

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи магістра
на тему: «Перспективи сумісного використання технологій ші та традиційних
плк у сфері теплотехнічних систем»

Виконав студент 2 курсу, групи АТ-29м
спеціальності 174 “ Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка”

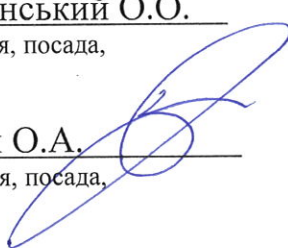
 Бобков Ярослав Андрійович

(прізвище та ініціали студента)

 Керівник: к.т.н., доц. Добржанський О.О.

(науковий ступінь, вчене звання, посада,
прізвище та ініціали)

Рецензент: к.т.н., доц., Громовий О.А.

(науковий ступінь, вчене звання, посада,
прізвище та ініціали) 

Житомир – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”
Факультет комп’ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна

Спеціальність 174 “Автоматизована система опалення з використанням надлишкового тепла”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри робототехніки,
електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна
к.т.н., доц. Громовий О.А.
« 17 » вересня 2025р.

ЗАВДАННЯ

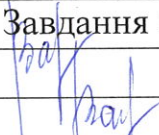
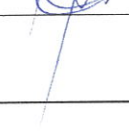
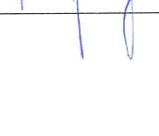
на кваліфікаційну роботу магістра

Студент Бобков Ярослав Андрійович

1. Тема роботи: Перспективи сумісного використання технологій ші та традиційних плк у сфері теплотехнічних систем
2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру «1» грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: матеріали звіту про переддипломну практику, характеристики обраного теплотехнічного об'єкта, технологічні параметри температури, тиску та витрати, засоби вимірювання й виконавчі механізми, програмований логічний контролер, середовище збору та обробки даних, засоби обміну даними з Excel, модуль штучного інтелекту, вимоги до сумісної роботи ПЛК і модуля ШІ, надійності та безпеки системи
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці): технічне завдання, аналіз теплотехнічних систем і сучасних підходів до їх автоматизації, обґрунтування вибору об'єкта та напрямів інтелектуалізації, вибір елементної бази, розробка структурної й функціональної схем системи, організація взаємодії ПЛК, датчиків і модуля штучного інтелекту, розрахунок електротехнічних компонентів та розробка електричної принципової схеми, розробка алгоритму функціонування, програмна реалізація обміну даними з Excel та алгоритмів ШІ, оцінка перспектив їх сумісного використання з традиційними ПЛК.

5. Перелік презентативного матеріалу (з точним визначенням обов'язкових слайдів/креслень): схема теплотехнічного об'єкта, структурна схема системи керування, функціональна схема, електрична принципова схема, схема обміну даними між ПЛК, середовищем обробки даних і модулем ШІ, блок-схема алгоритму функціонування системи, фрагменти програмної реалізації обміну даними з Excel та алгоритмів ШІ, результати роботи модуля штучного інтелекту.

6. Консультанти з кваліфікаційної роботи магістра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

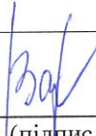
Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1, 2, 3	Добржанський О.О.		
4,5	Добржанський О.О.		

7. Дата видачі завдання 22.09.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підготувати звіт про переддипломну практику	1 тиждень	виконано
2.	Збір та аналіз джерел за темою роботи, огляд існуючих систем	1 тиждень	виконано
3.	Вибір і обґрунтування технічних та програмних засобів	2 тиждів	виконано
4.	Розробка структурної, функціональної та блок-схеми	3 тиждів	виконано
5.	Аналіз отриманих результатів	4 тиждів	виконано
6.	Оформлення пояснювальної записки та презентаційного матеріалу	4 тиждів	виконано

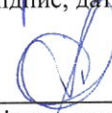
Студент


(підпис, дата)

Я.А. Бобков

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис, дата)

О.О.Добржанський

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
Актуальність теми, мета та завдання дослідження.....	5
Огляд сучасних підходів до автоматизації теплоенергетичних систем.....	8
Роль систем штучного інтелекту в оптимізації технологічних процесів.....	8
Засоби обміну даними між ПЛК та інформаційними системами.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА ОБ’ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	12
1.1. Класифікація та структура сучасних теплоенергетичних комплексів.....	12
1.2. Основні технологічні параметри (температура, тиск, витрата) та методи їх контролю.....	14
1.3. Огляд сенсорних засобів для збору теплотехнічних даних	15
1.4. Програмовані логічні контролери у теплоенергетиці.....	15
1.5. Вимоги до автоматизованих систем керування теплоенергетичними процесами	17
1.6. Обґрунтування вибору об’єкта автоматизації.....	17
1.7. Напрями інтелектуалізації теплоенергетичних систем.....	18
РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРНА СХЕМА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ.....	20
2.1. Вибір елементної бази апаратного комплексу.....	20
2.2. Структурна схема системи управління.....	22
2.3. Інтеграція ПЛК, датчиків та середовища обробки даних..	2
РОЗДІЛ 3. ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА ТА ОПИС РОБОТИ СИСТЕМИ.....	24
3.1. Функціональна структура збору та обробки даних.....	24
3.2. Алгоритми управління виконавчими механізмами.....	25
3.3. Взаємодія системи з модулем штучного інтелекту	29

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ.....	31
4.1. Розрахунок та вибір електротехнічних компонентів.....	31
4.2. Розробка схеми електричної принципової.....	51
 РОЗДІЛ 5. АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ.....	 54
5.1. Алгоритм функціонування системи управління.....	54
5.2. Програмна реалізація обміну даними з Excel.....	61
5.3. Реалізація алгоритмів штучного інтелекту.....	78
 ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	 96
 СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ.....	 98

ВСТУП

Актуальність теми

Сучасний етап розвитку промисловості та енергетики характеризується стрімким зростанням вимог до ефективності використання енергоресурсів, надійності технологічних процесів та екологічної безпеки виробництва. Особливу роль у цьому процесі відіграють теплотехнічні системи, які застосовуються в енергетиці, житлово-комунальному господарстві, промислових підприємствах та об'єктах критичної інфраструктури. Підвищення ефективності їх роботи напряму впливає на рівень енергоспоживання, собівартість виробництва та інтеграцію у сучасні концепції сталого розвитку. Традиційні системи автоматизації теплотехнічних процесів здебільшого базуються на використанні програмованих логічних контролерів. ПЛК вже десятиліттями залишаються основою промислової автоматизації завдяки своїй надійності, стійкості до завад та можливості роботи в складних промислових умовах. Водночас класичні алгоритми керування, реалізовані на базі ПЛК, часто не здатні повною мірою враховувати нелінійність процесів теплопередачі, вплив зовнішніх чинників та змінні режими навантаження.

Сучасний етап розвитку цифрових технологій характеризується активним впровадженням елементів штучного інтелекту у виробничі процеси. Методи машинного навчання, нейронні мережі, експертні системи та інтелектуальні алгоритми оптимізації відкривають нові можливості для аналізу великих масивів даних, прогнозування станів обладнання та адаптивного керування технологічними процесами. У поєднанні з традиційними ПЛК такі технології дозволяють створювати гнучкі гібридні системи управління.

Актуальність теми обумовлена необхідністю розробки ефективних підходів до інтеграції систем штучного інтелекту з класичними промисловими контролерами в області теплотехнічних систем. Впровадження таких рішень дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії обладнання, зменшити втрати теплової енергії, забезпечити ранню діагностику несправностей та сформувати основи для переходу до концепції «розумної енергетики».

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження та обґрунтування перспектив спільного використання технологій штучного інтелекту та традиційних програмованих логічних контролерів у сфері теплотехнічних систем з метою підвищення їх ефективності, надійності та адаптивності до змінних умов експлуатації.

Для досягнення поставленої мети в роботі **необхідно вирішити такі основні завдання:**

- проаналізувати сучасний стан автоматизації теплотехнічних систем;
- дослідити архітектуру та принципи роботи традиційних ПЛК;
- розглянути сучасні підходи до застосування алгоритмів штучного інтелекту в технічних системах;
- розробити концептуальну модель інтеграції ПЛК та модулів ШІ;
- обґрунтувати використання середовищ табличної обробки даних (зокрема Excel) як проміжної ланки між ПЛК та інтелектуальним модулем;
- оцінити можливості підвищення енергоефективності теплотехнічних систем за рахунок застосування ШІ.

Об’єкт дослідження: Об’єктом дослідження є теплотехнічні системи промислового та енергетичного призначення, оснащені засобами автоматизованого керування на базі програмованих логічних контролерів.

Предмет дослідження: є методи та засоби інтеграції технологій штучного інтелекту з традиційними ПЛК для аналізу та оптимізації параметрів теплотехнічних процесів.

Методи дослідження: У роботі використано комплекс теоретичних та практичних методів дослідження, зокрема методи системного аналізу для побудови структури гібридної системи управління, методи теорії автоматичного керування для синтезу алгоритмів регулювання, а також методи машинного навчання для створення інтелектуальних моделей прогнозування та оптимізації.

Наукова новизна та практична цінність проекту

Наукова новизна роботи полягає у розробці підходу до поєднання традиційних алгоритмів керування на базі ПЛК з інтелектуальними алгоритмами аналізу даних, що базуються на використанні табличних моделей та методів машинного навчання.

Практична цінність роботи полягає в можливості використання запропонованих рішень для модернізації існуючих теплотехнічних установок, підвищення рівня їх енергоефективності та надійності функціонування.

Перелік публікацій

Добржанський О.О., Рогожнікова Г.Л. «Перспективи сумісного використання технологій ІІІ та традиційних ПЛК у сфері теплотехнічних систем» Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки 11-15 травня – Житомир : ЖДТУ, 2025. – С.71-72

Структура та обсяг роботи.

Дана роботи складається з анотації, вступу, 5 основних розділів, переліку використаних літературних джерел.

Робота розміщена на 60 сторінках основного тексту і містить 11 рисунків. Кількість використаних інформаційних джерел містить 25 найменувань.

Технології штучного інтелекту та ПЛК у теплотехнічних системах

Системи на базі штучного інтелекту та програмованих логічних контролерів являють собою сучасний напрям розвитку промислової автоматизації, орієнтований на підвищення ефективності управління технологічними процесами. На відміну від класичних автоматизованих систем, де логіка керування задається у вигляді фіксованих алгоритмів, сучасні інтелектуальні системи здатні аналізувати великі масиви технологічних даних, навчатися на історичній інформації та формувати адаптивні керуючі впливи.

У теплотехнічних системах такі технології застосовуються для оптимізації режимів теплопостачання, регулювання температурних графіків, прогнозування теплових навантажень та підвищення енергоефективності обладнання. ПЛК у таких системах виконують роль надійної апаратної платформи для збору сигналів від датчиків температури, тиску та витрати, а також для керування виконавчими механізмами у режимі реального часу. У централізованих системах керування ПЛК об'єднуються у єдині інформаційні мережі, де центральні обчислювальні вузли виконують функції накопичення, структурування та подальшого аналізу даних. Концепція сумісного використання ПЛК та ШІ передбачає мінімізацію участі людини в рутинних процесах керування, перекладаючи більшість функцій оптимізації на інтелектуальні алгоритми.

Сфера застосування таких рішень охоплює як цивільні теплотехнічні об'єкти (котельні, теплові пункти, теплоелектростанції), так і спеціалізовані системи критичної інфраструктури. Інтелектуальні системи на базі ПЛК та ШІ можуть використовуватися для підвищення безпеки, енергоефективності та надійності теплотехнічних об'єктів. Разом з тим, існують певні ризики застосування інтелектуальних автоматизованих систем. Основним із них є ризик зовнішнього втручання в роботу інформаційних та керуючих модулів.

Недостатній рівень кіберзахисту може призвести до несанкціонованого доступу та порушення стабільності роботи системи. Тому все більшої уваги приділяється впровадженню захищених каналів зв'язку, апаратних засобів шифрування та багаторівневих систем авторизації.

За статистичними оцінками, переважна частина великих енергетичних та промислових підприємств вже впроваджує або планує впровадження гібридних систем керування на базі ПЛК та інтелектуальних алгоритмів. Пріоритетними напрямками застосування таких технологій є теплоенергетика, електроенергетика, промислова автоматизація, транспортна інфраструктура та системи безпеки.

Прикладами практичного застосування є системи прогнозування пікових теплових навантажень, моніторинг технічного стану теплообмінного обладнання, аналіз ефективності теплових мереж, виявлення витоків теплоносія та контроль якості процесів теплопередачі.

Засоби передачі даних у системах ПЛК + ШІ

Основою для роботи сучасних інтелектуальних теплотехнічних систем є надійна інфраструктура передачі даних. Стабільні канали зв'язку забезпечують своєчасну доставку технологічної інформації від ПЛК до аналітичних модулів штучного інтелекту та назад.

Ключову роль у таких системах відіграють провідні промислові мережі на базі Ethernet, RS-485 та промислових версій TCP/IP. На відміну від бездротових рішень, дротові канали забезпечують більшу завадостійкість та стабільність у складних промислових умовах. В Україні та у світі активно розвиваються високошвидкісні волоконно-оптичні технології передачі даних. Використання пасивних оптичних мереж дозволяє організовувати надійні канали зв'язку між диспетчерськими пунктами, серверними приміщеннями та

віддаленими об'єктами теплоенергетики. Це створює умови для централізованої обробки даних та віддаленого управління. Зростання обсягів технологічних даних призводить до необхідності використання хмарних та розподілених обчислювальних платформ. Однак у випадку теплотехнічних систем перевага часто надається локальним серверам через підвищені вимоги до безпеки та надійності. Поєднання локальних серверів та обмеженої інтеграції з хмарними платформами вважається оптимальною моделлю.

Очікується подальший розвиток стандартів передачі даних, що дозволить зменшити затримки у системах управління та збільшити пропускну здатність каналів зв'язку. Це, у свою чергу, створить додаткові можливості для більш складних алгоритмів аналізу даних та інтеграції інтелектуальних функцій у процеси керування.

Інтелектуальні промислові системи (аналог ІІоТ) у теплоенергетиці

Концепції інтелектуальних промислових систем у теплоенергетиці базуються на інтеграції ПЛК, датчиків, локальних серверів та модулів штучного інтелекту в єдине інформаційне середовище. Такі системи забезпечують безперервний збір параметрів технологічних процесів та їх подальший аналіз.

На відміну від класичних систем автоматизації, інтелектуальні комплекси дозволяють переходити від реактивного до прогнозного управління. Це означає, що система здатна не лише реагувати на відхилення параметрів, а й заздалегідь передбачати можливі аварійні режими та пропонувати оптимальні стратегії роботи. Важливою особливістю таких систем є використання стандартизованих протоколів обміну даними, таких як Modbus TCP, OPC UA та MQTT. Ці протоколи забезпечують уніфікований

обмін інформацією між ПЛК, серверами та програмними модулями аналітики. Залишається актуальною проблема сумісності обладнання різних виробників. Саме тому все більшого значення набувають відкриті стандарти та уніфіковані інтерфейси, які дозволяють інтегрувати різноманітні пристрої у єдиний інформаційний простір.

Фахівці відзначають низку ключових тенденцій розвитку інтелектуальних теплотехнічних систем: зростання ролі алгоритмів машинного навчання, перехід до предиктивного технічного обслуговування, збільшення ролі цифрових двійників теплотехнічних об'єктів, а також розвиток автономних алгоритмів оптимізації енергоспоживання.

Спеціалізовані застосування інтелектуальних систем у теплотехнічній сфері

Спеціалізовані сфери застосування інтелектуальних систем у теплотехнічній галузі охоплюють об'єкти підвищеної відповідальності, такі як теплоелектроцентралі, об'єкти критичної інфраструктури та промислові енергетичні комплекси. У таких системах поєднання ПЛК та ШІ використовується для забезпечення максимальної стабільності роботи, захисту обладнання та оперативного реагування на надзвичайні ситуації.

Прикладами застосування є моніторинг аварійних режимів, автоматизоване відключення небезпечних ділянок системи, контроль технічного стану обладнання та підтримка прийняття рішень персоналом.

Подібні системи вважаються менш вразливими до фізичних ушкоджень завдяки децентралізованій архітектурі та автономності роботи базових ПЛК навіть у разі втрати зв'язку з аналітичними модулями.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1. Класифікація та структура сучасних теплоенергетичних комплексів

Сучасні теплоенергетичні комплекси є багаторівневими технічними системами, призначеними для генерації, перетворення, транспортування та розподілу теплової енергії. До них належать котельні установки, центральні та індивідуальні теплові пункти, теплоелектроцентралі, теплові мережі, а також локальні системи опалення та гарячого водопостачання промислових і житлових об'єктів.

За функціональним призначенням теплоенергетичні системи поділяються на виробничі (котельні, теплогенератори), транспортні (теплові мережі) та споживчі (тепlopункти, системи опалення, вентиляції та кондиціонування). Їх структура включає джерела тепла, теплообмінні апарати, трубопровідні системи, насосні агрегати, запірно-регулюючу арматуру та засоби автоматизації.

Теплоенергетичні комплекси характеризуються значною тепловою інерцією, складними гідравлічними режимами та взаємозалежністю параметрів, що робить їх типовими об'єктами для впровадження автоматизованих та інтелектуальних систем керування.



Рис. 1.1. Приклад тепло-системи будинку



Рис. 1.2. Приклад сучасної тепло-системи промислової.

1.2. Основні технологічні параметри (температура, тиск, витрата) та методи їх контролю

Ефективність роботи теплоенергетичних систем визначається стабільністю та точністю підтримання основних технологічних параметрів – температури, тиску та витрати теплоносія. Температура є ключовим показником якості тепlopостачання. Контроль здійснюється у подаючих та

зворотних трубопроводах, на вході та виході теплообмінників, а також у контрольних точках споживачів. Для стабілізації застосовуються автоматичні регулятори, які змінюють інтенсивність теплообміну шляхом керування клапанами або насосами.

Тиск у системі забезпечує циркуляцію теплоносія та запобігає утворенню повітряних пробок. Регулювання тиску здійснюється за допомогою насосних станцій, розширювальних баків та запобіжних клапанів. Витрата теплоносія визначає кількість переданої теплової енергії та контролюється витратомірами різних типів – електромагнітними, ультразвуковими або вихровими. Сучасні методи контролю включають цифрову фільтрацію сигналів та адаптивні алгоритми регулювання.

Окрім основних параметрів, у сучасних теплоенергетичних системах також контролюються похідні величини, зокрема температурний перепад між подаючим та зворотним трубопроводами, коефіцієнти тепловіддачі та показники теплових втрат. Аналіз цих параметрів дозволяє більш точно оцінювати ефективність роботи обладнання та своєчасно виявляти деградацію теплообмінних поверхонь. Для підвищення точності вимірювань застосовуються методи програмної компенсації похибок, цифрова фільтрація сигналів та алгоритми усереднення даних. У складних системах використовуються резервовані канали вимірювання, що підвищує надійність контролю та дозволяє уникнути помилкових спрацьовувань.

Використання інтелектуальних методів аналізу параметрів дає змогу реалізувати адаптивну зміну режимів роботи обладнання на основі прогнозування можливих перевантажень або аварійних ситуацій.

1.3. Огляд сенсорних засобів для збору теплотехнічних даних

Для збору даних у теплоенергетичних системах застосовуються промислові датчики температури, тиску та витрати, що забезпечують високу точність і надійність в умовах підвищених температур та вібрацій. Датчики температури базуються на платинових термометрах опору (Pt100, Pt1000) або термопарах типу К та J. Вони мають уніфіковані вихідні сигнали та легко інтегруються з системами автоматизації.

Датчики тиску використовують тензорезистивні або п'єзорезистивні сенсори та оснащуються уніфікованими струмовими інтерфейсами 4–20 мА, що забезпечує стійкість до перешкод та втрат сигналу. Витратоміри можуть бути електромагнітними, ультразвуковими або механічними, залежно від характеристик теплоносія та вимог точності.

Сучасні сенсорні засоби дедалі частіше оснащуються вбудованими мікропроцесорними модулями, що дозволяє виконувати попередню обробку сигналів безпосередньо на рівні датчика. Це забезпечує більшу точність вимірювання та знижує навантаження на ПЛК. Важливою тенденцією є використання так званих «розумних» датчиків, які підтримують цифрові протоколи зв'язку та мають можливість самодіагностики. Такі сенсори здатні повідомляти систему керування про вихід параметрів за допустимі межі або про необхідність технічного обслуговування.

Паралельно розвиваються безконтактні методи вимірювання, що підвищують надійність експлуатації у агресивних та високотемпературних середовищах.

1.4. Програмовані логічні контролери у теплоенергетиці

Програмовані логічні контролери (ПЛК) є базовими елементами сучасних систем автоматизації теплоенергетичних об'єктів. Вони призначені для збору оперативних даних, їх обробки в реальному часі та генерації керуючих впливів на виконавчі механізми.

У теплоенергетиці широко застосовуються модульні ПЛК середнього та верхнього класу з підтримкою аналогових і дискретних входів/виходів, інтерфейсів промислового зв'язку (RS-485, Ethernet) та стандартних протоколів (Modbus, OPC UA).



Рис. 1.3. ПЛК



Рис. 1.4. Різновид ПЛК

Окрім базових функцій керування, сучасні ПЛК дедалі частіше виконують функції збору статистичних даних, журналювання подій та первинного аналізу технологічної інформації. Це дозволяє реалізувати концепцію локальної аналітики без необхідності постійного звернення до зовнішніх серверів. У промислових умовах великого значення набуває відмовостійкість ПЛК. Для цього застосовуються резервні процесорні модулі, дубльовані канали живлення та апаратні засоби захисту від перенапруг і електромагнітних завад.

Розвиток обчислювальних можливостей ПЛК дає змогу впроваджувати елементи машинного навчання безпосередньо на рівні контролера, що відкриває нові перспективи для автономного управління теплотехнічними процесами.

1.5. Вимоги до автоматизованих систем керування теплоенергетичними процесами

Автоматизовані системи керування теплоенергетичними процесами повинні забезпечувати високу надійність, відмовостійкість та точність регулювання. Основними вимогами є безперервність роботи, швидка реакція на відхилення параметрів та можливість масштабування. Система має підтримувати самодіагностику, аварійні режими, архівацію даних та передачу інформації на верхній рівень керування. Особлива увага приділяється інформаційній безпеці, особливо при інтеграції з зовнішніми мережами та системами аналітики.

Додатковими вимогами до автоматизованих систем є масштабованість та можливість інтеграції з верхнім рівнем керування підприємства. Це дозволяє розширювати систему у міру зростання обсягів виробництва або модернізації обладнання без повної заміни апаратної платформи.

Важливою є вимога до стандартизації інтерфейсів та протоколів обміну, що забезпечує сумісність обладнання різних виробників. Також суттєве значення має відповідність міжнародним стандартам функціональної безпеки, що регламентують роботу критично важливих систем.

1.6. Обґрунтування вибору об'єкта автоматизації

Об'єктом автоматизації у даній роботі є локальна теплотехнічна установка із замкнутим контуром циркуляції теплоносія, яка включає насосну групу, теплообмінник, трубопровідну систему та регулюючу арматуру. Саме такий об'єкт дозволяє повною мірою реалізувати концепцію сумісного використання традиційних ПЛК та методів штучного інтелекту, оскільки поєднує динамічні теплові процеси та необхідність постійної адаптації режимів роботи.

Вибір локальної теплотехнічної установки як об'єкта автоматизації також зумовлений можливістю гнучкого моделювання різноманітних робочих режимів. Це дозволяє проводити експериментальні дослідження без ризику порушення стабільності роботи реальних промислових об'єктів.

Окрім того, така установка є зручною базою для відпрацювання алгоритмів взаємодії між ПЛК та системами штучного інтелекту, що забезпечує практичну цінність отриманих результатів.

1.7. Напрями інтелектуалізації теплоенергетичних систем

Інтелектуалізація теплоенергетичних систем є одним із ключових напрямів розвитку сучасної промислової автоматизації та енергетики. Вона

передбачає поступовий перехід від класичних алгоритмів регулювання до адаптивних, самонавчальних і прогнозних методів керування, які здатні враховувати динамічні зміни режимів роботи обладнання та вплив зовнішніх факторів. У центрі цього процесу знаходиться інтеграція традиційних програмованих логічних контролерів із алгоритмами штучного інтелекту, що дозволяє значно розширити функціональні можливості систем керування. Одним із основних напрямів інтелектуалізації є впровадження алгоритмів машинного навчання для прогнозування теплових навантажень. На основі історичних даних про температуру зовнішнього повітря, споживання теплової енергії та режимів роботи обладнання формуються моделі, здатні передбачати зміну навантажень на години або навіть доби наперед. Це дозволяє системі заздалегідь оптимізувати режими роботи насосів, пальникових пристроїв та регулюючої арматури.

Перспективним напрямом є розвиток систем предиктивного технічного обслуговування. На відміну від традиційного регламентного підходу, інтелектуальні системи здатні аналізувати параметри вібрації, температури підшипників, перепади тиску та інші непрямі ознаки зносу обладнання. На основі таких даних формуються прогнози щодо залишкового ресурсу вузлів та агрегатів, що дозволяє проводити обслуговування саме тоді, коли це дійсно необхідно. Особливу роль відіграє концепція цифрових двійників теплотехнічних систем. Цифровий двійник є віртуальною моделлю реального об'єкта, яка в режимі реального часу отримує дані від ПЛК і відображає поточний стан обладнання. Це дає змогу моделювати різні аварійні та перехідні режими без ризику для реальної установки, а також відпрацьовувати нові стратегії керування в безпечному віртуальному середовищі.

Важливим напрямом інтелектуалізації є впровадження адаптивних регуляторів, здатних автоматично підлаштовувати свої параметри в процесі роботи. На відміну від класичних ПІД-регуляторів зі сталими коефіцієнтами, адаптивні алгоритми враховують зміну характеристик об'єкта керування,

старіння обладнання, забруднення теплообмінних поверхонь та інші фактори, що впливають на динаміку процесів. Зростає також роль розподілених інтелектуальних систем, де обчислення виконуються не лише на центральних серверах, а й безпосередньо на рівні контролерів та інтелектуальних датчиків. Такий підхід, відомий як edge computing, дозволяє суттєво знизити затримки передачі даних та підвищити надійність роботи системи у разі втрати зв'язку з центральним вузлом.

Окрему увагу приділяють питанням кібербезпеки інтелектуальних теплоенергетичних систем. У міру зростання ролі цифрових технологій збільшується ризик несанкціонованого доступу до систем керування. Тому активно розробляються багаторівневі системи захисту, що включають апаратні засоби шифрування, сегментацію мереж, контроль цілісності програмного забезпечення та моніторинг підозрілої активності.

Інтеграція інтелектуальних модулів із традиційними ПЛК також сприяє розвитку гібридних систем керування, у яких поєднуються жорстко детерміновані алгоритми та гнучкі інтелектуальні методи. Це дозволяє поєднати високу швидкодію та надійність класичних систем автоматизації з адаптивністю та здатністю до самооптимізації сучасних алгоритмів машинного навчання. Подальший розвиток інтелектуалізації теплоенергетичних систем пов'язаний із розширенням використання великих даних (Big Data) та аналітики в реальному часі. Накопичення великих масивів технологічної інформації створює передумови для глибшого розуміння закономірностей роботи теплотехнічних об'єктів та впровадження більш точних і ефективних стратегій управління.

Таким чином, напрями інтелектуалізації охоплюють не лише технічні аспекти модернізації обладнання, а й зміну концепції управління теплоенергетичними системами — від реактивного реагування до проактивного, прогнозного та самонавчального керування.

РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРНА СХЕМА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

2.1. Вибір елементної бази апаратного комплексу

Відповідно до обраних напрямів дослідження необхідно сформувати елементну базу апаратно-програмного комплексу для автоматизації та інтелектуалізації теплотехнічних процесів. Основною вимогою до елементної бази є забезпечення надійного збору технологічних параметрів, їх обробки в режимі реального часу та можливості інтеграції з програмними засобами штучного інтелекту. Центральним елементом системи обрано програмований логічний контролер (ПЛК) промислового класу, який забезпечує стабільну роботу в умовах підвищених температур, вібрацій та електромагнітних завад. ПЛК повинен підтримувати роботу з аналоговими та дискретними сигналами, а також мати вбудовані або розширювані інтерфейси зв'язку **RS-485** та **Ethernet** з підтримкою протоколів **Modbus RTU/TCP**.

Для вимірювання температури застосовуються платинові термоперетворювачі опору типу **Pt100/Pt1000**, які забезпечують високу точність вимірювання та стабільність характеристик у широкому діапазоні температур. Для контролю тиску використовуються тензорезистивні датчики із струмовим виходом **4–20 мА**, що забезпечує завадостійкість при передачі сигналу на значні відстані. Витрата теплоносія контролюється за допомогою електромагнітних або ультразвукових витратомірів, які дозволяють здійснювати безконтактні вимірювання без створення додаткового гідравлічного опору в трубопроводі.

Для перетворення та уніфікації сигналів застосовуються модулі аналогового введення, модулі дискретного введення-виведення, а також проміжні перетворювачі сигналів. Для підвищення надійності роботи системи передбачене застосування джерел безперебійного живлення та стабілізаторів напруги. Для реалізації сумісної роботи ПЛК і модуля штучного інтелекту

застосовується промислова обчислювальна станція або вбудований комп'ютер, який забезпечує обробку даних у табличному форматі (наприклад, у середовищі Excel) та виконання алгоритмів машинного навчання. Передача даних між ПЛК та аналітичним модулем здійснюється через стандартні протоколи промислового зв'язку.

Таким чином, елементна база апаратного комплексу формується з урахуванням вимог до надійності, масштабованості та можливості подальшого розвитку системи в напрямку інтелектуалізації процесів теплоенергетики.

2.2. Структурна схема системи управління

Структурна схема апаратно-програмного комплексу побудована за принципом гібридної архітектури: **надійна детермінована підсистема керування** (ПЛК з I/O) забезпечує реальновреміне управління виконавчими механізмами та захистом, а **аналітично-оптимізаційна підсистема** (Edge/Server з модулями ШІ і базою даних / Excel-буфером) виконує збір історії, прогнозування, навчання моделей та видачу коригувальних уставок. Над цими шарами знаходиться візуалізація/SCADA та інтерфейс оператора.

Ключові принципи архітектури:

- чітке розділення реального часу (ПЛК) та ресурсоємної аналітики (ШІ/сервер);
- стандартизовані інтерфейси для передачі даних (Modbus/OPC UA, Ethernet);
- локальна обробка критичних сигналів у ПЛК (аварійні блокування, релейні логіки);

- періодична або подієва передача агрегованих даних до аналітичного модуля;
- можливість зворотного впливу від ШІ — корекційні уставки або рекомендації, що впроваджуються контролером за визначеною логікою авторизації/перевірки.

2.3 Інтеграція ПЛК, датчиків та середовища обробки даних

1) Первинні вимірювальні блоки (датчики)

Температура: Pt100 / Pt1000 або термопари (тип К) — вихід: чутливість $\pm 0.1\text{--}0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$; підключення до аналогових модулів ПЛК через 3-/4-дротові схеми.

Тиск: тензорезистивні датчики з виходом **4–20 mA**, діапазони 0–0.6...0–1.6 МПа.

Витрата: електромагнітні або ультразвукові витратоміри — виходи: імпульсні/analog/Modbus.

Додаткові датчики: вібрація (акселерометри), рівні, датчики якості теплоносія — для діагностики.

Рекомендація: використовувати «розумні» датчики з цифровим інтерфейсом там, де це можливо — вони дають діагностику самого датчика (self-test), калібрування та цифрову передачу (нижча похибка).

2) Модулі попередньої обробки / I/O

Аналогові входи (0–10 V, 4–20 mA) з АЦП високої роздільності (min 16 bit) та локальною фільтрацією шуму.

Проміжні перетворювачі для імпульсних витратомірів (імпульс → частота/4–20 mA).

Локальні вимірювальні шафи з захистом від перенапруг, розрядників та ізоляцією.

3) ПЛК — реальний час

Обов'язкові функції: циклічний опит (scan), PID/логіка, захисні інтерлоки, аварійне виключення, журнал подій.

Рекомендована модель: модульний ПЛК з Ethernet і RS-485, наприклад Siemens S7-1200 / S7-1500 або аналоги Schneider/Omron (залежно від доступності).

Локальні цикли: всі критичні рішення (аварія насоса, розрив контуру) обробляються на ПЛК — це гарантує детермінованість.

Комунікації з AI: ПЛК публікує знімки станів, агреговані значення і журнали на Edge через Modbus TCP / OPC UA; приймає коригувальні уставки (лише після перевірки безпеки).

4) Edge / Промисловий сервер (аналітичний рівень)

Функції: прийом даних в реальному часі, архівація (time-series DB), попередня обробка (агрегація, нормалізація), запуск ML-моделей (інференс), інтерфейс користувача, бек-офіс для тренування моделей (batch).

Excel-буфер: для сумісності та простоти — на Edge формується щоденний/годинний експорт у таблиці Excel або CSV (архів), які можуть використовуватися для ad-hoc аналізу та навчання моделей. (Зауваження: для production краще використовувати базу time-series, а Excel — як доступний інструмент для інженера.)

AI Engine: модулі прогнозування навантажень, діагностики стану обладнання, оптимізації витрат/режимів. Інференс — переважно реального часу (наприклад, кожні 1–5 хв), тренування — офлайн (щоденно/щотижнево).

5) SCADA / HMI / Операторські інтерфейси

Відображення ключових параметрів, трендів, тривог; можливість ручного коригування уставок; історія аварій.

Рольова модель доступу, журнал дій операторів, підписані зміни уставок.

6) Верхній рівень — інтеграція

Можливість передачі агрегованих даних до корпоративних систем, міських диспетчерських або енергетичного оператора через захищені канали (VPN, TLS).

Інтеграція з енергетичними ринковими сигналами (ціни/запити) — для оптимізації роботи з урахуванням вартості енергії (опціонально).

Інтерфейси, протоколи, частоти опитування і політики обміну

Протоколи:

Лінійка вимірювань → ПЛК: аналог (4–20 mA / 0–10 V) або Modbus RTU (RS-485) для «розумних» витратомірів;

ПЛК ↔ Edge: Modbus TCP або OPC UA (Ethernet);

Edge ↔ SCADA: OPC UA / REST API;

Віддалений доступ: VPN + HTTPS / TLS, багатофакторна авторизація.

Частоти опитування (рекомендовані):

Температура: 1–10 s (для внутрішньої слідкування);

Тиск: 1–5 s;

Витрата: 1 s (для імпульсних лічильників), або агрегація 1 min;

Лог подій, аварійні тригери — миттєво (реєстрація в ПЛК і миттєва реакція).

Політика обміну:

Критичні сигнали: передача безпосередньо у ПЛК/локальну аварійну логіку; не чекають погодження з АІ.

Оперативні дані: передаються у Edge у режимі push (через Modbus TCP/OPC UA) з таймштампом.

Дані для тренування: зберігаються у Time-Series DB; періодично експортуються у Excel/CSV для offline-аналізу/візуалізації.

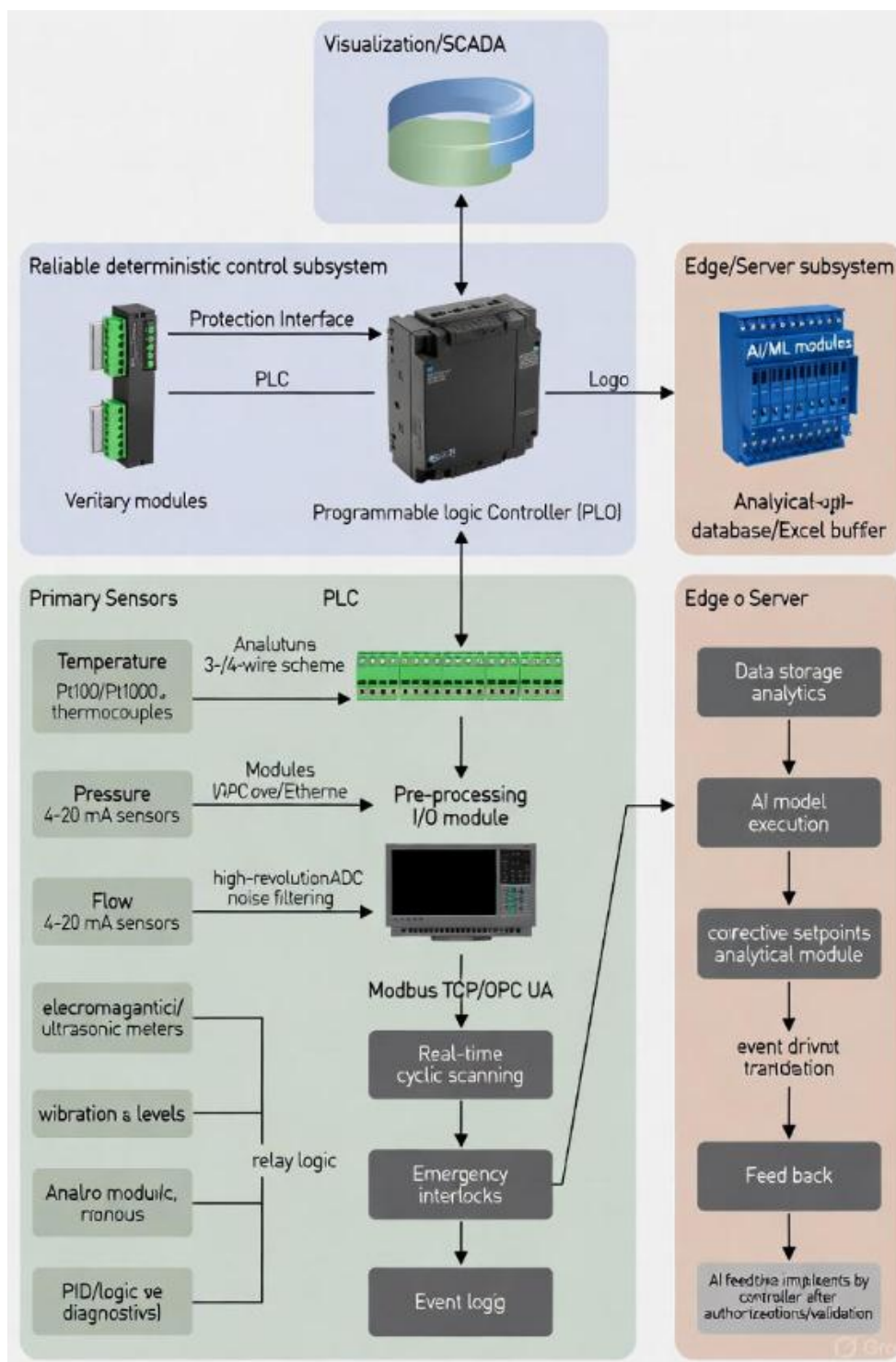


Рис. 2.1. Структурна схема системи управління

РОЗДІЛ 3. ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

3.1. Функціональна структура збору та обробки даних

Функціональна структура системи збору та обробки даних у теплоенергетичному комплексі побудована таким чином, щоб забезпечити безперервний контроль ключових параметрів та можливість їх глибокого аналітичного опрацювання із залученням технологій штучного інтелекту. На першому рівні працює традиційна система реального часу, основу якої становлять програмований логічний контролер (ПЛК) та первинні перетворювачі. На другому рівні розміщується аналітичний модуль, представлений Edge-сервером або промисловою обчислювальною станцією, де виконується аналітика, прогнозування та оптимізація режимів роботи. Первинні сенсори формують дані про температуру, тиск, витрату та інші показники, що описують стан теплосистеми. Датчики температури типу Pt100/Pt1000 або термопари забезпечують високу точність у широкому температурному діапазоні, а датчики тиску зі стандартизованим виходом 4–20 мА гарантують завадостійкість та стабільність передачі вимірювальної інформації. Витратоміри електромагнітного або ультразвукового типів дають змогу визначати витрату теплоносія без суттєвих втрат тиску. Сигнали з цих датчиків надходять до модулів введення ПЛК, де відбувається аналогово-цифрове перетворення, фільтрація, нормалізація та перевірка на відповідність допустимому робочому діапазону.

ПЛК виконує функції опитування датчиків, керування регулюючими органами, фіксації аварійних подій та забезпечує детерміновану роботу системи незалежно від стану аналітичного рівня. Передавання інформації на сервер здійснюється через промислові протоколи Modbus TCP або OPC UA, що забезпечують швидкість, захист даних та можливість масштабування

системи. На аналітичному рівні дані агрегуються, проходять очищення та зберігаються у спеціалізованих базах часових рядів. Паралельно формується Excel-буфер, зручний для оперативного аналізу інженерами. На основі цих даних працюють моделі штучного інтелекту, які здійснюють прогнозування температурних навантажень, аналізують поведінку обладнання, визначають небажані тренди та виявляють аномалії у роботі системи. Цей рівень також генерує рекомендації для ПЛК або пропонує коригувальні уставки, які можуть бути автоматично або вручну підтверджені оператором.

Таким чином, функціональна структура поєднує переваги класичної автоматики, що працює у реальному часі, з адаптивною та гнучкою аналітикою на основі ШІ, що підвищує ефективність управління теплотехнічними процесами.

3.2. Алгоритми управління виконавчими механізмами

Алгоритми управління виконавчими механізмами побудовані на поєднанні класичного регулювання, реалізованого у ПЛК, та можливості оптимізації з боку модуля штучного інтелекту. Основними виконавчими елементами теплосистеми є електроприводи насосів, частотно-регульовані двигуни, регулюючі клапани, запірні арматури та інші механізми, віддія яких залежить рівень тиску, температура і витрата теплоносія. Робота алгоритмів починається зі збирання актуальних параметрів із датчиків. ПЛК перевіряє значення на аварійність, застосовує фільтрацію та усереднення, після чого передає їх у блок керування. У ПЛК реалізовано ПІД-регулятори, які підтримують задані значення температури, тиску та витрати. На основі різниці між бажаним та фактичним значенням параметра система формує керуючий вплив: зміну частоти обертання насоса, зміщення регулюючого клапана або подання відповідних дискретних команд.

Важливою частиною алгоритму є система взаємоблокувань, що запобігає небезпечним станам. Зокрема, ПЛК не допускає увімкнення насоса при відсутності теплоносія, не дозволяє одночасного відкриття взаємовиключаючих клапанів, а також фіксує та реагує на перевищення тиску або швидке його падіння. Модуль ІІІ аналізує історичні та поточні дані та формує пропозиції щодо оптимальних уставок. Наприклад, система може передбачити пікове теплове навантаження та випереджувально змінити продуктивність насосів, зменшивши коливання тиску або забезпечивши стабільнішу подачу тепла. Після перевірки ПЛК отримує нові уставки у межах дозволеного діапазону та вносить корекції в регулюючі контури.

Таким чином, алгоритми управління виконавчими механізмами являють собою гнучку багаторівневу структуру, де традиційні ПД-регулятори, перевірена логіка аварійних блокувань та сучасні аналітичні інструменти доповнюють один одного, створюючи більш стабільний і енергоефективний режим роботи теплосистеми.

3.3. Взаємодія системи з модулем штучного інтелекту

Взаємодія між ПЛК та модулем штучного інтелекту є ключовим елементом модернізованої системи управління. Цей процес реалізується через структуровану схему обміну даними, що включає передавання показників від ПЛК, аналітичну обробку на сервері, генерацію рекомендацій та відправку коригувальних параметрів назад до контролера. ПЛК у реальному часі передає серверу дані про температуру, тиск, витрату та інші робочі параметри, а також інформацію про стан виконавчих механізмів. Передача здійснюється через стандартизовані протоколи Modbus TCP або OPC UA, що забезпечує високу швидкість та надійність комунікацій. На сервері ці дані накопичуються та піддаються попередній структуризації, після чого передаються в модуль ІІІ.

Штучний інтелект аналізує динаміку параметрів, оцінює відхилення від нормальних режимів та формує прогностичні моделі. На основі цих моделей система може передбачити можливе зростання тиску, визначити майбутнє теплове навантаження або виявити неправильну роботу обладнання. Окремий блок модулю ШІ відповідає за генерацію оптимізаційних рекомендацій, наприклад: зменшення продуктивності насоса, зміщення позиції клапана чи зміну уставки регулювання температури.

Перед тим як такі рекомендації надійдуть у ПЛК, вони проходять перевірку на допустимість та відповідність межам безпечної роботи. За умов ручного режиму оператор може підтвердити або відхилити запропоновані зміни. У автоматичному режимі ПЛК отримує уставки негайно та оновлює параметри регулювання. Після цього система формує зворотний зв'язок, надсилаючи до аналітичного модуля фактичні параметри, що дозволяє алгоритмам ШІ адаптуватися та вдосконалюватися в процесі роботи.

У результаті такої інтеграції теплосистема отримує адаптивні механізми регулювання, які поєднують надійність ПЛК та гнучкість штучного інтелекту, що дозволяє зменшити енергоспоживання, підвищити стабільність роботи та збільшити термін служби обладнання.

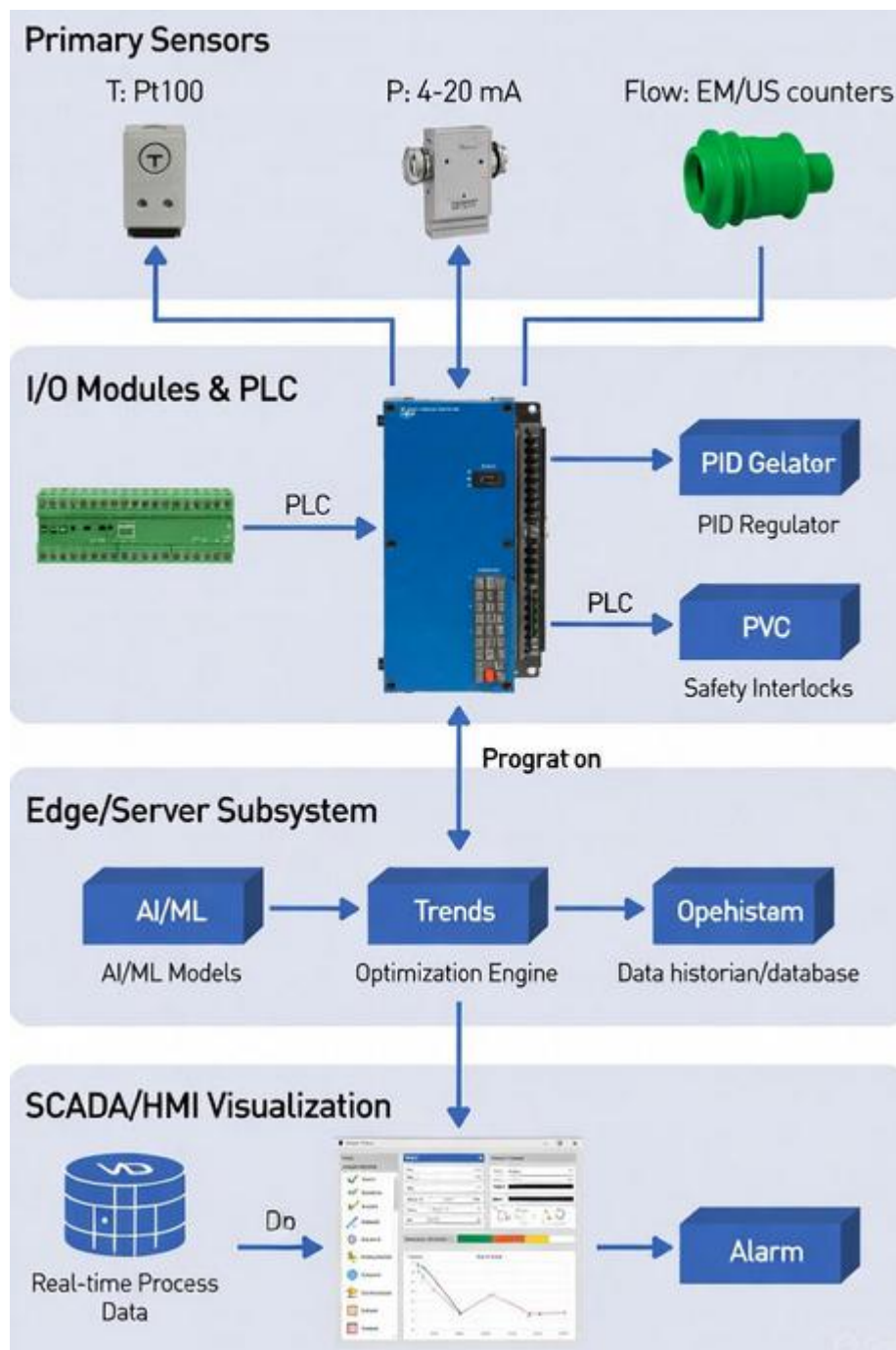


Рис. 3.1. Функціональна схема

РОЗДІЛ 4. ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ТА РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

4.1. Розрахунок та вибір електротехнічних компонентів

У цьому підрозділі описано підхід до підбору електротехнічних компонентів апаратного комплексу, що реалізує сумісне використання ПЛК і модулів ШІ в теплотехнічних системах. Підбір базується на вимогах до надійності, детермінованості реакцій у режимі реального часу, захисту від перенапруг та перешкод, а також на можливості подальшої масштабованості та інтеграції з аналітичним рівнем (Edge/Server). Нижче наведені конкретні компоненти з орієнтирними моделями та докладні розрахунки по енергетичних ланцюгах.

4.1.1. Перелік робочих навантажень (прикладна конфігурація)

Для проведення розрахунків формуємо типовий набір навантажень, який відповідає локальній теплотехнічній установці з двома циркуляційними насосами та базовою автоматикою:

1. **Насос 1** — асинхронний двигун 3,0 кВт, 400 В, 50 Гц.
2. **Насос 2** — асинхронний двигун 3,0 кВт, 400 В, 50 Гц.
3. **VFD** — частотні перетворювачі по одному на насос (підбираються під номінальний струм двигуна).
4. **ПЛК + I/O**: Siemens S7-1200 CPU1214C + SM AI/DI/DO модулі (орієнтовна споживана потужність $24\text{ V} \approx 6\ldots 10\text{ W}$ для CPU + модулів).
5. **Edge/Server**: промисловий сервер $\approx 300\text{ W}$ (пік).
6. **Мережевий комутатор, маршрутизатор, модем**: $\approx 30\ldots 50\text{ W}$.
7. **Джерело 24 V DC** (живлення ПЛК та модулів) — розрахункове навантаження $5\ldots 8\text{ A}$.

8. **Сенсори (аналог/цифрові):** сумарно до 2...4 А на 24 V (включно з передавачами Pt100→4–20 mA).
9. **Інші споживачі** (індикатори, оптопари, лампи) — до 1 А

4.1.2. Розрахунок електричних навантажень

Розрахунок струму навантаження двигуна (приклад для 3,0 кВт)

Для визначення номінального струму асинхронного двигуна використовуємо формулу:

$$I = \frac{P_{el}}{\sqrt{3}U \cos \varphi}$$

$$P_{el} = \frac{P_{mech}}{\eta} P_{el} = \frac{P_{mech}}{\eta}$$

де електрична потужність з урахуванням ККД двигуна.

$$P_{mech} = 3.0 \text{ kW} \quad P_{mech} = 3.0 \text{ kW}$$

Візьмемо припущення: , ККД

$\eta = 0.90$, коефіцієнт потужності
 $\cos \varphi = 0.85$, мережна

напруга $U = 400 \text{ V}$.

Обчислюю електричну потужність:

$$P_{el} = \frac{3.0 \text{ kW}}{0.90} = 3.333 \text{ kW} = 3333 \text{ W}$$

Обчислюю знаменник:

$$\sqrt{3}U \cos \varphi = 1.73205 \times 400 \times 0.85$$

Обчислюю струм :

$$I = \frac{3333}{589.897} \approx 5.65 \text{ A}$$

Отже, номінальний струм двигуна $\approx 5.65 \text{ A} \approx 5.65 \text{ A}$.

Для 3 кВт двигуна при 400 V номінальний струм $\sim 5.65 \text{ A} \sim 5.65 \text{ A}$.
Вибір VFD і захисних пристроїв здійснюємо з запасом на пускові струми —
типово VFD підбирають з запасом 1,15–1,25 від I_n ; захисні автомати — з
урахуванням характеристик пускової кривої.

Вибір перетворювача частоти (VFD) з номінальним струмом $\geq 1.2 \times I_n$,
 $\geq 1.2 \times I_n$, щоб витримати стартові навантаження і дати запас. Для
 $I_n \approx 5.65 \text{ A}$ VFD з Nom. $I \approx 7 \text{ A}$ або VFD для двигуна
4kW/8A.

4.1.3. Підбір UPS та резервного живлення

Сумарні споживачі, що повинні працювати від UPS (щоб забезпечити
контрольне завершення та підтримку зв'язку) — Edge Server, ПЛК, мережеве
обладнання, комунікаційні компоненти.

- Edge Server — 300 W.
- PLC + I/O — 30 W.
- Комутатор + маршрутизатор — 40 W.
- Додаткові пристрої (HD camera, модем) — 30 W.
- Резервні запаси та втрати інвертора $\approx 20\% \approx 20\%$

Сумарне навантаження $P_{sum} = 300 + 30 + 40 + 30 = 400 \text{ W}$.

$P_{sum} = 300 + 30 + 40 + 30 = 400 \text{ W}$. З урахуванням втрат (20%): реальна
необхідна потужність $UPS \approx 400 \times 1.2 = 480 \text{ W}$.

Бажане резервування $t = 30 \text{ хв} = 0.5 \text{ h}$. Енергія

$$E = P_{sum} \times t = 400 \text{ W} \times 0.5 \text{ h} = 200 \text{ Wh}.$$

$E = P_{sum} \times t = 400 \text{ W} \times 0.5 \text{ h} = 200 \text{ Wh}$. Для підбору акумулятора 12 V потрібно ємність:

$$Ah = \frac{E}{V_{bat}} \times \frac{1}{\eta_{inu}}$$

Ефективність інвертора $\eta_{inu} = 0.9(90\%)$: $\eta_{inu} = 0.9(90\%)$:

$$Ah = \frac{200}{12} \times \frac{1}{0.9} = 16.667 \times 1.111 \approx 18.52 Ah$$

Батарея 12 V $\approx 18-20 Ah \approx 18-20 Ah$ для автономії 30 хв при навантаженні 400 W.

Вибір ПЛК та модулів введення/виведення (I/O) де орієнтовна кількість каналів:

- Аналогові входи (AI, 4–20 mA / 0–10 V / RTD):
- Temp supply (Pt100 → transmitter) — 2 канали;
- Return Temp — 2 канали;
- Pressure — 2 канали;
- Flow — 2 канали;
- Додаткові — 2 канали.
→ Разом AI $\approx$ **10 каналів** (запас 20–30% $\Rightarrow$ обираємо 12–16 каналів).
- Дискретні входи (DI):
- Pump1_Run, Pump2_Run, E-Stop, Door, Level_Low, Valve_Pos_Switches $\rightarrow \approx$ **8–12 DI**.
- Дискретні виходи (DO):
- Start/Stop Pump1, Start/Stop Pump2, Valve_Open/Close, AlarmLamp, Buzzer $\rightarrow \approx$ **8 DO**.
- Аналогові виходи (AO):

- Setpoint VFD (0–10 V) — 1–2 канали;
→ 2 АО.

Модульний ПЛК з можливістю додавання AI/DI/DO модулів. Наприклад **Siemens S7-1200 CPU1214C + SM1231 AI + SM1234 DI/DO**. Або **Schneider Modicon M241** з M-analog modules.

Вибір і підключення датчиків:

Температурні датчики

- **Pt100 (3-провідний)** підключений до RTD-входу AI-модуля або через польовий передавач Pt100→4–20 mA (наприклад, Rosemount/Endress transmitters). Перевага 4–20 mA: завадостійкість на великі відстані.

Датчики тиску

- **4–20 mA pressure transmitter** (WIKA, Endress+Hauser або аналог) — діапазон 0–1.6 МПа типово для теплових контурів.

Витратоміри

- **Electromagnetic flowmeter** (Siemens SITRANS FM) або ультразвуковий (KROHNE) — вихід 4–20 mA + Modbus.

Додаткові датчики

- Вібрація: акселерометр (для предиктивної діагностики).
- Рівень: поплавковий або ємнісний з DI.

Для того щоб був захист від перенапруг, ЕМС, гальванічна розв'язка прийняті наступні кроки:

- **PD (Surge Protection Device)** — тип 2 (клас II) на вводі живлення шафи.
- **Гальванічна розв'язка** між логікою (ПЛК, Edge) і силовими ланцюгами — оптопари, релейні розв'язки.

- **Фільтрація ЕМС:** на вводах VFD та кабелях живлення моторів рекомендується встановити LC-фільтри і дроселі за потреби, особливо при довгих кабелях.
- **Екранізація кабелів сигналів (4–20 mA, RS-485) і заземлення екранів** на одному кінці (у шафі) для уникнення петлі заземлення.
- **Категорія захисту шафи** — IP54/65 в залежності від місця встановлення.

Нижче — орієнтовний список з моделями компонентів для подальшої реалізації проєкту :

- **PLC CPU:** Siemens S7-1200 CPU1214C (6ES7214-1AG40-0XB0)
- **AI module (RTD/4–20 mA):** Siemens SM1231 AI (6ES7231-4HD32-0XB0)
- **DI/DO module:** Siemens SM1223/SM1234
- **VFD:** Siemens SINAMICS V20 4 kW (6SL3210-5BE32-5UV0) або Danfoss FC-102 4 kW
- **Flowmeter:** Siemens SITRANS FM MAG 5100
- **Pressure transmitter:** WIKA A-10 (4–20 mA)
- **Pt100 transmitter:** Endress+Hauser iTEMP TMT71 (Pt100→4–20 mA)
- **PS 24 V DC:** Mean Well DR-120-24 або Siemens SITOP 24V 10A
- **UPS:** APC Smart-UPS 1500VA (≈ 1000 W) з додатковою батареєю 12V 20Ah для 30–60 min
- **Main breaker / MCCB:** Siemens 3-pole 16 A (тип B/C)
- **Contactors / Motor protection:** Siemens 3RT2 + thermal relay
- **SPD:** Phoenix Contact or Schneider Type 2 SPD
- **Cables:** Cu 4 mm² for motors, Cu 1.5–2.5 mm² for 24 V circuits; Cat6 STP for Ethernet.
- **Enclosure/Panel:** steel cabinet IP54 with DIN-rail and ventilation.

4.2. Розробка схеми електричної принципової

Розробка електричної принципової схеми апаратного комплексу автоматизації теплотехнічної системи спрямована на формування цілісної функціональної структури, яка поєднує традиційні засоби керування на основі програмованого логічного контролера (ПЛК) із сучасною аналітичною підсистемою штучного інтелекту. Схема відображає взаємозв'язок між джерелами живлення, силовою комутацією, засобами автоматизації, первинними вимірювальними перетворювачами та модулем обробки даних, що забезпечує реалізацію алгоритмів машинного навчання та інтелектуального аналізу параметрів теплоносія.

Живлення системи здійснюється від трифазної мережі 3×400 В АС, яка вводить через автоматичний вимикач QF1. Цей апарат виконує функції захисту від коротких замикань та перевантажень, забезпечуючи безпечне підключення установки до промислової мережі. Після QF1 електроенергія надходить на розподільчу шину, звідки подається на силові кола виконавчих механізмів, частотний перетворювач та допоміжні перетворювачі живлення постійного струму 24 В. Окремим виходом живлення передбачається канал живлення підсистеми Edge/Server, яка реалізує обчислювальний модуль ІІІ. Таке рішення мінімізує вплив силових перешкод на роботу аналітичних алгоритмів і підвищує відмовостійкість системи. Однією з ключових частин схеми є силові виконавчі механізми, керування якими здійснюється через контактори КМ1, КМ2 та КМ3. Ці контактори забезпечують пуск та зупинку електроприводів теплотехнічної установки, а також дозволяють реалізувати алгоритми поетапного включення або пріоритетного навантаження обладнання. Перед приводами встановлено частотний перетворювач (VFD), який забезпечує плавне регулювання обертів насосів, що є критичним для стабілізації витрати та тиску в теплових мережах. VFD взаємодіє з ПЛК як через аналоговий вхід (керування швидкістю 0–10 В або 4–20 мА), так і через інтерфейс Modbus RTU для отримання діагностичної інформації. Це дає змогу

системі штучного інтелекту отримувати розширені дані про стан приводу та ефективніше виконувати прогнозну оптимізацію режимів роботи.

До ПЛК Siemens S7-1200 підключені модулі введення/виведення, які забезпечують прийом даних від усіх первинних перетворювачів та генерацію керуючих впливів на виконавчі механізми. Цей контролер обрано через його відмовостійкість, підтримку промислових протоколів, наявність швидких аналогових входів, можливість масштабування та ефективну інтеграцію з системами верхнього рівня. ПЛК отримує сигнали від температурних датчиків Pt100, підключених за трипровідною схемою, що підвищує точність вимірювання за рахунок компенсації опору ліній. Сигнали тиску та витрати передаються у вигляді уніфікованого струмового сигналу 4–20 мА, стійкого до завад, що особливо важливо при наявності частотних перетворювачів. ПЛК формує сигнали керування для контакторів КМ1–КМ3 через дискретні виходи, а також керує частотним перетворювачем шляхом передавання уставки на аналоговий вихід або через цифровий інтерфейс. Усі вихідні кола контролера мають гальванічну розв'язку, що захищає логічну частину від впливу силових перенапруг. Вбудована система аварійних блокувань передбачає реакцію на критичні перевищення температури, тиску, втрату сигналу датчика, помилки приводів, що дозволяє забезпечити безпечний режим роботи навіть при збоях у підсистемі ШІ.

Підсистема штучного інтелекту, реалізована у вигляді Edge/Server модуля, підключена до ПЛК за протоколом OPC UA або Modbus TCP, що забезпечує двосторонній обмін даними. На вхід модуля надходять всі вимірювальні параметри та статуси обладнання, а також інтерпретовані дані (наприклад, розрахункова теплова потужність чи ефективність). Модуль ШІ здійснює обробку часових рядів, прогнозує навантаження, виконує діагностику стану системи, генерує оптимальні уставки для приводів та клапанів. Після цього оновлені параметри надходять у ПЛК через захищений канал зв'язку, де вони проходять перевірку на відповідність допустимому

діапазону та застосовуються для корекції керуючих контурів. Таким чином забезпечується «м'яка» інтеграція ШІ в систему без порушення детермінованої роботи контролера.

Система живлення 24 В DC формується двома джерелами PS1 та PS2, що забезпечують redundancy-конфігурацію. Основне джерело лінійно живить ПЛК, датчики та модулі введення/виведення, тоді як резервне може бути включене через контролер резервування для забезпечення безперервної роботи у разі виходу з ладу основного блока. Завдяки цьому ПЛК та аналітичний модуль можуть функціонувати безперервно навіть під час аварій у силовій частині. Комунікаційні лінії в схемі об'єднані у промислову мережу, що підтримує розділення VLAN, захищений обмін пакетами та можливість швидкого резервування. Взаємодія між ПЛК, частотним перетворювачем та Edge/AI-модулем забезпечує безперервне оновлення даних, а також можливість передавати сигнали на SCADA/HMI, де оператор може контролювати стан системи та впливати на роботу обладнання.

Запропонована електрична принципова схема демонструє повністю інтегровану, відмовостійку та масштабовану архітектуру, яка поєднує традиційний підхід до автоматизації на базі ПЛК із сучасними технологіями штучного інтелекту, що працюють у режимі аналізу великого масиву даних та прогнозного управління. Така інтеграція дозволяє значно підвищити ефективність теплотехнічної установки, знизити енергоспоживання і забезпечити стабільність технологічного процесу навіть у змінних умовах роботи.

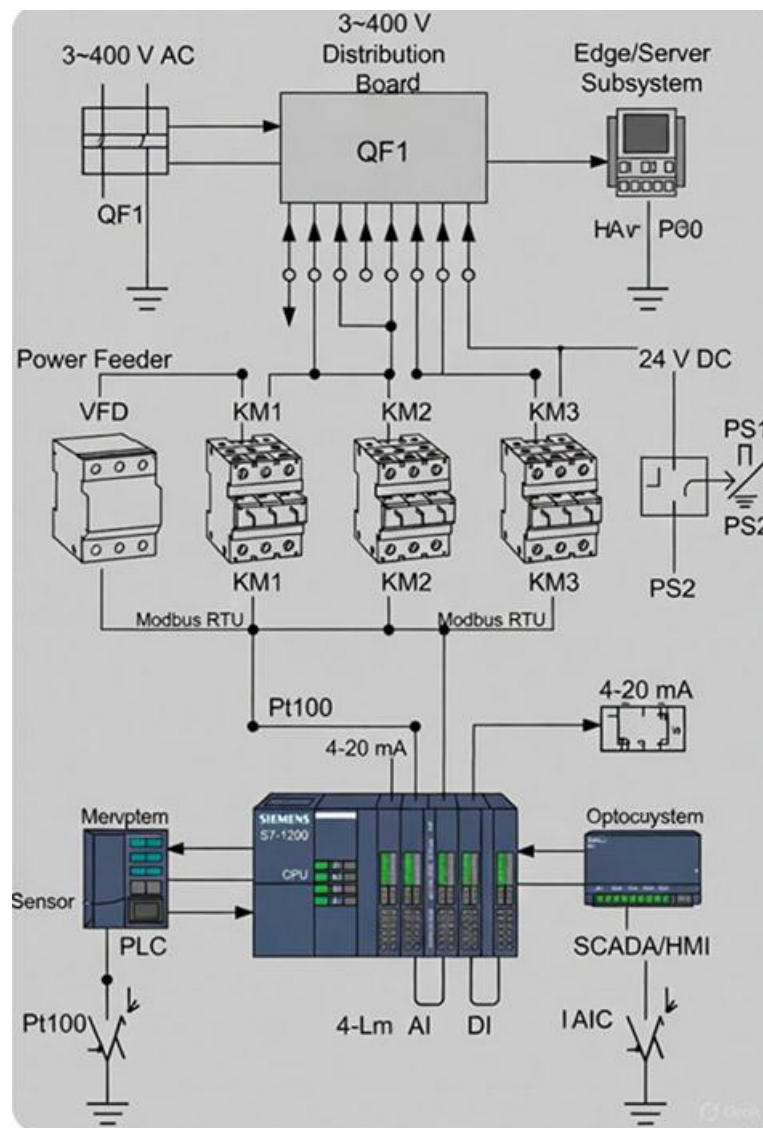


Рис. 4.1 Схема електрична принципова

РОЗДІЛ 5. АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ

5.1. Алгоритм функціонування системи управління

Алгоритм функціонування автоматизованої системи управління теплотехнічною установкою побудований на принципі поєднання детермінованої логіки програмованого логічного контролера та інтелектуальних алгоритмів аналізу даних, реалізованих у модулі штучного інтелекту. Такий підхід дозволяє зберегти надійність і передбачуваність класичних систем автоматизації, водночас розширюючи їх можливості за рахунок прогнозування та оптимізації режимів роботи.

Функціонування системи починається з безперервного збору інформації з первинних вимірювальних перетворювачів. Датчики температури, тиску та витрати теплоносія формують аналогові сигнали, які надходять до модулів введення ПЛК. Контролер здійснює опитування входів у циклічному режимі з фіксованим часовим інтервалом, що забезпечує стабільну роботу системи в реальному часі. На цьому етапі виконуються попередня фільтрація сигналів, масштабування фізичних величин та перевірка коректності отриманих даних. Після обробки вхідних сигналів ПЛК виконує основні алгоритми керування. Для підтримання заданих теплотехнічних параметрів використовуються ПІД-регулятори, які формують керуючі впливи на виконавчі механізми — частотні перетворювачі насосів, регулюючі клапани та інші силові елементи. Усі алгоритми керування реалізовані з урахуванням аварійних блокувань, обмежень по граничних значеннях температури, тиску та витрати, що гарантує безпечну експлуатацію обладнання незалежно від зовнішніх умов.

Паралельно з виконанням локальних алгоритмів управління ПЛК передає технологічні дані на рівень аналітичної обробки. Обмін інформацією здійснюється через стандартні промислові протоколи (Modbus TCP або OPC UA) до Edge/Server модуля. На цьому рівні дані накопичуються, структуруються та зберігаються, зокрема у табличному форматі Excel, що дозволяє здійснювати подальший аналіз, візуалізацію та архівацію параметрів роботи теплотехнічної системи. Модуль штучного інтелекту використовує накопичені дані для виконання аналітичних та прогнозних алгоритмів. На основі історичних значень температури, тиску та витрати формуються моделі машинного навчання, які дозволяють оцінювати тенденції зміни навантаження, виявляти нештатні режими та прогнозувати поведінку системи у коротко- та середньостроковій перспективі. Результатом роботи ШІ є формування рекомендацій щодо оптимальних уставок регулювання або коригування режимів роботи виконавчих механізмів.

Сформовані рекомендації передаються назад до ПЛК у вигляді коригувальних параметрів або нових уставок. Перед застосуванням цих значень контролер виконує перевірку їх допустимості відповідно до закладених обмежень безпеки. У разі відповідності нові параметри інтегруються в алгоритми керування, після чого система переходить у оновлений режим роботи. За необхідності передбачено можливість ручного підтвердження змін оператором через SCADA/HMI.

Важливою складовою алгоритму є зворотний зв'язок між ПЛК та модулем штучного інтелекту. Після впровадження коригувальних дій контролер продовжує передавати фактичні значення параметрів, що дозволяє ШІ оцінювати ефективність прийнятих рішень та адаптувати моделі машинного навчання. Таким чином реалізується самонавчальна система управління, здатна поступово підвищувати точність прогнозів і стабільність роботи теплотехнічної установки. У разі виникнення аварійних ситуацій або втрати зв'язку з аналітичним рівнем ПЛК автоматично переходить у

автономний режим роботи, використовуючи лише локальні алгоритми керування. Це забезпечує безперервність функціонування системи та збереження безпечного стану обладнання незалежно від працездатності модуля штучного інтелекту.

Таким чином, алгоритм функціонування системи управління реалізує ієрархічну структуру, у якій традиційний ПЛК відповідає за надійне керування в реальному часі, а підсистема штучного інтелекту виконує задачі аналізу, прогнозування та оптимізації. Сумісне використання цих підходів створює передумови для підвищення енергоефективності теплотехнічних систем, зменшення експлуатаційних витрат та впровадження інтелектуальних методів управління без радикальної заміни існуючої апаратної бази.

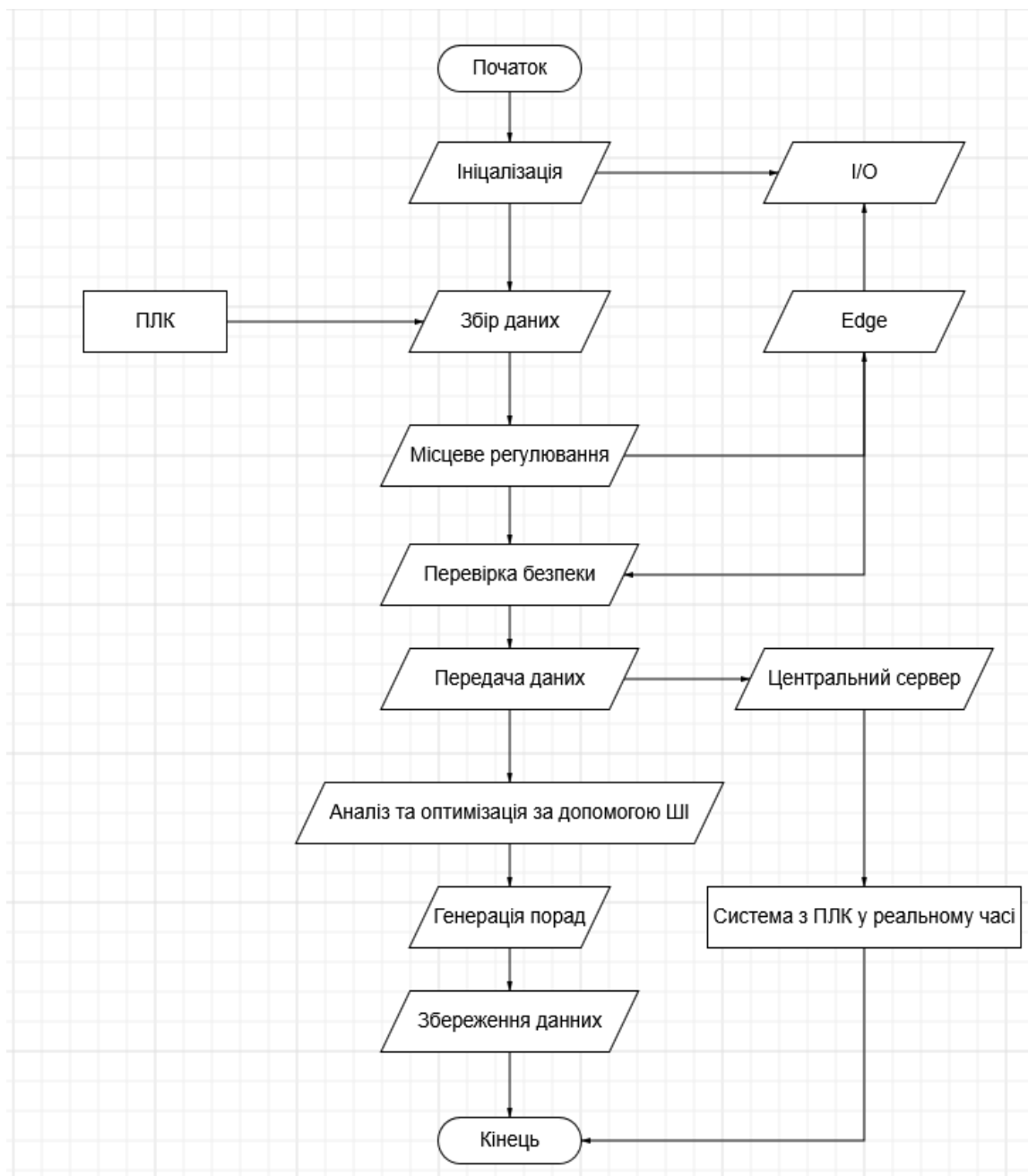


Рис. 5.1. Алгоритм функціонування

5.2. Програмна реалізація обміну даними з Excel

Програмна реалізація обміну даними між програмованим логічним контролером та середовищем табличної обробки Excel є важливим елементом

інформаційної архітектури розроблюваної системи управління. Використання Excel як проміжного рівня зберігання та аналізу даних обумовлено його широкою розповсюдженістю, зручністю візуалізації, можливістю інтеграції з мовами програмування та бібліотеками машинного навчання, а також простотою організації архівування технологічної інформації. Передавання даних з ПЛК до Excel реалізується через проміжний програмний рівень — сервер збору даних (Edge/Server), який виконує функції прийому, обробки, структуризації та запису інформації. Обмін даними між ПЛК та сервером здійснюється з використанням стандартних промислових протоколів Modbus TCP або OPC UA. Такий підхід дозволяє забезпечити надійний і стандартизований доступ до змінних ПЛК без необхідності внесення змін у його базову програму керування.

У процесі роботи ПЛК циклічно формує масив технологічних параметрів, що включає значення температури теплоносія, тиску, витрати, станів виконавчих механізмів та службових сигналів. Ці дані з заданою періодичністю передаються на сервер збору даних, де вони приймаються відповідним драйвером протоколу та перетворюються у зручний для подальшої обробки формат. На цьому етапі можуть виконуватися попередня фільтрація, усереднення та перевірка коректності отриманих значень.

Запис даних у файл Excel здійснюється програмними засобами серверної частини, що можуть бути реалізовані з використанням мов програмування Python або C#. Кожен параметр зберігається у відповідному стовпці таблиці, а кожен цикл опитування формує новий рядок з часовою міткою. Така структура забезпечує формування повноцінного часового ряду, необхідного для подальшого аналізу, побудови трендів та навчання моделей штучного інтелекту. Для зменшення навантаження на файлову систему передбачено механізми ротації файлів та архівації даних.

Важливою особливістю реалізації обміну є двосторонній характер взаємодії. Окрім запису даних, Excel використовується як джерело параметрів для корекції роботи системи. Модуль штучного інтелекту, який працює з даними у табличному форматі, аналізує накопичену інформацію та формує оптимальні значення уставок або коефіцієнтів регулювання. Результати аналізу записуються у спеціально визначені комірки або окремі аркуші Excel-файлу, які слугують інтерфейсом передачі рекомендацій назад у систему керування. Серверна частина періодично опитує відповідні поля Excel та зчитує нові значення керуючих параметрів. Після перевірки допустимості отриманих даних вони передаються до ПЛК через той самий промисловий протокол зв'язку. Контролер, у свою чергу, інтегрує ці параметри в алгоритми керування, дотримуючись обмежень безпеки та пріоритетів аварійних режимів. Такий підхід дозволяє впроваджувати інтелектуальні алгоритми управління без прямого втручання у програмний код ПЛК.

З метою забезпечення цілісності та достовірності даних у програмній реалізації передбачено механізми контролю помилок та синхронізації. Кожен запис у таблиці Excel супроводжується часовою міткою та ідентифікатором джерела даних. У разі втрати зв'язку між ПЛК та сервером система автоматично переходить у режим локального керування, а після відновлення зв'язку виконується синхронізація даних без втрати інформації. Використання Excel як проміжного рівня також спрощує інтеграцію з програмними засобами аналізу даних та машинного навчання. Табличний формат дозволяє швидко імпортувати дані у бібліотеки штучного інтелекту, виконувати підготовку вибірок, навчання моделей та оцінювання ефективності алгоритмів оптимізації. При цьому відсутня необхідність у складних базах даних або спеціалізованому програмному забезпеченні, що робить запропоноване рішення економічно доцільним та технологічно гнучким.

Таким чином, програмна реалізація обміну даними з Excel забезпечує ефективний інформаційний зв'язок між ПЛК та підсистемою штучного

інтелекту, дозволяючи організувати повний цикл збору, зберігання, аналізу та використання технологічних даних. Запропонований підхід створює умови для впровадження інтелектуальних методів управління теплотехнічними системами без порушення класичної структури автоматизованого керування та з мінімальними витратами на модернізацію.

```
PROGRAM Main_Control
VAR
    (* Аналогові входи *)
    Temp_In      : REAL;    (* Температура, °C *)
    Press_In     : REAL;    (* Тиск, bar *)
    Flow_In      : REAL;    (* Витрата, м3/h *)

    (* Уставки *)
    Temp_Set     : REAL := 75.0;
    Press_Set    : REAL := 4.0;
    Flow_Set     : REAL := 12.0;

    (* Керуючі сигнали *)
    Pump_Speed   : REAL;    (* 0-100 %, VFD *)
    Valve_Pos    : REAL;    (* 0-100 % *)

    (* Аварії *)
    аварія       : BOOL := FALSE;

    (* Дані від ШІ *)
    AI_Temp_Set  : REAL;
    AI_Press_Set : REAL;
    AI_Flow_Set  : REAL;
    AI_Valid     : BOOL;

    (* ПІД-регулятори *)
    PID_Temp     : PID;
    PID_Press    : PID;

END_VAR
```

Рис. 5.2. Приклад коду для ПЛК ч1

```

END_VAR

(* === ЗЧИТУВАННЯ ДАНИХ === *)
Temp_In  := AI_Temperature;
Press_In := AI_Pressure;
Flow_In  := AI_Flow;

(* === ПЕРЕВІРКА АВАРІЙ === *)
IF (Temp_In > 95.0) OR (Press_In > 6.0) OR (Flow_In < 1.0) THEN
    аварія := TRUE;
END_IF;

(* === ЛОКАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ === *)
IF аварія = TRUE THEN
    Pump_Speed := 0.0;
    Valve_Pos  := 0.0;
ELSE
    (* Якщо ШІ надав допустимі уставки – використовуємо їх *)
    IF AI_Valid = TRUE THEN
        Temp_Set  := AI_Temp_Set;
        Press_Set := AI_Press_Set;
        Flow_Set  := AI_Flow_Set;
    END_IF;

    (* ПІД-регулювання *)
    PID_Temp(SetPoint := Temp_Set, ProcessVar := Temp_In);
    PID_Press(SetPoint := Press_Set, ProcessVar := Press_In);

    Pump_Speed := PID_Press.ControlOutput;
    Valve_Pos  := PID_Temp.ControlOutput;
END_IF;

(* === ПЕРЕДАЧА ДАНИХ НА EDGE === *)
PLC_Data.Temperature := Temp_In;
PLC_Data.Pressure    := Press_In;
PLC_Data.Flow        := Flow_In;
PLC_Data.PumpSpeed   := Pump_Speed;
PLC_Data.Alarm       := аварія;
PLC_Data.Timestamp   := CURRENT_TIME;

END_PROGRAM

```

Рис. 5.3. Приклад коду для ПЛК ч2

5.3. Реалізація алгоритмів штучного інтелекту

У розробленій системі штучний інтелект використовується як аналітичний рівень, що доповнює традиційне керування теплотехнічним процесом на базі програмованого логічного контролера. Основна ідея полягає у тому, що ПЛК виконує детерміноване керування в режимі реального часу, забезпечуючи стабільність і безпеку технологічного процесу, тоді як модуль штучного інтелекту здійснює аналіз накопичених даних та формує рекомендації для оптимізації режимів роботи системи.

Програмна реалізація алгоритмів штучного інтелекту виконується на рівні Edge/Server із використанням мови програмування Python та спеціалізованих бібліотек для обробки даних і машинного навчання. Зв'язок між ПЛК та аналітичним модулем організовано за допомогою протоколу Modbus TCP, що дозволяє зчитувати поточні значення технологічних параметрів без втручання у внутрішню логіку роботи контролера.

У процесі роботи програма в циклічному режимі отримує з ПЛК значення температури, тиску та витрати теплоносія. Отримані дані масштабуються до фізичних одиниць вимірювання та доповнюються часовою міткою, що дозволяє формувати повноцінні часові ряди. Далі ці дані записуються у файл Excel, який використовується як проміжне сховище та інструмент архівації. Такий підхід забезпечує простоту інтеграції з іншими програмними засобами, а також зручність аналізу й візуалізації даних інженерним персоналом. Після накопичення достатнього обсягу статистичної інформації активується алгоритм машинного навчання. У даній роботі для демонстрації принципу використано модель лінійної регресії, яка аналізує взаємозв'язок між температурою, тиском і витратою теплоносія та дозволяє прогнозувати подальшу зміну температурного режиму системи. Хоча застосована модель є відносно простою, вона наочно демонструє можливість використання методів штучного інтелекту для прогнозування та оптимізації

теплотехнічних процесів. На основі результатів прогнозування формується набір рекомендованих уставок керування. Значення температури, тиску та витрати коригуються з урахуванням допустимих технологічних меж, що гарантує безпечну експлуатацію обладнання. Таким чином, модуль штучного інтелекту не здійснює пряме керування виконавчими механізмами, а лише пропонує оптимізовані параметри для подальшого використання.

Сформовані рекомендації передаються назад у ПЛК шляхом запису у відповідні регістри, а також встановлюється спеціальний сигнал підтвердження, який інформує контролер про готовність даних. Остаточне рішення щодо застосування нових уставок приймається ПЛК з урахуванням власних алгоритмів безпеки, стану системи та наявності аварійних умов. У разі виникнення небезпечних режимів рекомендації штучного інтелекту автоматично ігноруються.

Реалізований підхід демонструє ефективну модель сумісного використання технологій штучного інтелекту та традиційних програмованих логічних контролерів у сфері теплотехнічних систем. Штучний інтелект забезпечує аналітичну підтримку та адаптацію до змінних умов, тоді як ПЛК зберігає ключову роль у забезпеченні надійності, стабільності та безпеки технологічного процесу. Така архітектура є перспективною для впровадження інтелектуальних систем керування в сучасних теплоенергетичних установках та створює основу для подальшого розвитку адаптивних і самонавчальних систем управління.

```

import pandas as pd
import time
from datetime import datetime
from pymodbus.client import ModbusTcpClient
from sklearn.linear_model import LinearRegression
import numpy as np

# === ПІДКЛЮЧЕННЯ ДО ПЛК ===
plc = ModbusTcpClient('192.168.0.10')
plc.connect()

EXCEL_FILE = "heat_system_data.xlsx"

# === ОСНОВНИЙ ЦИКЛ ===
while True:

    # === ЗЧИТУВАННЯ ДАНИХ З ПЛК ===
    temp = plc.read_holding_registers(0, 1).registers[0] / 10
    press = plc.read_holding_registers(1, 1).registers[0] / 10
    flow = plc.read_holding_registers(2, 1).registers[0] / 10

    timestamp = datetime.now()

    # === ЗАПИС В EXCEL ===
    try:
        df = pd.read_excel(EXCEL_FILE)
    except FileNotFoundError:
        df = pd.DataFrame(columns=["Time", "Temp", "Press", "Flow"])

    df.loc[len(df)] = [timestamp, temp, press, flow]
    df.to_excel(EXCEL_FILE, index=False)

    # === АНАЛІЗ III (ПРИКЛАД) ===
    if len(df) > 50:
        X = df[["Temp", "Press", "Flow"]].values
        y = df["Temp"].shift(-1).fillna(df["Temp"]).values

        model = LinearRegression()
        model.fit(X, y)

        predicted_temp = model.predict([[temp, press, flow]])[0]

        # === ФОРМУВАННЯ УСТАВОК ===
        new_temp_set = min(max(predicted_temp, 60), 85)
        new_press_set = min(max(press, 3.0), 5.0)
        new_flow_set = min(max(flow, 8.0), 15.0)

        # === ПЕРЕДАЧА УСТАВОК В ПЛК ===
        plc.write_register(10, int(new_temp_set * 10))
        plc.write_register(11, int(new_press_set * 10))
        plc.write_register(12, int(new_flow_set * 10))
        plc.write_coil(0, True) # AI_Valid = TRUE

    time.sleep(5)

```

Рис. 5.4. Приклад коду взаємодії III

ВИСНОВКИ

У процесі виконання дипломного проекту виконано комплекс науково-практичних завдань, спрямованих на розробку сучасної системи автоматизованого управління теплотехнічними процесами з елементами інтелектуалізації:

- проведено аналіз сучасних теплоенергетичних комплексів, їх структури, основних технологічних параметрів (температура, тиск, витрата теплоносія) та напрямів автоматизації й інтелектуалізації;
- сформовано елементну базу апаратного комплексу, включаючи програмований логічний контролер промислового класу, первинні датчики (Pt100/Pt1000, тензорезистивні датчики тиску 4–20 мА, електромагнітні/ультразвукові витратоміри), модулі введення/виведення, частотні перетворювачі та джерела живлення 24 V DC з резервуванням;
- розроблено структурну схему гібридної системи управління з чітким розділенням на рівень реального часу (ПЛК з I/O) та аналітично-оптимізаційний рівень (Edge/Server з модулем ШІ);
- створено функціональну схему збору, обробки та передачі даних з використанням промислових протоколів Modbus TCP/OPC UA, включаючи архівацію в часових рядах та Excel-буфер;
- розроблено алгоритми управління виконавчими механізмами (насоси, клапани, VFD) на базі ПІД-регуляторів з аварійними блокуваннями та механізмами інтеграції рекомендацій ШІ;
- забезпечено безпечну взаємодію ПЛК з модулем штучного інтелекту, включаючи передачу даних, генерацію рекомендацій, валідацію уставок та зворотний зв'язок для адаптації моделей;

- розроблено загальний алгоритм функціонування системи з циклічним збором даних, локальним регулюванням, аналітикою ШІ, оптимізацією та самонавчанням;
- виконано розрахунок електричних навантажень, підбір компонентів (VFD, захисні автомати, UPS) та розроблено електричну принципову схему з гальванічною розв'язкою, резервуванням живлення та захистом від перешкод;
- реалізовано програмне забезпечення аналітичного рівня на Python з використанням бібліотек машинного навчання для прогнозування, виявлення аномалій та формування оптимальних уставок.

Поставлені задачі розв'язано таким чином:

- базисом системи управління обрано гібридну архітектуру, де ПЛК (наприклад, Siemens S7-1200 або аналогічний) забезпечує детерміноване керування в реальному часі, безпеку та аварійні інтерлоки, а Edge/Server — аналітику, прогнозування та оптимізацію на основі ШІ;
- для вимірювання ключових параметрів використано надійні промислові датчики з уніфікованими сигналами (4–20 мА, RTD), підключені до гальванічно-розв'язаних модулів ПЛК з фільтрацією та шумозахистом;
- силові ланцюги насосів та приводів реалізовано через частотні перетворювачі з апаратним та програмним захистом, включаючи моторні автомати, теплові реле та контактори;
- резервування живлення 24 V DC забезпечено дублюванням джерел (PS1/PS2) з OR-логікою або активним контролером резервування, що гарантує безперервну роботу ПЛК та критичних модулів навіть при відмові основного джерела;

- комунікація між рівнями системи організована через промислову Ethernet-мережу з підтримкою Modbus TCP/OPC UA, що забезпечує швидкий, надійний та захищений обмін даними;
- модуль штучного інтелекту реалізовано як адаптивну підсистему, яка аналізує часові ряди, прогнозує навантаження, виявляє аномалії та генерує рекомендації, які застосовуються ПЛК лише після суворої валідації на відповідність межам безпеки;
- візуалізація та оперативне керування передбачено через SCADA/HMI з трендами, мнемосхемами, системою тривог та журналом подій, з можливістю ручного підтвердження змін від ШІ;
- запропонована система демонструє високу відмовостійкість, масштабованість та енергоефективність, поєднуючи надійність класичної автоматики з гнучкістю та прогнозними можливостями штучного інтелекту, що дозволяє зменшити енергоспоживання, підвищити стабільність теплопостачання та подовжити термін служби обладнання.

Розроблена система є перспективною для впровадження в сучасних теплоенергетичних комплексах і створює основу для подальшого розвитку повністю адаптивних та самонавчальних систем управління.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Болотов В. І. **Автоматизація теплотехнічних процесів.** – К.: Техніка, 2015. – 312 с.
- 2) Гребенюк О. М. **Системи автоматичного керування теплоенергетичними установками.** – Харків: ХНУРЕ, 2016. – 278 с.
- 3) Dorf R. C., Bishop R. H. **Modern Control Systems.** – 13th ed. – Pearson, 2017. – 1100 p.
- 4) Åström K. J., Murray R. M. **Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers.** – Princeton University Press, 2016. – 396 p.
- 5) Siemens AG. **SIMATIC S7-1200 Programmable Controller. System Manual.** – Siemens, 2022.
- 6) Schneider Electric. **Modicon PLCs – Architecture and Programming Guide.** – Schneider Electric, 2021.
- 7) IEC 61131-3. **Programmable Controllers – Programming Languages.** – International Electrotechnical Commission, 2013.
- 8) IEC 61511. **Functional Safety – Safety Instrumented Systems.** – IEC, 2016.
- 9) Popov V., Andreev A. **Industrial Automation Using PLCs.** – Springer, 2019. – 284 p.
- 10) Frank Petruzella. **Programmable Logic Controllers.** – 5th ed. – McGraw-Hill, 2017. – 480 p.
- 11) Bolton W. **Programmable Logic Controllers and Industrial Automation.** – Newnes, 2020. – 368 p.
- 12) Bishop C. M. **Pattern Recognition and Machine Learning.** – Springer, 2006. – 738 p.
- 13) Géron A. **Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras & TensorFlow.** – O'Reilly, 2019. – 856 p.
- 14) Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. **Deep Learning.** – MIT Press, 2016. – 775 p.

- 15) Russell S., Norvig P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach.** – 4th ed. – Pearson, 2021. – 1152 p.
- 16) Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. **Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0.** – Acatech, 2013.
- 17) Lee J., Bagheri B., Kao H. A. **A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0** // Manufacturing Letters. – 2015. – Vol. 3. – P. 18–23.
- 18) Gilchrist A. **Industry 4.0: The Industrial Internet of Things.** – Apress, 2016. – 250 p.
- 19) Xu L. D., He W., Li S. **Internet of Things in Industries: A Survey** // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2014. – Vol. 10, No. 4. – P. 2233–2243.
- 20) OPC Foundation. **OPC UA Specification.** – OPC Foundation, 2022.
- 21) Modbus Organization. **Modbus Application Protocol Specification V1.1b3.** – 2012.
- 22) Wang L., Törngren M., Onori M. **Current Status and Advancement of Cyber-Physical Systems in Manufacturing** // Journal of Manufacturing Systems. – 2015. – Vol. 37. – P. 517–527.
- 23) Bequette B. W. **Process Control: Modeling, Design, and Simulation.** – Prentice Hall, 2003. – 760 p.
- 24) Skogestad S. **Multivariable Feedback Control: Analysis and Design.** – Wiley, 2005. – 608 p.
- 25) Montgomery D. C., Runger G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers.** – Wiley, 2018. – 784 p.