МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проєкт)

другого (бакалаврського) рівня освіти
(рівень вищої освіти)

на тему Проект автоматизації подачі води в умовах міських теплових мереж. Система автоматичного регулювання температурним режимом

Виконав: студент 4 курсу, групи 6.1743-с2
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Мендоса Плата А. А.

Керівник доцент, к. т. н. Барішенко О.М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент _____

Запоріжжя 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти другий (бакалаврський)
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ
Мендоса Плата Адольфо Адольфович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Проект автоматизації подачі води в умовах міських теплових мереж. Система автоматичного регулювання температурним режимом
керівник роботи Барішенко О. М. доцент, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «23» грудня 2025 року № 1833-с
2. Строк подання студентом роботи 14 червня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи технічна документація, технологічні інструкції, дані, отримані під час проходження виробничої практики
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз існуючого рівня автоматизації; розробка схеми інформаційних потоків; розробка технічного завдання; структура програмно-технічного комплексу; проєктування системи регулювання температурним режимом; розробка технічної документації; техніко-економічних показники; охорона праці, пожежна безпека, електробезпека, висновки, список використаних джерел
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): функціональна схема автоматизації, принципові електричні схеми, монтажно-комутаційна схема, схема зовнішніх з'єднань креслень) презентація роботи

6. Консультанти розділів роботи.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	доцент, Барішенко О.М.		
2	доцент, Барішенко О.М.		
3	доцент, Барішенко О.М.		
4	доцент, Барішенко О.М.		
5	доцент, Барішенко О.М.		
6	доцент, Барішенко О.М.		

7 Дата видачі завдання 14.04.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання стапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючого рівня автоматизації	21.04-27.04.26	
2	Розробка схеми інформаційних потоків	28.04-04.05.26	
3	Розробка технічного завдання	05.05-07.05.26	
4	Вибір структури та складу програмно-технічного комплексу	08.05-10.05.26	
5	Проєктування системи регулювання температури	08.05-14.05.26	
6	Розробка технічної документації	15.05-18.05.26	
7	Розрахунок системи автоматизації та показників її надійності	19.05-21.05.26	
8	Розрахунок техніко-економічних показників	22.05-23.05.26	
9	Розгляд питань охорони праці та техногенної безпеки	24.05-25.05.26	
10	Розробка презентації роботи, проходження нормконтролю, підготовка доповіді	26.05 – 15.06.26	

Студент _____ Адольфо МЕНДОСА ПЛАТА
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) _____ Олена БАРІШЕНКО
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Андрій КОЛОСОК
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Мендоса Плата А. А. Проект автоматизації подачі води в умовах міських теплових мереж. Система автоматичного регулювання температурним режимом

Кваліфікаційна робота бакалавра на здобуття вищої освіти за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка», науковий керівник О. М. Барішенко, Запорізький національний університет, Інженерний науково-навчальний інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем. Запоріжжя, 2026.

Метою роботи є проєктування автоматизованої системи У ході виконання роботи було проведено: комплексний аналіз тепло-розподільчого пункту як багатозв’язного об'єкта автоматизації; ідентифікацію динамічних характеристик контурів опалення та гарячого водопостачання (ГВП) за експериментальними кривими розгону; розрахунок оптимальних параметрів налаштування цифрових ПІ-регуляторів частотним методом; комп'ютерне моделювання перехідних процесів у середовищі MATLAB/Simulink за каналами «завдання-вихід» та «збурення-вихід»; обґрунтування комплексу технічних засобів (КТЗ) автоматизації на базі сучасного ПЛК Schneider Electric Modicon M221 та розробку принципової електричної схеми силової частини і ланцюгів керування; аналіз небезпечних виробничих факторів, розробку інженерних рішень з охорони праці та протиаварійного захисту; розрахунок техніко-економічних показників проєкту, який підтвердив високу рентабельність та окупність інвестицій за 2 роки і 1 місяць.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, шести розділів, висновків, переліку джерел посилання з 48 найменувань, викладена на 61 сторінці машинописного тексту, включаючи 18 рисунків, 3 таблиці та 9 аркушів графічного матеріалу.

Ключові слова: система автоматичного регулювання, тепловий пункт, гаряче водопостачання, опалення, промисловий контролер, моделювання

ЗМІСТ

ВСТУП 6
1. ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ 8
1.1 Технологічний опис об’єкта автоматизації 8
1.2 Тепловий-розподільчий пункт як об’єкт автоматизації 14
1.3 Постановка задачі проєктування системи автоматизації 17
2.1 Загальні вимоги до архітектури та функціонування системи 20
2.2 Вимоги до функцій та контурів автоматичного керування 21
2.3 Вимоги до інформаційного забезпечення та комерційного обліку 22
2.4 Вимоги до надійності, безпеки та аварійного захисту 22
2.5 Вимоги до інтерфейсу користувача та інтеграції в SCADA 23
3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ 24
4. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ 35
4.1 Функціональна схеми автоматизації управління 35
4.2 Вибір та обґрунтування технічних засобів САУ 38
4.4 Принципова схема електроприводу 45
5. ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 47
5.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів 47
5.2. Технічні та організаційні заходи з охорони праці 48
5.3. Пожежна та техногенна безпека 49
6. ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ 51
6.1. Розрахунок капітальних витрат на автоматизацію 51
6.2. Розрахунок річних експлуатаційних витрат 52
6.3. Розрахунок економічної ефективності та окупності 53
ВИСНОВКИ 55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 57

ВСТУП

Надійне та ефективне функціонування міських теплових мереж є одним із критично важливих елементів життєзабезпечення сучасного мегаполіса. В умовах постійного зростання вартості енергоресурсів, зношеності комунікацій та підвищення вимог до екологічності, традиційні підходи до керування теплопостачанням вичерпують свій ресурс. Однією з головних проблем централізованих систем є динамічна нестабільність гідравлічних та теплових режимів, яка призводить до перевитрати палива, аварійних ситуацій та нерівномірного розподілу тепла між споживачами.

Автоматизація процесів подачі води та впровадження систем автоматичного регулювання (САР) температурним режимом дозволяють вирішити ці проблеми комплексно. Сучасні засоби мікропроцесорної техніки, інтелектуальні датчики та запірно-регулювальна арматура з електроприводами дають змогу гнучко реагувати на зміну зовнішніх чинників (температури навколишнього середовища, добового коливання водоспоживання тощо). Це забезпечує не лише високу точність підтримання технологічних параметрів, але й суттєвий енергоощадний ефект, мінімізуючи вплив людського фактора. Таким чином, розробка САР подачі води та температурного режиму в міських тепломережах є актуальною інженерною та соціально-економічною задачею.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка системи автоматизації подачі води в умовах міських теплових мереж, а саме системи автоматичного регулювання температурним режимом для підвищення ефективності, надійності та енергоощадності міських теплових мереж.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати технологічний процес теплопостачання як об'єкт автоматизації, виявити основні збурення та дестабілізуючі фактори.

2. Обґрунтувати вибір структури системи автоматичного регулювання та технічних засобів автоматизації (контролерів, датчиків, виконавчих механізмів).

3. Розробити математичну модель контурів регулювання витрати води та температури в тепловій мережі.

4. Синтезувати закони регулювання (зокрема, ПІД-регулятори) та виконати розрахунок оптимальних параметрів їх налаштування.

5. Здійснити комп'ютерне моделювання розробленої САР для оцінки показників якості регулювання у динамічних режимах.

6. Обґрунтувати вибір комплексу технічних засобів автоматизації.

7. Оцінити техніко-економічну ефективність впровадження проєкту та розробити заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси транспортування теплоносія та розподілу теплової енергії в умовах міських теплових мереж.

Предмет дослідження – САР параметрами подачі води (тиск, витрата) та температурним режимом на основі сучасних мікропроцесорних контролерів та регулювальних органів.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань використано методи теорії автоматичного керування (для синтезу САР), методи математичного моделювання (для аналізу динаміки системи в середовищі MATLAB/Simulink), а також загальноінженерні підходи для розрахунку технологічного обладнання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у вдосконаленні алгоритмів сумісного регулювання витрати та температури мережної води, що дозволяє зменшити час перехідних процесів та мінімізувати перевитрату теплової енергії під час різких змін зовнішніх умов.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблений проєкт автоматизації може бути використаний під час реконструкції та модернізації діючих центральних теплових пунктів (ЦТП) або котелень міських тепломереж. Впровадження системи дозволить знизити аварійність, зменшити споживання електроенергії на привід насосів та оптимізувати витрати палива.

1. ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Технологічний опис об’єкта автоматизації

Тепловий пункт (ТП) – це комплекс технологічного обладнання та пристроїв, розташованих в окремому приміщенні, призначений для підключення внутрішніх систем теплоспоживання (опалення, гарячого водопостачання, вентиляції) до зовнішніх магістральних теплових мереж. ТП забезпечує керування режимами теплоспоживання, трансформацію параметрів теплоносія, контроль гідравлічних і теплових режимів, а також комерційний облік витрат енергоресурсів [21].



Рисунок 1.1 – Тепловий пункт

Основне призначення теплового пункту полягає у стабілізації та автоматичному підтриманні параметрів теплоносія (тиску, температури та витрати) на заданому рівні, що є критично важливим для надійної, безпечної та економічної експлуатації абонентських установок.

Склад обладнання ТП визначається видом первинного теплоносія:

1. При паровому теплоносії вузол комплектується пароросподільниками, редукційними пристроями, приладами контролю параметрів пари,

теплообмінниками (пароводяними), а також системами збору та перекачування конденсату (конденсатними баками та насосними агрегатами).

2. При водяному теплоносії основними елементами є водо-водяні теплообмінники, циркуляційні, підвищувальні та підживлювальні відцентрові насоси, регулювальна арматура, а також локальні пристрої протикорозійного захисту та запобігання утворенню накипу [21].

До базових технологічних завдань теплового пункту належать:

– трансформація параметрів теплоносія (зниження тиску та температури до безпечних значень);

– автоматичне регулювання та безперервний моніторинг параметрів технологічного середовища;

– розподіл теплової енергії за контурами споживання;

– захист систем споживача від аварійного підвищення параметрів мережної води (тиску та температури);

– облік витрат теплоносія та спожитої теплової енергії;

– надійне відсікання та ізоляція систем теплоспоживання в аварійних ситуаціях.

За масштабом обслуговування та локалізацією теплові пункти класифікують на:

1. Індивідуальні теплові пункти (ІТП). Призначені для забезпечення тепловою енергією одного споживача (будівлі або її частини). Зазвичай інтегруються у підвальних або технічних приміщеннях об'єкта.

2. Центральні теплові пункти (ЦТП). Обслуговують групу об'єктів (житлові квартали, мікрорайони або промислові комплекси). Переважно зводяться як окремі споруди.

3. Блочні теплові пункти (БТП). Являють собою компактні модульні установки заводської готовності, змонтовані на єдиній рамі [21]. Вони постачаються на об'єкт у вигляді готових збірних одиниць, що дозволяє суттєво

заощадити корисну площу та мінімізувати терміни монтажних робіт. БТП можуть функціонувати як у структурі ІТП, так і ЦТП.

Сучасний міський тепловий пункт забезпечує розподіл енергії за трьома основними напрямками споживання:

1. Система гарячого водопостачання (ГВП). Призначена для подачі споживачам води з нормативною температурою 55 – 60 °С. Залежно від гідравлічної структури системи ГВП поділяють на *відкриті* (безпосередній розбір води з тепломережі) та *закриті* (нагрів питної водопровідної води мережним теплоносієм у пластинчастих теплообмінниках) [22]. Закриті системи є пріоритетними для міських мереж завдяки високій санітарно-гігієнічній якості води та енергетичній ефективності.

2. Система опалення. Забезпечує компенсацію теплових втрат будівель для підтримання комфортної внутрішньої температури. Застосовують *залежні* схеми підключення (змішування води з подавального та зворотного трубопроводів за допомогою водоструминних елеваторів або змішувальних насосів) та *незалежні* схеми. У незалежних системах внутрішній контур будівлі гідравлічно ізольований від зовнішньої тепломережі за допомогою поверхневих теплообмінників, що унеможливлює вплив коливань тиску в магістралі на радіатори споживачів.

3. Система вентиляції. Використовується для підігріву припливного повітря у калориферах вентиляційних установок. Підключення також може виконуватися за залежним чи незалежним принципом.

Найбільш прогресивною конфігурацією є тепловий пункт із закритою двоступеневою системою ГВП та незалежним підключенням контуру опалення.

Технологічний процес транспортування та трансформації енергії в такому ТП здійснюється за двоконтурним принципом. Високотемпературний первинний теплоносій від джерела (ТЕЦ або котельні) проходить через магістральні теплові мережі великої довжини, де перед подачею піддається глибокій хімічній водопідготовці (деарація, зм'якшення, контроль pH) для

зниження корозійної активності та запобігання відкладенням всередині трубопроводів.

Потрапляючи в ТП, первинний теплоносій проходить крізь регулювальні клапани вузла автоматики, віддає тепло у каскад пластинчастих теплообмінників і повертається у зворотну магістраль джерела. У вторинному (ізольованому) контурі системи опалення циркуляційні насоси забезпечують безперервний рух внутрішнього теплоносія через будівлю. Будь-які втрати об'єму води у внутрішньому контурі через мікровитоки компенсуються автоматичним вузлом підживлення, що живиться з первинної мережі або водопроводу [21].

Паралельно холодніший потік водопровідної води спрямовується до насосної станції ТП, яка підвищує тиск до необхідного робочого рівня. Далі вода проходить через першу та другу ступені водонагрівачів ГВП, де безперервно нагрівається мережною водою і надходить у циркуляційний контур споживачів. Циркуляційні насоси ГВП підтримують постійний рух гарячої води в магістралі, забезпечуючи її миттєву подачу нормативної температури абоненту навіть у періоди мінімального водорозбору.

Для раціонального відпуску тепла в системах централізованого теплопостачання використовують три методи регулювання: якісний (зміна температури теплоносія при постійній витраті), кількісний (зміна витрати при постійній температурі) та якісно-кількісний [22].

На практиці на рівні джерела тепла застосовують центральне якісне регулювання за загальним температурним графіком. Проте через значну інерційність магістральних мереж та нерівномірність навантажень (суміщення опалення, вентиляції та ГВП) виникає потреба в обов'язковому впровадженні локального (місцевого) кількісного регулювання безпосередньо в теплових пунктах за допомогою САР [22].

Сучасні локальні САР параметрами теплоносія ТП функціонують на основі таких класичних принципів теорії автоматичного керування:

Регулювання за збуренням (принцип компенсації збурень): Корекція температури теплоносія у контурі опалення здійснюється превентивно за

заданим температурним графіком залежно від сигналів датчика температури зовнішнього повітря (погодозалежне керування).

Регулювання за відхиленням (зворотний зв'язок): Керуючий вплив на виконавчий механізм формується лише після виникнення неузгодженості між поточним значенням технологічного параметра (наприклад, температури ГВП або тиску) та заданою уставкою.

1. Комбіноване регулювання: поєднує компенсацію зовнішніх збурень (температури повітря, сонячної інсоляції, вітрового навантаження) з корекцією за відхиленням внутрішньої температури повітря у контрольних (реперних) приміщеннях об'єкта або за температурою зворотного теплоносія.

2. Програмне керування: зміна значень уставок регулятора у часі за заздалегідь визначеним алгоритмом (наприклад, перехід системи опалення в економний режим зі зниженням температури в приміщеннях у нічні години або у вихідні дні для адміністративних та промислових споруд).

Для реалізації ефективного термогідравлічного режиму та мінімізації енерговитрат автоматизований ТП повинен бути оснащений таким мінімальним комплектом засобів КВПіА та виконавчих механізмів:

– високоефективні пластинчасті теплообмінники (розбірні або зварні);

– циркуляційні та підвищувальні насосні агрегати, оснащені частотно-регульованими приводами (ЧРП);

– регулювальні дво- або триходові клапани з лінійними електроприводами на лініях подачі первинного теплоносія;

– комплекс первинних вимірювальних перетворювачів: датчики температури (зовнішнього середовища, прямої/зворотної магістральної та внутрішньої води), датчики тиску та електронні витратоміри;

– запірно-захисна арматура (швидкодійні відсічні клапани, зворотні клапани);

– програмований логічний контролер (ПЛК), що здійснює збір даних, реалізує алгоритми ПІД-регулювання технологічних контурів та забезпечує

інтеграцію ТП до верхнього рівня диспетчеризації (SCADA).

Впровадження повномасштабної автоматизації теплових пунктів дозволяє повністю виключити людський фактор, мінімізувати теплові втрати, оптимізувати витрати електроенергії на приводи насосів та гарантувати стабільне забезпечення абонентів тепловою енергією відповідно до поточних погодних умов [22].

Стрімкий розвиток обчислювальної техніки та засобів вимірювань зумовлює суттєве зростання обсягів технологічних даних у комунальній сфері [2]. Для прийняття ефективних управлінських рішень та оптимізації режимів роботи обладнання критично важливою є автоматизація технологічних процесів.

Попри значний досвід впровадження локальних АСУ ТП на комунальних підприємствах України, більшість із них розроблені різними підрядниками з використанням різнотипного обладнання та програмного забезпечення [23]. Головним недоліком такої децентралізації є відсутність інтеграції та передачі даних у системи верхнього рівня для наскрізного аналізу й глобальної оптимізації роботи об'єктів.

Впровадження сучасної інтегрованої архітектури керування дозволяє:

– автоматично керувати системами опалення, вентиляції та водопостачання;

– отримувати об'єктивну інформацію про стан мереж та оперативно сповіщати про позаштатні відхилення;

– контролювати максимальну кількість параметрів обладнання для економії енергоресурсів;

– оптимізувати витрати на споживання тепла, електроенергії, гарячої та холодної води;

– вести ретроспективний аналіз роботи обладнання та дій персоналу на основі баз даних.

Таким чином, автоматизація інженерних систем теплових пунктів є базовим інструментом для підвищення енергоефективності ЖКГ. Інтеграція

інформаційних потоків усіх підсистем в єдиний програмно-апаратний комплекс забезпечує оперативний доступ до даних, спрощує моніторинг і мінімізує експлуатаційні витрати підприємства [23].

1.2 Тепловий-розподільчий пункт як об’єкт автоматизації

Одним з головних елементів системи теплопостачання є тепло-розподільчий пункт, в якому здійснюється зв'язок між тепловою мережею і споживачами теплової енергії.

Тепло-розподільчий пункт виконує прийом теплоносія, його перетворення, розподіл між споживачами, здійснює облік теплоспоживання, автоматично забезпечуючи при цьому:

– необхідні параметри теплоносія в системах опалення та вентиляції;

– температуру води в системах гарячого водопостачання;

– узгодження і стабілізацію гідравлічних режимів в тепловій мережі і в системах теплоспоживання.

Всі ці завдання можна реалізувати за рахунок автоматизації теплорозподільчого пункту міста. Розглянемо технологічну схему теплового розподільчого пункту, яка показана на рисунку 1.2 [24]

Вихідні дані, що використовуються у проєкті, є умовними:

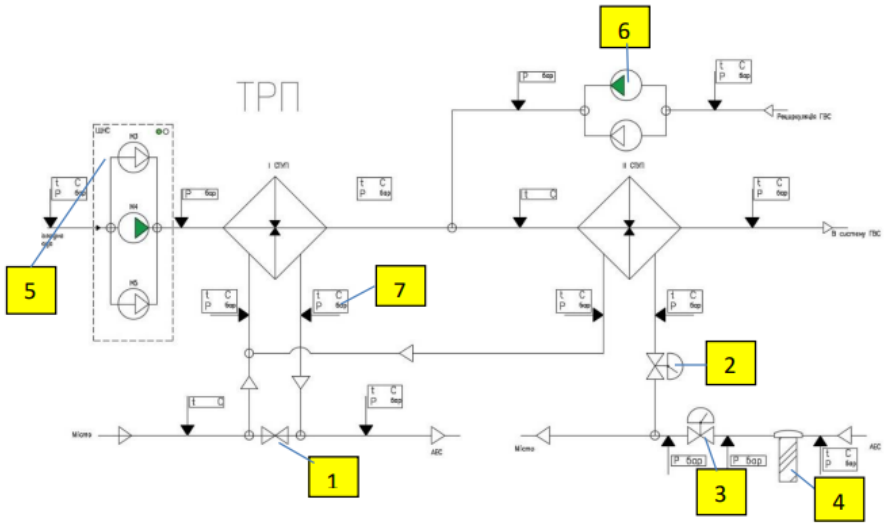
– загальна потужність теплового розподільчого пункту складає 4,07 МВт;

– точкою підключення є теплотраса діаметром Ду 200;

– температурний графік в зимовий період від 130 ° С до 70 ° С, в літній період від 77° С до 46 ° С

– перепад на теплопункті не менше 40 м вод. ст.

– мережева вода температурою від 70°С до 130 ° С згідно температурного графіка по трубопроводах прямої мережної води надходить з атомної станції на теплорозподільчий пункт.



1 – засувка; 2 – регулятор температури; 3 – регулятор тиску; 4 – фільтр; 5 – циркуляційний насос; 6 – рециркуляційний насос, 7 – датчики температури і тиску

Рисунок 1.2 – Технологічна схема роботи тепло-розподільчого пункту

За функціональним призначенням технологічну структуру теплорозподільчого пункту (ТРП) запропоновано розділити на чотири взаємопов'язані технологічні вузли, які з'єднані між собою трубопроводами та оснащені як індивідуальними, так і загальносистемними засобами автоматичного керування:

Вузол I – введення магістральної теплової мережі;

Вузол II – узгодження та стабілізації тисків (у зовнішній тепломережі та внутрішніх системах теплоспоживання);

Вузол III – приєднання системи гарячого водопостачання (ГВП);

Вузол IV – приєднання внутрішніх систем опалення.

Вузли введення теплової мережі та узгодження тисків є базовими та обов'язковими елементами будь-якого сучасного об'єкта теплопостачання. Зокрема, вузол узгодження тисків призначений для забезпечення роботи інженерного обладнання ТРП, абонентських систем теплоспоживання, а також зовнішніх тепломереж у стабільному, гідравлічно збалансованому та безаварійному режимах.

Інтеграція обладнання у вузлі узгодження тисків дозволяє вирішити такі технологічні завдання:

– автоматичне підтримання постійного перепаду тиску теплоносія на регулювальних органах (клапанах) систем теплоспоживання;

– обмеження тиску технологічного середовища в трубопроводах у межах, що є допустимими для міцності арматури, теплообмінників та радіаторів;

– гарантоване заповнення внутрішніх контурів теплоносієм та їх захист від спорожнення (дренажування);

– запобігання закипанню перегрітого теплоносія у верхніх точках (геодезичних відмітках) систем теплоспоживання;

– динамічне обмеження максимальної (граничної) витрати мережної води;

– здійснення автоматичного гідравлічного балансування суміжних ділянок теплової мережі.

Приготування гарячої води для господарсько-побутових та питних потреб у вузлі приєднання ГВП здійснюватиметься за закритою схемою. За такого підходу холодна водопровідна вода нагрівається до необхідних параметрів у швидкісному пластинчастому теплообміннику за рахунок теплоти первинного магістрального теплоносія, що унеможливлює їхнє пряме змішування.

Контур опалення на розробленій технологічній схемі підключений до зовнішніх теплових мереж за залежною схемою. Залежне приєднання систем опалення є найбільш поширеним у вітчизняній практиці проектування і, відповідно до вимог чинних нормативних документів, розглядається як пріоритетне.

Зазначене інженерне рішення доцільно застосовувати за умови збігу температурних графіків регулювання теплоносія у зовнішній магістралі та у внутрішньому контурі будівлі. Головною перевагою такої схеми є відсутність потреби у встановленні вартісного теплообмінного обладнання для контуру опалення, а основним елементом автоматизації вузла в такому разі виступає змішувальний насосний агрегат.

1.3 Постановка задачі проєктування системи автоматизації

На основі технологічних особливостей об'єкта, головні завдання системи автоматизації проєктуємого теплорозподільчого пункту (ТРП) полягають у:

– автоматичному регулюванні відпуску теплової енергії на опалення котеджів та плавального басейну відповідно до поточних потреб;

– прецизійній стабілізації температури води в контурі гарячого водопостачання (ГВП).

Автоматичне регулювання температурних режимів у системах опалення та ГВП є необхідною умовою для забезпечення кінцевих споживачів теплоносієм із нормативними параметрами. Своєю чергою, стабілізація тиску гарантує надійну циркуляцію води у внутрішніх мережах, запобігає виникненню зон застою (стагнації) в трубопроводах, мінімізує ризик гідроударів та кавітації в насосному обладнанні.

З погляду теорії автоматичного керування, розгляданий ТРП є складною динамічною системою з кількома взаємопов'язаними вхідними й вихідними величинами (багатозв'язний об'єкт регулювання). Проте виражена спрямованість технологічних ділянок за основними каналами керування дозволяє розбити загальну структуру на окремі автономні контури стабілізації.

1. Керовані (вихідні) параметри:

– температура зворотного теплоносія в контурі опалення ($Т_{зв}$);

– температура гарячої води на виході з теплообмінника ГВП ($Т_{гв}$);

2. Керуючі впливи (регульовані параметри):

– витрата первинного (прямого) теплоносія, що надходить із тепломережі до системи опалення;

– витрата гріючої мережної води, що подається на пластинчастий теплообмінник ГВП;

– частота обертання (потужність) електродвигунів насосної групи.

3. Збурюючі впливи (вхідні неконтрольовані параметри):

– температура первинного теплоносія від зовнішнього постачальника (АЕС);

– коливання витрати води споживачами в системі ГВП (режим водорозбору);

– зміна температури навколишнього середовища (метеорологічні чинники).

Оскільки температура первинного теплоносія є заданою зовнішньою константою, що визначається режимом роботи АЕС, основним регулюючим параметром для контуру опалення обрано витрату прямої мережної води. Для підвищення температури зворотного теплоносія ($Т_{зв}$), яка опосередковано відображає тепловий баланс в опалювальних приміщеннях котеджів та басейну, виконавчий механізм збільшує ступінь відкриття клапана (росте витрата первинного теплоносія). Для зниження температури – витрата зменшується шляхом прикриття регулювального органу.

Похідним інтегральним параметром у системі виступає сумарна витрата теплоти, яка обумовлена поточними значеннями температур та миттєвою витратою теплоносія.

Динамічна зміна параметрів ТРП відповідно до фактичного теплового навантаження абонентів дозволяє суттєво підвищити якість теплопостачання, мінімізувати невиправні втрати енергії та забезпечити максимальний енергоощадний ефект, що позитивно впливає на техніко-економічні показники роботи всього теплорозподільчого пункту.

Проєктом передбачено, що ТРП забезпечуватиме безперебійне постачання споживачів тепловою енергією та водою нормативної температури. Вибір основного тепломеханічного устаткування та засобів автоматизації для реалізації цієї схеми здійснюватиметься за каталогами провідних світових виробників.

У теплорозподільному пункті запроєктовано обладнання:

1. Для обліку кількості тепла встановлюється ультразвуковий тепловодолічильник типу СВТУ-10М, $Д_у$ 65, $G_н$ = 120 $м^3$/год.

2. Для обліку холодної води, що йде в систему ГВП, встановлюються ультразвуковий лічильник холодної води типу СВТУ-10М, Ду 50, $G_{макс}$ = 70 $м^3$/год.

3. Програмований логічний контролер.

4. Електроприводи.

6. Термічні датчики, тощо.

Висновки. У першому розділі кваліфікаційної роботи виконано комплексний аналіз міського теплорозподільчого пункту як складного багатозв’язного об’єкта автоматизації. На основі вивчення технологічного процесу обґрунтовано доцільність впровадження сучасної інтегрованої архітектури керування, яка дозволяє вирішити проблему інформаційної децентралізації комунальних мереж та забезпечує наскрізну передачу даних на верхній рівень диспетчеризації. Запропонована чотиривузлова структура пункту забезпечує ефективне суміщення незалежного контуру гарячого водопостачання із двоступеневим пластинчастим теплообмінником та залежного контуру опалення котеджів і плавального басейну. Визначено чіткі межі та взаємозв'язки між вихідними керованими величинами, керуючими впливами та зовнішніми збуреннями, де ключовим фактором стабілізації температурного режиму об'єкта виступає динамічна зміна витрати мережної води від зовнішнього джерела. З урахуванням заданої специфіки об'єкта сформовано оптимальний комплекс технічних засобів автоматизації та комерційного обліку енергоресурсів на базі програмованого логічного контролера, ультразвукових лічильників та електроприводів. Реалізація поставлених завдань проєктування дозволить повністю виключити людський фактор, оптимізувати роботу насосних агрегатів із частотно-регульованими приводами та гарантувати високу якість теплопостачання за умов суворого дотримання погодного графіка.

2. ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1 Загальні вимоги до архітектури та функціонування системи

Проєктована система автоматичного регулювання теплорозподільчого пункту має являти собою багаторівневу, ієрархічну, розподілену систему керування, побудовану на базі сучасних мікропроцесорних засобів та промислових мереж передачі даних. Система повинна забезпечувати безперервне, цілодобове функціонування в автоматичному режимі без потреби в постійній присутності обслуговчого персоналу. Архітектурно систему автоматизації пропонується розділити на два основні рівні:

Нижній (польовий) рівень – включає первинні вимірювальні перетворювачі (датчики температури, ультразвукові витратоміри СВТУ-10М) та виконавчі механізми (електроприводи Honeywell регулювальних клапанів, пуско конденсаторну та комутаційну апаратуру керування насосними агрегатами).

Середній (контролерний) рівень – базується на програмованому логічному контролері (ПЛК) серії Modicon. ПЛК здійснює опитування датчиків, обробку аналогових і дискретних сигналів, реалізує алгоритми ПІД-регулювання та формує керуючі впливи на виконавчі пристрої.

Система повинна забезпечувати три основні режими керування:

– автоматичний – основний режим роботи, за якого всі алгоритми стабілізації технологічних параметрів та логіко-програмного керування насосами виконуються контролером автономно на основі сигналів із датчиків;

– дистанційний – режим оперативного втручання, що дозволяє диспетчеру верхнього рівня (SCADA) видавати прямі команди на зміну положення клапанів або пуск/зупинку насосів через інтерфейси зв'язку;

– місцевий (ручний) – сервісний режим, який реалізується безпосередньо біля технологічного обладнання за допомогою перемикачів на шафі автоматики для проведення пусконалагоджувальних або ремонтних робіт.

2.2 Вимоги до функцій та контурів автоматичного керування

Система автоматизації повинна гарантувати точне підтримання параметрів у трьох базових технологічних контурах ТРП.

1. Контур регулювання відпуску теплоти на опалення.

Стабілізація температури зворотного теплоносія $T_{зв}$ відповідно до поточної температури прямого мережного теплоносія, що надходить від АЕС, та погодних умов навколишнього середовища.

ПЛК повинен реалізувати алгоритм погодозалежного ПІД-регулювання. При відхиленні $T_{зв}$ від розрахункового значення температурного графіка контролер має видавати імпульсний або аналоговий сигнал на електропривід Honeywell, який змінює ступінь відкриття регулювального клапана на подавальному трубопроводі первинної мережної води, корегуючи її витрату.

Похибка регулювання температури зворотного теплоносія не повинна перевищувати ±1 °С у сталому режимі.

2. Контур регулювання температури гарячого водопостачання.

Завдання: Підтримання постійної температури гарячої води $T_{гв}$ на виході з двоступеневого пластинчастиго теплообмінника в межах 55 – 60 °С незалежно від динаміки водорозбору споживачами.

Оскільки контур ГВП є високодинамічним об'єктом із запізненням, алгоритм регулювання має оперативно реагувати на коливання витрати. Керування здійснюється зміною витрати гріючого теплоносія через теплообмінник за допомогою відповідного клапана з електроприводом Honeywell.

Похибка стабілізації температури ГВП не повинна перевищувати ±2 °С при стрибкоподібних змінах витрати споживачами.

2.3 Вимоги до інформаційного забезпечення та комерційного обліку

Інформаційне забезпечення системи має гарантувати збір, первинну обробку, візуалізацію та архівацію всіх технологічних даних.

1. Вимоги до вимірювальних каналів. Аналогові сигнали від датчиків температури (опірні термоперетворювачі) та датчиків тиску (уніфікований сигнал струму 4 – 20 мА мають проходити програмну фільтрацію від завад та масштабуватися у фізичні одиниці виміру всередині ПЛК.

2. Вимоги до комерційного обліку. Для точного контролю енергоспоживання система має інтегрувати дані з лічильників СВТУ-10М. Ультразвуковий тепловодолічильник на базі Ду 65 повинен безперервно передавати на ПЛК дані про миттєву витрату ($G_н$ = 120 м^3/ год) та інтегральну кількість спожитого тепла. Ультразвуковий лічильник холодної води на базі Ду 50 ($G_{макс}$ = 70 м^3/год) має забезпечувати облік об'єму води, що спрямовується на потреби ГВП. Передача даних від лічильників до ПЛК має здійснюватися через цифрові інтерфейси (RS-485, протокол Modbus RTU).

2.4 Вимоги до надійності, безпеки та аварійного захисту

Система автоматизації повинна мати високий рівень живучості та реалізувати комплекс захисних блокувань у разі виникнення позаштатних ситуацій:

– при виявленні критичного підвищення тиску або температури теплоносія понад допустимі інженерні межі, ПЛК повинен видати команду на повне закриття швидкодійних відсічних клапанів;

– у разі зникнення протоку води (сухий хід) або аварії частотного перетворювача, система має миттєво зупинити робочий насос і, за потреби, увімкнути резервний агрегат.

– при аварійному вимкненні основного електроживлення ПЛК Modicon повинен зберігати поточні налаштування, уставки регуляторів та журнал подій в енергонезалежній пам'яті (EEPROM). Перезапуск контролера після відновлення живлення має відбуватися автоматично із переходом системи у безпечний робочий стан.

– усі технічні засоби КВПіА, шафи автоматики та виконавчі механізми повинні відповідати вимогам ПУЕ (Правила улаштування електроустановок), мати належний клас захисту корпусу (не нижче IP54 для шаф та IP65 для польових датчиків) та обов'язкове захисне заземлення.

2.5 Вимоги до інтерфейсу користувача та інтеграції в SCADA

Програмне забезпечення середнього та верхнього рівнів має відповідати принципам побудови сучасних диспетчерських систем:

1. ПЛК Modicon повинен мати інтегрований комунікаційний порт (RS-485/Ethernet) для повноцінного обміну даними із системами верхнього рівня (SCADA). Це дозволить ліквідувати проблему інформаційної ізольованості ТРП.

2. Технологічний інтерфейс користувача (на локальній панелі оператора або моніторі диспетчера) має відображати поточний стан об'єкта у вигляді динамічної мнемосхеми ТРП. На схемі обов'язково мають візуалізуватися: поточні значення з біметалевих термометрів ТБ-100, аналогових датчиків, стани насосів (робота/аварія) та відсоток відкриття приводів Honeywell.

3. Система повинна мати звукове та візуальне сповіщення (аларми) про будь-які відхилення параметрів від норми, фіксуючи точний час та причину виникнення позаштатної події в електронному журналі.

Висновки. У другому розділі сформульовано комплексні технічні, функціональні та експлуатаційні вимоги до багаторівневої системи автоматизації, що проєктується.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

В системі автоматичного регулювання досліджуваного теплопункта передбачено дві системи регулювання: система опалення (СО) та система гарячого водопостачання ГВП). Обидві системи повинні забезпечувати підтримку стабільності температури води, яка надходить до споживачів залежно від температури зовнішнього середовища та температурного графіку.

Розрахунок налаштувань системи виконується по параметрам динаміки об'єкта управління, в якості котрого виступають СО та ГВП, які отримуються після обробки кривих розгону, що будуються по експериментальним даним.

Параметрами такого об'єкту управління є:

коефіцієнт передачі об'єкта $К_{об}$, котрий визначають, як встановлене відхилення величини, що регулюється, в розрахунку на одиничне стрибкоподібне збурення;

– загальне запізнення $\tau_{об}$;

– стала часу $Т_{об}$.

При подачі ступінчастого збурення в розмірі 16% по шкалі виконавчого механізму були отримані такі перехідні характеристики, що представлені в наступному графічному і табличному вигляді, наведеному в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Дані перехідних характеристик температури

t, с	0	178	658	1138	1618
Т, °С	72	72	75,5	77,5	78,6
t, с	2098	2578	3058	3538	4000
Т, °С	79,2	79,6	79,7	79,9	79,9

Для визначення загального запізнення τоб та сталої часу $Т_{об}$ проводять дотичну до перехідної характеристики в точці, де швидкість зміни величини максимальна. Проекція відрізка дотичної на вісь часу визначає час запізнювання $\tau_{об}$ та постійну часу $Т_{об}$. Для розрахунку було обрано дві одноконтурні САР:

температура зворотної води до тепломережі з корекцією по температурі зовнішнього повітря і температура подавальної води в систему ГВП.

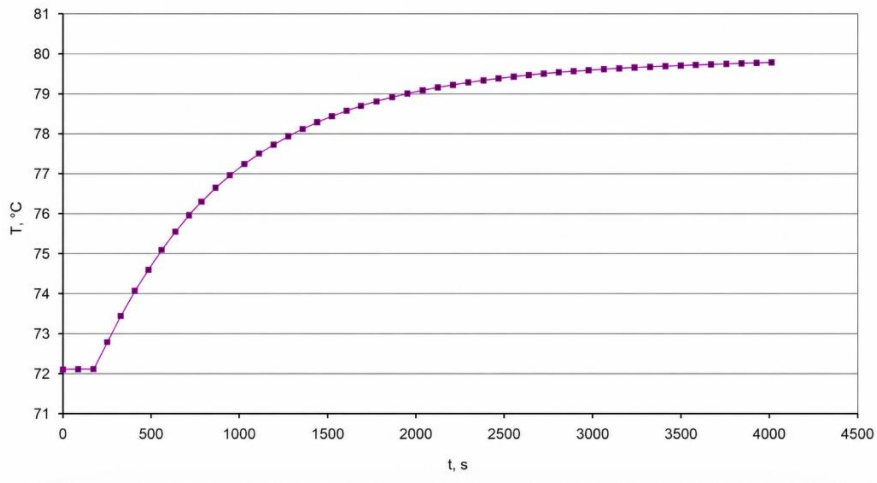


Рисунок 3.1 – Перехідна характеристика об’єкту регулювання – температура зворотньої води з систему опалення – регулююча дія

Параметри об’єкту:

$$К_{об} = 0{,}5\ °C\ \%РО;$$

$$\tau_{об} = 180\ с;$$

$$Т_{об} = 830\ с.$$

Для визначення параметрів об’єкту проведемо нормування перехідної характеристики:

$$h(t) = \frac{y(t) - y(0)}{y(\infty) - y(0)}; \quad (3.1)$$

$$\tau = 1{,}07;$$

$$t_1 - 0{,}07 \cdot t_2;$$

$$T_{об} = \frac{t_2 - \tau}{1{,}61};$$

$$k_{об} = \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

За нормованими характеристиками визначаємо параметри об’єкту керування:

$$\tau_1 = 1{,}07 \cdot 267{,}4 - 0{,}07 \cdot 1516 = 180$$

$$\mathrm{T_{об}} = \frac{1516 - 180}{1{,}61} = 830;$$

$$k_{\text{об}} = \frac{8}{16} = 0{,}5;$$

$$W_{\text{об1}}(s) = \frac{0{,}5}{830s + 1} e^{-180s}$$

На рис. 3.2 представлена нормована перехідна характеристика.

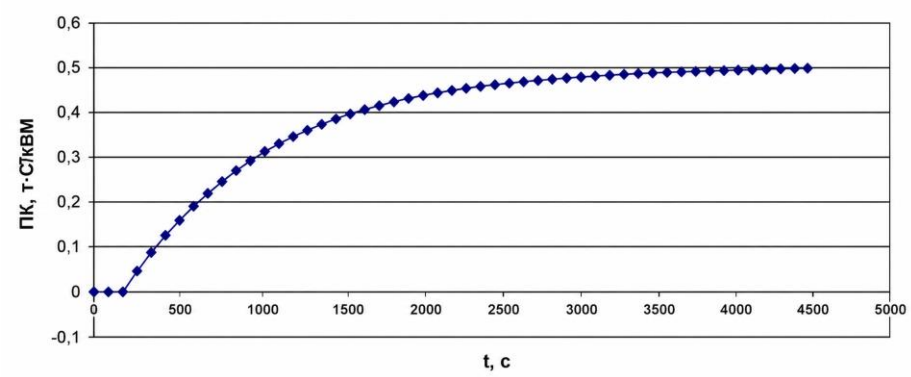


Рисунок 3.2 – Нормована перехідна характеристика

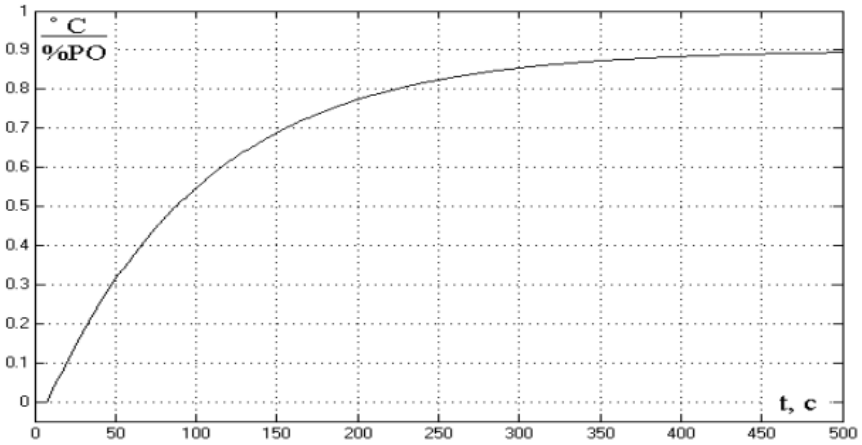


Рисунок 3.3 – Перехідна характеристика об’єкту регулювання – температура подавальної води в систему ГВП

Параметри об’єкту:

$$K_{об} = 0{,}9\ °C\ \%\ РО;$$

$$\tau_{об} = 8\ с;$$

$$T_{об} = 98\ с.$$

Ось перефразований, стилістично вирівняний та інженерно грамотний варіант тексту для вашої дипломної роботи (для третього розділу, де зазвичай проводяться розрахунки). Текст очищено від русинізмів («цифрових модулей», «обумовлюється», «рівновіддалені»), а термінологію приведено до стандартів теорії автоматичного керування (ТАК).

Враховуючи, що в даній кваліфікаційній роботі керування реалізується на базі програмованого логічного контролера, систему автоматичного регулювання (САР) слід розглядати та розраховувати як цифровізовану (дискретну).

Інтеграція мікропроцесорних засобів у контури керування технологічними процесами вносить специфічні корективи в динаміку та аналіз систем управління. Це зумовлено тим, що цифрові пристрої оперують дискретизованими сигналами, які набувають фіксованих значень лише у визначені, рівновіддалені моменти часу. Інтервал між цими моментами визначається як період квантування (або період повторення) і позначається як T_0.

Застосування сучасних мікропроцесорних контролерів для автоматизації теплотехнічних об'єктів забезпечує низку суттєвих переваг:

– можливість реалізації багатоконтурних систем регулювання та одночасного керування кількома технологічними процесами за допомогою одного центрального процесорного модуля ПЛК;

– гнучке вдосконалення й модифікація алгоритмів керування об'єктом на програмному рівні без необхідності зміни або модернізації апаратної елементної бази;

– легка адаптація, масштабованість та оптимізація структури системи управління під мінливі умови експлуатації ТРП.

Типова функціонально-структурна схема цифрової САР, яка відображає процеси квантування сигналів та взаємодію безперервного об'єкта з дискретним контролером, наведена на рисунку 3.4.

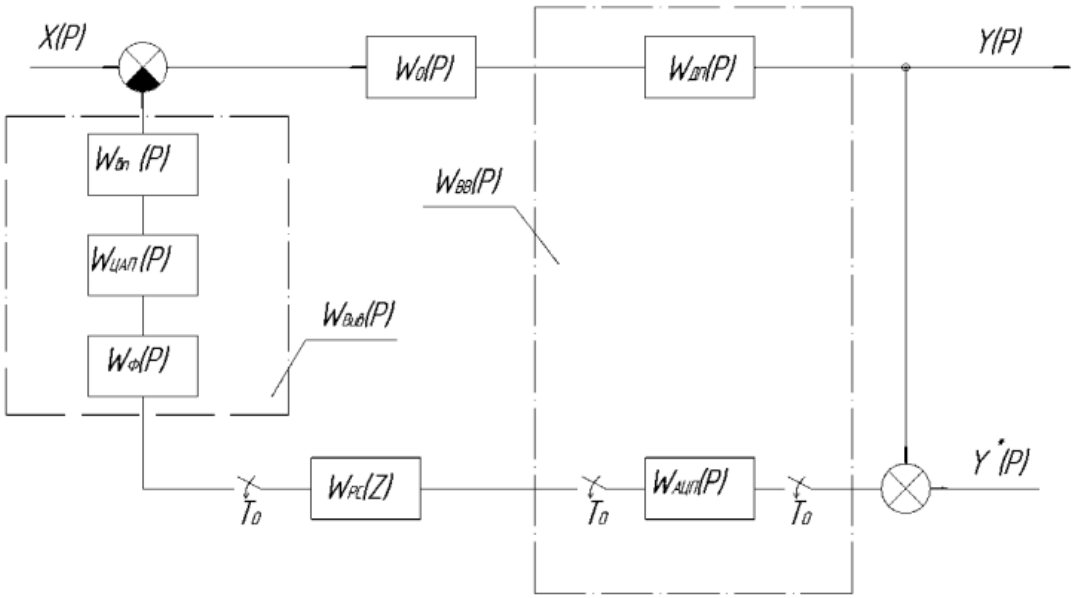


Рисунок 3.4 – Структурна схема цифрової САР

Позначення на схемі:

$W_{вп}$ (p) – передавальна функція виконавчого пристрою;

$W_{ЦАП}$ (p) – передавальна функція цифро-аналогового перетворювача;

$W_{ф}$(p) – передавальна функція фіксатора нульового порядку;

$W_{РС}$ (z) – передавальна функція контролера;

$W_{АЦП}$ (p) – передавальна функція аналогово-цифрового перетворювача;

$W_{ДП}$(p) – передавальна функція датчика-перетворювача;

T_o – період квантування (в секундах).

Для розрахунків приймемо розрядність АЦП та ЦАП – 16, тобто максимальне число в десятковій системі дорівнює $2^n – 1 = 2^{16} – 1 = 65535$.

Діапазон зміни регулюючого параметру приймаємо Δy =120°C. Період квантування визначаємо як 0,04 с.

Передавальна функція каналу введення інформації для температури зворотньої води в загальному вигляді може бути записана:

$$W_{\text{вв}}(\text{p}) = W_{\text{ДП}} \cdot W_{\text{АЦП}} = K_{\text{ДП}} \cdot K_{\text{АЦП}}, \quad (3.2)$$

де $W_{ДП}$ – передавальна функція датчика-перетворювача;

$W_{АЦП}$ – передавальна функція аналогово-цифрового перетворювача.

Знайдемо перехідну функцію датчика-перетворювача:

$$W_{\text{ДП}} = \frac{\Delta I}{\Delta x}, \quad (3.3)$$

де ΔI – нормована вихідна величина перетворювача;

Δx – шкала датчика.

Температура зворотньої води вимірюється за допомогою датчику температури типу Pt 1000 Ом/00С ESM-11 (0…20) мА, шкала якого (0…120)°С є вихідним сигналом.

Тому маємо:

$$W_{\text{ДП}} = \frac{20}{120} = 0{,}167 \frac{\text{мА}}{℃}.$$

Для перетворення аналогового сигналу в цифровий використовується шістнадцятирозрядний АЦП (n = 16).

$$W_{\text{АЦП}} = \frac{2^n - 1}{\Delta I}, \quad (3.4)$$

де ΔI – нормована вихідна величина перетворювача.

Температуру води в системі ГВП (прямої) та зворотної води СО було вирішено вимірювати за допомогою вищеописаних датчиків температури типу Pt 1000 Ом/0◦С ESM-11 з вихідним сигналом (0…20) мА, тому маємо однакові величини для АЦП:

$$W_{\text{АЦП прям}} = \frac{65535}{20} = 3276{,}75\ 1/\text{мА}$$

$$W_{\text{АЦП зворот}} = \frac{65535}{20} = 3276{,}75\ 1/\text{мА}$$

Остаточно передавальна функція каналу введення інформації для температури зворотної води та подавальної води системи ГВП має вигляд:

$$W_{\text{ВВ подав.}}(\text{p}) = 0{,}167 \cdot 3276{,}75 = 547{,}217\ 1/℃$$

$$W_{\text{ВВ зворот.}}(\text{p}) = 0{,}167 \cdot 3276{,}75 = 547{,}217\ 1/℃$$

Передавальна функція каналу виводу інформації в загальному вигляді може бути записана:

$$W_{\text{вив}}(\text{p}) = W_{\text{ф}}(\text{p}) \cdot W_{\text{ЦАП}}(\text{p}) \cdot W_{\text{ВП}}(\text{p}), \qquad (3.5)$$

Де $W_{ЦАП}(p)$ – передавальна функція цифро-аналогового перетворювача;

$W_{ф}(p)$ – передавальна функція фіксатору нульового порядку;

$W_{ВП}(p)$ – передавальна функція виконавчого пристрою.

$$W_{\text{ф}} = \frac{1 - e^{-T_0 p}}{p}, \qquad (3.6)$$

тут T_0 – період квантування у секундах, маємо значення $T_0 = 0{,}04$.

Таким чином:

$$W_{\text{ф}} = \frac{1 - e^{-T_0 p}}{p} = \frac{1 - e^{-0{,}04p}}{p},$$

$$W_{\text{ЦАП}} = \frac{\Delta I}{2^n - 1} = \frac{20}{65535} = 0{,}00035,$$

$$W_{\text{ВП}} = \frac{\text{К}_{\text{ВП}}}{\text{р}} = \frac{\Delta \text{X}_{max}}{p \cdot \Delta I \cdot T_0} = \frac{20}{p \cdot 20 \cdot 0{,}01} = \frac{100}{p}.$$

Остаточно передавальна функція каналу виводу інформації для температури води ГВП має вигляд:

$$W_{\text{вив.подав}}(\text{р}) = \frac{0{,}035(1 - e^{-0{,}04p})}{p^2}, \qquad (3.7)$$

Передавальна функція каналу виводу інформації для температури зворотної води СО має вигляд:

$$W_{\text{вив.зворот}}(\text{р}) = \frac{0{,}035(1 - e^{-0{,}04p})}{p^2}, \qquad (3.8)$$

У якості закону регулювання в даній системі використовується ПІ-закон регулювання. Для розрахунку налаштувань контролера було використано частотний метод.

Моделювання проведене в середовищі MatLab.

Для системи регулювання температури подавальної води отримані наступні результати розрахунку для налаштування регулятора:

$К_р$ = 3,1921; $Т_и$ = 397,62.

Зображення перехідних процесів по каналу «завдання-вихід» та «збурення-вихід» для системи регулювання температури подавальної води представлено на рис. 3.5 та 3.6.

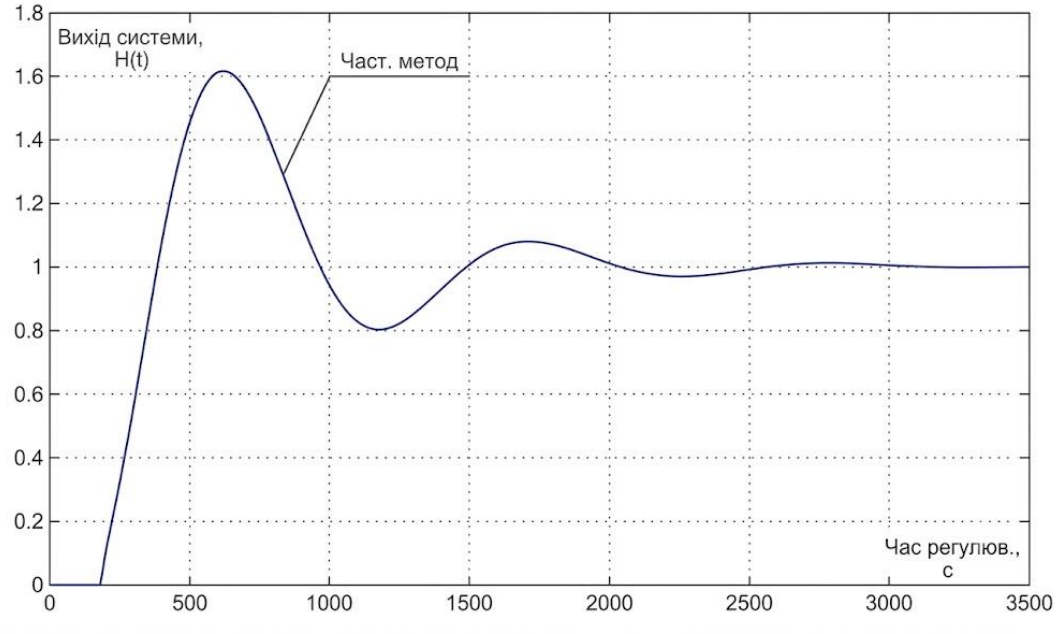


Рисунок 3.5 – Графік перехідного процесу по каналу «завдання-вихід»

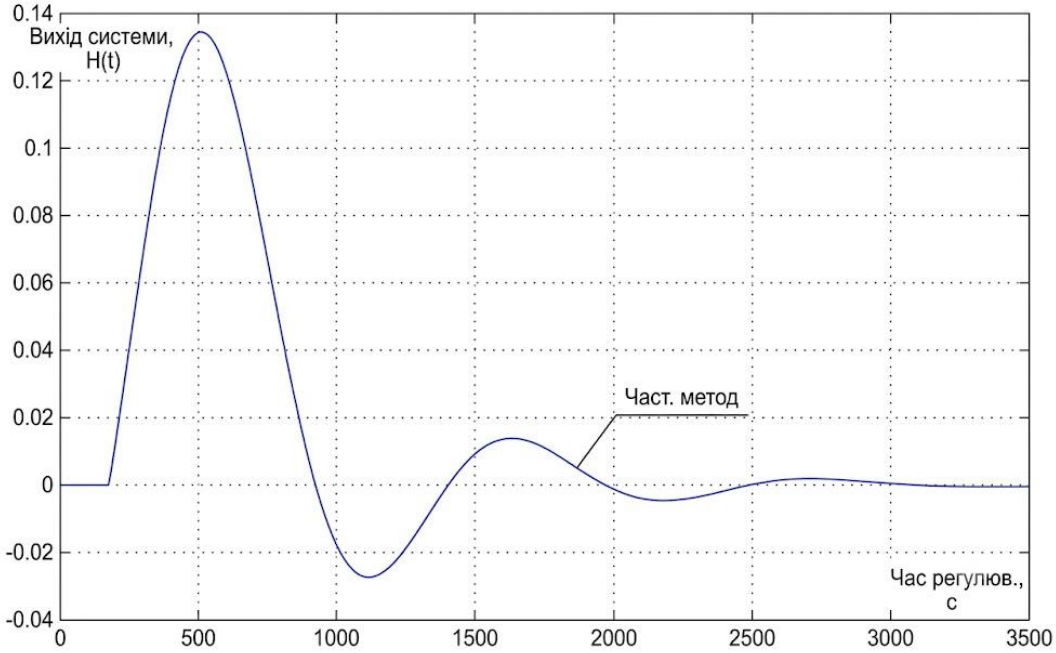


Рисунок 3.6 – Графік перехідного процесу по каналу «збурення-вихід»

При аналізі системи автоматичного регулювання (САР) – температура зворотньої води з системи опалення в залежності від температури зовнішнього повітря були отримані якості перехідного процесу, котрі задовольняють заданим технологічним параметрам, а саме:

– максимальне динамічне відхилення –1,6 ◦C;

– перерегулювання – 61 %;

– час регулювання – 2700 с.

Для системи регулювання температури зворотної води отримані наступні результати розрахунку для налаштування регулятора:

$К_р$ = 10,4066; $Т_u$ = 21,2571.

Графіки перехідних процесів по каналу «завдання-вихід» та «збурення-вихід» для системи регулювання температури зворотної води представлено на рис. 3.7 та рис. 3.8.

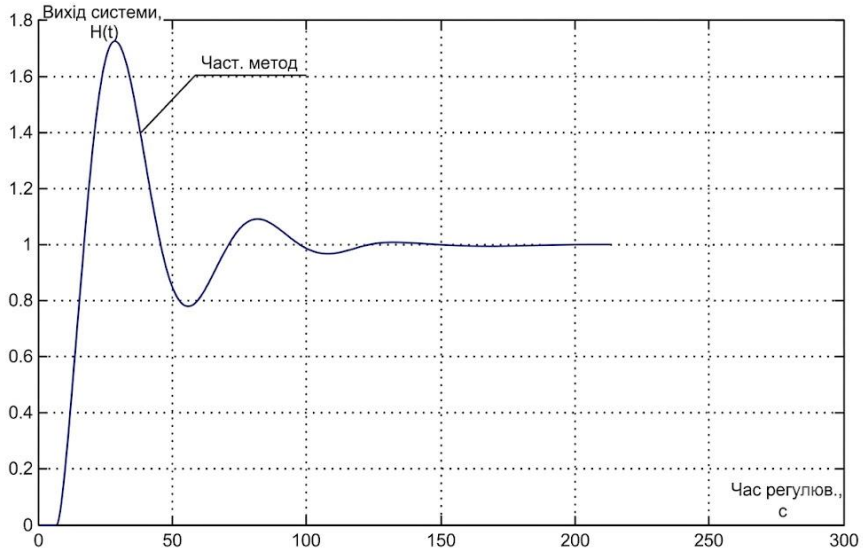


Рисунок 3.7 – Перехідний процес по каналу «завдання – вихід»

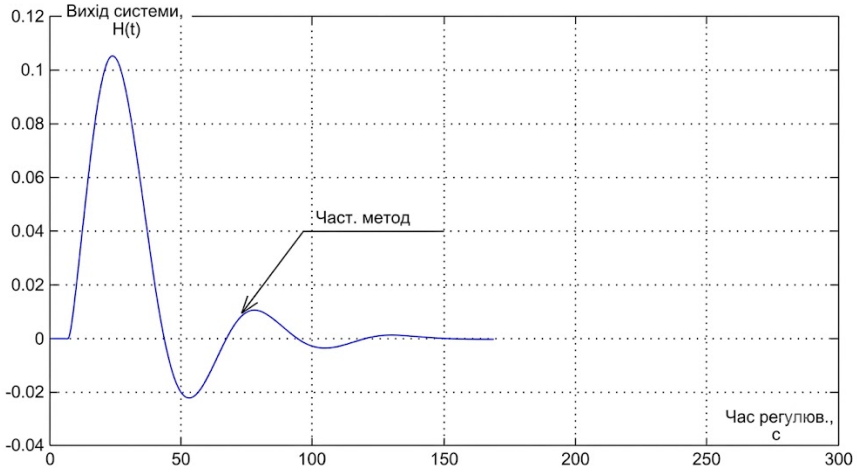


Рисунок 3.8 – Перехідний процес по каналу «збурення – вихід»

При аналізі системи регулювання - температура води в системі ГВП отримані наступні показники якості перехідних процесів, які задовольняють заданим технологічним параметрам, а саме:

– максимальне динамічне відхилення – 1,8 ◦С;

– перерегулювання – 68 %;

– час регулювання – 160 с.

Аналізуючи промодельовані в середовищі MatLab перехідні процеси, можна зробити висновок, що запропонований метод є доцільним у використанні в даній кваліфікаційній роботі як метод розрахунку налаштувань регулятора.

Висновки. У цьому розділі здійснено синтез та розрахунок замкненої системи автоматичного керування (САК), базою для якого слугували ідентифіковані динамічні характеристики об’єкта автоматизації. У ролі останнього виступають взаємопов'язані технологічні контури систем опалення (СО) та гарячого водопостачання (ГВП).

Для комплексного аналізу динамічних властивостей розробленої системи було проведено комп'ютерне моделювання перехідних процесів у середовищі MATLAB/Simulink. Математичне моделювання виконувалося за двома основними напрямками:

– по каналу керуючого впливу («завдання – вихід»): для оцінки швидкодії, динамічної похибки та характеру відпрацювання системою заданих уставок.

– по каналу збурюючого впливу («збурення – вихід»): для аналізу інваріантності та здатності системи компенсувати зовнішні й внутрішні збурення (наприклад, коливання витрати мережної води або зміни температури зовнішнього середовища).

Моделювання охоплювало контури регулювання температури як подавальної, так і зворотної води. Отримані чисельні значення показників якості повністю відповідають жорстким технологічним вимогам та критеріям стійкості, що свідчить про високу точність, надійність та ефективність запропонованого алгоритму керування в реальних умовах експлуатації.

4. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ

4.1 Функціональна схеми автоматизації управління

На рисунку 4.1 надана функціональна схема автоматизації.

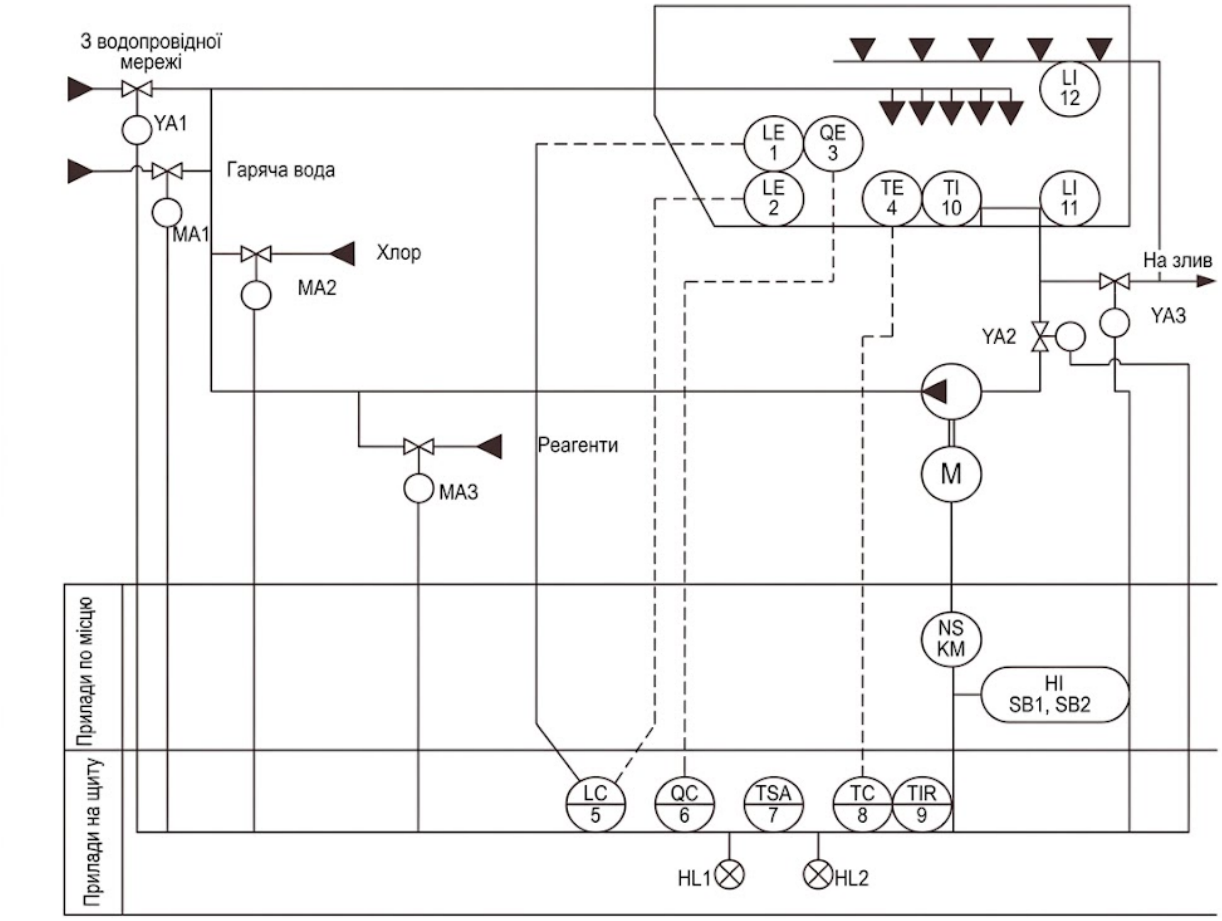


Рисунок 4.1 – Функціональна схема автоматизації регулювання температурним режимом

Запропонована система автоматизації підтримує задану температуру води, яка надходить в систему гарячого водопостачання; регулює подачу теплоти в системі опалення залежно від зміни параметрів навколишнього середовища з метою підтримки заданої температури повітря в опалювальних приміщеннях.

1. Контур контролю та регулювання рівня (Контур 1, 2, 5, 11, 12)

Цей контур відповідає за підтримання заданого об'єму рідини в основному резервуарі та захист від переповнення або сухого ходу.

LE1, LE2 – первинні датчики рівня, встановлені безпосередньо в технологічній ємності. Вони фіксують поточне положення дзеркала води (наприклад, верхній та нижній аварійні рівні).

LC5 – Регулятор рівня, винесений на щит. Він отримує сигнал від датчиків і формує керуючий вплив на виконавчі механізми (електромагнітні клапани або насоси) для подачі чи зливу води.

LI 11, LI 12 – показуючі прилади рівня, які дозволяють оператору візуально контролювати стан заповнення ємності (один безпосередньо на баку, інший – у верхній зоні розподілу).

2. Контур контролю та регулювання якості/концентрації (Контур 3, 6)

Призначений для моніторингу хімічних показників води (наприклад, рівень pH, залишковий хлор або жорсткість) після додавання хлору та реагентів.

QE3 – первинний датчик/аналізатор якості води, що здійснює безперервний відбір проби або вимірювання фізико-хімічних параметрів у ємності.

QC6 – автоматичний регулятор якості на щиті. Залежно від відхилення показника від норми, він керує виконавчими механізмами на лініях подачі хлору (MA2) та інших реагентів (MA3).

3. Контур контролю, сигналізації та регулювання температури (Контур 4, 7, 8, 9, 10)

Забезпечує змішування холодної («З водопровідної мережі») та «Гарячої води» для досягнення заданого температурного режиму.

TE4 – датчик температури (термоперетворювач опору або термопара) всередині резервуара.

TI10 – місцевий показуючий термометр.

TC8 та TIR 9 – регулятор температури та показуючий/реєструючий прилад на щиті. Вони керують електроприводом MA1 на лінії гарячої води для

стабілізації температури.

TSA7 – сигналізатор температури, пов'язаний із сигнальними лампами HL1 та HL2 на щиті. Вони попереджають оператора про вихід температури за технологічні межі (світлова сигналізація «Мінімум/Максимум»).

4. Контур керування насосним агрегатом та запірною арматурою

Забезпечує циркуляцію води в системі або її злив.

Двигун (M) та насос: здійснюють перекачування рідини. Насос забирає воду з нижньої частини ємності через запірний клапан.

NS/KM – магнітний пускач (контактор) або станція керування двигуном насоса.

H/SB1, SB2 – пост місцевого керування (кнопки «Старт/Стоп») для ручного пуску чи зупинки насоса безпосередньо біля обладнання.

YA1, YA2, YA3 – електромагнітні засувки/клапани (соленоїди) для швидкого відсікання або перенаправлення потоків води (наприклад, YA3 працює на лінію «На злив»).

Вода з водопроводу та гаряча вода через змішувальні клапани з електроприводами (YA1, MA1) надходить у резервуар. Туди ж через дозатори (MA2, MA3) додаються хлор та реагенти.

Датчики LE1-2, QE3, TE4 безперервно моніторять стан середовища.

Щитові регулятори (LC5, QC6, TC8) опрацьовують ці дані. Якщо вода охолола – відкривається клапан гарячої води MA1. Якщо впав рівень – відкривається подача води. Якщо хімічні показники не в нормі – додаються реагенти.

Насос M забезпечує циркуляцію води через систему верхнього розподілу (душові сопла/розпилювачі) або, за потреби, відкачує воду через клапан YA3 на злив у каналізацію.

4.2 Вибір та обґрунтування технічних засобів САУ

Ефективність, надійність та точність роботи системи автоматичного керування процесом водопідготовки і приготування гарячої води безпосередньо залежать від раціонального вибору технічних засобів. Комплекс технічних засобів (КТЗ) обрано за принципами модульності, сумісності за вихідними сигналами (стандартний струмовий сигнал 4 – 20 мА) або дискретний сигнал 24 В, високої завадостійкості та відповідності промисловим стандартам.

Програмований логічний контролер (ПЛК).

Центральним керуючим та обчислювальним елементом архітектури САУ обрано сучасний промисловий програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M221 (модель TM221CE40R) (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Промисловий контролер Electric Modicon M221 (модель TM221CE40R)

Даний ПЛК спеціально розроблений для автоматизації компактних технологічних систем, має високу швидкість обробки даних, вбудовані апаратні функції ПІД-регулювання та розширені комунікаційні можливості. Вибір моделі з інтегрованим портом Ethernet (індекс «E») дозволяє легко інтегрувати вузол

водопідготовки в загальну локальну мережу підприємства для передачі даних на верхній рівень диспетчеризації (SCADA-системи), хмарні сервіси або для реалізації віддаленого моніторингу.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики ПЛК TM221CE40R

Параметр	Значення / Характеристика
Кількість дискретних входів	24 входи (DC 24 В), зокрема 4 швидкісні входи (HSC, до 100 кГц)
Кількість дискретних виходів	16 виходів (релейного типу, з комутаційною здатністю до 2 А)
Вбудовані аналогові входи	2 входи (0…10 В) на борту базового блока
Номінальна напруга живлення	AC 100…240 В
Макс. кількість модулів розширення	До 7 модулів серії Modicon TM3 (дискретні, аналогові, температурні)
Комунікаційні інтерфейси	RJ45 Ethernet (протокол Modbus TCP, вбудований Web-сервер); RJ45 RS-485/RS-232 (протокол Modbus RTU); USB mini-B (для конфігурування).
Об'єм пам'яті програм	2 Мб (до 65 000 інструкцій логіки)
Програмне забезпечення	EcoStruxure Machine Expert Basic (сучасне середовище розробки)

Наявність двох вбудованих аналогових входів (0 – 10 В) на самому процесорному блоці дозволяє підключити ключові аналогові датчики схеми (наприклад, температури TE4 та якості води QE3 через відповідні

перетворювачі) без закупівлі додаткових модулів розширення, що суттєво оптимізує вартість КТЗ.

Наявність Ethernet-інтерфейсу дозволяє розгорнути просту графічну веб-сторінку безпосередньо в пам'яті контролера. Це забезпечує можливість оперативного моніторингу рівнів, температури та стану насоса з будь-якого авторизованого пристрою (ПК, планшет) через стандартний браузер.

Наявність слота для SD-карти дає змогу реалізувати функцію логування – автоматичного запису трендів температури та критичних спрацювань сигналізації (TSA 7) у текстові звіти без постійного підключення до комп'ютера.

Згідно з позиціями на функціональній схемі, для реалізації системи автоматизації обрано наступні сучасні компоненти:

1. Контур контролю та регулювання рівня (позиції 1, 2, 5, 11, 12).

Первинні перетворювачі рівня (LE 1, LE 2): обрано безконтактні ультразвукові датчики рівня (ультразвуковий датчик рівня EAX20000-AB291). Вони забезпечують високу точність вимірювання, не мають рухомих частин та стійкі до агресивних випаровувань хлору.



Рисунок 4.3 – Ультразвуковий датчик рівня EAX20000-AB291

Вихідний сигнал: 4 – 20 мА;

Робочий діапазон: 0,2 – 2 м ;

Захист: IP67.

Показуючі прилади (LI 11, LI 12) та регулятор (LC5): реалізуються програмно всередині ПЛК Modicon M221. Для фізичного відображення на дверцятах щита використовується компактний цифровий індикатор-сигналізатор або графічна HMI-панель оператора Schneider Electric Magelis, підключена по шині Modbus RTУ.

2. Контур контролю та регулювання якості води (позиції 3, 6).

Датчик якості води (QE3): промисловий аналізатор рідини Endress+Hauser Liquiline Compact CM72 (рис. 4.4) із цифровим електродом. Прилад здійснює безперервний моніторинг рівня pH або концентрації вільного хлору.



Рисунок 4.4 – Промисловий аналізатор рідини Endress+Hauser Liquiline Compact CM72

Живлення: DC – 24 В;

Вихідний сигнал: 4 – 20 мА .

Регулятор якості (QC6): функція ПІД-регулювання покладена на процесор ПЛК. Контролер за алгоритмом видає імпульсні команди на виконавчі механізми – дозуючі насоси хлору та хімічних реагентів (MA2, MA3).

3. Контур вимірювання та регулювання температури (позиції 4, 7, 8, 9, 10).

Датчик температури (TE 4, TI 10): інтелектуальний термоперетворювач опору JUMO dTRANS T08 із вбудованим РК-дисплеєм для локального відображення (TI 10).



Рисунок 4.5 – Інтелектуальний термоперетворювач опору JUMO dTRANS T08

Чутливий елемент:

Pt100;

Клас точності: А;

Вихідний сигнал: 4 – 20 мА (перетворюється на 0 – 10 В для базового блока ПЛК).

Регулятор (TC 8) та сигналізатор (TSA 7): реалізовані у вигляді програмних модулів у ПЛК. При виході температури за межі аварійних уставок, контролер через релейні виходи активує світлозвукову колону сигналізації HL1/HL2 (серія Schneider Electric Harmony). Запис та реєстрація параметрів (TIR 9) виконується в пам'ять ПЛК та на SD-карту.

4. Виконавчі механізми та силова апаратура.

Регулювальні клапани (MA1): сідельний клапан з аналоговим електроприводом Belimo (керування сигналом 0 – 10 В).



Рисунок 4.6 – Привод сідельного клапану Belimo

Електромагнітні відсічні клапани (YA1, YA2, YA3): соленоїдні клапани швидкої дії Danfoss EV220B (керування котушкою DC 24 В від виходів ПЛК).

Керування двигуном насоса (NS/KM, M): пристрій плавного пуску Schneider Electric Altistart 01. Він здійснює м'який розгін циркуляційного насоса, захищаючи гідравлічну систему від гідроударів. Кнопки «Старт/Стоп» (SB1, SB2) – захищені кнопки серії Harmony XB5 (IP65).



Рисунок 4.7 – Пристрій плавного пуску Schneider Electric Altistart 01

4.3 Алгоритм функціонування обраного комплексу технічних засобів САР

Алгоритм функціонування обраного комплексу технічних засобів САР розподілено на три взаємопов'язані технологічні цикли, які паралельно опрацьовуються контролером Modicon M221:

1. Цикл наповнення та стабілізації рівня.

При запуску системи датчики рівня LE 1 та LE 2 передають поточний стан резервуара на дискретні/аналогові входи ПЛК. Якщо зафіксовано нижній рівень, програмний регулятор LC 5 через релейні виходи відкриває соленоїдний клапан YA1 (подача холодної води) та подає сигнал на відкриття клапана гарячої води MA1. Поточний об'єм безперервно контролюється локальним індикатором LI 11 та дублюється на щитовій панелі оператора LI 12. При досягненні верхнього ліміту наповнення клапани автоматично перекриваються.

2. Цикл температурного змішування.

Для підтримки стабільної температури суміші, датчик TE 4 безперервно транслює поточне значення. Програмний ПІД-регулятор TC 8, інтегрований у ПЛК, порівнює фактичну температуру з уставкою (38 °C).

Якщо вода холодна, ПЛК через аналоговий вихід плавно відкриває електропривод MA1, збільшуючи подачу гарячої води.

У разі перегріву програмний блок TSA 7 миттєво блокує подачу гарячої води та вмикає світлову аварійну сигналізацію HL2 (червона лампа), фіксуючи подію у журналі логів TIR 9.

3. Цикл хімводопідготовки та циркуляції.

Якість води постійно аналізується блоком QE3, сигнал від якого обробляється програмним регулятором якості QC 6 у контролері. Залежно від об'єму свіжої води, що надійшла, ПЛК розраховує точну дозу реагентів та через транзисторні виходи видає високочастотні імпульси на насоси-дозатори хлору MA2 та супутніх реагентів MA3.

Після виходу всіх параметрів (рівень, температура, якість) на задані уставки, ПЛК через пристрій плавного пуску NS/KM запускає циркуляційний насос М. Вода подається на верхню систему розпилювачів. Ручний пуск або аварійна зупинка насоса за місцем забезпечується кнопками SB1/SB2. У разі необхідності повного дренажу або промивки системи, ПЛК закриває відсічний клапан циклу YA2 та відкриває клапан YA3, спрямовуючи потік «На злив» у каналізацію.

4.4 Принципова схема електроприводу

Принципова схема електроприводу СО і ГВП наведена на рис. 4.8.

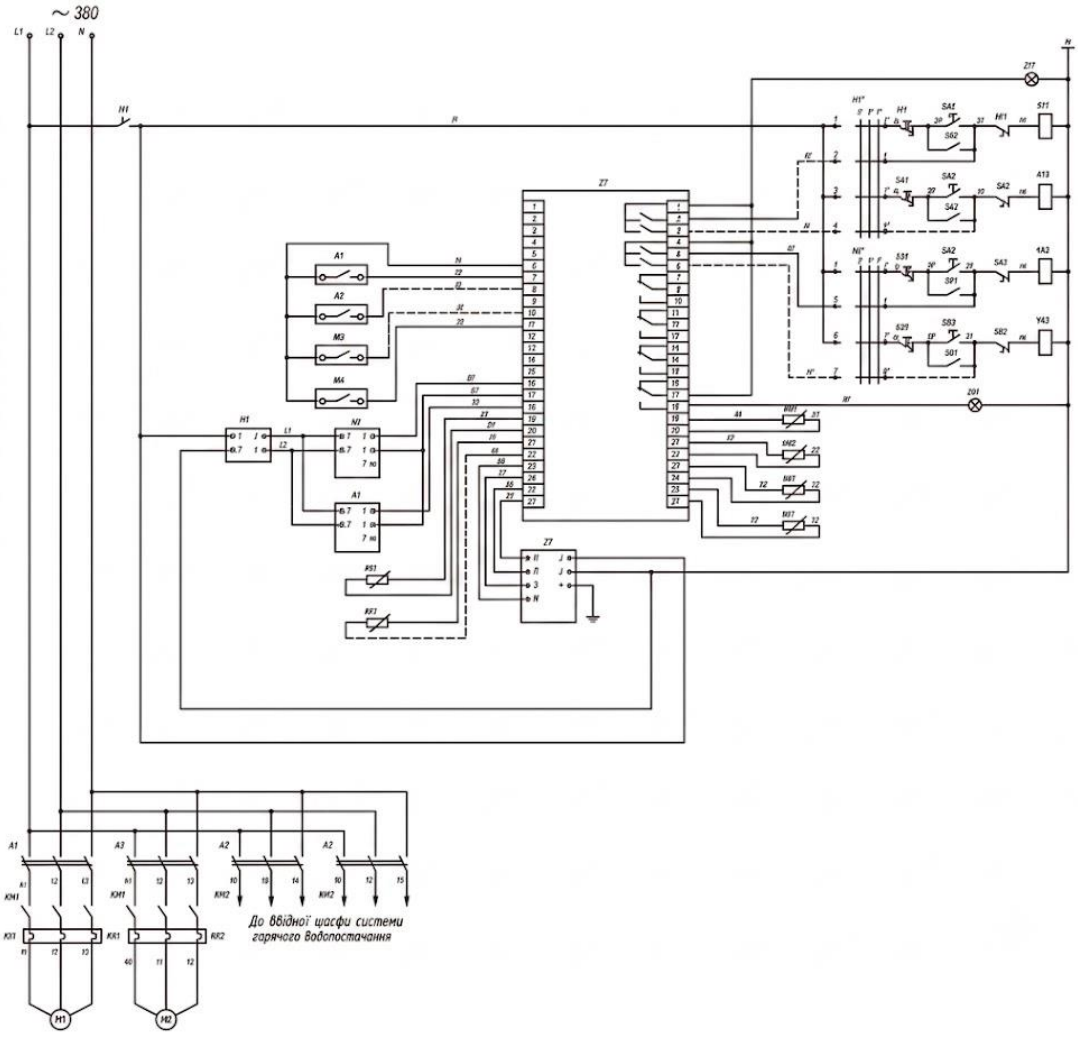


Рисунок 4.8 – Принципова схема електроприводу СО і ГВП

Представлена принципова електрична схема описує роботу системи автоматизованого керування насосними агрегатами та запірно-регулювальною арматурою контуру гарячого водопостачання на базі центрального програмованого логічного контролера. Живлення силової частини здійснюється від трифазної мережі змінного струму, яка через автоматичні вимикачі та магнітні контактори подає напругу на електродвигуни насосів, захищені від перевантажень за допомогою теплових реле. Контролер безперервно опитує дискретні та аналогові датчики, серед яких блоки контролю рівня ємності, кінцеві вимикачі положення арматури та температурні перетворювачі, підключені через модулі гальванічної розв'язки та нормуючі підсилювачі. На основі закладеного алгоритму ПЛК комутує свої внутрішні вихідні реле, які керують котушками виконавчих контакторів насосів, соленоїдними клапанами зливу й подачі, а також електроприводами засувок. Для забезпечення гнучкості керування у схемі передбачено перемикачі режимів роботи, що дозволяють оператору переходити з автоматичного ПЛК-регулювання на ручне керування за допомогою кнопок «Старт/Стоп» безпосередньо на лицьовій панелі щита. Візуальний контроль за поточним станом системи, наявністю живлення та виникненням аварійних ситуацій забезпечується за допомогою сигнальних ламп і світлових індикаторів, винесених у ланцюги керування.

Висновки. У результаті виконання розділу обґрунтовано вибір та структуру комплексу технічних засобів САК на базі сучасного контролера Modicon M221, що забезпечує високу надійність та точність керування. Інтеграція новітніх ультразвукових датчиків, інтелектуальних приводів Belimo та пристроїв плавного пуску дозволила оптимізувати роботу контурів термостабілізації, рівня та хімводопідготовки відповідно до заданих технологічних вимог. Розроблена принципова електрична схема підтверджує повну сумісність обраних компонентів та гнучкість системи завдяки підтримці автоматичного і ручного режимів керування.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

У даному розділі розглянуто питання забезпечення безпечних умов праці обслуговуючого персоналу, аналіз потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів при експлуатації системи автоматичного керування (САК) водопідготовкою, а також заходи із запобігання виникненню надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Проектування КТЗ виконано відповідно до чинного законодавства України, зокрема Закону України «Про охорону праці», Кодексу цивільного захисту України та вимог НПАОП.

5.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Експлуатація та обслуговування САК процесами водопідготовки, опалення та гарячого водопостачання пов'язані з наявністю низки небезпечних і шкідливих виробничих факторів (згідно з ДСТУ-Н Б А.3.2-1:2007):

1. Небезпека ураження електричним струмом: наявність напруги живлення силової частини ~380 В, 50 Гц) для насосних агрегатів та кіл керування ~220 В}). Особливу небезпеку становить можливість дотику до струмопровідних частин із пошкодженою ізоляцією.

2. Термічна небезпека (опіки): наявність трубопроводів та регулювальних клапанів (контур ГВП та СО) з гарячою водою, температура якої може перевищувати +60… +70 °С.

3. Хімічна небезпека: використання концентрованого хлору та агресивних технологічних реагентів для знезараження води, що загрожує хімічними опіками шкіри, слизових оболонок або отруєнням при випаровуванні.

4. Підвищений рівень шуму та вібрації: джерелом є працюючі відцентрові насоси та запірно-регулююча арматура під час інтенсивного руху рідини.

5. Психофізіологічні фактори: напруженість праці оператора САК, пов'язана з постійним зоровим та нервово-емоційним напруженням під час

моніторингу параметрів на дисплеях чи HMI-панелях.

5.2. Технічні та організаційні заходи з охорони праці

Електробезпека.

Для захисту персоналу від ураження електричним струмом (відповідно до вимог ПУЕ та НПАОП 40.1-1.21-98) у проекті реалізовано такі заходи:

1. Захисне заземлення та занурення: усі металеві неструмопровідні частини обладнання (корпус шафи керування з ПЛК Modicon M221, станини насосів, металеві лотки кабельних трас) підлягають надійному приєднанню до контуру захисного заземлення з опором не більше 4 Ом.

2. Захисне відключення: силові ланцюги живлення насосів та блоки живлення периферії захищені диференційними автоматами (УЗО) зі струмом витоку не більше3 0 мА.

3. Ізоляція та низька напруга: для живлення засобів автоматизації (датчиків рівня IFM, температури JUMO, хімводопідготовки) та кіл інтерфейсів застосовано безпечну низьку напругу DC ~ 24 В. Шафа керування має клас захисту не нижче IP54.

Захист від термічних та хімічних факторів.

1. Теплоізоляція: усі трубопроводи гарячого водопостачання та теплообмінне обладнання покриваються сучасними теплоізоляційними матеріалами. Температура на зовнішній поверхні ізоляції в зоні доступу персоналу не повинна перевищувати +45 °C

2. Хімічна безпека: реагентний вузол обладнується примусовою припливно-витяжною вентиляцією. Обслуговуючий персонал забезпечується засобами індивідуального захисту (ЗІЗ): гумовими рукавичками, захисними окулярами та фартухами. Впроваджений у проекті датчик якості води QE 3 дозволяє автоматизувати дозування, мінімізуючи прямий контакт людини з хімікатами.

Зниження шуму, вібрації та нормалізація умов праці.

Для зниження вібрації насосних агрегатів застосовано віброізолюючі основи (пружинні або гумові амортизатори) та гнучкі вставки (віброкомпенсатори) на трубопроводах.

Застосування пристрою плавного пуску Altistart 01 виключає виникнення гідроударів, що значно знижує акустичний шум арматури під час пуску.

Робоче місце оператора обладнується відповідно до санітарних норм (ДСТУ EN 614): забезпечується оптимальне природне й штучне освітлення, а параметри мікроклімату підтримуються системами кондиціювання.

5.3. Пожежна та техногенна безпека

Пожежна безпека.

Категорія приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою – В (згідно з ДСТУ Б В.1.1-36:2016). Заходи пожежної профілактики включають:

Використання кабелів, які не підтримують горіння та мають низьке димовиділення (типу ВВГнг-LS).

Встановлення в шафі керування автоматичних вимикачів для захисту від струмів короткого замикання та перевантаження, які є основними джерелами займання електропроводки.

Оснащення приміщення первинними засобами пожежогасіння (вуглекислотні вогнегасники ВВ-3 або ВВ-5, які дозволено використовувати для гасіння електроустановок під напругою).

Техногенна безпека та безаварійна робота САК.

Для запобігання аваріям техногенного характеру (затоплення приміщень, руйнування трубопроводів через перегрів або надлишковий тиск) в алгоритмі ПЛК Modicon M221 передбачено комплексне програмно-апаратне блокування:

Захист від сухого ходу та переливу: при досягненні критичного аварійного рівня (датчики LE 1, LE 2) ПЛК автоматично знеструмлює насос М та перекриває вхідні клапани YA1-YA3.

Протиаварійний термічний захист: сигналізатор TSA 7 у разі перевищення критичної температури суміші формує команду на повне закриття виконавчого механізму МА1 (гаряча вода), запобігаючи закипанню системи та термічному руйнуванню пластикових елементів контуру.

Усі аварійні події дублюються світлозвуковою колоною (HL1, HL2) на лицьовій панелі щита та записуються на енергонезалежну SD-карту контролера для подальшого аналізу.

Висновки. У розділі проведено детальний аналіз умов праці та виявлено основні небезпечні фактори при роботі САК водопідготовки й ГВП. Запропоновані інженерні рішення (захисне заземлення, ПЗВ, автоматизація хімічного дозування та використання низьковольтних ланцюгів DC ~ 24 В) повністю задовольняють вимогам чинних нормативних документів з охорони праці. Реалізовані в ПЛК Modicon M221 алгоритми протиаварійних блокувань мінімізують ризик виникнення техногенних аварій та забезпечують тривалу безаварійну роботу об'єкта.

6. ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

Метою даного розділу є розрахунок економічної ефективності від розробки та впровадження системи автоматичного керування (САК) процесами водопідготовки, опалення (СО) та гарячого водопостачання (ГВП). Доцільність реалізації проекту обґрунтовується порівнянням капітальних витрат на закупівлю й монтаж КТЗ із річним економічним ефектом, що досягається за рахунок заощадження енергоносіїв, води, хімічних реагентів та оптимізації витрат на обслуговуючий персонал.

6.1. Розрахунок капітальних витрат на автоматизацію

Капітальні витрати складаються з вартості обладнання, допоміжних матеріалів, а також витрат на монтажні та пусконалагоджувальні роботи:

$$К = К_{обл} + К_{мат} + К_{монт} + К_{пн}, \quad (6.1)$$

де $К_{обл}$ – витрати на придбання КТЗ (ПЛК Modicon M221, датчики, клапани, силова апаратура);

$К_{мат}$ – вартість монтажних матеріалів (кабелі, короби, металоконструкції), приймається як 10% від $К_{обл}$;

$К_{монт}$ – вартість монтажних робіт, приймається як 15% від $К_{обл}$;

$К_{пн}$ – вартість пусконалагоджувальних робіт та програмування ПЛК, приймається як 12% від $К_{обл}$.

Кошторис витрат на основне обладнання наведений в табл. 6.1.

Розрахунок супутніх витрат:

$$К_{мат} = 122900 \cdot 0{,}10 = 12290 \text{ грн.}$$

$$К_{монт} = 122900 \cdot 0{,}15 = 18435 \text{ грн.}$$

$$К_{пн} = 122900 \cdot 0{,}12 = 14748 \text{ грн.}$$

Загальні капітальні витрати (K):

$$K = 122900 + 12290 + 18435 + 14748 = 168373 \text{ грн.}$$

Таблиця 6.1 – Кошторис витрат на основне обладнання

Найменування технічного засобу	Кількість, шт.	Ціна за одиницю, грн.	Загальна вартість, грн.
ПЛК Schneider Electric Modicon M221 (TM221CE40R)	1	18 500	18 500
Ультразвуковий датчик рівня IFM Electronic	2	9 200	18 400
Аналізатор якості води Endress+Hauser CM72	1	24 000	24 000
Інтелектуальний термоперетворювач JUMO dTRANS	1	7 500	7 500
Регулювальний клапан з електроприводом Belimo	1	16 200	16 200
Соленоїдний відсічний клапан Danfoss EV220B	3	4 800	14 400
Пристрій плавного пуску Altistart 01	1	8 900	8 900
Шафа керування, щитові прилади (Harmony, автомати)	1	15 000	15 000
		ВСЬОГО	122 900

6.2. Розрахунок річних експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати до і після впровадження САК суттєво відрізняються. Автоматизація дозволяє скоротити витрати за ключовими статтями.

1. Економія теплової енергії та води.

Завдяки точному ПІД-регулюванню температури (клапан MA1 та датчик TE 4) виключається перегрів води та її перевитрата. За середніми статистичними даними аналогічних об'єктів, економія теплової енергії на контур ГВП/СО становить 12%, а економія води за рахунок чіткого контролю рівня (LC5) – 8%.

Річні витрати на тепло та воду до модернізації: $С_{ен1}$ = 340000 грн./рік.

Річні витрати після впровадження САК: $С_{ен2}$ = 302600 грн./рік.

Річна економія: $\Delta С_{ен}$ = 37400 грн.

2. Економія хімічних реагентів.

Імпульсне автоматичне дозування хлору та реагентів (блоки МА2, МА3 під керуванням ПЛК) залежно від реальних показників датчика QE 3 запобігає надлишковому викиду хімікатів, який раніше відбувався при ручному або таймерному налаштуванні. Економія реагентів становить 15%.

Річна економія на хімікатах: $\Delta С_{хім}$ = 16500 грн.

3. Оптимізація фонду оплати праці (ФОП).

Впровадження автоматичного режиму звільняє персонал від необхідності постійного ручного регулювання засувок та візуального моніторингу рівнів. Це дозволяє скоротити трудовитрати на обслуговування (або перевести персонал на суміщення посад).

Річна економія на зарплаті з урахуванням відрахувань у фонди:

$$\Delta С_{фоп} = 42000 \text{ грн.}$$

6.3. Розрахунок економічної ефективності та окупності

1. Загальна річна економія (річний економічний ефект ΔС):

$$\Delta С = \Delta С_{ен} + \Delta С_{хім} + \Delta С_{фоп}, \qquad (6.2)$$

$$\Delta С = 37400 + 16500 + 42000 = 95900 \ \frac{\text{грн.}}{\text{рік}}.$$

2. Збільшення витрат на амортизацію та ел. енергію для ПЛК:

Експлуатація нової системи потребує витрат на амортизацію КТЗ (10% від вартості обладнання) та споживання електроенергії самим контролером і датчиками

Чистий річний економічний ефект (Е):

$$\text{Е} = \Delta\text{С} - \text{С}_{\text{дод}} = 95900 - 14290 = 81610 \ \frac{\text{грн.}}{\text{рік.}} \qquad (6.3)$$

3. Ток окупності капітальних вкладень ($\text{Т}_{\text{ок}}$):

$$\text{Т}_{\text{ок}} = \frac{\text{К}}{\text{Е}} = \frac{168373}{81610} = 2{,}06 \text{ року.} \qquad (6.4)$$

4. Коефіцієнт економічної ефективності капіталовкладень ($\text{Е}_{\text{к}}$):

$$E_{\text{к}} = \frac{1}{\text{Т}_{\text{ок}}} = \frac{1}{2{,}06} \approx 0{,}48 \qquad (6.5)$$

Отримане значення $\text{Е}_{\text{к}} = 0{,}48$ є значно вищим за нормативний коефіцієнт для галузі промислової автоматизації ($\text{Е}_{\text{норм}} = 0{,}15$), що вказує на високу фінансову доцільність проекту.

Висновки. Проведені техніко-економічні розрахунки підтвердили високу ефективність впровадження розробленої САК на базі контролера Modicon M221. При загальних капітальних інвестиціях у розмірі 168373 грн., чистий річний економічний ефект становить 81610 грн. за рахунок оптимізації витрат енергоносіїв, води та хімреагентів. Проект є повністю рентабельним, а термін окупності капіталовкладень становить 2 роки і 1 місяць, що відповідає сучасним вимогам до інвестицій у промислове енергоощадне обладнання.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальну інженерну та соціально-економічну задачу — розроблено систему автоматизації подачі води в умовах міських теплових мереж із фокусом на побудову високоефективної системи автоматичного регулювання (САР) температурним режимом. На основі виконаних досліджень, математичного моделювання та інженерних розрахунків сформульовано такі основні висновки:

1. Проаналізовано об'єкт автоматизації – міський теплорозподільчий пункт (ТРП) потужністю 4,07 МВт, що працює за двоконтурним принципом та отримує первинний теплоносій від атомної електростанції. Технологічну структуру об'єкта успішно розподілено на автономні взаємопов'язані контури, де базовими чинниками стабілізації визначено відпуск теплоти на опалення та прецизійне регулювання температури в системі гарячого водопостачання (ГВП).

2. Синтезовано та досліджено закони регулювання. Проведено ідентифікацію динамічних характеристик об'єкта за експериментальними кривими розгону. Для цифрової САР із періодом квантування T_0 = 0,04 с частотним методом розраховано оптимальні налаштування ПІ-регуляторів: для контуру ГВП (K_p = 3,1921; T_u = 397,62 с) та для контуру зворотної води системи опалення (K_p = 10,4066; T_u = 21,2571 с).

3. Виконано комп'ютерне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink за каналами «завдання-вихід» та «збурення-вихід». Отримані показники якості переходжувальних процесів повністю задовольняють технологічним вимогам. Для контуру опалення максимальне динамічне відхилення склало 1,6 °С при часі регулювання 2700 с, а для високодинамічного контуру ГВП – динамічне відхилення становить 1,8 °С при швидкодії 160 с, що доводить стійкість та інваріантність системи до зовнішніх погодних і водорозбірних збурень.

4. Обґрунтовано комплекс технічних засобів (КТЗ). Побудову багаторівневої архітектури САУ реалізовано на базі сучасного

високошвидкісного промислового ПЛК Schneider Electric Modicon M221 (модель TM221CE40R), периферійних ультразвукових датчиків рівня EAX20000, аналізатора якості Liquiline Compact CM72, термоперетворювачів JUMO dTRANS T08, регулювальних клапанів Belimo та пристрою плавного пуску Altistart 01. Розроблена принципова електрична схема підтвердила сумісність за сигнальними інтерфейсами, забезпечила гнучке перемикання між автоматичним і ручним режимами та усунула проблему інформаційної ізольованості ТРП шляхом інтеграції в SCADA-систему через Ethernet (Modbus TCP).

5. Розроблено заходи з охорони праці та пожежної безпеки. Відповідно до чинного законодавства України передбачено технічні рішення щодо електробезпеки (захисне заземлення 4 Ом, встановлення ПЗВ зі струмом витоку 30 мА та перехід на низьковольтні кола живлення датчиків (DC = 24 В), а також реалізовано програмно-апаратні аварійні блокування від сухого ходу насосів та протиаварійний термічний захист від закипання мережної води.

6. Доведено техніко-економічну доцільність проекту. При загальних капітальних інвестиціях на автоматизацію у розмірі 168373 грн., чистий річний економічний ефект становить 81610 грн. за рахунок впровадження енергоощадних технологій (економія тепла 12%, води 8%, хімреагентів 15%). Розрахунковий термін окупності капіталовкладень складає 2 роки і 1 місяць) при коефіцієнті ефективності $E_к = 0,48$, що значно перевищує нормативне значення і свідчить про високу інвестиційну привабливість розробленої системи.

Результати роботи мають пряме практичне значення і можуть бути рекомендовані до впровадження під час модернізації та реконструкції діючих центральних теплових пунктів міських комунальних підприємств. Аналізуючи результати виконання кваліфікаційної роботи, можна з упевненістю констатувати, що всі завдання, які були поставлені у вступі, повністю та успішно виконані.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Конституція України : офіц. текст. Київ : КМ, 2013. 96 с.

2. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 р. № 2694-XII Голос України. 2017. 27 верес. (№ 178-179). С. 10–22.

3. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. Вид. офіц. Київ. 1998. 45 с. (Інформація та документація).

4. 90/270/ЄЕС. Про мінімальні вимоги безпеки та здоров'я при роботі з екранними пристроями. [Чинний від 1990-05-29]. Брюссель. : Рада Європейських співтовариств, 1990. 14 с.

5. ПУЕ-2021. Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86; чинний з 2021-01-01]. К. : Міненерговугілля України, 2021. 617 с. (Інформація та документація).

6. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с. (Інформація та документація).

7. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок [Чинний від 2002-01-01]. Київ : Мінпраці України, 2001. 45 с. (Інформація та документація).

8. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. [Чинний від 2014-12-30]. Київ : МВС України, 2014. 91 с. (Інформація та документація).

9. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. [Чинний з 1997-10-06]. Київ : Держнаглядохоронпраці, 1997. 97 с. (Інформація та документація).

10. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. [Чинний з 1998-01-09]. Київ : Мінпраці України, 1998. 89 с. (Інформація та документація).

11. НПАОП 0.00-7.15-18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров’я працівників під час роботи з екранними пристроям. [Чинний від 2018-05-18]. Київ : Мінсоцполітики України, 2018. 6 с. (Інформація та документація).

12. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. [Чинний з 2019-03-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 133 с. (Інформація та документація).

13. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Чинний від 1999-12-01]. Київ : МОЗ України, 1999. 106 с. (Інформація та документація).

14. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с. (Інформація та документація).

15. ДСТУ EN 2:2014. Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT). [Чинний з 01.01.2016]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 7 с. (Інформація та документація).

16. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [Чинний від 2017-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. 66 с. (Інформація та документація).

17. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Київ : Мінрегіон України, 2017. 47 с. (Інформація та документація).

18. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. [Чинний від 2015-07-01]. Київ : Мінрегіон України, 2014. 191 с. (Інформація та документація).

19. Правила експлуатації та типових норм належності вогнегасників. [Чинний від 2018-02-23]. Київ : МВС України, 2018. 23 с. (Інформація та документація).

20. Авраменко В. С., Авраменко А. С. Проектування інформаційних систем : навч. посібник. Черкаси : ЧНУ ім. Б. Хмельницького, 2017. 434 с.

21. Системи опалення, вентиляції і кондиціювання повітря будівель : навч. посіб. для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» / М.Ф.Боженко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського.– Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 380 с.

22. Автоматизація технологічних процесів: Автоматизація основних інженерних систем будівлі : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно - інтегровані технології» /Укладачі: В. П. Бунь, Т. Г. Баган, О. В. Степанець, Ю. І. Маріяш – Київ : КПІ імені Ігоря Сікорського, 2019. 65 с.

23. Пирков В.В. Особливості проектування сучасних систем водяного опалення / В.В. Пирков. – К. : ІІ ДП «Такі справи», 2003. 176 с.

24. Шефер, В.В. Електричні машини: навчальний посібник / В.В. Онушко, О.В. Шефер. – Полтава, ПолтНТУ, 2015. 536 с.

25. Онушко, В.В. Моделювання електромеханічних систем: навчальний посібник / В.В. Онушко, Д.В. Стрижеус. – Полтава, ПолтНТУ, 2010. 81с.

26. Моделювання систем: Підручник для ВУЗів / В.М. Томашевський. – К.: BHV, 2005. 352 с.

27. Основи комп'ютерного моделювання: навч. посібник / М.С. Барабаш, П.М. Кір'язєв, О.І. Лапенко, М.А. Ромашкіна. 2-е вид. стер. – К.: НАУ, 2019. 492 с.

28. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.

29. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / За ред. М.Г. Поповича. – К.: Либідь, 2005. – 672 с.

30. Основи побудови автоматизованих систем управління. URL: http://ir.znau.edu.ua/bitstream/123456789/2487/1/Osnovy_pobydovu_ASU.pdf. (дата звернення: 5.11.2026).

31. Автоматизовані системи управління. URL: https://vuzlit.com/2303874/avtomatizovani_sistemi_upravlinnya. (дата звернення: 5.11.2026).

32. Схема теплопостачання міста Запоріжжя. Енергосервісна компанія «Екологічні Системи». Запоріжжя, 2009. С. 1-102. URL: https://zp.gov.ua/upload/content/o_1c7mo50ba1cq81dvf1eud1i1a5l24k.pdf. (дата звернення: 02.02.2026).

33. Штаба О. М. Удосконалення системи управління міським тепловим розподільчим пунктом з метою підвищення ефективності використання теплоносія атомної електричної станції : магістерська робота. ІННІ ім. Ю. М. Потебні, ЗНУ. Запоріжжя, 2022. 99 с. URL: https://dspace.znu.edu.ua/jspui/bitstream/12345/9945/1/%D0%A8%D1%82%D0%B0%D0%B1%D0%B0%20%D0%9E.%D0%9C..pdf (дата звернення: 13.06.2026).

34. Автоматизація, щит (шафа) автоматики управління теплового пункту, ГВС. URL: https://umtec.in.ua/p/68738011-avtomatizaciya-shchit-shkaf-avtomatikiupravleniya-teplovogo-punkta-gvs/. (дата звернення: 02.02.2026).

35. LogoTherm – індивідуальні теплові пункти для багатоквартирних будинків, офісних центрів, котеджних містечок чи приватних маєтків. URL: https://www.meibes.ua/o-kompanii/news/2020/06/18/logotherm-individualnyieteplovyie-punktyi/. (дата звернення: 02.02.2026).

36. What is MATLAB? URL: https://cimss.ssec.wisc.edu/wxwise/class/aos340/spr00/whatismatlab.htm (дата звернення: 28.10.2026).

37. Implement MATLAB Functions in Simulink with MATLAB Function Blocks. URL: https://www.mathworks.com/help/simulink/ug/what-is-a-matlab-functionblock.html. (дата звернення: 28.10.2026).

38. Швець В. І., Шостачук Д. М. Виконавчі механізми, регулювальні органи і пристрої. С. 1 – 162. URL: https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/8319/mod_resource/content/1/%D0%92%D095 %9C%D0%A0%D0%9E_%D0%BA%D0%BD%D0%B8%D0%B3%D0%B0.pdf. (дата звернення: 5.11.2026).

39. Датчики та перетвоювачі. URL: https://www.danfoss.com/ukua/products/dcs/sensors-and-transmitters/#tab-other (дата звернення: 16.01.2026).

40. Промисловий контролер Modicon. URL: https://www.electrocentr.com.ua/ua/products/plc/Modicon.html. (дата звернення: 15.01.2026).

41. Місюренко В. О. Використання перетворювача частоти Altivar 320 як засобу автоматизації технологічної установки. Національний університет «Львівська політехніка» кафедра ЕКС. 2018. С. 52–56. URL: https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/44085. (дата звернення: 15.01.2026).

42. Neural Network Predictive Controller в автоматизації теплового пункту. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ, 2020. С. 235-239. URL: http://molodyvcheny.in.ua/files/journal/2020/4/49.pdf. (дата звернення: 02.02.2026).

43. Теплова автоматика Danfoss. Данфосс ТОВ. 2016. С. 1–298. URL: https://santehkomplekt.ua/files/katalogi/Danfoss/teplovaya_avtomatika_compressed.pdf. (дата звернення: 15.01.2026).

44. Wilo pumps. URL: http://www.domenicalipumps.com/wilo-pumps/. (дата звернення: 16.01.2026).

45. Автоматизовані теплові пункти. URL: https://jak.koshachek.com/articles/avtomatizovani-teplovi-punkti.html. (дата звернення: 27.10.2022).

46. Weintek ip-series. URL: https://www.risacorps.com/product/weintek-ip-series/. (дата звернення: 27.05.2026).

47. Система автоматизованого проєктування AutoCAD. URL: https://studopedia.com.ua/1_12826_sistema-avtomatizovanogo-proektuvannyaAutoCAD.html. (дата звернення: 27.05.2026).

48. Тепловий лічильник в будинку. URL: https://thermomodernisation.org/teplovyi-lichylnyk-v-budynku/. (дата звернення: 02.06.2026).