення та активації веб-сервера;
- наявність 8 або 128 МБ вільної пам'яті з можливістю зберігання додаткових даних у вигляді файлової структури (каталогів та підкаталогів).

					БР.АКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Середовище розробки для Modicon M340

Для програмування процесорних модулів платформи автоматизації Modicon M340 застосовуються такі програмні продукти:

- інструментальна система Unity Pro Small;
- інструментальну систему Unity Pro Medium, Large або Extra Large, аналогічну до тієї, що використовується для програмування платформ автоматизації Modicon Premium і Modicon Quantum.

Опис процесорних модулів BMX P34 2020/2030 з вбудованим портом Ethernet TCP/IP

На лицьовій панелі вдосконалених процесорних модулів BMX P34 2020/2030 передбачено такі елементи індикації та роз'єми [5]:

Гвинтовий елемент для фіксації модуля у слоті монтажного шасі (позначення 0).

Індикаційний блок, який залежно від модифікації модуля може містити 8 або 10 світлодіодних індикаторів:

- RUN (зелений) — індикація роботи модуля (виконання програми);
- ERR (червоний) — індикація несправностей процесорного модуля або системи загалом;
- I/O (червоний) — індикація помилок у модулях вводу/виводу;
- SER COM (жовтий) — індикація обміну по послідовному інтерфейсу Modbus;
- CARD ERR (червоний) — відсутність або несправність карти пам'яті;
- ETH ACT (зелений) — активний обмін у мережі Ethernet TCP/IP;
- ETH STS (зелений) — поточний стан мережі Ethernet TCP/IP;
- ETH 100 (червоний) — індикація швидкості передавання даних у мережі Ethernet TCP/IP (10 або 100 Мбіт/с).

Живлення системи

Для кожного монтажного шасі BMX ХВР рр00 передбачено окремий модуль живлення. Такі модулі встановлюються у перші два слоти шасі (з маркуванням

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

CPS). Параметри необхідного живлення визначаються виходячи з кількості та типів встановлених модулів, тому для кожного шасі складається таблиця енергоспоживання з метою підбору оптимального модуля живлення типу BMX CPS ppp0 [5].

Конфігурація з одним монтажним шасі

Монтажні шасі BMX XBP pp00 використовуються як основа для побудови автоматизованої системи на платформі Modicon M340 у конфігурації з одним або кількома шасі.

Монтажні шасі виконують такі функції:

механічна: забезпечують установлення всіх модулів ПЛК (модулів живлення, процесорних, модулів дискретного та аналогового вводу/виводу, спеціалізованих модулів). Шасі можуть монтуватися на монтажну панель, пластину або DIN-рейку:

- усередині електрошкафів;
- на каркасах обладнання тощо.

Вибір модулів розширення

Для забезпечення необхідної кількості аналогових та дискретних каналів я обрав наступні модулі розширення:

- BMX AMI 0600 — модуль аналогових входів;
- BMX AMO 0800 — модуль аналогових виходів;
- BMX DDM 16025 — комбінований модуль дискретних входів/виходів.

3.2 Опис принципової електричної схеми зовнішніх з'єднань контролера Modicon M340 для автоматизації водогрійного котла

У даній роботі розглянуто фрагмент принципової електричної схеми зовнішніх з'єднань для контролера Modicon M340. Підбір приладів, представлених у цій схемі, здійснювався таким чином, щоб продемонструвати основні типи обладнання. Розглянуто підключення таких пристроїв [5]:

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

- температурний перетворювач Sitrans TH100;
- перетворювач різниці тисків САПФІР-22ДД;
- перетворювач надлишкового тиску САПФІР-22ДД;
- частотний перетворювач Danfoss VLT Micro Drive FC51;
- реле контролю полум'я з фотоприймачем СЛ-90-2 та модулем МФ-ФР202;
- реле тиску ДРД-5Н.

3.2.1 Опис і призначення давач-перетворювач тиску САПФІР-22-ДД

Вимірювальні перетворювачі серій Сапфір 22 ДД, Сапфір 22 МП та Сапфір 22 МПС (рис. 3.2) застосовуються у системах автоматичного контролю, регулювання й управління технологічними процесами. Вони забезпечують безперервне перетворення значень вимірюваних параметрів — надлишкового та абсолютного тиску, різниці тисків, розрідження або параметрів агресивних середовищ — у стандартизований уніфікований струмовий сигнал, придатний для дистанційної передачі [8].



Рисунок 3.2 – Давач САПФІР-22 ДД

Перетворювачі цього типу широко застосовуються у різних галузях промисловості, зокрема на вибухонебезпечних об'єктах газової, нафтової та хімічної промисловості, а також на атомних електростанціях. Крім того, такі пристрої експортуються для використання за кордоном.

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Датчик тиску Сапфір-22ДД здійснює перетворення вимірюваного параметра середовища у стандартизований уніфікований струмовий вихідний сигнал. Крім того, ці перетворювачі можуть застосовуватися для отримання лінійної залежності між витратою робочого середовища та вихідним сигналом. Прилади працюють у складі вторинної апаратури для відображення, реєстрації, регулювання, а також у системах автоматичного керування, централізованого моніторингу та інших пристроях промислової автоматики.

Принцип дії датчика Сапфір-22ДД базується на використанні тензоефекту у напівпровідникових матеріалах. Вимірюваний параметр надходить у вимірювальну камеру блоку датчика, де викликає деформацію чутливого елемента. Ця деформація призводить до зміни електричного опору тензорезисторів, розташованих у вимірювальному блоці. Електронний модуль перетворювача фіксує ці зміни та формує відповідний вихідний сигнал.

Чутливим елементом тензоперетворювача є пластина з монокристалічного сапфіру, на якій розміщені кремнієві плівкові тензорезистори. Пластина жорстко з'єднана з металевою мембраною тензоперетворювача.

Перетворювачі Сапфір-22ДД можуть виготовлятися як із зростаючою, так і зі спадною характеристикою вихідного сигналу: лінійною — для перепаду тиску або нелінійною — для витрати, залежно від специфікації замовника. Інші модифікації перетворювачів мають лише зростаючу характеристику вихідного сигналу.

Конструктивно перетворювач Сапфір-22ДД складається з вимірювального блоку та електронного модуля. Останній однаковий для всіх моделей, а різниця полягає у типі вимірювального блоку. Залежно від діапазону вимірювань, застосовуються два варіанти: мембранний або мембранно-важільний.

Крім цього, перетворювачі різниці тиску при використанні у поєднанні з блоком вираження кореня БИК-1 дозволяють отримати лінійну залежність між вихідним сигналом і витратою вимірюваного середовища [8].

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Перетворювач має високу сейсмостійкість і здатний витримувати сейсмічні навантаження до 9 балів на висоті 20 метрів.

Прилади цього типу призначені для роботи у складі вторинних реєструвальних, відображальних, регулювальних пристроїв та іншої автоматизованої апаратури, яка працює з уніфікованим вихідним сигналом постійного струму у діапазонах 0–5 мА, 0–20 мА або 4–20 мА.

Застосування перетворювача у вибухонебезпечних умовах заборонено.

При замовленні такого пристрою необхідно зазначити: умовне позначення перетворювача та технічні умови (ТУ 25-02.720136-83).

Приклади оформлення позначення перетворювачів у технічній документації або при їх замовленні:

Перетворювач вимірювальний різниці тисків Сапфір–22ДД, модель 2420, з фланцями з нержавіючої сталі 08Х18Г8Н2Т, кліматичне виконання УХЛ 3.1, діапазон робочих температур від +1 до +80 °С, з точністю $\Delta d = \pm 0,25 \%$, верхня межа вимірювання — 6,3 кПа, вихідний сигнал із зростаючою характеристикою 0–5 мА, оснащений монтажними фланцями та різьбовим з'єднанням К 1/4" із вентильним блоком:

Сапфір-22М-ДД-2420-02-УХЛ 3.1-0.25/6.3 кПа-0.5-К 1/4-В, температура +1...+80 °С, ТУ 25-02.720136-83.

Перетворювач вимірювальний залишкового тиску Сапфір–22ДД, модель 2161, з мембраною з титаново-сплавного матеріалу, корпусом із нержавіючої сталі 08Х18Г8Н2Т, кліматичне виконання УХЛ 3.1, діапазон температур +1...+50 °С, точність $\Delta d = \pm 0,25 \%$, верхня межа вимірювання — 10 МПа, вихідний сигнал 0–5 мА, виконання з ніпельним з'єднанням:

Сапфір-22ДД-2161-11-УХЛ 3.1-0.25/10 МПа-0.5, ТУ 25-02.720136-83.

Кожний перетворювач має регулювання діапазону вимірювання і може бути налагоджений на будь-яку верхню межу вимірювання, яка вказана для даної моделі.

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Межі допустимої основної похибки Δd для перетворювача з нижньою межею діапазону вимірюваного параметра, що дорівнює нулю, виражаються у відсотках від нормованого значення та наведені у таблицях 1, 2 та 3 [5].

У якості нормованого значення приймається:

- для перетворювача Сапфір-22ДД — сума абсолютних значень верхніх меж вимірювання залишкового тиску та розрідження;
- для інших типів перетворювачів — верхня межа вимірюваного вхідного параметра.

Після зміни налаштувань перетворювача на будь-яку верхню межу вимірювання, передбачену для конкретної моделі, значення основної похибки та варіації вихідного сигналу не перевищує відповідних значень Δd , визначених для відповідних меж вимірювання.

Залежність між вихідним сигналом та вимірюваним параметром визначається за наступними формулами [8]:

- для перетворювача Сапфир – 22ДД

$$I_p = \frac{P}{P_{\max}} (I_{\max} - I_{\min}) + I_{\min}; \quad (3.1)$$

- для перетворювача Сапфір-22ДД:

$$I_p = \frac{P_{\text{розр.мах}} - P}{P_{\text{розр.мах}} + P_{\text{вим.мах}}} (I_{\max} - I_{\min}) + I_{\min}. \quad (3.2)$$

де I_p - розрахункове значення вихідного сигналу, мА;

I_{\max} – найбільше значення вихідного сигналу, мА;

I_{\min} – найменше значення вихідного сигналу, мА;

P – значення вимірюючого тиску, кгс/см², Па, кПа, МПа;

P_{\max} -, верхня межа вимірювань вимірюючого тиску, кгс/см², Па, кПа, МПа;

$P_{\text{розр.мах}}$ – верхня межа вимірювань залишкового тиску, кгс/см², Па, кПа, МПа;

Підставимо числові значення в формули 3.8 та 3.9:

- для перетворювача Сапфір-22ДД

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

$$I_p = \frac{13}{13} (20-4)+4=20, \text{ мА};$$

- для перетворювача Сапфир-22ДД

$$I_p = \frac{-30 - 30}{-30 + 90} (20 - 4) + 4 = 20, \text{ мА}.$$

Відповідно, вихідний сигнал досягає свого максимального значення при верхній межі вимірюваного параметра.

Перетворювач отримує живлення від джерела постійного струму з відповідною напругою $36 \pm 0,72$ В. Дозволяється живлення перетворювача із вихідним струмовим сигналом у діапазоні 4–20 мА від джерела постійного струму з напругою від 15 до 42 В. При цьому допустимі межі напруги живлення залежать від значення навантажувального опору, який розраховується за відповідною формулою:

$$R_n = \frac{U - U_{\min}}{I_{\max}}, \quad (3.3)$$

де U – напруга живлення, В; $U_{\min} = 15$, В; $I_{\max} = 20$, мА; R_n – навантажуючий опір, кОм.

$$R_n = \frac{24 - 15}{20} = 0,45, \text{ кОм}.$$

Потужність перетворювача Сапфир-22ДД із вихідним сигналом 4–20 мА не перевищує 1 Вт.

Зміна навантажувального опору під час вимірювання вихідного сигналу відбувається в межах 100–1000 Ом (для сигналу 20 мА) або 200–2500 Ом (для сигналу 5 мА), при цьому відхилення не перевищує $\pm 0,25$ % діапазону вихідного сигналу.

Вплив температури навколишнього середовища на зміну вихідного сигналу визначається у відсотках від діапазону сигналу на кожні 10 °С за відповідною формулою:

$$\gamma_t = 0,7\gamma + 0,3\gamma \frac{P_{\max}}{P_i} \quad (3.4)$$

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

де P_{\max} – максимальна межа вимірювань для даної моделі, кгс/см₂;

P_i – дійсне значення верхньої межі вимірювань, кгс/см₂;

$\gamma = \pm 0,25\%$, для перетворювача із значенням Δd рівним 0,25.

$$\gamma_t = 0,7 \times (\pm 0,25) + 0,3 \times (\pm 0,25) \frac{16}{13} = \pm 0,3.$$

3.2.2 Принцип роботи перетворювача Сапфір-22ДД

Перетворювач складається з вимірювального блоку та електронного модуля. Всі моделі перетворювачів мають уніфікований електронний пристрій, відмінності стосуються лише конструкції вимірювального блоку [8].

Вимірюваний тиск впливає на мембрану (позиція 6), яка через рідинний прошарок передає зусилля на мембрану тензоперетворювача, викликаючи її деформацію і відповідну зміну опору тензорезисторів.

Електронний модуль зібраний на трьох платах (позиції 4, 5, 13 — рис. 3.3), розміщених у спеціальному корпусі (позиція 3), закритому ущільненими кришками (позиції 2 і 6).

Для підключення передбачено сальниковий кабельний ввід (позиція 11), клемну колодку (позиція 19), гвинт для під'єднання екрана (позиція 1) та болт для заземлення корпусу (позиція 12).

Регульовальні елементи включають коректори (позиції 9 та 10) для точного налаштування діапазону та нуля вихідного сигналу. Перемички (позиції 16, 17) використовуються для ступеневого зсуву нуля та налаштування діапазону, а перемички (позиції 14 і 15) — для зміни напрямку зміщення нуля.

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Якщо це неможливо, при вимірюванні тиску газу у нижніх точках лінії потрібно передбачити встановлення відстійних посудин, а при вимірюванні тиску рідин у верхніх точках — газозбірників.

У разі наявності газозбірників або відстійних посудин у з'єднувальних лініях, у них необхідно передбачити встановлення пристроїв для продування трубопроводів.

Для підключення з'єднувальних ліній до перетворювача рекомендується встановлювати два запірних вентиля або триходовий кран. Це спрощує процедуру відключення перетворювача від технологічного процесу, забезпечує можливість з'єднання з атмосферою та полегшує періодичний контроль відповідності вихідного сигналу нульовому значенню вимірюваного тиску.

Монтаж перетворювача до з'єднувальної лінії здійснюється за допомогою привареного ніпеля або через монтажний фланець. Ущільнення різьбових з'єднань виконується з урахуванням властивостей вимірюваного середовища — із застосуванням фторопластової стрічки або фаолітової замазки.

До модуля аналогових входів ВМХ АМІ 0800 підключаються сигнальні кабелі від п'яти перетворювачів різниці тисків Сапфір-22ДД та двох температурних перетворювачів Sitrans ТН100.

До модуля ВМХ АММ 0600 підводяться кабелі керування від виконавчих механізмів типу МЕО.

Живлення контролера Modicon М340, а також модулів ВМХ АМІ 0800, ВМХ АММ 0600 та ВМХ DDM 16025 здійснюється від джерела постійного струму з напругою 24 В, яка подається від блоку живлення СРС 2000.

Вимірювання температури виконується за допомогою термоперетворювачів опору Siemens ТН100, які перетворюють сигнал з термодатчиків у стандартизований струмовий сигнал 4–20 мА. Схема підключення такого термоперетворювача наведена на рис. 3.4 [8].

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

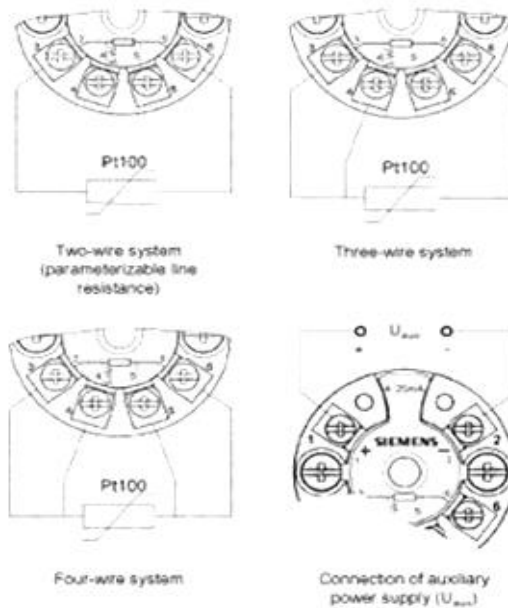


Рисунок 3.4 – Схема підключення термометра опору ТН100

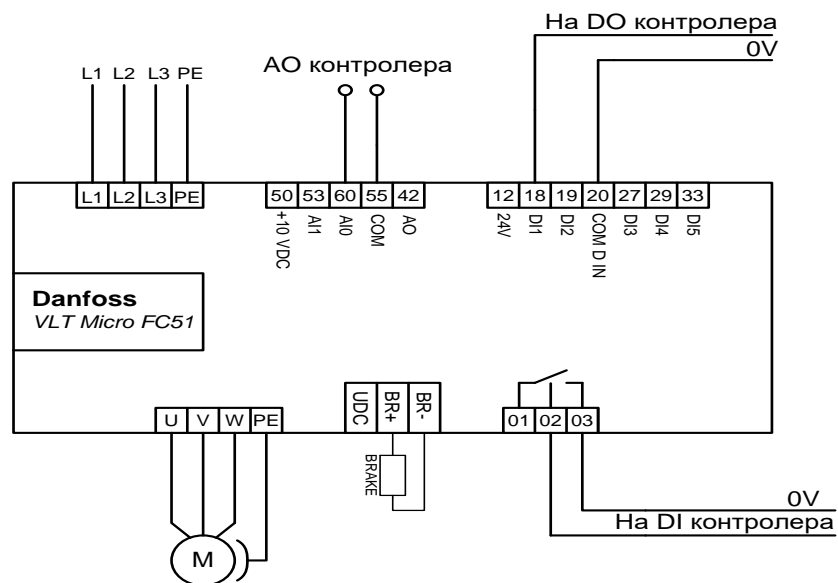


Рисунок 3.5 –Схема під'єднання частотного перетворювача Danfoss VLT Micro Drive FC51

Виконавчий механізм типу МЕО підключається за наступною схемою: на клеми L та N подається живлення змінного струму з напругою 220 В.

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

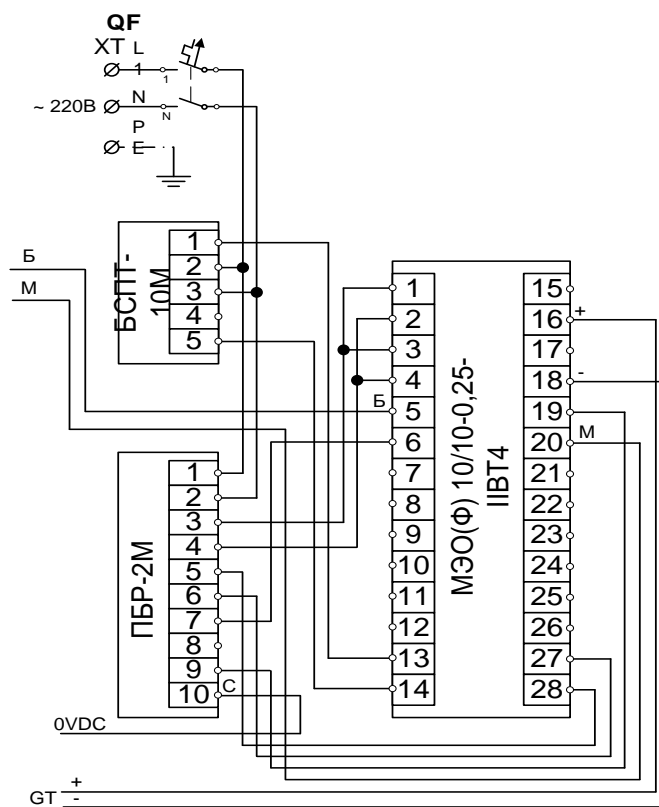


Рисунок 3.6 – Схема підключення МЗО-16/25-0,25-90

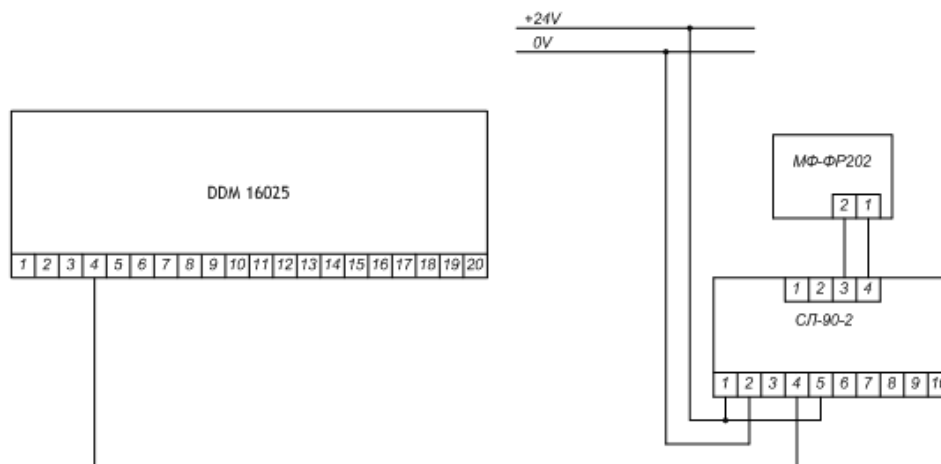


Рисунок 3.7 – Схема під'єднання фотодавача наявності полум'я

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

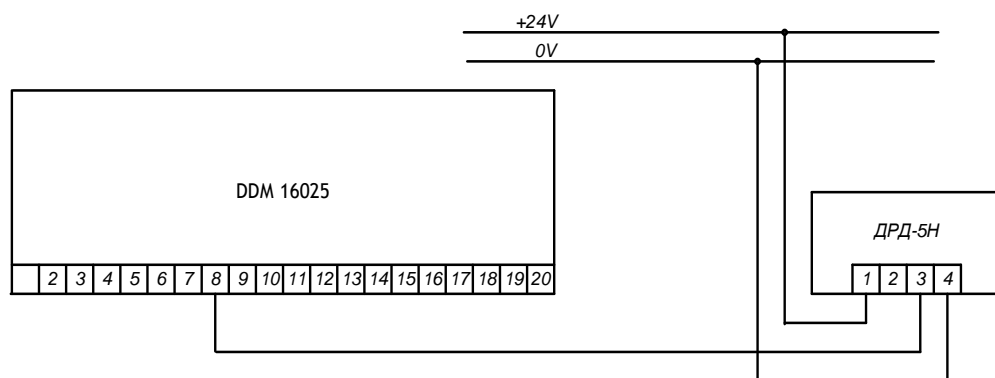


Рисунок 3.8 – Схема під'єднання давача реле тиску

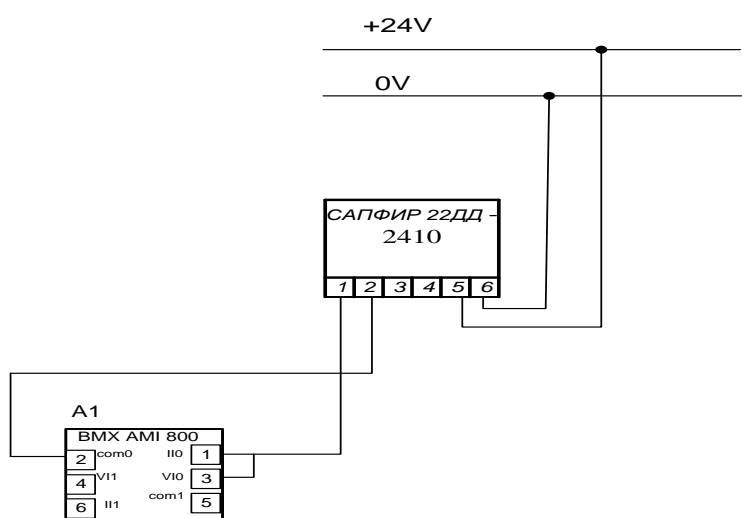


Рисунок 3.9 – Схема під'єднання перетворювача різниці тисків

Висновок до розділу

У третьому розділі наведено фрагмент принципової електричної схеми зовнішніх з'єднань для контролера Modicon M340. Підбір приладів для цієї схеми виконувався з метою продемонструвати основні типи обладнання, що використовуються у системі. У розділі розглянуто підключення таких приладів: температурний перетворювач Sitrans TH100 та перетворювач різниці тисків САПФІР-22ДД.

4 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

4.1 Розрахунок параметрів динамічних моделей каналом регулюючої дії і каналом збурення та перевірка її адекватності

У цьому розділі виконано дослідження системи автоматичного керування (САК) температурою води на вході до теплової мережі [2, 6].

Об'єктом керування (ОК) у даному випадку виступає подача палива. Вихідною величиною ОК є температура води, що надходить у мережу; вхідним впливом — зміна витрати палива на вході; збурюючим фактором — зміна витрати зворотної води (див. табл. 4.1).

Таблиця 4.1. – Вихідні параметри ОК

t, хв.	T, °C
0	18
3	20
6	26
9	32
12	41
15	50
18	56
21	62
24	68
27	72
33	78
37	80
40	81
42	81
45	81

Функція передачі каналу збурення має такий вигляд [3, 4]:

$$W_{OK}(s) = \frac{0.92}{(14.37s + 1)^2} \quad (4.1)$$

Вихідними даними для побудови моделі об'єкта керування (ОК) у каналі регулюючої дії слугує експериментальна розгінна характеристика температури води у мережі, отримана в результаті стрибкоподібної зміни положення регулювального органу на 70 %.

Якість регулювання в замкнутій системі автоматичного керування (САК) оцінюється за такими показниками перехідного процесу [5, 6]:

- допустима динамічна похибка регулювання $U_{дин}$ — це максимальне відхилення регульованого параметра у перехідному режимі від заданого значення. Величина цієї похибки відповідає амплітуді першого коливання регульованої величини у перехідному процесі ($U_{дин} = A_1$);
- допустимий час регулювання t_r — проміжок часу, починаючи з моменту впливу збурення на САК, протягом якого регульована величина досягає нового рівноважного стану із заданою точністю $\pm\Delta$ і надалі не виходить за ці межі. Цей показник характеризує швидкодію САК;
- допустиме перерегулювання регульованої величини φ — відношення другої амплітуди A_2 до першої A_1 , виражене у відсотках, коли ці коливання спрямовані у протилежні сторони:

$$\varphi = \frac{A_2}{A_1} \cdot 100\%$$

Допустимий коефіцієнт зникання ψ [4]:

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1}$$

Допустимий час першого узгодження перехідного процесу $t_{пс}$ — це час, після якого регульована величина вперше досягає свого усталеного значення.

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Цей показник також відображає швидкість протікання процесу на початковій стадії.

Допустимий час досягнення першого максимуму - t_{\max} .

Вимоги до якості процесу регулювання:

Допустиме максимальне динамічне відхилення $\Delta 1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$;

Допустима похибка регулювання = $2 \text{ }^\circ\text{C}$;

Допустимий час регулювання $t_p = 30 \text{ хв}$.

Для розрахунку системи автоматичного регулювання даного контуру необхідно визначити математичну модель об'єкта керування (ОК). Модель об'єкта регулювання, яка використовується для визначення оптимальних параметрів налаштування регулятора, приймається у вигляді передаточної функції [6].

Побудова математичної моделі виконується на основі експериментальної розгінної кривої, знятої безпосередньо на об'єкті, яка демонструє зміну температури води на виході з котла при зміні положення регулюючого органу (РО) на 70 %.

Експериментальна розгінна крива об'єкта керування за каналом «витрата газу — температура води у мережі» представлена на рис. 3.1.

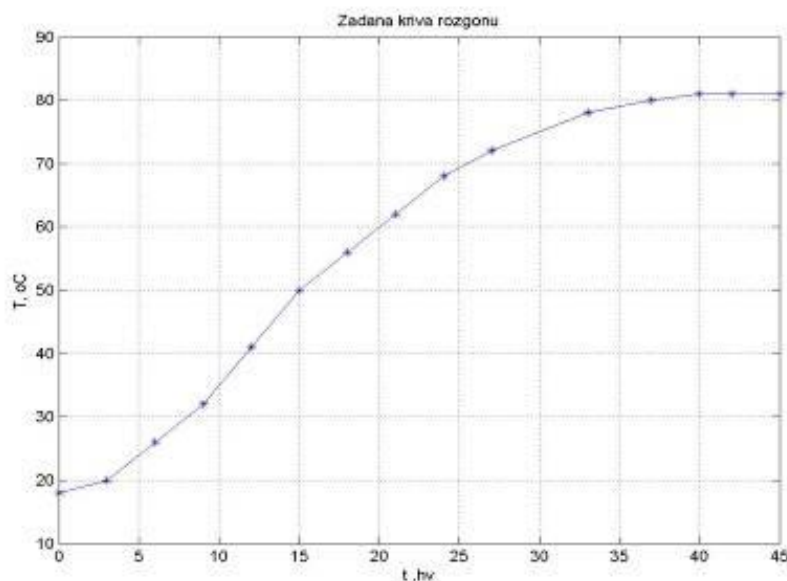


Рисунок 4.1 – Експериментальна крива розгону об'єкту керування по каналу витрати газу-температура води в мережу [4]

Програма у середовищі Matlab, призначена для побудови експериментальної розгінної кривої [8]:

```
t= [0 3 6 9 12 15 18 21 24 27 33 37 40 42 45];  
T= [18 20 26 32 41 50 56 62 68 72 78 80 81 81 81];  
plot (t,T,'b-*'); grid;  
xlabel ('t,hv'); ylabel ('T, oC'); title ('Zadana kriva rozgonu');
```

Для зручності розрахунків експериментальну криву розгону ОК $y^e(t)$ нормуємо діленням її значень на максимальну зміну вихідної величини $\Delta y = y^e(\infty) - y_n$.

$$h^e(t) = \frac{y^e(t) - y_n}{\Delta y}$$

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

y_n - початкове (номінальне) значення керованої величини.

Програма в середовищі Matlab для побудови нормованої експериментальної кривої розгону [9]:

```
t= [0 1.9 10.9 21.9 29 39.7 54.1 61.3 72.1 82.9 97.3 125.6 150];  
T= [80 80 81.7 84.1 85.5 87.4 88.7 89.1 89.5 89.7 89.9 89.95 90];  
T_n=min (T);  
dT=max (T) - T_n;  
dy=20;  
h_e= (T-min (T)) /dT  
plot (t,h_e,'-b'); grid; xlabel ('t, c'); ylabel ('h (t) ^e');  
title ('Normovana kriva rozgonu');
```

Результат виконання програми:

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

h_e 0 0.0317 0.1269 0.2222 0.3650 0.5079 0.6031 0.6984 0.7936
 0.8571 0.9523 0.9841 1 1 1.

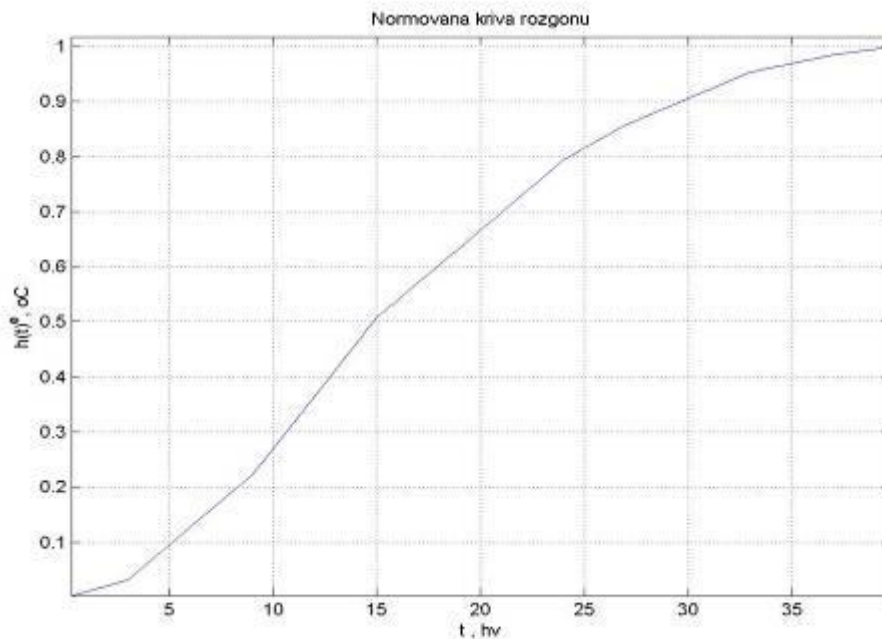


Рисунок 4.2– Нормована експериментальна крива розгону ОК

На основі форми експериментальної розгінної кривої обирається структура моделі об'єкта керування (ОК) та відповідна їй передаточна функція у вигляді послідовного з'єднання аперіодичних ланок.

Для заданого об'єкта керування обираємо передаточну функцію у такій формі [3]:

$$W(s) = \frac{1}{(Ts + 1)^n}, \quad (4.2)$$

де T - стала часу; n - кількість аперіодичних ланок.

У теоретичному вигляді передаточна функція для моделі (4.2) описується наступним рівнянням:

$$h(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{i!} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^i$$

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

З рівняння для різних значень n і заданих значень перехідної функції можна розрахувати відношення t/T . Так, наприклад, задаючись, $h(t)=0.5$ і $h(t)=0.9$ з рівняння можна знайти відношення t_{05}/T , t_{09}/T , де t_{05} і t_{09} – значення часу, що відповідають значенням функції передачі $h(t_{05})=0.5$ і $h(t_{09})=0.9$, а також розрахувати значення відношення t_{05}/t_{09} .

Таблиця 3.2 – Значення відношення t/T

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

На основі нормованої експериментальної перехідної характеристики визначаємо моменти часу $t_{0.5}$ та $t_{0.9}$, які відповідають значенням перехідної функції $h_c(t_{0.5}) = 0.5$ та $h_c(t_{0.9}) = 0.9$. Для даного випадку $t_{0.5} = 14.833$ с, $t_{0.9} = 29.7$

Розраховуємо відношення t_{05}/t_{09} : $t_{05}/t_{09}=0.4994$

перевіряють виконання умови $0.43 \leq t_{05}/t_{09} \leq 0.68$.

Слід зазначити, що розмірний коефіцієнт передачі об'єкта керування визначається на основі експериментальної розгінної кривої за відповідною формулою.

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y^e(\infty) - y_H}{\Delta x} \cdot \frac{[\text{розмірність вихідної величини}]}{[\text{розмірність вхідної величини}]}$$

де Δx - величина стрибкоподібної зміни вхідного впливу, що спричинила зміну вихідного параметра.

Усі розрахунки щодо визначення параметрів передаточної функції об'єкта керування та перевірки адекватності динамічної моделі виконуються у середовищі MATLAB. Для цього створено програму «model» [9].

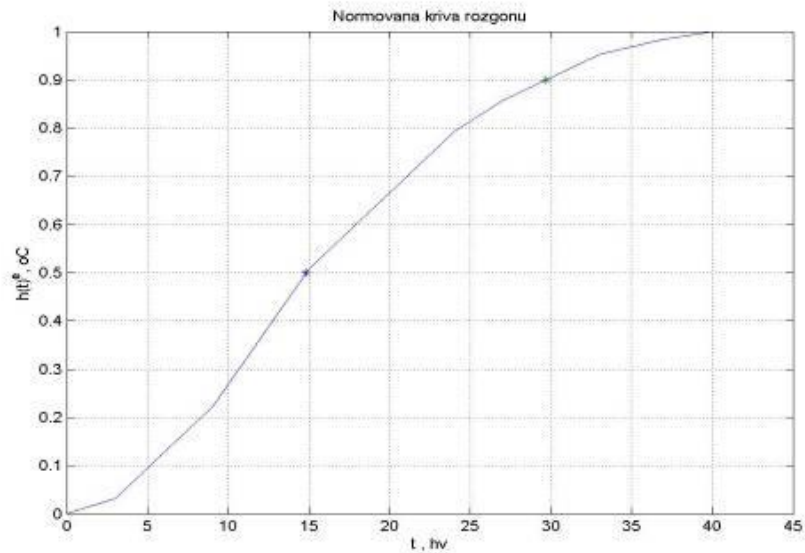


Рисунок 4.3–Нормована експериментальна крива розгону ОК з нанесеними значеннями часу t_{05} і t_{09} .

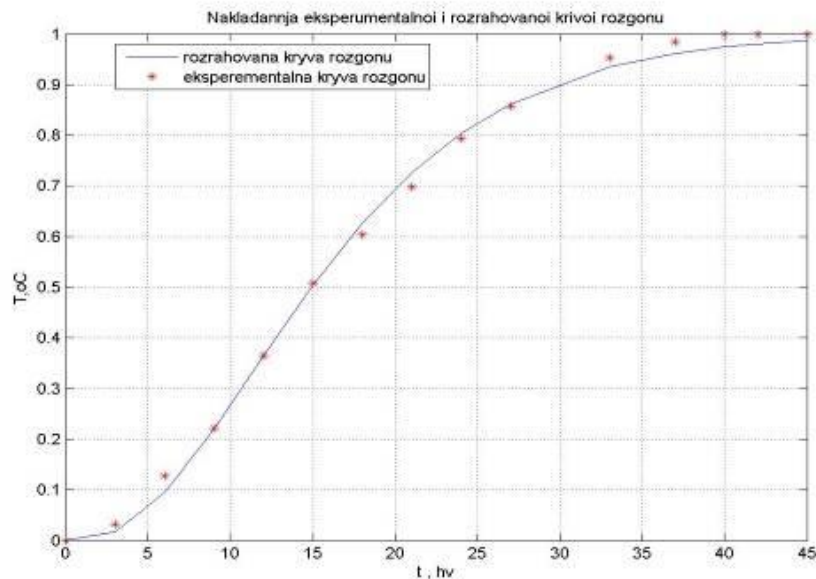


Рисунок 4.4 –Експериментальна та розрахована нормовані криві розгону по температурі води в мережу на виходіз котла, при зміні положення ОК на 70%.

На основі отриманих результатів розрахунку параметрів математичної моделі можна зробити висновок, що передаточна функція об'єкта керування має наступний вигляд [3,4]:

вигляді критерію запасу стійкості за умови використання розширених, а не стандартних частотних характеристик.

Розширена частотна характеристика системи з відомою передаточною функцією визначається шляхом підстановки у неї оператора Лапласа у вигляді такого виразу:

$$s = -m\omega \pm i\omega,$$

де m - ступінь коливальності, який характеризує запас стійкості; ω - кутова частота.

Амплітудно-фазовий критерій стійкості у вигляді критерію запасу стійкості за розширеними частотними характеристиками формулюється таким чином: якщо розширена амплітудно-фазова характеристика (РАФХ) розімкнутої системи автоматичного керування $W_s(m, i\omega)$ на частоті ω проходить через точку $(-1, i0)$, не охоплюючи її при вищих частотах, тоді корені характеристичного рівняння замкнутої системи будуть знаходитись у лівій півплощині комплексної площини, розташовуючись на променях $s = -m\omega \pm i\omega$ та всередині сектора, обмеженого цими променями.

Математично умова забезпечення необхідного запасу стійкості формулюється на основі амплітудно-фазового критерію стійкості Найквіста із застосуванням розширених частотних характеристик розімкнутої системи автоматичного регулювання.

$$W_{PC}(m, i\omega) = W_{OP}(m, i\omega) \cdot W_{AP}(m, i\omega) = -1,$$

де $W_{OP}(m, \omega) = A_{OP}(m, \omega) \cdot e^{i\varphi_{PC}(m, \omega)}$ - АФХ об'єкта керування;

$W_{AP}(m, i\omega) = A_{AP}(m, \omega) \cdot e^{i\varphi_{AP}(m, \omega)}$ - АФХ регулятора;

$A_{OP}(m, \omega)$, $A_{AP}(m, \omega)$ - розширені амплітудно-частотні характеристики об'єкта регулювання та регулятора;

$\varphi_{OP}(m, \omega)$, $\varphi_{AP}(m, \omega)$ - Розширені фазочастотні характеристики об'єкта регулювання та регулятора. Враховуючи, що в розімкнутій САК об'єкт

									Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	БРАКП-33.00.00.000. ПЗ				

керування та автоматичний регулятор з'єднані послідовно, із відповідного виразу отримуємо систему рівнянь у такій формі:

$$\left. \begin{aligned} A_{OP}(m, \omega) \cdot A_{AP}(m, \omega) &= 1 \\ \varphi_{OP}(m, \omega) + \varphi_{AP}(m, \omega) &= -\pi \end{aligned} \right\}$$

Якщо розширена амплітудно-фазова характеристика розімкнutoї САК проходить через точку $(-1, i0)$, то звичайна амплітудно-фазова характеристика не охоплює цю точку, що вказує на наявність у системи запасу стійкості за амплітудою. σ , що вказує на наявність у системи запасу стійкості як за амплітудою, так і за фазою γ

Для розрахунку параметрів регулятора з урахуванням заданого запасу стійкості системи, насамперед задається необхідне значення ступеня коливальності $m_{зад}$.

Розрахунок параметрів налаштування ПІ-регулятора

Пропорційно-інтегральний регулятор (ПІ-регулятор) являє собою паралельне з'єднання пропорційної та інтегральної ланок, передаточна функція якого має такий вигляд:

$$W(s) = k_s + \frac{k_s}{T_{із}} \cdot \frac{1}{i} = k_s \left(1 + \frac{1}{T_{із}s} \right),$$

де k_s - коефіцієнт передачі регулятора; $T_{із}$ - час ізодрому.

Розрахунок параметрів налаштування ПІ-регулятора виконується у два етапи [7]:

1) На площині параметрів налаштування регулятора визначають межу області, що відповідає заданому запасу стійкості САК;

2) Із визначеної межі області заданого запасу стійкості обирають оптимальні значення параметрів налаштування регулятора. Під оптимальними розуміють такі параметри налаштування, які при заданому запасі стійкості САК забезпечують мінімальне значення обраного критерію оптимальності. У

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	БРАКП-33.00.00.000. ПЗ					

Використаємо спрощений графічний метод для визначення необхідних параметрів ω^* та ω^{**} .

Програма у середовищі Matlab для визначення необхідних значень: ω^* та ω^{**}

%знаходження w^* та w^{**}

```
clear,clc;
```

```
T=5.5691; m=0.3; k=0.9;
```

```
w= [0: 0.001: 0.5];
```

```
p=-m*w+i*w;
```

```
Wor=k. / (T. *p+1). ^3;
```

```
fi=phase (Wor);
```

```
l1=-pi/2+atan (m);
```

```
l2=-pi;
```

```
plot (w,fi,w,l1,w,l2); grid;
```

```
plot (w,fi, [0 0.5], [-pi/2+atan (m) - pi/2+atan (m)], [0 0.5], [-pi - pi]); grid;
```

```
xlabel ('w, rad/sec'); ylabel ('fi, rad');
```

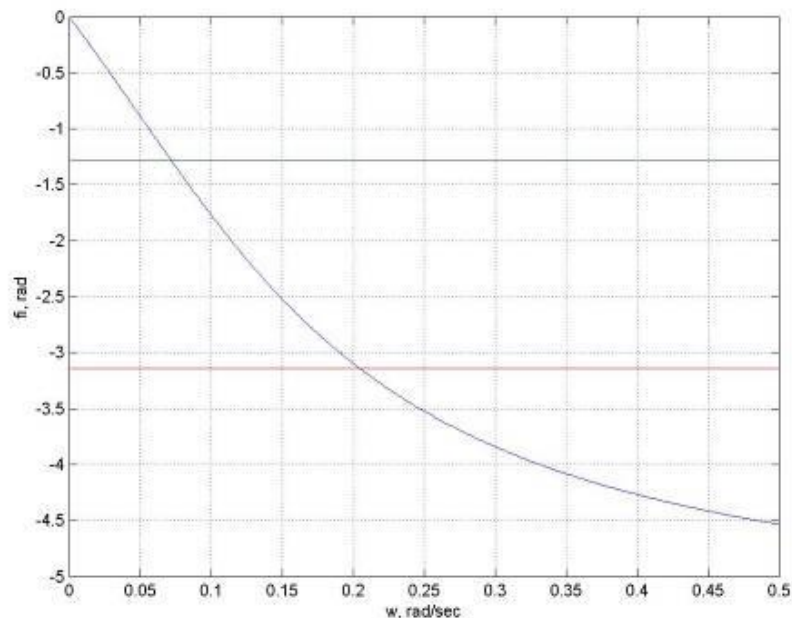


Рисунок 4.5 – Графік її фазо-частотної характеристики ОК

$$W^* = 0.072 \text{ рад/с}, W^{**} = 0.204 \text{ рад/с}$$

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Змінюючи частоту в діапазоні (ω^* ; ω^{**}) будує криву області границі запасу стійкості і з неї знаходжу оптимальні параметри настройки ПІ-регулятора [7].

Змінюючи частоту в діапазоні (ω^* ; ω^{**}) будує криву області границі запасу стійкості і з неї знаходжу оптимальні параметри настройки ПІ-регулятора.

Для заданого m в площині параметрів k_p , k_p/T_{iz} будуємо границю області запасу стійкості, з якої визначаємо оптимальні значення параметрів налаштування $(k_s)_{opt}$, $(k_s/T_{iz})_{opt}$, отримані при другій мінімальній інтегральній оцінці.

$$J_2 = \int_0^t [y(t) - y_{зад}(t)]^2 dt$$

де $y(t)$ - крива розгону замкнутої САК по регулюючій дії; $y_{зад}$ - задане значення регульованої величини.

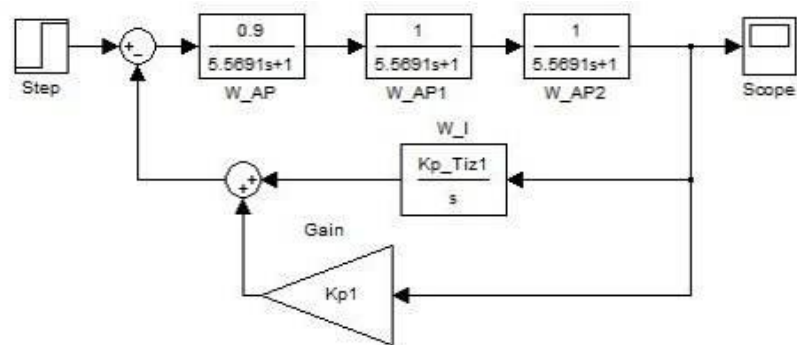


Рисунок 4.6 – Результат виконання програми: k_p_Tizopt 0.1213 k_{popt} = 1.9672

Програма в середовищі Matlab для знаходження оптимальних параметрів налаштування регулятора [8]

% 2-ga integralna oscinka

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

```

clear,clc;
w= [0.0718: 0.01: 0.2047];
T=5.5691; m=0.3; K=0.9;
p=-m. *w+i. *w;
W_op=K. / (T. *p+1). ^3;
Fi_op=phase (W_op);
A_op=abs (W_op);
gama=abs (Fi_op) +atan (m) - pi;
Kp_Tiz=- (w. * (m^2+1). *sin (Fi_op)). /A_op;
Kp= (-cos (Fi_op) - m. *sin (Fi_op)). /A_op;
for i=1: length (w)
Kp1=Kp (i);
Kp_Tiz1=Kp_Tiz (i);
sim ('PI_reg');
J2 (i) =sum (abs ( (x (:,2)). ^2));
end
figure (1)
[J s] =min (J2)
Kp (s)
Kp_Tiz (s)
Kp1=Kp (s)
Kp_Tiz1=Kp_Tiz (s)
plot (Kp,J2,Kp1,J,'r*'), grid
xlabel ('Kp'), ylabel ('J2');
sim ('PI_reg');
figure (2)
plot (tout,x (:,2)), gri

```

Отже, функція передачі ПІ-регулятора має такий вигляд [7]:

$$W_{PI}(s) = 1,967 + \frac{0,1213}{s}.$$

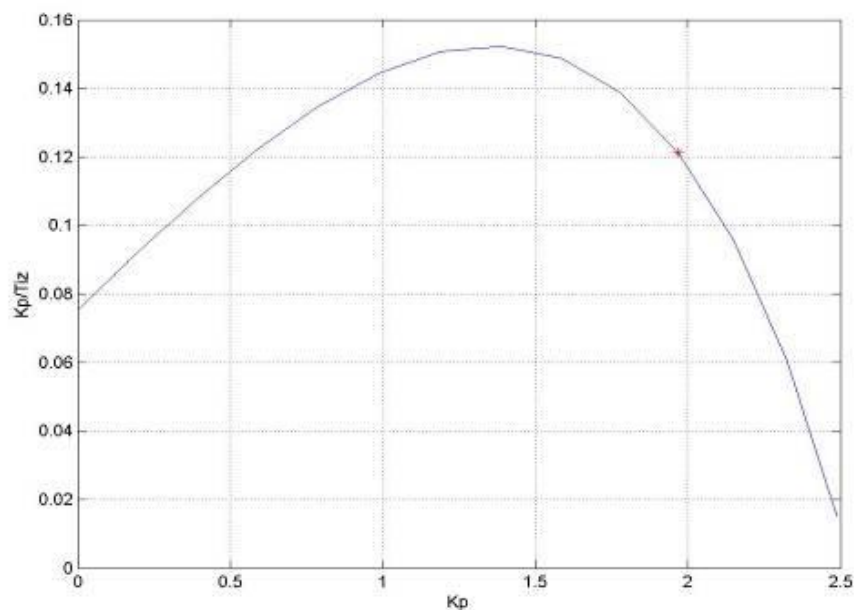


Рисунок 4.7 – Границя області заданого запасу стійкості САК температури води з ПІ-регулятором

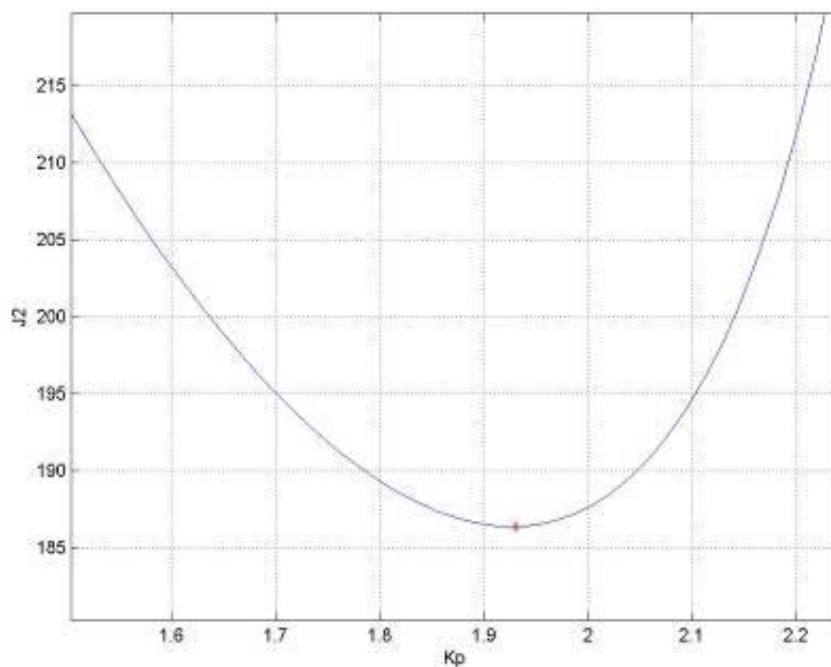


Рисунок 4.8 – Графік залежності значень другої інтегральної оцінки якості J_2 і параметром налаштування АР K_s

4.3 Дослідження перехідних процесів в САК при оптимальних параметрах налаштування ПІ-регулятора [7]

Моделювання автоматичної системи керування розрідженням газу перед циклонами виконується за допомогою ЕОМ із застосуванням методу структурного моделювання. Для моделювання АСК використовується програмний пакет Matlab. Синтез системи керування здійснюється шляхом використання типових структурних ланок [6].

Передаточна функція об'єкта керування має вигляд:

$$W_{\text{ок}}(s) = \frac{0,9}{(5,56s + 1)^3}.$$

Функція передачі за збуренням:

$$W_{\text{ок}}(s) = \frac{0,92}{(14,37s + 1)^2}.$$

Функція передачі ПІ-регулятора:

$$W_{\text{ок}}(s) = 1,96 + \frac{0,12}{s}.$$

Виконаємо моделювання структурної схеми процесу керування в середовищі Simulink із використанням знайдених оптимальних параметрів [6]:

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

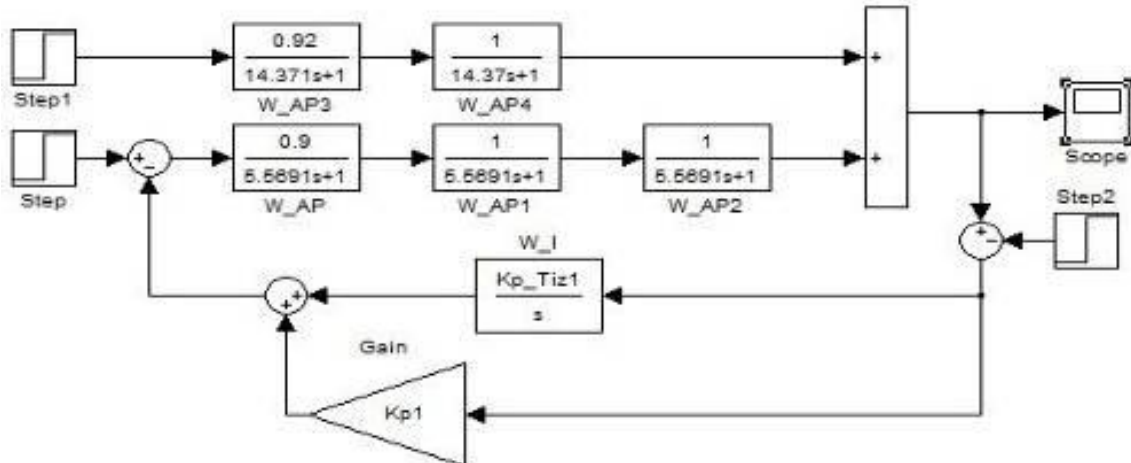


Рисунок 4.9 – Структурна схема моделювання САК, реалізована в середовищі
SIMULINK

Максимальне динамічне відхилення $A_1 = 5.7 \text{ }^\circ\text{C}$ — відповідає вимогам.

Час регулювання $t_p = 29$ хв при допустимій похибці $\Delta = \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ — задовольняється.

Час першого узгодження перехідного процесу $t_{pc} = 29$ хв.

Час досягнення першого максимуму $t_{max} = 18$ хв.

Таким чином, вимоги до якості регулювання виконано.

Максимальне динамічне відхилення $A_1 = 2.2 \text{ }^\circ\text{C}$ — відповідає вимогам ($A_1(\text{задане}) = 10 \text{ }^\circ\text{C}$).

Час регулювання $t_p = 24$ хв при допустимій похибці $\Delta = \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ — задовольняється.

Час першого узгодження перехідного процесу $t_{pc} = 24$ хв.

Час досягнення першого максимуму $t_{max} = 19$ хв.

Отже, вимоги до якості регулювання виконуються.

Максимальне динамічне відхилення $A_1 = -1.1 \text{ }^\circ\text{C}$ — відповідає вимогам ($A_1(\text{задане}) = 10 \text{ }^\circ\text{C}$).

Перерегулювання регульованої величини $\varphi = (0.2 / 1.1) \times 100 = 18 \%$.

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	БРАКП-33.00.00.000. ПЗ					

Ступінь загасання $\psi = (1.1 - 0.2) / 1.1 = 0.18$.

Час першого узгодження перехідного процесу $t_{pc} = 24$ хв.

Час досягнення першого максимуму $t_{max} = 21$ хв.

Таким чином, вимоги до якості процесу керування виконуються.

Висновки до розділу

На основі експериментальної розгінної кривої та встановлених вимог до якості процесу регулювання було виконано такі кроки:

- побудовано розрахункову розгінну криву, результати якої порівняно з експериментальною кривою, при цьому отримано зведену похибку у розмірі 3.1914 %;
- обрано одноконтурну структуру системи автоматичного регулювання та розраховано параметри налаштування для ПІ-регулятора.

У результаті дослідження перехідного процесу САК з оптимальними параметрами ПІ-регулятора при регулюючій дії у вигляді 70 % зміни положення регулюючого органу (РО), зроблено висновок, що ПІ-регулятор забезпечує якісний процес регулювання із наступними показниками:

максимальне динамічне відхилення $A_1 = 6.1$ °С (що відповідає вимогам при $A_{1(задане)} = 10$ °С);

час регулювання $t_p = 29$ хв при встановленій похибці $\Delta = \pm 2$ °С (що задовольняє вимогу $t_{p(задане)} = 30$ хв).

					БР.АКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконаної роботи було розроблено оптимізовану функціональну схему автоматизованої системи керування водогрійним котлом, визначено та обґрунтовано склад відповідних технічних засобів автоматизації. Реалізовано програмне забезпечення для мікропроцесорного контролера Modicon M340, а також сформовано схему принципів електричних з'єднань зовнішніх контурів між контролером і вибраними елементами системи автоматизації.

Застосування мікропроцесорної техніки в контурі автоматичного регулювання дає змогу підвищити ефективність керування, зменшити витрати електроенергії та трудових ресурсів, а також мінімізувати вплив суб'єктивного (людського) фактора на роботу системи.

На основі проведених розрахунків і моделювання було визначено зміну температури води на виході з котла, яка подається споживачам. Аналіз динамічних характеристик системи автоматичного керування із застосуванням ПІ-регулятора показав, що за оптимально підібраних параметрів регулятор забезпечує стабільний та якісний режим роботи, що відповідає встановленим критеріям якості регулювання.

					БР.АКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ЛІТЕРАТУРУ

1. Принцип роботи водогрійного котла [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfiles.net/preview/5734563/>
2. Глущенко О. Л. Котельні установки промислових підприємств: конспект лекцій / Глущенко О.Л. – Кам'янське: ДДТУ, 2019 – 103 с.
3. Горбійчук, М. І. Теорія автоматичного керування. Лінійні системи. [Текст]: лаб. практикум / М. І. Горбійчук, Л. Я. Чигур. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 64 с.
4. Горбійчук М.І. Автоматизація технологічних процесів та виробництв: метод. вказ. для викон. курс. проект. / М. І. Горбійчук, В. С. Борин, М. І. Когутяк. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. – 40 с.
5. Технічні засоби автоматизації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://studopedia.su/9_68606_lektsiya-tehnichni-zasobi-avtomatizatsii-osnovniponyattya-klasifikatsiya.html
6. Горбійчук М. І. Числові методи і моделювання на ЕОМ: [підручник] / Горбійчук М.І., Пістун Є.П. – Івано-Франківськ: «Факел», 2010. – 403 с.
7. Назаренко М.В. Теоретичні засади та принципи побудови моделей динамічних процесів та їх регуляторів: [монографія] / М.В.Назаренко. – Кривий Ріг: Діоніс (ФОП Чернявський Д.О.). – 2010. – 204 с.
8. Датчик тиску САПФІР-22 ДД. ТОВ НВФ «Стандарт-М». Режим доступу – <http://standart-m.com.ua/kipia/datchiki-davleniya/datchik-sapfir-22-di>
9. Програмування у середовищі Matlab. Режим доступу: <http://www.mathworks.com/discovery/matlab-mapreduce-hadoop.html>

					БРАКП-33.00.00.000. ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		