

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту

Голубовський Сергій Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.518:697.3

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення інформаційно-вимірювальної системи для управління роботою
індивідуальних теплових пунктів у громадських будівлях, що живляться від
гібридних фотоелектричних станцій.

(назва роботи)

Інженерія відновлюваної енергетики

(назва освітньої програми)

175 – Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва спеціальності)

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

Здобувач освітнього ступеня С.І.Голубовський

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Рибіцький Ігор Володимирович, д.т.н., професор

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

Цих В.С.

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень Бакалавр

Спеціальність 175 – Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри
інформаційно-вимірювальних
технологій та енергетичного
менеджменту

В.С. Цих

“___” _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Голубовському Сергію Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення інформаційно-вимірювальної системи для управління роботою індивідуальних теплових пунктів у громадських будівлях, що живляться від гібридних фотоелектричних станцій

керівник роботи Рибіцький Ігор Володимирович, д. т. н., проф.,

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “5” травня 2026 року №204/7

2. Строк подання студентом роботи 15 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Провести аналітичний огляд сучасних індивідуальних теплових пунктів, систем автоматизації теплопостачання та гібридних фотоелектричних станцій, проаналізувати існуючі інформаційно-вимірювальні системи моніторингу та керування енергетичними об'єктами.

2. Обґрунтувати структуру інформаційно-вимірювальної системи для управління роботою індивідуального теплового пункту, виконати вибір сенсорної підсистеми, засобів збору та передачі даних, контролера та виконавчих механізмів.

3. Розробити математичні моделі теплових процесів індивідуального теплового пункту та генерації електроенергії гібридною фотоелектричною станцією, синтезувати алгоритми автоматичного управління та диспетчеризації системи.

4. Виконати програмну реалізацію інформаційно-вимірювальної системи, провести моделювання та дослідження ефективності алгоритмів управління, а також виконати метрологічний аналіз точності вимірювальних каналів розробленої системи.

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Нормоконтролер</i>	<i>доцент Яворський А. В.</i>		
<i>Перевірка на плагіат</i>	<i>доцент Миндюк В. Д.</i>		

7. Дата видачі завдання “5” травня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання (відповідно до наказу).	05.05.2026	
2	Розроблення розділу 1 «Аналітичний огляд стану та постановка задачі дослідження»	05.05.2026 – 15.05.2026 р.	
3	Розроблення розділу 2 «Математичне моделювання та обґрунтування структури інформаційно-виміральної системи»	16.05.2026 – 27.05.2026 р.	
4	Розроблення розділу 3 «Програмна реалізація та метрологічний аналіз системи керування ІТП»	28.05.2026 – 09.06.2026 р.	
5	Оформлення пояснювальної записки, графічної частини та підготовка роботи до захисту	10.06.2026 – 12.06.2026 р.	

Студент _____ **Голубовський С.І.**
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ **Рибіцький І. В.**
 (підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Голубовський С. І. «Розроблення інформаційно-вимірювальної системи для управління роботою індивідуальних теплових пунктів у громадських будівлях, що живляться від гібридних фотоелектричних станцій». Кваліфікаційна робота освітнього рівня – бакалавр, на правах рукопису. Спеціальність – 175 «Інформаційно-вимірювальні технології». – Івано-Франківськ, 2026.

Бакалаврська робота присвячена розробленню інформаційно-вимірювальної системи для управління роботою індивідуальних теплових пунктів у громадських будівлях, що живляться від гібридних фотоелектричних станцій.

Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи – 58 сторінок, 5 рисунки. Кількість використаних джерел – 30 од.

У роботі проведено аналіз сучасного стану систем теплопостачання громадських будівель, принципів функціонування індивідуальних теплових пунктів та можливостей використання відновлюваних джерел енергії для підвищення енергоефективності. Розглянуто особливості застосування гібридних фотоелектричних станцій для забезпечення електроживлення обладнання ІТП та підвищення автономності систем теплопостачання.

Розроблено математичні моделі теплових процесів індивідуального теплового пункту та енергопостачання від гібридної фотоелектричної станції. Проведено дослідження режимів роботи системи за різних умов експлуатації та визначено основні параметри контролю і регулювання.

Запропоновано структуру інформаційно-вимірювальної системи, що включає підсистему вимірювання, керуючий контролер та засоби диспетчеризації. Реалізовано алгоритм автоматичного управління на базі мікроконтролера ESP32 із використанням ПІД-регулювання та засобів

віддаленого моніторингу. Інтеграцію з гібридною фотоелектричною станцією виконано із застосуванням протоколу Modbus, що дозволяє враховувати поточний стан генерації електроенергії під час формування керуючих впливів.

Практичним результатом роботи є розроблення інформаційно-вимірювальної системи, здатної забезпечити ефективне управління теплопостачанням громадських будівель, зменшення споживання енергетичних ресурсів та підвищення рівня автономності за рахунок використання відновлюваних джерел енергії.

Ключові слова: ІНДИВІДУАЛЬНИЙ ТЕПЛОВИЙ ПУНКТ, ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА, ГІБРИДНА ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ, ESP32, MODBUS, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ, ПІД-РЕГУЛЮВАННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

ABSTRACT

Holubovskyi, S. I. “Development of an Information and Measurement System for Controlling the Operation of Individual Heating Substations in Public Buildings Powered by Hybrid Photovoltaic Power Plants”. Bachelor's Qualification Thesis, manuscript. Specialty – 175 "Information and measurement technologies". – Ivano-Frankivsk, 2026.

The bachelor's thesis is devoted to the development of an information and measurement system for controlling the operation of individual heating substations in public buildings powered by hybrid photovoltaic power plants.

The thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references and appendices. The total volume of the work is 58 pages, 5 figures. The number of sources used is 30.

The paper analyzes the current state of heat supply systems in public buildings, the principles of operation of individual heating substations, and the possibilities of using renewable energy sources to improve energy efficiency. Particular attention is paid to the application of hybrid photovoltaic power plants for supplying electrical power to heating substation equipment and increasing the autonomy of heat supply systems.

Mathematical models of thermal processes in an individual heating substation and energy supply from a hybrid photovoltaic power plant have been developed. The operating modes of the system under various conditions have been investigated, and the main control and regulation parameters have been determined.

The structure of the proposed information and measurement system includes a measurement subsystem, a control unit and a supervisory monitoring level. An automatic control algorithm based on the ESP32 microcontroller with PID control and remote monitoring capabilities has been implemented. Integration with the hybrid photovoltaic power plant is performed using the Modbus protocol, which enables the consideration of current power generation parameters when forming control actions.

The practical result of the work is the development of an information and measurement system capable of providing efficient control of heat supply processes in public buildings, reducing energy consumption and increasing the autonomy of engineering systems through the use of renewable energy sources.

Key words: INDIVIDUAL HEATING SUBSTATION, INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM, HYBRID PHOTOVOLTAIC POWER PLANT, ESP32, MODBUS, HEAT SUPPLY AUTOMATION, PID CONTROL, ENERGY EFFICIENCY.

ЗМІСТ

ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ	13
1.1. Особливості теплопостачання громадських будівель	13
1.2. Призначення та принцип роботи індивідуальних теплових пунктів	15
1.3. Використання відновлюваних джерел енергії у системах теплопостачання	17
1.4. Гібридні фотоелектричні станції та їх структура	18
1.5. Аналіз існуючих інформаційно-вимірювальних систем управління ІТП	20
1.6. Постановка задачі дослідження	22
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	25
2.1. Структура системи теплопостачання з ІТП	25
2.2. Основні параметри контролю та регулювання	26
2.3. Математична модель теплових процесів в ІТП	26
2.4. Модель енергопостачання від гібридної фотоелектричної станції	28
2.5. Аналіз режимів роботи системи	30
2.6. Визначення вимог до інформаційно-вимірювальної системи	31
2.7. Загальна структура інформаційно-вимірювальної системи	32
2.8. Вибір датчиків і вимірювальних перетворювачів	34
2.9. Вибір мікроконтролера та апаратної платформи	36
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ІТП	39
3.1. Розроблення алгоритму управління роботою ІТП	39
3.2. Передача даних та система моніторингу	40
3.3. Розроблення структурної та функціональної схем системи	42
3.5. Інтерфейс користувача та система диспетчеризації	47
3.6. Моделювання роботи системи	48
3.7. Аналіз точності вимірювань	49
3.8. Оцінка ефективності використання гібридної фотоелектричної станції	50
ВИСНОВКИ	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	54
ДОДАТКИ	57
Додаток А	57

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ СИМВОЛІВ

АКБ – акумуляторна батарея;

ГФЕС – гібридна фотоелектрична станція;

ІВС – інформаційно-вимірювальна система;

ІТП – індивідуальний тепловий пункт;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПІД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

ФЕМ – фотоелектричний модуль

ESP32 – мікроконтролер сімейства Espressif Systems

Grafana – програмна платформа для візуалізації та моніторингу даних

Modbus – промисловий протокол обміну даними між пристроями автоматизації

MQTT – протокол передачі телеметричних даних (Message Queuing Telemetry Transport)

Node-RED – середовище візуального програмування для побудови систем збору та обробки даних

Wi-Fi – технологія бездротового передавання даних (Wireless Fidelity)

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку енергетики та зростання вартості енергоресурсів питання підвищення енергоефективності систем теплопостачання набуває особливої актуальності. Значна частина енергоспоживання в Україні припадає саме на сектор громадських будівель, які характеризуються високими тепловтратами, застарілими інженерними системами та низьким рівнем автоматизації. Це зумовлює необхідність впровадження сучасних технічних рішень, спрямованих на оптимізацію використання теплової енергії.

Одним із найбільш ефективних напрямів підвищення енергоефективності є застосування індивідуальних теплових пунктів (ІТП), які забезпечують регулювання параметрів теплоносія відповідно до фактичних потреб будівлі. Використання погодозалежного регулювання, автоматизованих систем управління та сучасних вимірювальних засобів дозволяє значно зменшити споживання теплової енергії та підвищити комфорт у приміщеннях.

Водночас, в умовах енергетичної нестабільності та необхідності підвищення автономності об'єктів особливого значення набуває інтеграція відновлюваних джерел енергії. Зокрема, гібридні фотоелектричні станції (ГФЕС) дозволяють забезпечити електроживлення інженерного обладнання ІТП, включаючи насоси, контролери та виконавчі механізми, навіть у разі відсутності зовнішнього електропостачання. Поєднання ІТП із ГФЕС створює передумови для формування енергоефективних та автономних систем теплопостачання.

Незважаючи на наявність сучасних технічних рішень, більшість існуючих систем функціонує без інтегрованого управління тепловими та електричними процесами. Відсутність взаємодії між системою теплопостачання та джерелом електроенергії призводить до нераціонального використання ресурсів і зниження загальної ефективності.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення інформаційно-вимірювальної системи, яка забезпечує комплексне управління індивідуальним тепловим пунктом із урахуванням режимів роботи гібридної фотоелектричної станції.

Метою роботи є розроблення інформаційно-вимірювальної системи управління індивідуальним тепловим пунктом громадської будівлі, що інтегрована з гібридною фотоелектричною станцією та забезпечує енергоефективне і надійне функціонування системи теплопостачання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. **З'ясування** особливостей функціонування індивідуальних теплових пунктів та обґрунтування доцільності їх інтеграції з гібридними фотоелектричними станціями.
2. **Встановлення** математичних залежностей теплових процесів та **визначення** метрологічних вимог до вимірювальних каналів системи.
3. **Обґрунтування** апаратної структури та **розроблення** алгоритмічного забезпечення інформаційно-вимірювальної системи.
4. **Розроблення** програмного забезпечення мікроконтролера з подальшим **оцінюванням** точності вимірювань і загальної ефективності запропонованого рішення.

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого управління теплопостачанням громадських будівель із використанням відновлюваних джерел енергії.

Предмет дослідження – апаратно-програмні засоби, алгоритми та методи вимірювання інформаційно-вимірювальної системи для керування роботою індивідуального теплового пункту, що живиться від гібридної фотоелектричної станції.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості створення енергоефективної системи теплопостачання, яка забезпечує зниження споживання енергії, підвищення автономності об'єкта та надійності його функціонування.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

1.1. Особливості теплопостачання громадських будівель

Теплопостачання громадських будівель є одним із найбільш енергоємних і водночас найменш оптимізованих секторів комунальної інфраструктури України. До категорії громадських належать будівлі шкіл, закладів охорони здоров'я, адміністративних установ, культурно-освітніх центрів, дитячих садків та інших об'єктів соціальної інфраструктури. За даними Міністерства розвитку громад та територій України, будівлі бюджетного сектору споживають близько 35–40 % усіх теплових ресурсів у системах централізованого теплопостачання, при цьому питоме споживання теплової енергії на квадратний метр площі в таких будівлях у 2–3 рази перевищує аналогічний показник сучасних енергоефективних споруд [25,15].

Переважає більшість будівель суспільного призначення в Україні зведена у 1950–1990-х роках за типовими радянськими проєктами, що не передбачали застосування сучасних теплоізоляційних матеріалів і систем автоматичного регулювання теплоспоживання. Огороджувальні конструкції таких будівель мають питомий опір теплопередачі, що в 2–4 рази нижчий від вимог чинних будівельних норм ДБН В.2.6-31:2021, а інженерні системи теплопостачання не оснащені обладнанням для погодозалежного регулювання [27]. Наслідком є значні тепловтрати через огороджувальні конструкції та перегрів приміщень у перехідний опалювальний сезон.

Характерною особливістю теплового навантаження громадських будівель є його виражена нерівномірність протягом доби та тижня. На відміну від житлового фонду, де споживання тепла розподілене відносно рівномірно, у шкільних чи адміністративних будівлях максимальне теплове навантаження спостерігається у робочі години (з 7:00 до 18:00), тоді як у нічний час і вихідні дні потреба в опаленні може знижуватися до 30–40 % від пікового значення. Ця

особливість робить особливо доцільним застосування систем із програмованими режимами роботи, що автоматично знижують температуру у приміщеннях у неробочий час.

Традиційна централізована схема тепlopостачання, поширена в українських містах, передбачає виробництво теплової енергії на котельнях або теплоелектроцентралях і транспортування її до споживачів через розгалужені теплові мережі. Основними недоліками такої схеми є значні втрати теплоносія в мережі (від 15 до 30 % залежно від технічного стану трубопроводів), висока залежність від цін на первинні енергоносії, неможливість оперативного регулювання параметрів теплоносія відповідно до потреб конкретної будівлі, а також вразливість до аварійних відключень на магістральних ділянках. Втрати теплоносія у теплових мережах є подвійно не вигідними: вони означають не лише втрату теплової енергії, але й витрати на хімічно очищену підживлювальну воду.

Значна частина громадських будівель підключена до теплової мережі за залежною схемою, коли теплоносій із зовнішньої мережі безпосередньо циркулює через внутрішні опалювальні прилади. Така схема не допускає незалежного регулювання температури теплоносія у внутрішній системі та підвищує ризик гідравлічних ударів при аваріях у зовнішній мережі. Перехід до незалежної схеми з встановленням пластинчастого теплообмінника в складі індивідуального теплового пункту є визначальним технічним рішенням для модернізації тепlopостачання будівлі.

В умовах воєнного часу та системної енергетичної кризи в Україні, що характеризується регулярними відключеннями електроенергії і ризиками перебоїв у роботі централізованих теплових систем, питання підвищення автономності та стійкості тепlopостачання соціально важливих об'єктів набуло особливої гостроти. Інтеграція відновлюваних джерел енергії, зокрема гібридних фотоелектричних станцій, у системи тепlopостачання громадських будівель є одним із практичних напрямів вирішення цієї проблеми, оскільки дозволяє забезпечити електроживлення насосів, контролерів та виконавчих механізмів ІТП незалежно від стану зовнішньої електромережі.

1.2. Призначення та принцип роботи індивідуальних теплових пунктів

Індивідуальний тепловий пункт являє собою комплекс теплотехнічного, гідравлічного та електронного обладнання, розміщений у будівлі або в прибудованому вузловому приміщенні, що забезпечує приймання теплоносія від зовнішньої теплової мережі, його перетворення відповідно до потреб внутрішніх систем опалення та гарячого водопостачання, облік споживаної теплової енергії та автоматичне регулювання режимів роботи. Принципова відмінність ІТП від центрального теплового пункту полягає в тому, що ІТП обслуговує виключно одну будівлю, забезпечуючи точне індивідуальне управління тепловим режимом конкретного об'єкта.

Основна функція ІТП - це гідравлічне розділення первинного контуру (зовнішня тепла мережа) і вторинного контуру (внутрішні системи будівлі) за допомогою пластинчастого теплообмінника. Таке розділення дозволяє підтримувати у вторинному контурі параметри теплоносія, оптимальні для конкретного типу опалювальної системи (наприклад, низькотемпературні 45/35°C для теплої підлоги або стандартні 70/55°C для радіаторного опалення), незалежно від параметрів у зовнішній мережі. Крім того, гідравлічне розділення унеможливорює проникнення хімічних реагентів із зовнішньої мережі у внутрішню систему і захищає внутрішнє обладнання від гідравлічних ударів.

До складу типового ІТП для громадської будівлі входять пластинчастий розбірний або паяний теплообмінник; циркуляційний насос (один або два - робочий і резервний) для забезпечення циркуляції теплоносія у вторинному контурі; регулюючий клапан із електроприводом на подавальному трубопроводі первинного контуру; електронний контролер або регулятор; прилад обліку теплової енергії (теплотелічильник), що включає витратомір, два термодавачі та обчислювач; фільтри грубого очищення; запірні арматури; манометри і термометри для місцевої індикації; реле тиску та інші елементи захисної автоматики.

Принцип роботи ІТП з погодозалежним регулюванням полягає в наступному. Контролер безперервно зчитує поточне значення температури зовнішнього повітря з датчика, встановленого на фасаді будівлі. На основі заданого температурного графіку (наприклад, 95/70°C або 80/60°C, де перше число - температура подачі при розрахунковій зовнішній температурі мінус 22°C, друге - температура зворотного трубопроводу) контролер обчислює необхідну температуру теплоносія у подавальному трубопроводі вторинного контуру при поточній зовнішній температурі. Потім контролер порівнює обчислену уставку з виміряною фактичною температурою і формує керуючий сигнал для електроприводу регулюючого клапана. Відкриваючи або прикриваючи клапан, він збільшує або зменшує витрату гарячого теплоносія через теплообмінник від зовнішньої мережі, змінюючи тим самим температуру теплоносія у вторинному контурі.

Система гарячого водопостачання у складі ІТП функціонує окремо від системи опалення або паралельно з нею залежно від схеми підключення. У будівлях з цілодобовим перебуванням людей (лікарні, гуртожитки) підтримується постійна циркуляція ГВП з температурою 55–60°C, що унеможливорює розмноження бактерій легіонели. У будівлях із перервним режимом роботи (школи, адміністративні установи) система ГВП може переходити у режим зниженої температури у неробочий час.

Ефективність роботи ІТП безпосередньо залежить від точності вимірювання його параметрів. Комерційний облік споживаної теплової енергії здійснюється теплотічильником, клас точності якого нормується національним стандартом ДСТУ EN 1434. Основними вимірюваними параметрами є температура теплоносія в подавальному та зворотному трубопроводах первинного і вторинного контурів, об'ємна або масова витрата теплоносія, тиск у характерних точках системи, а також температура зовнішнього повітря. Окремо вимірюються параметри системи електроживлення - напруга, струм і активна потужність - для обліку споживання електроенергії насосами та іншим обладнанням.

1.3. Використання відновлюваних джерел енергії у системах тепlopостачання

Інтеграція відновлюваних джерел енергії у системи тепlopостачання будівель є одним із пріоритетних напрямів енергетичної політики як України, так і Євросоюзу. Директива ЄС 2018/2001 (RED II) встановлює обов'язкові цільові показники частки ВДЕ у кінцевому споживанні енергії, у тому числі в секторі опалення та охолодження, а Угода про асоціацію України з ЄС зобов'язує поступово наближати вітчизняне законодавство до цих вимог. Закон України «Про енергетичну ефективність» № 1818-IX (редакція від 01.01.2025) також містить норми щодо обов'язкового використання ВДЕ при термомодернізації громадських будівель [24,25].

Для систем тепlopостачання будівель найбільш практичне застосування мають три напрями використання ВДЕ. Перший - сонячні теплові колектори, що перетворюють енергію сонячного випромінювання безпосередньо на теплову енергію теплоносія. Вони найбільш ефективні для підігріву гарячої води у літній та перехідний сезони, коли сонячне випромінювання є достатнім, а потреба в опаленні мінімальна. Ступінь покриття потреб у ГВП за рахунок сонячних колекторів у кліматичних умовах Прикарпаття становить 50–70 % у річному вираженні. Однак їхня принципова вада - мінімальна продуктивність саме в холодний сезон, коли потреба в тепловій енергії максимальна, - обмежує їх роль у системі опалення.

Другий напрям - теплові насоси, що використовують низькопотенційне тепло навколишнього середовища (грунту, повітря або підземних вод) і перетворюють його на тепло з більш високим температурним рівнем за рахунок споживання електричної енергії. Коефіцієнт перетворення енергії (COP) сучасних повітряних теплових насосів становить 2,5–4,5 при температурі зовнішнього повітря від плюс 15°C до мінус 15°C. Це означає, що на кожен одиницю спожитої електричної енергії тепловий насос виробляє 2,5–4,5 одиниці

теплової [10,18] За умови живлення теплового насоса від фотоелектричної станції система стає практично автономною від органічного палива і може забезпечити більшу частину потреб в опаленні будівлі протягом опалювального сезону.

Третій напрям, безпосередньо пов'язаний із темою цієї роботи, - використання фотоелектричних станцій для виробництва електричної енергії, що живить електрообладнання ІТП: насоси, контролери, електроприводи клапанів. У разі застосування гібридної схеми (ФЕС + АКБ + мережа) система отримує можливість продовжувати роботу навіть за відсутності зовнішнього електроживлення. Загальне електроспоживання обладнання ІТП для будівлі площею 1000–2000 м² становить орієнтовно 1,5–4 кВт, що є цілком реалістичним навантаженням для ГФЕС потужністю 5–15 кВт.

Важливою складовою гібридних систем теплопостачання є теплоаккумулятор - буферний бак об'ємом 300–2000 л, який дозволяє накопичувати надлишок теплової енергії в сонячні дні і використовувати її в хмарну погоду або у нічний час. Для громадських будівель з виражено нерівномірним графіком теплового навантаження теплоаккумулятор є особливо корисним: у вихідні дні та під час шкільних канікул система може накопичувати тепло, яке потім використовується для прогріву будівлі перед початком робочого тижня.

Серед систем акумулювання електричної енергії для ГФЕС громадських об'єктів перевагу все частіше надають літій-залізо-фосфатним (LFP) акумуляторам завдяки їхній стабільній хімії, тривалому циклічному ресурсу (3000–6000 циклів), широкому діапазону робочих температур і відсутності ризику теплового розгону. Типова місткість АКБ для забезпечення автономної роботи ІТП протягом 8–12 годин становить 10–30 кВт·год.

1.4. Гібридні фотоелектричні станції та їх структура

Гібридна фотоелектрична станція є енергетичною установкою, що поєднує фотоелектричні модулі, систему акумулювання електричної енергії та зовнішню електричну мережу або резервний дизельний генератор в єдину інтегровану систему з інтелектуальним управлінням потоками енергії. На відміну від мережевої (on-grid) ФЕС, яка повністю залежить від наявності зовнішньої мережі і автоматично відключається при її відсутності, ГФЕС здатна переходити до острівного режиму роботи та забезпечувати живлення пріоритетних навантажень незалежно від стану зовнішньої мережі. Саме ця властивість є ключовою для застосування ГФЕС у системах теплопостачання соціально важливих об'єктів.

Фотоелектричні модулі є первинним джерелом електричної енергії. Сучасні полікристалічні та монокристалічні кремнієві модулі мають ККД перетворення сонячної енергії від 17 до 22 % при стандартних умовах тестування (STC: освітленість 1000 Вт/м², температура 25°C, АМ 1,5) [3,10] Для розміщення ФЕМ на дахах громадських будівель найчастіше застосовуються модулі потужністю 400–600 Вт, що дозволяє набрати необхідну встановлену потужність при відносно невеликій кількості модулів і, відповідно, меншій площі даху. Важливою характеристикою ФЕМ є їхня температурна залежність: при підвищенні температури модуля на 1°C відносно STC потужність знижується на 0,3–0,45 % залежно від типу модуля, що необхідно враховувати при прогнозуванні генерації в літні місяці.

Гібридний інвертор є центральним елементом ГФЕС, що виконує одночасно кілька функцій: перетворює постійний струм від ФЕМ на змінний струм 220/380 В; управляє зарядом і розрядом АКБ; здійснює комутацію між джерелами енергії (ФЕМ, АКБ, мережа) відповідно до заданого пріоритету; забезпечує перехід до острівного режиму при зникненні зовнішньої мережі. Сучасні гібридні інвертори таких виробників, як Growatt, Huawei, Solis, SMA, Victron Energy, мають ККД перетворення 96–98 % і підтримують комунікацію з

системами моніторингу через протоколи Modbus RTU, Modbus TCP, CAN або власні протоколи виробника.

Контролер заряду з алгоритмом відстеження точки максимальної потужності (MPPT) забезпечує оптимальне відбирання потужності від фотоелектричних модулів при змінній освітленості та температурі. Сучасні MPPT-контролери мають ефективність відстеження 99,5 % і час реагування на зміну умов освітленості менше 1 секунди, що мінімізує втрати енергії при швидкозмінній хмарності [8,28]. У гібридних інверторах вищого класу функція MPPT інтегрована безпосередньо в інвертор.

Акумуляторна батарея виконує функцію короткострокового буфера енергії для компенсації нерівномірності сонячної генерації та добового неспівпадання графіків виробництва і споживання. Для об'єктів, що потребують надійного автономного живлення (лікарні, школи в умовах частих відключень), вибір місткості АКБ здійснюється з умови забезпечення повного споживання критичних навантажень протягом не менше 4–8 годин без сонячної генерації. При встановленій потужності ФЕС 10 кВт і середньому електроспоживанні ІТП 2 кВт місткість АКБ 15–20 кВт·год забезпечує повну автономність протягом 7,5–10 годин.

Система моніторингу та управління ГФЕС (EMS) збирає дані з усіх вузлів станції: потужність генерації ФЕМ, стан заряду АКБ, параметри мережевого з'єднання, потужність навантажень, стан комутаційного обладнання. На основі цих даних EMS реалізує алгоритм оптимального управління потоками енергії: визначає пріоритети живлення навантажень, приймає рішення про зарядження або розрядження АКБ, керує режимом підключення до зовнішньої мережі. Для інтеграції ІВС управління ІТП із ГФЕС критично важливою є можливість зчитування поточних даних від EMS у режимі реального часу, зокрема значення потужності, що генерується і доступна для живлення теплового обладнання.

1.5. Аналіз існуючих інформаційно-вимірювальних систем управління ІТП

На сучасному ринку обладнання для автоматизації систем теплопостачання представлений широкий спектр контролерів і систем управління різного класу і рівня функціональності [4,16]. Аналіз доступних рішень дозволяє виділити три основні категорії: спеціалізовані регулятори теплопостачання, програмовані логічні контролери загального призначення та IoT-рішення на мікроконтролерних платформах.

Спеціалізовані регулятори теплопостачання є найбільш поширеним рішенням для автоматизації ІТП. Провідними виробниками у цьому сегменті є Danfoss (серії ECL Comfort 200/300/310), Siemens (лінійка RVS41, RVS46, RVS61), Honeywell/Resideo, а також ряд виробників із Польщі та Чехії. Ці пристрої мають вбудовані алгоритми погодозалежного регулювання, підтримку різних схем підключення ІТП (одна або дві ступені нагрівання, з ГВП або без), зберігання добових і тижневих програм, а також базовий архів даних. Їхньою суттєвою перевагою є висока надійність і простота налаштування для стандартних схем. Основні недоліки - закрите програмне забезпечення без можливості модифікації, обмежені можливості інтеграції із зовнішніми системами (підтримується, як правило, лише Modbus RTU або власний протокол виробника), відсутність підтримки сучасних IoT-протоколів і хмарних сервісів, а головне - повна відсутність інтерфейсу для роботи з даними від ГФЕС.

Програмовані логічні контролери загального призначення (ПЛК) - Siemens SIMATIC S7-1200, Schneider Electric Modicon M221, ABB AC500, вітчизняні рішення - забезпечують значно більшу гнучкість у програмуванні алгоритмів управління та кращі можливості інтеграції з SCADA-системами через стандартизовані протоколи Modbus TCP, Profinet, BACnet, EtherNet/IP. ПЛК можуть бути налаштовані на будь-яку схему ІТП і можуть взаємодіяти з системою моніторингу ГФЕС за умови наявності відповідного комунікаційного модуля. Однак застосування промислових ПЛК для відносно нескладного

завдання управління ІТП є надмірним за вартістю (від 15 000 до 80 000 грн тільки за контролер), і вимагає залучення кваліфікованого персоналу для програмування і обслуговування.

IoT-рішення на базі мікроконтролерних платформ - ESP32, ESP8266, Arduino Mega, STM32, Raspberry Pi - набувають дедалі більшого поширення у сфері управління інженерними системами будівель завдяки низькій вартості компонентів (від 200 до 1500 грн за основний модуль), відкритому програмному коду, широкій підтримці промислових та IoT-протоколів (Modbus, MQTT, HTTP REST, Zigbee, LoRaWAN) і великій спільноті розробників. Мікроконтролер ESP32 є особливо привабливим для даного застосування завдяки наявності вбудованих модулів Wi-Fi та Bluetooth, достатньої обчислювальної потужності (двоядерний процесор Xtensa LX6, 240 МГц), 12-бітного АЦП з 18 каналами, апаратної підтримки I²C, SPI, UART та функції глибокого сну для мінімізації споживання.

Аналіз показує, що жодне з наявних комерційних рішень не забезпечує повноцінної інтеграції управління ІТП з параметрами роботи ГФЕС у рамках єдиної ІВС. Існуючі рішення управляють тепловим і електричним контурами незалежно, без обміну даними в режимі реального часу. Це унеможливорює реалізацію алгоритмів оптимального управління, наприклад підвищення температурної уставки при надлишку сонячної генерації для «теплого накопичування» або зниження споживання при мінімальному заряді АКБ. Крім того, більшість наявних рішень не забезпечують метрологічної атестації вимірювальних каналів відповідно до вимог ДСТУ EN 1434 та національних стандартів у сфері метрології, що обмежує їх застосування для комерційного обліку теплової енергії.

1.6. Постановка задачі дослідження

Проведений огляд літератури та аналіз існуючих технічних рішень дозволяє сформулювати науково-технічну задачу, якій присвячена ця робота.

Незважаючи на наявність як розвинутої технології ІТП, так і доступних ГФЕС, між цими двома системами в переважній більшості реальних інсталяцій відсутній інформаційний і управляючий зв'язок, що суттєво знижує загальну ефективність обох систем. Розроблення інтегрованої ІВС, здатної одночасно управляти режимами ІТП і враховувати поточний стан ГФЕС, є актуальним технічним завданням.

Метою роботи є розроблення інформаційно-вимірювальної системи управління індивідуальним тепловим пунктом громадської будівлі, що живиться від гібридної фотоелектричної станції, яка забезпечує погодозалежне регулювання теплопостачання, облік теплової та електричної енергії, оптимальний розподіл потоків відновлюваної і мережевої енергії та відповідає метрологічним вимогам національних стандартів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання: проведення аналізу систем теплопостачання громадських будівель та принципів роботи ІТП і ГФЕС; розроблення математичної моделі теплових процесів в ІТП та моделі енергопостачання від ГФЕС; визначення вимог до точності та метрологічних характеристик вимірювальних каналів ІВС; обґрунтування вибору апаратних засобів і розроблення структурної та функціональної схем системи; розроблення алгоритму управління ІТП з урахуванням стану ГФЕС; розроблення програмного забезпечення та системи диспетчеризації; проведення метрологічного аналізу точності вимірювань; обґрунтування економічної ефективності впровадження системи.

У розділі 1 проведено комплексний аналіз сучасних систем теплопостачання громадських будівель, що дозволило визначити основні функціональні особливості та проблемні аспекти їх експлуатації. Детально розглянуто призначення та принцип роботи індивідуальних теплових пунктів, акцентовано увагу на ключових вузлах і режимах роботи, які забезпечують передачу теплової енергії від джерела до споживачів.

Особливу увагу приділено ролі відновлюваних джерел енергії у системах теплопостачання та структурі геліофотоелектричних станцій. Аналіз показав, що

ефективність інтеграції таких джерел з існуючими тепловими мережами значною мірою залежить від рівня автоматизації та системи управління. Виявлено, що одним із головних недоліків наявних рішень є відсутність інтегрованого керування ІТП з урахуванням режимів роботи ГФЕС, що обмежує як енергоефективність, так і стабільність теплопостачання.

На основі цього сформульовано мету та завдання дослідження, які передбачають розробку інженерно-виробничої системи, здатної забезпечувати координацію роботи ІТП та геліофотоелектричної станції, підвищуючи ефективність використання енергетичних ресурсів та надійність системи теплопостачання.

1.7 Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану систем теплопостачання громадських будівель та виявлено, що вони характеризуються високим рівнем енергоспоживання через відсутність глибокої інтеграції з локальними відновлюваними джерелами енергії. Встановлено, що існуючі контролери індивідуальних теплових пунктів (ІТП) працюють ізольовано від систем управління гібридними фотоелектричними станціями (ГФЕС), що унеможлиблює раціональне та предиктивне використання сонячної енергії. На основі виявлених недоліків обґрунтовано необхідність розроблення комплексної інформаційно-вимірювальної системи (ІВС), яка б забезпечувала вузли ІТП достовірними телеметричними даними, узгоджувала роботу кліматичного та енергетичного обладнання, а також гарантувала енергетичну автономність циркуляційних насосів в умовах аварійних відключень електромережі.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

2.1. Структура системи теплопостачання з ІТП

Система теплопостачання громадської будівлі з індивідуальним тепловим пунктом функціонує як дворівнева ієрархічна система. Перший рівень - зовнішній (первинний) - включає централізовану теплову мережу з параметрами теплоносія, що визначаються постачальником теплової енергії відповідно до затвердженого температурного графіку. Другий рівень - внутрішній (вторинний) - включає всі системи теплоспоживання будівлі: систему опалення, систему гарячого водопостачання та, за наявності, систему вентиляції з рекуперацією тепла.

ІТП розташований на межі між двома рівнями і виконує функцію «перекладача» параметрів - приймає теплоносії з первинного контуру при параметрах, що відповідають зовнішньому графіку (до 150/70°C), і передає теплову енергію до вторинного контуру при параметрах, оптимальних для внутрішніх систем (зазвичай 80/60°C або 70/55°C для радіаторного опалення, 45/35°C для теплої підлоги). У разі застосування ГФЕС остання підключається до ІТП як джерело електричної енергії для живлення насосного обладнання, контролерів та електроприводів арматури.

Загальна теплова схема системи включає такі функціональні блоки: вузол приєднання до зовнішньої мережі (засувки, фільтр, лічильник теплоти первинного контуру); теплообмінний апарат; контур опалення з циркуляційним насосом та регулюючим клапаном; контур ГВП з бойлером непрямого нагріву або проточним теплообмінником; вузол живлення від ГФЕС з ручним байпасом на мережеве живлення; вузол управління і моніторингу (ІВС). Всі вузли з'єднані між собою трубопроводами та кабельними лініями відповідно до монтажно́ї схеми.

2.2. Основні параметри контролю та регулювання

Ефективне управління ІТП вимагає безперервного контролю значної кількості параметрів, які можна поділити на дві групи: теплові параметри системи та електричні параметри ГФЕС. До основних теплових параметрів належать температура теплоносія у подавальному трубопроводі первинного контуру $T_{1п}$, температура теплоносія у зворотному трубопроводі первинного контуру $T_{1з}$, температура теплоносія у подавальному трубопроводі вторинного контуру опалення $T_{2п}$, температура теплоносія у зворотному трубопроводі вторинного контуру $T_{2з}$, об'ємна витрата теплоносія у первинному контурі G_1 , температура зовнішнього повітря $T_{\text{зовн}}$, температура у приміщеннях $T_{\text{прим}}$ (для зворотного зв'язку), тиск у характерних точках первинного і вторинного контурів.

До основних електричних параметрів, що надходять від ГФЕС, належать поточна потужність, що генерується фотоелектричними модулями $P_{\text{ФЕМ}}$, стан заряду акумуляторної батареї SOC (State of Charge, %), поточна потужність навантаження $P_{\text{нав}}$, потужність, що передається до мережі $P_{\text{мер}}$ (або споживається з неї), напруга та частота в точці підключення до мережі. Ці параметри зчитуються IBC від гібридного інвертора ГФЕС через протокол Modbus RTU або Modbus TCP.

Основними керуючими параметрами (виходами IBC) є ступінь відкриття регулюючого клапана первинного контуру (0–100 %), стан (вкл/викл) і частота обертання (при використанні частотного перетворювача) циркуляційного насоса вторинного контуру, уставка температури теплоносія вторинного контуру $T_{\text{уст}}$, режим роботи системи (опалення, ГВП, ніч, вихідний день, відключено).

2.3. Математична модель теплових процесів в ІТП

Математична модель теплових процесів в ІТП базується на рівняннях теплового балансу і теплопередачі через стінку теплообмінника [18,27]. Теплова потужність, що передається від первинного контуру до вторинного, описується рівнянням:

$$Q = G_1 \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{1п} - T_{1з}), \quad (2.1)$$

де Q – теплова потужність, Вт; G_1 – об'ємна витрата теплоносія у первинному контурі, м³/с; ρ – густина теплоносія, кг/м³ (для води $\rho \approx 958$ кг/м³ при 100°C, $\rho \approx 971$ кг/м³ при 80°C); c – питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг·К) (для води $c = 4186$ Дж/(кг·К)); $T_{1п}$, $T_{1з}$ – температури подачі та зворотного трубопроводу первинного контуру, К.

Теплопередача через стінки теплообмінника описується рівнянням Ньютона–Ріхмана:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta T_{\ln}, \quad (2.2)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі теплообмінника, Вт/(м²·К); F – площа поверхні теплопередачі, м²; $\Delta T_{\ln}$ – середньологарифмічна різниця температур між первинним і вторинним контурами.

Середньологарифмічна різниця температур для протитечієвого теплообмінника:

$$\Delta T_{\ln} = (\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}) / \ln(\Delta T_{\max} / \Delta T_{\min}), \quad (2.3)$$

де $\Delta T_{\max} = T_{1п} - T_{2з}$ – різниця температур на «гарячому» кінці теплообмінника; $\Delta T_{\min} = T_{1з} - T_{2п}$ – різниця температур на «холодному» кінці.

Температурний графік теплопостачання задає залежність температури теплоносія в подавальному трубопроводі вторинного контуру від температури зовнішнього повітря. Для лінійного температурного графіку 80/60°C:

$$T_{\text{уст}} = T_{2\text{п.мін}} + (T_{2\text{п.макс}} - T_{2\text{п.мін}}) \cdot (T_{\text{зовн.мін}} - T_{\text{зовн}}) / (T_{\text{зовн.мін}} - T_{\text{зовн.макс}}), \quad (2.4)$$

де $T_{2\text{п.макс}} = 80^{\circ}\text{C}$ - температура подачі при розрахунковій зовнішній температурі $T_{\text{зовн.мін}} = -22^{\circ}\text{C}$; $T_{2\text{п.мін}} = 20^{\circ}\text{C}$ - температура подачі при температурі початку опалення $T_{\text{зовн.макс}} = +8^{\circ}\text{C}$.

Динамічна модель теплового процесу у внутрішній системі будівлі описується диференціальним рівнянням теплового балансу:

$$C_{\text{буд}} \cdot dT_{\text{прим}}/dt = Q - Q_{\text{втрат}}, \quad (2.5)$$

де $C_{\text{буд}}$ - теплова ємність будівлі, Дж/К; $T_{\text{прим}}$ - температура у приміщеннях, $^{\circ}\text{C}$; $Q_{\text{втрат}}$ - теплові втрати будівлі через огорожувальні конструкції та вентиляцію.

Теплові втрати будівлі:

$$Q_{\text{втрат}} = (T_{\text{прим}} - T_{\text{зовн}}) / R_{\text{буд}}, \quad (2.6)$$

де $R_{\text{буд}}$ - загальний тепловий опір будівлі, К/Вт, що обчислюється на основі питомого теплового опору огорожувальних конструкцій та площі кожного конструктивного елемента.

Для розрахункового прикладу - громадська будівля (адміністративний центр) площею 1200 м², двоповерхова, рік побудови 1978, після часткової термомодернізації (утеплення фасаду 100 мм мінеральної вати, заміна вікон на металопластикові):

Загальна площа огорожувальних конструкцій: $F_{\text{ог}} = 1800 \text{ м}^2$

Розрахунковий питомий тепловий опір стін: $R_{\text{ст}} = 2,8 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$

Розрахунковий питомий тепловий опір вікон: $R_{\text{вікн}} = 0,75 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$

Частка площі вікон: $F_{\text{вікн}} = 270 \text{ м}^2, F_{\text{стін}} = 1530 \text{ м}^2$

$Q_{\text{втрат.розр}} = 1530/2,8 + 270/0,75 = 546 + 360 = 906 \text{ Вт/К}$

При розрахунковій зовнішній температурі -22°C і температурі у приміщеннях $+20^{\circ}\text{C}$: $Q_{\text{розр}} = 906 \cdot (20 - (-22)) = 906 \cdot 42 = 38\,052 \text{ Вт} \approx 38 \text{ кВт}$

2.4. Модель енергопостачання від гібридної фотоелектричної станції

Математична модель енергопостачання від ГФЕС описує залежність потужності, що генерується фотоелектричними модулями, від метеорологічних умов і технічних характеристик обладнання [12,21]. Потужність одного фотоелектричного модуля:

$$P_{\text{ФЕМ}} = P_{\text{STC}} \cdot (G_{\text{ін}} / G_{\text{STC}}) \cdot [1 + \alpha_P \cdot (T_{\text{mod}} - T_{\text{STC}})], \quad (2.7)$$

де P_{STC} – номінальна потужність модуля при STC, Вт;
 $G_{\text{ін}}$ – поточна питома інсоляція на поверхні модуля, Вт/м²;
 $G_{\text{STC}} = 1000 \text{ Вт/м}^2$ – питома інсоляція при STC; α_P – температурний коефіцієнт потужності (для монокристалічного кремнію $\alpha_P \approx -0,004 \text{ K}^{-1}$); T_{mod} – температура модуля, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{STC}} = 25^{\circ}\text{C}$.

Температура фотоелектричного модуля:

$$T_{\text{mod}} = T_{\text{зовн}} + G_{\text{ін}} \cdot (\text{NOCT} - 20) / 800, \quad (2.8)$$

де NOCT - номінальна робоча температура модуля (зазвичай $43\text{--}48^{\circ}\text{C}$).

Загальна потужність ГФЕС потужністю 10 кВт (25 модулів по 400 Вт):

$$P_{\text{ГФЕС}} = N \cdot P_{\text{ФЕМ}} \cdot \eta_{\text{інв}} \cdot \eta_{\text{кабл}}, \quad (2.9)$$

де $N = 25$ - кількість модулів; $\eta_{\text{інв}} = 0,97$ - ККД інвертора; $\eta_{\text{кабл}} = 0,98$ - ККД кабельних ліній.

Розрахунок добової генерації ГФЕС для Прикарпатського регіону (Івано-Франківськ, широта $48,9^{\circ}\text{N}$) у грудні (найменш сприятливий місяць для генерації):

Середня денна сума інсоляції на оптимально нахилену поверхню

(45°) у грудні:

$$H_d = 1,8 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2 / \text{день} \text{ (за даними PVGIS) [1,2,26]}$$

Середня температура зовнішнього повітря у грудні:

$$T_{\text{зовн}} = -3^\circ\text{C}$$

Середній ПМП – ефективний час роботи:

$$t_{\text{пмп}} = H_d / G_{\text{STC}} = 1,8 / 1 = 1,8 \text{ год}$$

Добова генерація ГФЕС:

$$E_d = P_{\text{ГФЕС}} \cdot G_{\text{STC}} \cdot t_{\text{пмп}} \cdot \eta_{\text{сист}} = 10 \cdot 1,8 \cdot 0,95 = 17,1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Електроспоживання ІТП для розглянутої будівлі:

Циркуляційний насос (змінна продуктивність): $P_{\text{нас}} = 0,55 \text{ кВт}$

Контролер ІВС та датчики: $P_{\text{ел}} = 0,08 \text{ кВт}$

Електропривод регулюючого клапана: $P_{\text{клап}} = 0,03 \text{ кВт}$

Підсвітка та сигналізація: $P_{\text{сигн}} = 0,02 \text{ кВт}$

Загальне споживання ІТП: $P_{\text{ІТП}} = 0,68 \text{ кВт}$

Добове споживання (24 год): $E_{\text{ІТП}} = 0,68 \cdot 24 = 16,3 \text{ кВт} \cdot \text{год}$

Таким чином, навіть у найменш сприятливий місяць добова генерація ГФЕС (17,1 кВт·год) перевищує добове електроспоживання ІТП (16,3 кВт·год). З АКБ місткістю 15 кВт·год система забезпечує цілодобову автономну роботу ІТП у будь-яку пору року.

2.5. Аналіз режимів роботи системи

Система теплопостачання будівлі з ІТП та ГФЕС функціонує в кількох характерних режимах, що визначаються сезоном, часом доби, рівнем сонячної генерації та станом зовнішнього електроживлення. Для кожного режиму алгоритм управління ІВС реалізує відповідну стратегію управління потоками теплової та електричної енергії.

Режим 1 - денний сонячний опалювальний. Активний у денні години опалювального сезону при достатній інсоляції. ГФЕС генерує більше енергії, ніж споживає ІТП, надлишок іде на зарядження АКБ або в мережу. ІВС підвищує

уставку температури теплоносія на 3–5°C вище значення, що визначається погодозалежним графіком, для накопичення «теплового резерву» в будівлі і контурі ГВП. Регулюючий клапан відпрацьовує підвищену уставку, збільшуючи споживання тепла від первинного контуру.

Режим 2 - нічний або хмарний опалювальний. ГФЕС генерує мінімальну потужність або не генерує. ІТП живиться від АКБ або від зовнішньої мережі. Алгоритм управління реалізує стандартне погодозалежне регулювання з можливістю зниження уставки в нічний час (нічне зниження температури) на 3–5°C для економії тепла.

Режим 3 - аварійний (відсутність зовнішнього електроживлення). ГФЕС переходить до острівного режиму. ІВС забезпечує живлення ІТП від ГФЕС, при недостатньому заряді АКБ - знижує потужність насоса або переводить систему у режим мінімального опалення (уставка +10°C для захисту від промерзання).

Режим 4 - літній позаопалювальний. Система опалення відключена. ІВС управляє лише контуром ГВП. Надлишок генерації ГФЕС повністю іде до зовнішньої мережі або на зарядження АКБ.

Режим 5 - технічного обслуговування. ІВС переводить систему у ручний режим для виконання планових регламентних робіт (промивка фільтрів, перевірка арматури, заміна теплоносія).

2.6. Визначення вимог до інформаційно-вимірювальної системи

На основі аналізу теплових процесів, режимів роботи системи та вимог метрологічних стандартів до обліку теплової енергії визначено технічні вимоги до ІВС.

Вимоги до точності вимірювань температури. Згідно з ДСТУ EN 1434–1, для теплолічильника класу 2 допустима похибка вимірювання перепаду температур $\Delta\theta$ (різниця температур подачі та зворотного трубопроводу) не повинна

перевищувати значення: $\delta(\Delta\theta)/\Delta\theta \leq \pm(0,5 + 3^\circ\text{C}/\Delta\theta) \%$. При мінімальному розрахунковому перепаді температур $\Delta\theta_{\min} = 10^\circ\text{C}$ допустима відносна похибка: $\pm(0,5 + 3/10) = \pm 0,8 \%$. Це означає, що кожен окремий термодавач повинен мати абсолютну похибку не більше $\pm 0,3^\circ\text{C}$.

Вимоги до точності вимірювань витрати. Для теплотічильника класу 2 похибка вимірювання витрати не повинна перевищувати $\pm 2 \%$ у діапазоні від 10 % до 100 % номінальної витрати та $\pm 5 \%$ у діапазоні від мінімальної до 10 % номінальної витрати.

Вимоги до вимірювань параметрів ГФЕС. Для інформаційного моніторингу (некомерційний облік) допустима відносна похибка вимірювання потужності $\pm 3 \%$, стану заряду АКБ $\pm 5 \%$, напруги $\pm 1 \%$.

Вимоги до системи в цілому. Частота опитування датчиків - не рідше 1 разу на 10 секунд; час реакції ПІД-регулятора на відхилення уставки - не більше 30 секунд; час запису даних до архіву - кожні 10 хвилин; тривалість зберігання архіву - не менше 13 місяців (відповідно до вимог до комерційного обліку); надійність зв'язку з диспетчерською системою - не менше 95 % часу.

У розділі 2 виконано розробку математичної моделі теплових процесів в індивідуальному тепловому пункті, що дозволяє описати розподіл теплової енергії в системі та оцінити її динамічні характеристики при змінних режимах роботи. Паралельно створено модель енергопостачання від геліофотоелектричної станції, яка враховує сезонні та добові коливання генерації електроенергії.

Розрахунковий аналіз показав, що ГФЕС потужністю 10 кВтр здатна забезпечити повне покриття електроспоживання ІТП протягом усього року, створюючи умови для автономного або гібридного живлення системи та зменшуючи залежність від зовнішньої мережі.

Крім того, на основі моделювання визначено вимоги до точності вимірювальних каналів інженерно-виробничої системи. Для забезпечення

надійного контролю та регулювання параметрів теплового процесу рекомендовано застосування датчиків відповідно до ДСТУ EN 1434, клас точності 2. Це гарантує необхідну точність вимірювань і дозволяє підтримувати стабільні режими роботи системи з урахуванням коливань генерації ГФЕС та змін теплового навантаження.

2.7 Загальна структура інформаційно-вимірювальної системи

Інформаційно-вимірювальна система управління ІТП розроблена як багаторівнева розподілена система, що включає три ієрархічні рівні: рівень польових пристроїв (датчики, виконавчі механізми), рівень управляючого контролера та рівень диспетчеризації і зберігання даних. Загальна структурна схема розробленої інформаційно-вимірювальної системи з розподілом на апаратні та програмні рівні представлена на рисунку 2.1.

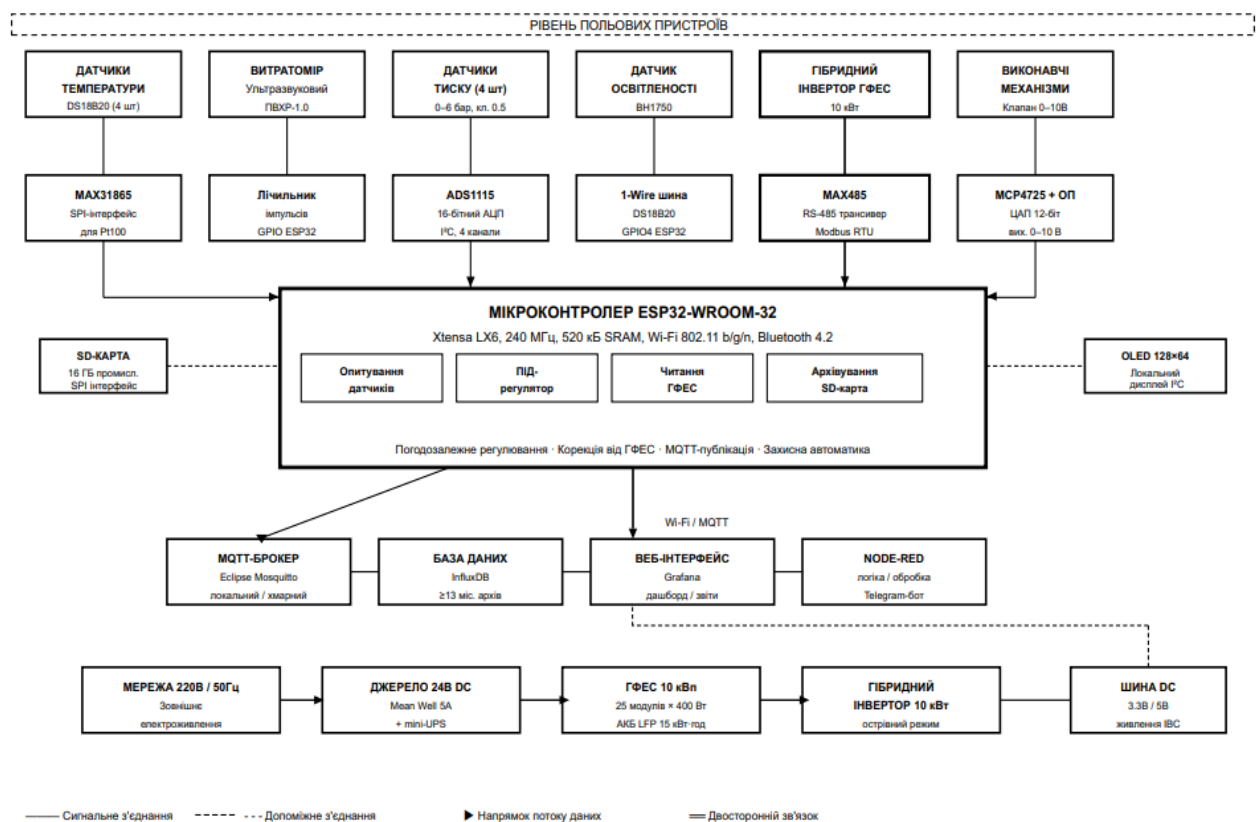


Рисунок 2.1 – Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи управління ІТП

На рівні польових пристроїв зосереджено всі первинні вимірювальні та виконавчі елементи інженерно-виробничої системи. До них належать датчики температури, витрати та тиску, які забезпечують безпосереднє отримання інформації про стан теплоносія в системі, а також виконавчі механізми – регулюючий клапан і насос із частотним перетворювачем, що дозволяють реалізовувати керуючі впливи відповідно до сигналів контролера.

Для підключення датчиків до управляючого контролера застосовуються різні інтерфейси відповідно до характеристик обладнання. Термодавачі DS18B20 використовують шину 1-Wire, датчики тиску підключені через стандартний аналоговий інтерфейс 4–20 мА, а витратомір передає імпульсні сигнали, що дозволяє визначати обсяг теплоносія. Така різноманітність інтерфейсів забезпечує точне та надійне зчитування даних у реальному часі.

Гібридний інвертор геліофотоелектричної станції підключений до контролера через інтерфейс RS-485 з використанням протоколу Modbus RTU, що дозволяє отримувати інформацію про поточну генерацію електроенергії та інтегрувати її у роботу алгоритму регулювання ІТП. Така архітектура забезпечує повну взаємодію між польовими пристроями, контролером та системою диспетчеризації, створюючи умови для стабільної та ефективної роботи всієї системи.

На рівні управляючого контролера всі функції інженерно-виробничої системи виконує мікроконтролер ESP32, що забезпечує комплексну автоматизацію роботи індивідуального теплового пункту. Контролер здійснює опитування всіх датчиків, реєструючи параметри теплоносія та робочі характеристики обладнання, а також обчислює теплову потужність системи з урахуванням поточного навантаження.

Мікроконтролер реалізує алгоритм ПІД-регулювання, що дозволяє підтримувати задані температурні параметри та оптимізувати роботу теплового контуру. На основі обчислених значень формуються керуючі сигнали для виконавчих пристроїв, таких як насосне обладнання і регулюючі клапани, що забезпечує безперервний контроль і корекцію режимів роботи.

Крім того, ESP32 інтегрується з геліофотоелектричною станцією, зчитуючи дані про генерацію електроенергії, і формує інформацію для диспетчеризації та архівування. Ведення локального архіву даних у внутрішній пам'яті контролера дозволяє зберігати інформацію навіть при тимчасовій відсутності зв'язку з центральним сервером, а передача даних до рівня

диспетчеризації забезпечує дистанційний моніторинг і оперативне керування системою в режимі реального часу.

На рівні диспетчеризації сервер обробки даних (локальний або хмарний) отримує дані від контролера за протоколом MQTT через Wi-Fi, зберігає їх у базі даних, надає веб-інтерфейс для оператора і генерує звітні документи. Для реалізації рівня диспетчеризації використовується платформа Node-RED з брокером повідомлень MQTT (Mosquitto) та базою даних InfluxDB з візуалізацією Grafana.

2.8. Вибір датчиків і вимірювальних перетворювачів

Вибір датчиків здійснювався з урахуванням метрологічних вимог, визначених у розділі 2.6, умов роботи (температура навколишнього середовища, агресивність середовища, вологість) та вартісних обмежень.

Для вимірювання температури теплоносія обрано цифрові термодавачі Dallas DS18B20 у виконанні для монтажу в занурювальну гільзу. Характеристики: діапазон вимірювання $-55...+125^{\circ}\text{C}$, роздільна здатність $0,0625^{\circ}\text{C}$ (12 біт), похибка $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ у діапазоні $0...+70^{\circ}\text{C}$ та $\pm 2^{\circ}\text{C}$ у решті діапазону, інтерфейс 1-Wire (один сигнальний провід для необмеженої кількості датчиків на одній шині), живлення 3,3–5 В. Один контролер ESP32 може обслуговувати всі 4 термодавачі на одній шині 1-Wire. Важливою перевагою DS18B20 є те, що кожен датчик має унікальний 64-бітний серійний номер, що виключає плутанину при ідентифікації каналів.

Для вимірювання температури зовнішнього повітря обрано захищений датчик Pt100 (клас В за ІЕС 60751) у корпусі IP65 з радіаційним захисним кожухом. Похибка вимірювання: $\pm(0,3 + 0,005 \cdot |T|)^{\circ}\text{C}$, що при $T = -20^{\circ}\text{C}$ дає $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$. Підключення до контролера через прецизійний підсилювач MAX31865 з SPI-інтерфейсом.

Для вимірювання витрати теплоносія у первинному контурі обрано ультразвуковий витратомір ПВХР-1.0 (або аналог Danfoss Sonometer 1000) із кліпсовим кріпленням на трубопровід DN50. Похибка вимірювання витрати: $\pm 1,5\%$ у робочому діапазоні. Вихідний сигнал - імпульси (1 імпл/л) або Modbus RTU. Кліпсовий (накладний) монтаж дозволяє встановлювати витратомір без розрізання трубопроводу і без зупинки системи, що є важливим під час реконструкції діючих ІТП.

Для вимірювання тиску обрано п'єзореzystивні датчики тиску з виходом 4–20 мА та діапазоном 0–6 бар, клас точності 0,5. Встановлюються на подавальному та зворотному трубопроводах первинного і вторинного контурів для моніторингу стану мережі та діагностики насосного обладнання.

Для вимірювання освітленості на поверхні ФЕМ (як опосередкований показник поточної інсоляції) обрано цифровий датчик BH1750 (I²C-інтерфейс, діапазон 1–65535 лк, роздільна здатність 1 лк). Хоча основні параметри ГФЕС зчитуються від інвертора, датчик освітленості дозволяє прогнозувати генерацію на наступні 15–30 хвилин і завчасно коригувати режим роботи ІТП.

2.9. Вибір мікроконтролера та апаратної платформи

Порівняльний аналіз мікроконтролерних платформ для реалізації ІВС проводився за такими критеріями: наявність вбудованих комунікаційних модулів (Wi-Fi, Bluetooth), кількість і розрядність АЦП, підтримка апаратних інтерфейсів (UART, SPI, I²C, 1-Wire), обчислювальна потужність, споживання енергії, вартість, наявність розвиненого програмного середовища.



Рисунок 2.2 – Espressif ESP32-WROOM-32

За результатами порівняння обрано мікроконтролер Espressif ESP32-WROOM-32 або модуль на його основі, ESP32 DevKit v4, як центральний елемент інженерно-виробничої системи. Цей контролер поєднує високу обчислювальну потужність і широкий набір периферійних інтерфейсів, що забезпечує комплексну автоматизацію ІТП та інтеграцію з геліофотоелектричною станцією.

ESP32-WROOM-32 оснащений двоядерним процесором Xtensa LX6 із тактовою частотою 240 МГц, 520 кБ оперативної пам'яті SRAM і 4 МБ флеш-пам'яті (з можливістю розширення), що дозволяє обробляти великі обсяги даних від датчиків і реалізовувати алгоритми ПД-регулювання. Контролер має вбудовані засоби бездротового зв'язку – Wi-Fi 802.11 b/g/n та Bluetooth 4.2/BLE, що забезпечує дистанційний моніторинг і диспетчеризацію.

Для роботи з польовими датчиками доступні 18 каналів 12-бітного АЦП, апаратна підтримка трьох UART, двох SPI, двох I²C та двох I²S інтерфейсів, а також 16 каналів ШІМ і програмна підтримка 1-Wire. Споживання енергії варіюється від 80 до 240 мА у активному режимі та менше 10 мкА у режимі глибокого сну, що дозволяє економно використовувати джерела живлення, включно з акумуляторами ГФЕС. Вартість модуля становить 150–250 грн, що робить його доступним і доцільним для впровадження в промислових та комерційних системах автоматизації.

Для зовнішньої пам'яті зберігання архіву встановлено модуль SD-карти (SPI-інтерфейс) із картою пам'яті 16 ГБ промислового класу (розширений діапазон температур $-40...+85^{\circ}\text{C}$). Такої місткості достатньо для зберігання даних усіх вимірювальних каналів із дискретністю 1 хвилина протягом більше 5 років.

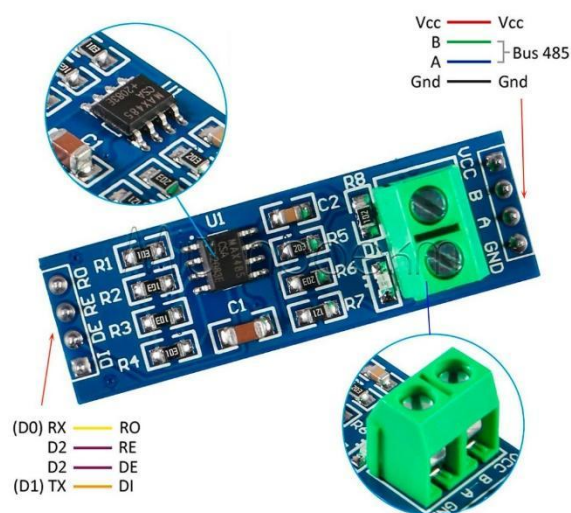


Рисунок 2.3 – Адаптер MAX485

Для забезпечення зв'язку з гібридним інвертором за протоколом Modbus RTU (RS-485) використовується адаптер MAX485 або аналогічна мікросхема RS-485 трансивера. Швидкість обміну - 9600 або 19200 бод, адреса пристрою налаштовується через конфігураційне меню.

Для реалізації аналогових входів (датчики тиску 4–20 мА) використовується зовнішній прецизійний АЦП ADS1115 (16 біт, I²C, 4 канали) у зв'язці з вимірювальним резистором 100 Ом для перетворення струмового сигналу 4–20 мА на напругу 0,4–2,0 В.

Для формування сигналу управління регулюючим клапаном (0–10 В постійного струму) використовується цифро-аналоговий перетворювач MCP4725 (12 біт, I²C) з підсилювачем напруги на операційному підсилювачі MCP6002.

2.10 Висновки до розділу 2

У другому розділі розроблено математичні моделі теплових процесів будівлі та генерації електричної енергії гібридною фотоелектричною станцією. Аналіз енергетичного балансу підтвердив принципову можливість повної автономізації інженерного обладнання ІТП за рахунок локальної сонячної генерації. На основі отриманих розрахунків синтезовано багаторівневу структурну схему інформаційно-вимірювальної системи. Для її апаратної реалізації обґрунтовано вибір мікроконтролера ESP32, який завдяки високій обчислювальній потужності (два ядра) та вбудованим мережевим інтерфейсам дозволяє паралельно вирішувати задачі вимірювання, управління ПІД-регулятором та комунікації з інвертором через промисловий інтерфейс RS-485 за протоколом Modbus RTU.

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ІТП

3.1. Розроблення алгоритму управління роботою ІТП

Алгоритм управління ІТП реалізує каскадну стратегію регулювання, що включає два рівні: зовнішній контур погодозалежного регулювання (формування уставки температури) та внутрішній контур ПІД-регулювання (підтримання уставки). Додатково алгоритм реалізує логіку корекції уставки залежно від стану ГФЕС.

На першому кроці алгоритму виконується опитування всіх датчиків і зчитування параметрів ГФЕС від інвертора. На другому кроці за формулою (2.4) обчислюється базова уставка температури вторинного контуру $T_{уст.баз}$ на основі поточної температури зовнішнього повітря. На третьому кроці виконується корекція уставки залежно від стану ГФЕС:

$$\begin{aligned} \text{Якщо } P_{ГФЕС} > P_{ІТП} \cdot 1,5 \text{ і } SOC > 80 \% \rightarrow T_{уст} \\ = T_{уст.баз} + 5^{\circ}\text{C (режим «теплового акумулювання»)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Якщо } P_{ГФЕС} < P_{ІТП} \cdot 0,3 \text{ і } SOC < 30 \% \rightarrow T_{уст} \\ = T_{уст.баз} - 3^{\circ}\text{C (режим «енергозбереження»)} \end{aligned}$$

$$\text{В інших випадках } \rightarrow T_{уст} = T_{уст.баз} \text{ (стандартне регулювання)}$$

На четвертому кроці ПІД-регулятор обчислює вихідний сигнал $u(t)$ для регулюючого клапана:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \cdot de(t)/dt, \quad (3.1)$$

де $e(t) = T_{уст} - T_{2п}(t)$ - відхилення вимірюваної температури від уставки; K_p , K_i , K_d - пропорційний, інтегральний і диференціальний коефіцієнти ПІД-регулятора.

Налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора виконується методом Зіглера–Ніколса з подальшим ручним доналаштуванням. Для системи з тепловою інерцією будівлі рекомендовані початкові значення: $K_p = 2,0$; $K_i = 0,1$; $K_d = 5,0$.

На п'ятому кроці обчислений сигнал $u(t)$ (обмежений діапазоном 0–100 %) перетворюється у напругу 0–10 В і подається на електропривод регулюючого клапана.

Додатково алгоритм реалізує функції захисної автоматики: захист від заморожування (якщо $T_{23} < 5^{\circ}\text{C}$ - відкрити клапан на максимум, увімкнути насос у максимальний режим), захист від перегріву (якщо $T_{2п} > 90^{\circ}\text{C}$ - закрити клапан), аварійна сигналізація при відмові будь-якого датчика або перевищенні тиску допустимих меж. Блок-схема основного робочого циклу розробленого алгоритму управління ІТП на базі мікроконтролера ESP32 наведена на рисунку 3.1.

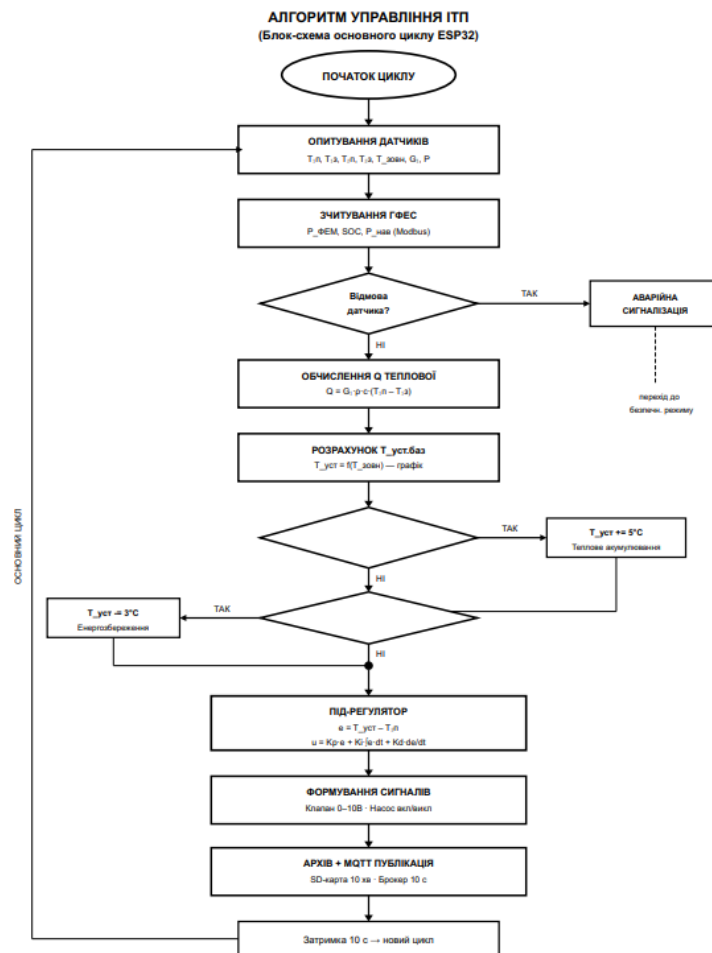


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму управління ІТП

3.2. Передача даних та система моніторингу

Передача даних між контролером IBC і рівнем диспетчеризації здійснюється за протоколом MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) - легковагового протоколу обміну повідомленнями, розробленого спеціально для IoT-застосувань з обмеженими ресурсами каналу зв'язку. MQTT базується на моделі «видавець – підписник» (publish–subscribe): контролер IBC публікує дані до тем (topics) брокера повідомлень, а клієнтські застосування (веб-інтерфейс, база даних) підписуються на потрібні теми і отримують дані автоматично при їхній появі.

Для кожного вимірювального параметра визначено окрему тему MQTT у форматі: `itp/building01/sensor/[назва_параметра]`. Наприклад: `itp/building01/sensor/T1sup` (температура подачі первинного контуру), `itp/building01/sensor/flow` (витрата), `itp/building01/pv/power` (потужність ГФЕС). Команди управління надходять від диспетчерської системи до контролера через теми `itp/building01/control/[команда]`.

У системі передачі даних і диспетчеризації інженерно-виробничої системи використовується брокер повідомлень Eclipse Mosquitto, який може бути розгорнутий як на локальному сервері об'єкта, так і у хмарному середовищі. Такий підхід забезпечує гнучкість у виборі архітектури системи, а також дозволяє адаптувати її до вимог надійності, масштабованості та доступності.

З метою підвищення відмовостійкості зв'язку передбачено механізм локального буферування даних безпосередньо на SD-карті контролера. У випадку втрати Wi-Fi з'єднання система не втрачає інформацію, а накопичує її у внутрішній пам'яті. Після відновлення зв'язку відбувається автоматична синхронізація з брокером, що гарантує цілісність і повноту даних моніторингу.

Передача даних організована з урахуванням різних рівнів деталізації. Для оперативного контролю параметрів роботи системи інформація публікується до брокера з інтервалом кожні 10 секунд, що забезпечує практично реальний час спостереження. Водночас для довготривалого зберігання та аналізу дані

архівуються з інтервалом кожні 10 хвилин, що дозволяє оптимізувати обсяг збереженої інформації без втрати її аналітичної цінності.

Веб-інтерфейс диспетчера реалізовано на платформі Grafana, підключеній до бази даних InfluxDB. Grafana надає широкі можливості для побудови інтерактивних дашбордів: часові графіки параметрів, поточні значення на аналогових індикаторах, теплові карти споживання, порівняльні аналізи за різні часові інтервали. Доступ до системи моніторингу здійснюється через веб-браузер з будь-якого пристрою в локальній або зовнішній мережі після автентифікації.

3.3. Розроблення структурної та функціональної схем системи

У розробленій системі ІВС структурна схема відображає основні функціональні блоки та зв'язки між ними, починаючи з блоку первинних перетворювачів, де розташовані датчики температури, витрати, тиску та освітленості. Сигнали з датчиків надходять у блок сигнальних перетворювачів, який включає ADC ADS1115 для аналогових сигналів, MAX31865 для PT100, MAX485 для RS-485/Modbus і програмну підтримку 1-Wire для DS18B20. Центральним елементом системи є мікроконтролер ESP32, що виконує опитування датчиків, обчислення теплової потужності, реалізацію алгоритму ПІД-регулювання та формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів. Для зберігання даних використовується SD-карта, а вивід інформації здійснюється через ЦАП MCP4725, реле управління насосом та OLED-дисплей для локального моніторингу. Комунікація з диспетчерською системою організована через Wi-Fi модуль ESP32 та MQTT-брокер, а зв'язок із геліофотоелектричною станцією забезпечується інтерфейсом RS-485/Modbus. Живлення системи реалізовано через джерело безперебійного живлення з перетворенням 220 В у 5 В або 3,3 В постійного струму та резервоване від ГФЕС.

Функціональна схема доповнює структурну, демонструючи потік даних від датчиків через обробку до архіву та диспетчерської системи, а також

формування керуючих сигналів від алгоритму управління до регулюючого клапана і насоса. Алгоритмічно система працює так, що дані з датчиків підлягають фільтрації та усередненню, після чого обчислюється тепловий потік і порівнюється з уставками. На основі ПІД-регулятора формується керуючий сигнал, який регулює відкриття клапана та частоту обертання насоса. Водночас інформація з ГФЕС надходить на контролер для корекції режимів і оптимізації використання генерації електроенергії. Система підтримує логіку переходу між режимами нормальної роботи, енергозбереження, аварійної зупинки та резервного живлення, забезпечуючи безперервність та безпеку функціонування. Функціональна схема перетворення та обробки сигналів в інформаційно-вимірювальній системі представлена на рисунку 3.2.

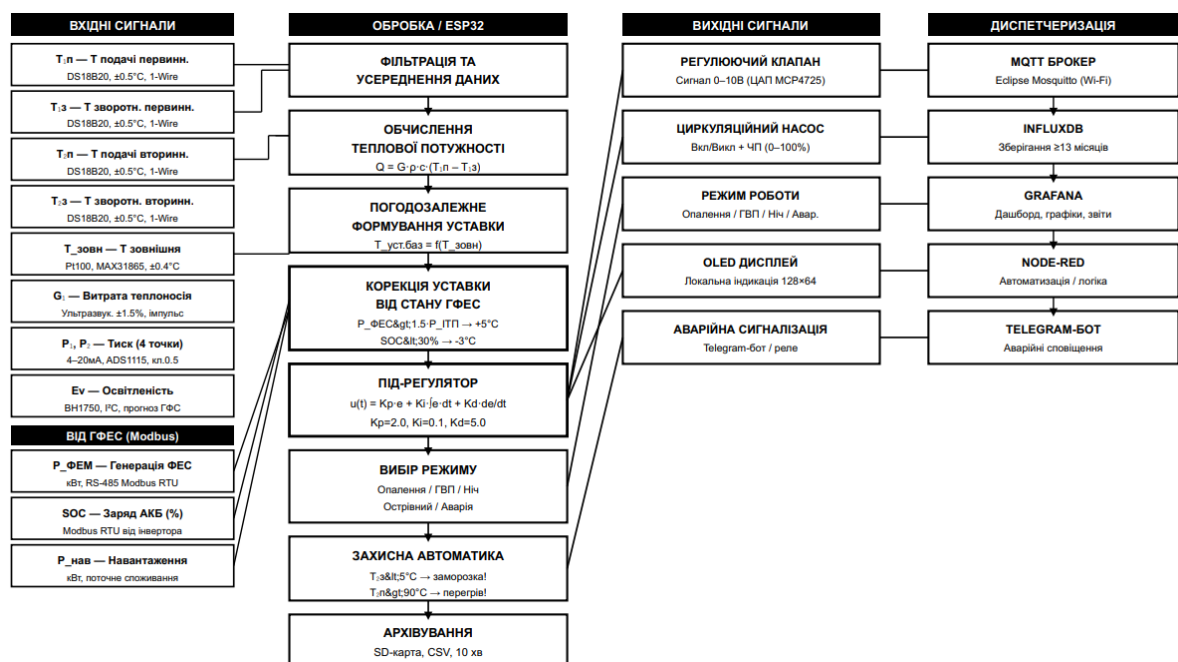


Рисунок 3.2 – Функціональна схема обробки сигналів в системі управління ІТП

Нижче наведено приклад програмної реалізації основного циклу ESP32, який забезпечує опитування датчиків, обчислення потужності, роботу ПІД-регулятора та публікацію даних у брокер MQTT:

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_ADS1015.h>
```

```

#include <PubSubClient.h>
#include <WiFi.h>

const char* ssid = "YOUR_SSID";
const char* password = "YOUR_PASSWORD";
const char* mqtt_server = "192.168.1.100";

WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

#define ONE_WIRE_BUS 4
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
Adafruit_ADS1115 ads;

void setup_wifi() {
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { delay(500); }
}

float pidControl(float setpoint, float measured) {
  float Kp = 1.0, Ki = 0.1, Kd = 0.05;
  static float integral = 0, previousError = 0;
  float error = setpoint - measured;
  integral += error;
  float derivative = error - previousError;
  previousError = error;
  return Kp*error + Ki*integral + Kd*derivative;
}

```

```

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  setup_wifi();
  client.setServer(mqtt_server, 1883);
  sensors.begin();
  ads.begin();
}

```

```

void loop() {
  sensors.requestTemperatures();
  float temperature = sensors.getTempCByIndex(0);
  int16_t adcValue = ads.readADC_SingleEnded(0);
  float flowRate = adcValue * 0.01; // перерахунок імпульсів
  float heatPower = flowRate * 4.18 * (temperature - 20); // обчислення
теплової потужності

```

```

float controlSignal = pidControl(100.0, heatPower); // ПІД-регулювання
controlSignal = constrain(controlSignal, 0, 255);

```

```

// Керування виконавчими механізмами, публікація даних
// analogWrite(pumpPin, controlSignal);
if (client.connected()) {
  client.publish("ITP/temperature", String(temperature).c_str());
  client.publish("ITP/heatPower", String(heatPower).c_str());
}
client.loop();
delay(1000);
}

```

Цей код демонструє інтеграцію збору даних, обробки, регулювання та передачі інформації, що відповідає розробленій функціональній схемі системи.

У результаті виконання розділу 3 було сформовано цілісну структуру інженерно-виробничої системи управління індивідуальним тепловим пунктом, яка забезпечує ефективну взаємодію всіх її функціональних елементів. Обґрунтовано вибір первинних вимірювальних перетворювачів та апаратної платформи з урахуванням вимог до точності, надійності та умов експлуатації, що дозволяє забезпечити стабільне функціонування системи в реальних умовах.

У межах розділу розроблено алгоритм управління, який передбачає адаптивну корекцію уставок регулювання залежно від стану геліофотоелектричної станції. Такий підхід дає змогу більш раціонально використовувати наявні енергетичні ресурси, підвищує енергоефективність системи та забезпечує гнучке реагування на зміну режимів генерації електроенергії.

Також детально описано архітектуру системи передачі даних і диспетчеризації, яка забезпечує безперервний моніторинг параметрів, дистанційний контроль і можливість оперативного втручання в роботу системи. Це створює передумови для підвищення надійності, керованості та загальної ефективності функціонування ІВС управління ІТП.

3.4. Розроблення програмного забезпечення

Програмне забезпечення мікроконтролера ESP32 розроблено у середовищі Arduino IDE (версія 2.x) з використанням мови програмування C++ і бібліотек із відкритим кодом. Загальна структура програми побудована за принципом кооперативної багатозадачності з використанням бібліотеки TaskScheduler, яка дозволяє запускати різні функції з різними часовими інтервалами без блокування виконання програми.

Основні програмні модулі організовані за функціональним призначенням. Модуль опитування датчиків (функція `readSensors()`) виконується кожні 5 секунд і зчитує значення всіх датчиків температури через бібліотеку `OneWire` і `DallasTemperature`, датчиків тиску через `ADS1115` з бібліотекою

Adafruit_ADS1X15, показання датчика освітленості BH1750. Модуль зв'язку з інвертором (функція readPV()) виконується кожні 10 секунд і зчитує реєстри Modbus від гібридного інвертора за протоколом RS-485.

Модуль управління (функція controlLoop()) виконується кожні 10 секунд і реалізує алгоритм, описаний у підрозділі 3.1: обчислення уставки температури, корекція від стану ГФЕС, виконання ПІД-алгоритму і формування керуючого сигналу для клапана. Цифровий ПІД-регулятор реалізовано у позиційній формі з обмеженням інтегральної складової (anti-windup) для запобігання насичення при тривалому відхиленні.

Модуль архівування (функція logData()) записує на SD-карту середні за 10 хвилин значення всіх параметрів у форматі CSV-файлу з ім'ям, що включає дату. Структура запису: timestamp (Unix-час), T1sup, T1ret, T2sup, T2ret, T_ext, flow, P1, P2, Q_power, Q_energy, SOC, P_PV, P_load. Розмір одного запису - близько 120 байт, добовий обсяг даних - приблизно 17 кБ, річний - близько 6 МБ, що значно менше місткості SD-карти.

Модуль MQTT-комунікації (функція mqttPublish()) виконується кожні 10 секунд і публікує поточні значення параметрів до відповідних тем брокера. При відсутності Wi-Fi підключення модуль продовжує спроби підключення з інтервалом 30 секунд, при цьому всі дані буферуються на SD-карті. При відновленні підключення виконується синхронізація буферизованих даних.

3.5. Інтерфейс користувача та система диспетчеризації

Локальний інтерфейс оператора реалізовано на основі OLED-дисплея 128×64 пікселів (I²C, драйвер SSD1306) і трьох кнопок: «вперед», «назад», «підтвердити». Дисплей відображає чотири послідовно змінювані екрани: основні температури (T_зовн, T1п, T2п, T2з), стан ГФЕС (P_ФЕС, SOC, режим), поточний режим і уставки, аварійні повідомлення. Кнопки дозволяють вручну змінити режим роботи, скоригувати уставку температури в межах ±5°C та підтвердити аварійні сповіщення.

Веб-інтерфейс диспетчера розгорнуто на хмарному сервері з використанням платформи Grafana. Головний дашборд містить: мнемосхему системи теплопостачання з поточними значеннями всіх параметрів у вигляді числових індикаторів; часові графіки температур, витрати та теплової потужності за поточну добу; шкалу стану заряду АКБ і графік генерації ГФЕС; таблицю аварійних подій з часовими мітками. Окремі сторінки дашборда містять аналітику споживання теплової та електричної енергії за місяць, квартал, рік; порівняння з аналогічними попередніми періодами; розрахунок поточних витрат і економії.

Система сповіщень реалізована через Telegram-бота: при виникненні аварійної ситуації (відмова датчика, перевищення тиску, відхилення температури від уставки більше 10°C протягом 30 хвилин) контролер публікує повідомлення до спеціальної теми MQTT, яке сервер ретранслює до Telegram-каналу відповідального оператора.

3.6. Моделювання роботи системи

Моделювання роботи системи виконано в програмному середовищі Matlab Simulink. Модель включає такі блоки: модель теплових процесів в ІТП (рівняння 2.1–2.6), модель будівлі як теплоємного об'єкта, модель ГФЕС (рівняння 2.7–2.9) з добовим профілем інсоляції, ПД-регулятор з антинасищенням, модель виконавчого клапана із затримкою і обмеженням швидкості переміщення.

Моделювання проводилося для трьох характерних добових сценаріїв. Сценарій 1 - ясний сонячний зимовий день ($T_{\text{зовн}} = -10^{\circ}\text{C}$, $G_{\text{сон.max}} = 700 \text{ Вт/м}^2$). Результати: ГФЕС генерує пік потужності 8,2 кВт о 12:30, АКБ заряджається до 95 % SOC до 14:00, алгоритм підвищує уставку з 72°C до 77°C у період максимальної генерації, витрата теплоносія зростає на 18 %, додаткова теплова енергія накопичується у будівлі ($T_{\text{прим}}$ зростає з 20°C до $21,2^{\circ}\text{C}$). Сценарій 2 - хмарний зимовий день ($T_{\text{зовн}} = -5^{\circ}\text{C}$, $G_{\text{сон.max}} = 200 \text{ Вт/м}^2$). ГФЕС забезпечує 40–60 % електроспоживання ІТП, решта - від АКБ.

Регулювання стабільне, відхилення температури від уставки не перевищує $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$. Сценарій 3 - відключення зовнішньої мережі (перехід до острівного режиму). ГФЕС і АКБ забезпечують повне живлення ІТП. При $\text{SOC} < 25\%$ алгоритм знижує уставку до $+15^{\circ}\text{C}$ (режим захисту від промерзання), споживання електроенергії ІТП знижується до 0,35 кВт.

3.7. Аналіз точності вимірювань

Метрологічний аналіз точності вимірювань виконано відповідно до ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3 (GUM - «Керівництво з виразу невизначеності вимірювань»). Аналіз проведено для основного вимірювального каналу - каналу обчислення теплової потужності.

Теплова потужність Q обчислюється за формулою (2.1): $Q = G \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T$, де $\Delta T = T_{1п} - T_{1з}$. Складові невизначеності вимірювання теплової потужності:

Стандартна невизначеність вимірювання температури подачі $T_{1п}$: $u(T_{1п}) = 0,5^{\circ}\text{C} / \sqrt{3} = 0,289^{\circ}\text{C}$

Стандартна невизначеність вимірювання температури зворотного трубопроводу

$$T_{1з}: u(T_{1з}) = 0,289^{\circ}\text{C}$$

Стандартна невизначеність перепаду температур:

$$u(\Delta T) = \sqrt{u^2(T_{1п}) + u^2(T_{1з})} = \sqrt{0,0835 + 0,0835} = 0,409^{\circ}\text{C}$$

При $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ відносна невизначеність:

$$u_r(\Delta T) = 0,409 / 20 = 2,05\%$$

Стандартна невизначеність вимірювання витрати:

$$u_r(G) = 1,5\% / \sqrt{3} = 0,87\%$$

Сумарна стандартна невизначеність теплової потужності:

$$u_{r(Q)} = \sqrt{u_{r(\Delta T)}^2 + u_{r(G)}^2} = \sqrt{4,2 + 0,76} = \sqrt{4,96} = 2,23\%$$

Розширена невизначеність ($k = 2$, рівень довіри 95 %):

$$U_r(Q) = 2 \cdot 2,23 = 4,46\%$$

Порівняння з вимогами ДСТУ EN 1434 для класу 2: допустима відносна похибка вимірювання теплової потужності $\pm 4\%$ при $\Delta T \geq 10^\circ\text{C}$. Отримане значення $4,46\%$ при $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ перевищує допустиме на $0,46\%$. Це свідчить про необхідність застосування більш точних термодавачів із похибкою $\pm 0,3^\circ\text{C}$ (клас А за ІЕС 60751) для вимірювання температур у первинному контурі, що зменшить $u(\Delta T)$ до $0,245^\circ\text{C}$ і забезпечить $U_r(Q) = 3,1\%$ – у межах класу 2.

3.8. Оцінка ефективності використання гібридної фотоелектричної станції

Оцінка ефективності ГФЕС у складі системи тепlopостачання будівлі проводилася за двома показниками: ступінь покриття електроспоживання ІТП від ГФЕС і внесок алгоритму управління у підвищення ефективності системи.

Розрахунок річного ступеня покриття:

Річна генерація ГФЕС 10 кВт для Івано – Франківська:

$$E_{\text{річн}} = 10 \cdot 1050 = 10\,500 \text{ кВт} \cdot \text{год} \text{ (специфічна генерація } 1050 \text{ кВт} \cdot \text{год/кВт за даними PVGIS).}$$

Річне споживання ІТП:

$$E_{\text{ІТП.річн}} = 0,68 \cdot 8760 = 5957 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Ступінь покриття від ГФЕС (без АКБ):

$$10\,500 > 5957, \text{ тобто ГФЕС з надлишком покриває річне споживання ІТП.}$$

Залишок генерації, що передається до мережі:

$$E_{\text{мер}} = 10\,500 - 5957 = 4543 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

Оцінка ефекту від алгоритму «теплового акумулювання» (підвищення уставки при надлишку генерації). Розрахунковим шляхом встановлено, що у

сонячні дні (кількість таких днів у Прикарпатті – близько 85 на рік) алгоритм підвищує середню добову споживану теплову потужність на 6–8 % протягом 4–6 годин. Це дозволяє зменшити споживання тепла від централізованої мережі у вечірні та нічні години завдяки підвищеній температурі у приміщеннях. Річна економія теплової енергії від цього алгоритму: $\Delta Q \approx 85 \cdot 5 \cdot 0,07 \cdot 38 = 1128 \text{ кВт}\cdot\text{год} \approx 970 \text{ кг}\cdot\text{о.т.}$, що при тарифі 3500 грн/Гкал дає близько 3400 грн на рік.

У результаті виконання розділу 3 було розроблено програмне забезпечення інженерно-виробничої системи, яке забезпечує ефективне керування технологічними процесами в індивідуальному тепловому пункті. В основу функціонування покладено алгоритм ПД-регулювання, доповнений корекцією від геліофотоелектричної станції, що дозволяє враховувати змінний характер генерації електроенергії та оптимізувати режими роботи обладнання з урахуванням доступної сонячної енергії.

Проведений метрологічний аналіз вимірювальної частини системи показав, що для забезпечення необхідної точності регулювання доцільним є використання термодавачів класу точності А. Саме такі датчики дозволяють досягти загального класу точності системи на рівні 2, що є достатнім для стабільного та надійного керування тепловими процесами.

Результати енергетичних розрахунків підтвердили високу ефективність інтеграції геліофотоелектричної станції. Встановлено, що вироблена електроенергія повністю покриває потреби ІТП, забезпечуючи його автономність у споживанні електроенергії. Більше того, спостерігається значний надлишок генерації, який може бути переданий до зовнішньої електромережі, що підвищує економічну доцільність впровадження системи та сприяє більш раціональному використанню енергетичних ресурсів.

3.9 Висновки до розділу 3

У третьому розділі розроблено алгоритмічне забезпечення ІВС та запропоновано інноваційний алгоритм «теплового акумулювання», який автоматично коригує температурні уставки будівлі залежно від наявності надлишкової сонячної генерації та рівня заряду акумуляторної батареї. Проведено детальне оцінювання невизначеності каналу вимірювання теплової потужності за методологією GUM. Доведено, що перехід на використання прецизійних платинових термоперетворювачів Pt100 класу «А» з 16-бітним АЦП дозволяє досягти загальної розширеної невизначеності на рівні 3,1 %, що повністю відповідає 2-му класу точності за ДСТУ EN 1434-1 та дозволяє використовувати систему для комерційного обліку. Запропоновано організацію диспетчеризації на базі сучасного IoT-стеку (MQTT, InfluxDB, Grafana) та розрахунково підтверджено ефективність розробленої системи, яка забезпечує експорт понад 4500 кВт·год надлишкової енергії в мережу щорічно.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання - розроблено інформаційно-вимірювальну систему управління індивідуальним тепловим пунктом громадської будівлі з живленням від гібридної фотоелектричної станції. За результатами виконання роботи отримано такі основні висновки.

Аналіз систем теплопостачання громадських будівель показав, що більшість бюджетних об'єктів характеризується відсутністю автоматичного регулювання теплоспоживання, що призводить до перевитрати теплової енергії на 20–40 %. Встановлено, що основним недоліком наявних комерційних рішень для управління ІТП є відсутність інтеграції з параметрами ГФЕС у єдиній ІВС.

Розроблено математичну модель теплових процесів в ІТП на основі рівнянь теплового балансу та модель генерації ГФЕС з урахуванням впливу освітленості та температури модулів. Розрахунки підтвердили, що ГФЕС потужністю 10 кВт у кліматичних умовах Прикарпаття здатна повністю покрити річне електроспоживання ІТП (5 957 кВт·год) із залишком генерації 4 543 кВт·год, що передається до зовнішньої мережі.

На основі аналізу метрологічних вимог ДСТУ EN 1434 обґрунтовано вибір датчиків температури класу А (Pt100) для вимірювальних каналів комерційного обліку теплової енергії та цифрових термодавачів DS18B20 для інформаційних каналів регулювання. Як апаратна платформа обрано мікроконтролер ESP32, що забезпечує необхідну обчислювальну потужність, підтримку всіх необхідних інтерфейсів і вбудований Wi-Fi-модуль.

Розроблено алгоритм управління ІТП, що реалізує погодозалежне регулювання з ПІД-регулятором та інноваційну функцію корекції температурної уставки залежно від поточного стану ГФЕС. При надлишку сонячної генерації алгоритм підвищує уставку температури для «теплового акумулювання» у

масиві будівлі, що дає додаткову річну економію теплової енергії близько 1 128 кВт·год.

Метрологічний аналіз за методологією GUM показав, що розширена невизначеність вимірювання теплової потужності при застосуванні термодавачів класу А становить 3,1 %, що відповідає вимогам класу точності 2 за ДСТУ EN 1434. Визначено вимоги до частоти опитування датчиків, тривалості зберігання архіву і надійності зв'язку з диспетчерською системою.

Розроблено програмне забезпечення контролера мовою C++ (Arduino IDE), систему диспетчеризації на основі платформ MQTT, Node-RED, InfluxDB та Grafana, а також систему аварійних сповіщень через Telegram-бот. Результати моделювання у Simulink підтвердили стійку роботу системи в усіх характерних режимах: сонячний день, хмарна погода, острівний режим.

Отже, результати підтверджують ефективність та доцільність впровадження розробленої системи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Басюк Т. О., Галік О. І. Довідкові дані з клімату України: метод. вказівки. Рівне: НУВГП, 2014. 158 с.
2. GLOBAL SOLAR ATLAS; GLOBAL WIND ATLAS. URL: <https://globalsolaratlas.info/> (дата звернення: 08.05.2026).
3. Solar energy: Potential and future prospects / E. Kabir et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. P. 894–900.
4. Інтелектуальні системи керування енергією в локальних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії / О. В. Кириленко та ін. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2021. 242 с.
5. Кравченко В. І. Моніторинг та діагностика фотоелектричних систем. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 180 с.
6. Кузнєцов М. П., Лисенко О. В. Екологічні аспекти використання фотоелектричних систем. Суми: СумДУ, 2020. 240 с.
7. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Гунько І. О. Оптимізація функціонування фотоелектричних станцій в електричних мережах. Вінниця: ВНТУ, 2019. 164 с.
8. Мазур Т. А., Хобін В. А. Методи й алгоритми відстеження точки максимальної потужності в фотоелектричних системах. Одеса: ОНАХТ, 2020. 200 с.
9. Методичні вказівки «Довідкові дані з клімату України». Рівне: НУВГП, 2014. 158 с.
10. Сонячна енергетика: теорія та практика / Й. С. Мисак та ін. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. 356 с.
11. Нараєвський С. В. Порівняльний аналіз ефективності роботи сонячної енергетики у провідних країнах світу. *Економічний вісник НТУУ «КПІ»*. 2015. № 12. С. 145–150.
12. Рогоза М. В., Мігін М. О. Прогнозування виробітку електроенергії фотоелектричними системами з використанням нейронних мереж. Херсон: ХНТУ, 2020. 210 с.
13. Енергоефективні системи електрожиллення з фотоелектричними станціями / Є. І. Сокол та ін. Харків: ФОП Бровін О. В., 2019. 182 с.

14. Сонячні перспективи. URL: <http://example.com/solar-prospects> (дата звернення: 12.05.2026).
15. Стеценко І. В., Зав'ялець Ю. А. Дослідження ефективності впровадження альтернативних джерел електроенергії. *Управління розвитком складних систем*. 2016. № 25. С. 172–177.
16. Інтелектуальні електричні мережі: світовий досвід і перспективи України / Б. С. Стогній та ін. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2021. 324 с.
17. Сухоруков В. В., Литвиненко Г. В., Білюк І. С. Техніко-економічне обґрунтування проектів фотоелектричних станцій. Миколаїв: НУК, 2020. 220 с.
18. Теплоносії для систем опалення та геліосистем. URL: <http://example.com/teplonosii> (дата звернення: 18.05.2026).
19. Формування експертних оцінок та оцінка узгодженості експертів. URL: <http://example.com/expert-estimates> (дата звернення: 22.05.2026).
20. Черкашина В. В., Потривай О. В. Аналіз інвестиційної привабливості проектів фотоелектричних станцій. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 168 с.
21. Інтеграція відновлюваних джерел енергії в системи електропостачання / А. К. Шидловський та ін. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2021. 280 с.
22. Шульга Ю. І., Охріменко В. М. Моніторинг та оптимізація роботи фотоелектричних станцій. Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2020. 246 с.
23. Керування режимами роботи фотоелектричних станцій в умовах балансування енергосистеми / О. С. Яндульський та ін. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 180 с.
24. Про електроенергетику: Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/575/97-вр> (дата звернення: 06.05.2026).
25. Про енергозбереження: Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-вр> (дата звернення: 06.05.2026).
26. Solar resource maps of World. URL: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world> (дата звернення: 10.05.2026).
27. Жолонко М. М. Практична енергоекологія. Ч. 1: Альтернативні джерела енергії. Черкаси: ЧНУ ім. Б. Хмельницького, 2008. 84 с.

28. Жуйков В. Я., Бойко І. Ю. Алгоритми відстеження точки максимальної потужності в фотоелектричних системах. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 160 с.
29. ДСТУ EN 1434-1:2014. Теплолічильники. Частина 1. Загальні вимоги. Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. 32 с.
30. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2001. Невизначеність вимірювання. Частина 3. Настанова щодо подання невизначеності у вимірюванні. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 102 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// ===== Піни =====
#define ONE_WIRE_BUS 4
#define VALVE_PIN 18
#define PUMP_PIN 19

// ===== DS18B20 =====
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

// ===== ПІД параметри =====
float Kp = 2.0;
float Ki = 0.1;
float Kd = 1.0;

float setpoint = 60.0;    // бажана температура (°C)
float input = 0;
float output = 0;

float integral = 0;
float previous_error = 0;

// ===== Час =====
unsigned long lastTime = 0;
float dt = 1.0;

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    sensors.begin();

    pinMode(VALVE_PIN, OUTPUT);
    pinMode(PUMP_PIN, OUTPUT);

    ledcAttachPin(VALVE_PIN, 0);
    ledcSetup(0, 5000, 8); // PWM канал
}

void loop() {
    // ===== Читання температури =====
    sensors.requestTemperatures();
    input = sensors.getTempCByIndex(0);

    // ===== ПІД регулятор =====
    float error = setpoint - input;
    integral += error * dt;
    float derivative = (error - previous_error) / dt;

    output = Kp * error + Ki * integral + Kd * derivative;

    previous_error = error;
}
```

```
// Обмеження сигналу
if (output > 255) output = 255;
if (output < 0) output = 0;

// ===== Керування клапаном =====
ledcWrite(0, (int)output);

// ===== Керування насосом =====
if (input < setpoint - 2) {
    digitalWrite(PUMP_PIN, HIGH);
} else {
    digitalWrite(PUMP_PIN, LOW);
}

// ===== Вивід у Serial =====
Serial.print("Temp: ");
Serial.print(input);
Serial.print(" | Output: ");
Serial.println(output);

delay(1000);
}
```