

Міністерство освіти і науки України

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: **Розробка автоматизованої ступінчастої системи керування
нагрівальними елементами бойлера з живленням
від сонячних панелей**

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕТ-42

спеціальності 141

електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Хариш П. А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Оробчук Б. Я.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Коваль В. П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Коваль В. П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль, 2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В. П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«27» січня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Харишу Павлу Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка автоматизованої ступінчастої системи керування нагрівальними елементами бойлера з живленням від сонячних панелей

Керівник роботи: Оробчук Богдан Ярославович, к.т.н, доцент

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

Затверджені наказом ректора від «24» січня 2025 року № 4/7-51

2. Термін подання студентом завершеної роботи: червень 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: Типові схеми систем керування електричним навантаженням, характеристики сучасних МРРТ-контролерів та ступінчастих регуляторів потужності, технічні параметри сонячних панелей та нагрівальних елементів, кліматичні дані Тернопільського району

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

Вступ

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунковий розділ

4. Безпека життєдіяльності та основи охорони праці

Загальні висновки

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

1. Структурна схема автоматизованої ступінчастої системи керування нагрівальними елементами

2. Схема електрична принципова базового модуля АСКТ на основі АТМega328P-PU

3. Схема підключення

4. Конструктивне виконання системи з веб-інтерфейсом

5. Алгоритми керування та блок-схема роботи системи Master/Slave

6. Калькулятор бітових масок та таблиці комбінацій ТЕНів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності та основи хорони праці	Гурик О. Я., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 10 квітня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	15.02.2025	
2	Аналітичний розділ	28.02.2025	
3	Розрахунковий розділ	31.03.2025	
4	Проектно-конструкторський розділ	30.04.2025	
5	Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	01.06.2025	
6	Висновки	10.06.2025	
7	Оформлення пояснювальної записки	15.06.2025	
8	Оформлення графічної частини	15.06.2025	

Студент

(підпис)

Хариш П. А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Оробчук Б. Я.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Хариш Павло Андрійович. Розробка автоматизованої ступінчастої системи керування нагрівальними елементами бойлера з живленням від сонячних панелей.

Стор.– 74; рис. - 31; табл. - 9; плакатів - 1; джерел - 26; додатків - 2.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та практичне впровадження автоматизованої ступінчастої системи керування нагрівальними елементами бойлера, яка забезпечує найефективніше використання енергії сонячних панелей при підтриманні потрібної температури води.

В першому розділі здійснено аналітичний огляд систем керування електричним навантаженням, проаналізовано типи систем керування та існуючі на ринку контролери.

В другому розділі виконано розробку апаратно-програмного комплексу АСКТ на базі мікроконтролерів ATmega328P-PU та ESP32, створено алгоритми ступінчастого керування та розроблено калькулятор бітових масок.

В третьому розділі виконано розрахунок ефективності використання сонячної енергії для Тернопільського району та економічне обґрунтування з терміном окупності 2,3 роки.

В останньому розділі розглянуто питання охорони праці та безпеки життєдіяльності при експлуатації електротехнічного обладнання та систем відновлюваної енергетики.

Ключові слова: АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, СТУПІНЧАСТЕ РЕГУЛЮВАННЯ, НАГРІВАЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ, СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ, ВЕБ-ІНТЕРФЕЙС, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, MASTER/SLAVE, MQTT.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	10
1.1 Аналіз сучасних систем керування електричним навантаженням	10
1.2 Типи систем керування навантаженням	11
1.3 Особливості роботи з відновлюваними джерелами енергії	12
1.3.1 МРРТ-контролери	12
1.3.2 ШІМ контролери	13
1.3.3 Ступінчасті регулятори потужності	14
1.3.4 Гібридні системи	15
1.3.5 Енергоакумулюючі системи	16
1.4 Огляд існуючих на ринку систем на контролерів	16
1.4.1 Професійні контролери відстеження точки максимальної потужності	16
1.4.2 Бюджетні ступінчасті контролери	18
1.4.3 Універсальні МРРТ контролери	19
1.4.4 Самостійно створені пристрої на базі Arduino/ESP32	20
1.5 Порівняння розглянутих варіантів систем	20
1.6 Вимоги до системи, яка розробляється	22
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	25
2.1 Розробка апаратно-програмного комплексу контролера	25
2.1.1 Апаратна частина контролера	26
2.1.2 Програмна частина контролера	29
2.2 Алгоритми керування та особливості реалізації контролера	35
2.2.1 Вимірювання та розрахунок параметрів системи	36
2.2.2 Алгоритми цифрової фільтрації сигналів	39
2.3 Калькулятор бітових масок для оптимізації комбінацій ТЕНів	41
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	45
3.1 Опис наявної системи керування	45
3.2 Характеристики нагрівальних елементів системи	47
3.3 Розрахунок ефективності використання сонячної енергії	49

3.4 Розрахунок споживання електроенергії системи	51
3.5 Розрахунок економії та ефективності системи	53
3.6 Збільшення ефективності системи шляхом утеплення баку котла	54
3.7 Розрахунок терміну окупності системи	57
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	59
4.1 Заходи щодо забезпечення безпеки при роботі	59
4.2 Розрахунок захисного заземлення для системи	61
4.3 Заходи безпеки життєдіяльності при експлуатації системи	63
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	66
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	68
ДОДАТОК А	71
ДОДАТОК Б	74

ВСТУП

В умовах активного розвитку відновлюваних джерел енергії та підвищення вимог до енергоефективності будівель навчальні заклади повинні вирішити важливу задачу – підготувати спеціалістів, які зможуть працювати з сучасними енергетичними технологіями та автоматизованими системами керування.

Основним завданням фахівців в електроенергетичній галузі стає розробка систем ефективного використання сонячної енергії та впровадження енергозберігаючих технологій. Це вимагає створення нових підходів до управління електричними навантаженнями. Сучасні енергетичні системи базуються на принципах розумного генерування з використанням відновлюваних джерел, гнучкого регулювання споживання та застосування адаптивних алгоритмів [1].

Розвиток цифрових технологій створив умови для появи нових систем автоматизованого керування енергетичним обладнанням. Це стало можливим завдяки впровадженню сучасних досягнень у галузі інформаційних технологій, створенню мікропроцесорних систем управління на базі силової електроніки та веб-технологій.

Сонячні електростанції з розумними системами управління є одним з найперспективніших варіантів як для домашнього використання, так і для навчальних цілей при підготовці студентів електроенергетичних спеціальностей. Такі системи дозволяють виробляти значні обсяги електроенергії, яка може ефективно використовуватися для нагрівання води. Вони працюють незалежно від централізованого електропостачання та є екологічно безпечними.

Створення розумних систем керування нагрівальними елементами передбачає розробку структури, що поєднує енергетичні та інформаційні технології. Основу такої структури складають силові та інформаційні компоненти, системи ефективного використання сонячної енергії та веб-інтерфейси для контролю і управління [2].

Управління такими системами можна здійснювати через веб-інтерфейс, мобільні додатки, локальні дисплеї з енкодерами та MQTT-системи для інтеграції з технологіями розумного будинку. Автоматизовані системи управління суттєво відрізняються від простих перемикачів здатністю пристосовуватися до змінних умов освітлення, оптимізувати споживання енергії та забезпечувати максимальне використання доступної потужності сонячних панелей.

Розумні системи керування належать до динамічних систем, що працюють в режимі реального часу. Такі системи мають компоненти для взаємодії з навколишнім середовищем: датчики температур, прилади для вимірювання електричних параметрів та силові перемикачі.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення та використання сонячної енергії для нагрівання води з застосуванням розумної автоматизованої системи керування нагрівальними елементами.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та практичне впровадження автоматизованої ступінчастої системи керування нагрівальними елементами бойлера, яка забезпечує найефективніше використання енергії сонячних панелей при підтриманні потрібної температури води.

У результаті виконання кваліфікаційної роботи були вирішені наступні завдання:

- проведено аналіз сучасних систем управління електричними навантаженнями та визначено їх переваги і недоліки;
- розроблено двокомпонентну систему на базі мікроконтролерів ATmega328P-PU та ESP32 з розподілом функцій;
- створено алгоритми ступінчастого керування групами нагрівальних елементів для оптимального використання змінної потужності сонячних панелей;
- розроблено веб-інтерфейс та MQTT-підключення для дистанційного контролю та керування системою;

- впроваджено режим Master/Slave для підключення кількох споживачів до однієї сонячної електростанції;
- проведено розрахунки ефективності та економічної доцільності використання розробленої системи;
- створено калькулятор бітових масок для оптимізації вибору комбінацій нагрівальних елементів.

Тема кваліфікаційної роботи «Розробка автоматизованої ступінчастої системи керування нагрівальними елементами бойлера з живленням від сонячних панелей» відповідає сучасним потребам енергетичної галузі та є актуальною для підготовки фахівців у сфері відновлюваної енергетики.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Аналіз сучасних систем керування електричним навантаженням

Сьогодні активно впроваджуються автоматизовані рішення у побутовій сфері. Звичайні системи керування нагрівальними елементами бойлерів поступово замінюються розумними контролерами. Такі пристрої мають значно ширші можливості. Вони дозволяють не тільки підтримувати задану температуру води, але й оптимізувати споживання електроенергії. Це особливо важливо при використанні сонячних панелей як джерела живлення.

Основні компоненти сучасних систем керування: мікропроцесорний блок, який обробляє дані та керує роботою системи; програмне забезпечення для реалізації алгоритмів управління; датчики температури води та приміщення для моніторингу стану середовища; давачі електричних параметрів для контролю споживання енергії. Деякі системи також мають можливість підключення до мережі Wi-Fi для віддаленого керування та моніторингу.

На відміну від простих термостатів, сучасні контролери здатні аналізувати режим споживання гарячої води та автоматично адаптувати роботу нагрівальних елементів. Вони можуть враховувати погодні умови, час доби та присутність користувачів у будинку. Це дозволяє суттєво знизити витрати електроенергії без втрати комфорту.

Особливу увагу слід приділити системам, які працюють від сонячних панелей. Такі контролери повинні ефективно використовувати змінну потужність сонячного випромінювання протягом дня. Вони переключають різні комбінації нагрівальних елементів залежно від доступної енергії. При недостатній потужності від сонячних панелей система може автоматично брати енергію з електричної мережі.

1.2 Типи систем керування навантаженням

Системи керування електричним навантаженням можна розділити на декілька основних типів. Це залежить від принципу роботи та складності алгоритмів управління.

Релейні системи (рис.1.1, А) є найпростішими та найдешевшими варіантами. Вони використовують звичайні електромеханічні реле для комутації навантажень. Переваги таких систем - проста конструкція, низька вартість та висока надійність. Недоліки - обмежена швидкість перемикавання, підвищений рівень шуму при роботі.

Тиристорні регулятори (рис.1.1, Б) дозволяють плавно регулювати потужність навантаження. Це відбувається шляхом зміни кута відкривання тиристорів. Такі системи забезпечують точне керування та швидку реакцію на зміни входніх параметрів. Однак вони мають складнішу схемотехніку та можуть створювати електромагнітні завади в мережі.

Ступінчасті системи (рис.1.1, В) поєднують переваги обох підходів. Вони використовують декілька дискретних рівнів потужності. Кожен рівень відповідає певній комбінації нагрівальних елементів, що підключаються через реле або транзисторні ключі. Такий підхід забезпечує необхідну точність керування, зберігаючи при цьому простоту та надійність системи.

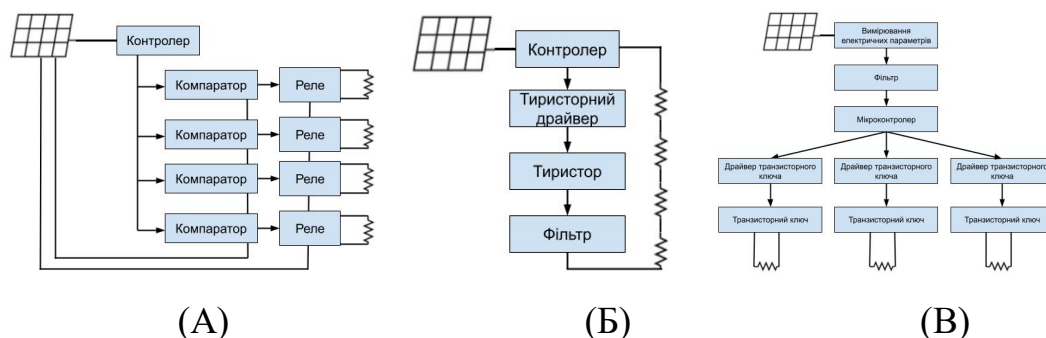


Рисунок 1.1 – структурні схеми систем керування. А – на основі релейної системи, Б – на основі тиристорного регулятора, В – на основі ступінчастого контролера.

1.3 Особливості роботи з відновлюваними джерелами енергії

Використання сонячних панелей як джерела живлення для нагрівальних елементів створює специфічні вимоги до системи керування. Потужність фотоелектричних модулів постійно змінюється залежно від освітленості, кута падіння сонячних променів, температури панелей та інших факторів.

Для ефективного використання сонячної енергії система керування повинна швидко адаптуватися до змінних умов. При збільшенні освітленості контролер має поступово збільшувати потужність навантаження. При зменшенні освітленості – зменшувати її у зворотному порядку. Важливо забезпечити стабільну роботу без різкої зміни навантаження при нестабільних погодних умовах.

Сучасні алгоритми керування навантаженням від сонячних панелей охоплюють декілька підходів. Найбільш розповсюдженими є MPPT-контролери (контролери відстеження максимальної потужності). Вони максимально ефективно використовують доступну потужність фотоелектричних модулів. Такі пристрої постійно відстежують точку максимальної потужності сонячних панелей та підлаштовують навантаження відповідно.

Також поширеними є гібридні системи, які працюють як від сонячних панелей, так і від електричної мережі. Вони потребують складніших алгоритмів управління. Контролер повинен визначати оптимальне співвідношення між використанням сонячної енергії та мережевої електроенергії.

1.3.1 MPPT-контролери

MPPT контролери використовують складні алгоритми для відстеження точки максимальної потужності сонячних панелей [3]. Основними методами є алгоритм "збурення та спостереження" та метод провідності.

Алгоритм збурення та спостереження періодично змінює робочу точку панелей у невеликих межах та відстежує зміну потужності. Якщо потужність

збільшується, алгоритм продовжує рух у тому ж напрямку. Якщо зменшується - змінює напрямок. Цей метод простий у реалізації, але може мати проблеми при швидких змінах освітленості.

Метод провідності аналізує похідну потужності за напругою та забезпечує більш точне відстеження точки максимальної потужності. Він краще працює при змінних умовах освітлення, але потребує більш складних обчислень.

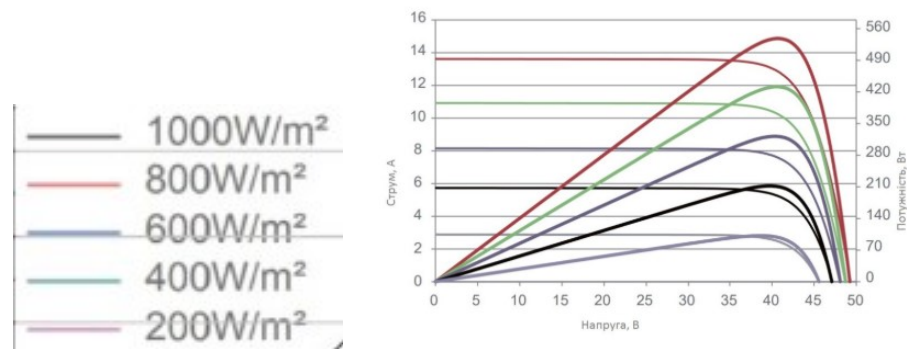


Рисунок 1.2 вольт-амперна характеристика сонячної панелі

1.3.2 ШІМ контролери

Контролери ШІМ використовують принцип широтно-імпульсної модуляції для регулювання потужності [4]. Хоча вони простіші та дешевші за контролери МРРТ, їх ефективність дещо нижча. Особливо це помітно при роботі з сучасними високовольтними сонячними панелями.

ШІМ контролери працюють шляхом швидкого перемикавання навантаження з частотою декілька кілогерц. Середня потужність регулюється зміною співвідношення між часом включеного та вимкненого стану. При коефіцієнті заповнення 50% середня потужність становить половину від максимальної.

Переваги контролерів ШІМ - проста схематехніка, низька вартість та висока надійність. Недоліки - нижча ефективність порівняно з контролерами відстеження точки максимальної потужності. Особливо це помітно при великій різниці між напругою панелей та навантаження.

1.3.3 Ступінчасті регулятори потужності

Ступінчасті регулятори потужності є одним з найефективніших рішень для керування нагрівальними елементами бойлерів [5]. Особливо це стосується систем, що живляться від сонячних панелей. Принцип їх роботи базується на поступовому підключенні різних комбінацій нагрівальних елементів. Це залежить від поточної потужності, що надходить від фотоелектричних модулів.

Система працює наступним чином: коли напруга від сонячних панелей досягає певного порогового значення, контролер підключає перший нагрівальний елемент найменшої потужності. При подальшому збільшенні напруги та потужності поступово підключаються додаткові нагрівальні елементи або їх комбінації. Це дозволяє точно відповідати споживанню доступній енергії без втрат.

Алгоритм керування використовує принцип гістерезису для запобігання частого перемикання навантажень при нестабільній освітленості. Для кожної комбінації нагрівальних елементів встановлюються верхня та нижня межі напруги спрацьовування. Це забезпечує стабільну роботу системи навіть при змінних погодних умовах.

Ширина гістерезису визначається емпірично і залежить від характеристик конкретної системи. Занадто вузький гістерезис може призвести до частого перемикання. Занадто широкий - до неефективного використання доступної енергії. Оптимальне значення зазвичай становить 5-10% від номінальної напруги спрацьовування.

Для забезпечення максимальної ефективності системи необхідно правильно розрахувати комбінації нагрівальних елементів та пороги їх підключення. Загальна кількість можливих комбінацій визначається кількістю доступних нагрівальних елементів та їх номінальною потужністю.

При використанні шести нагрівальних елементів з двійковим розподілом потужностей (100, 200, 400, 800, 1600, 3200 Вт) можна отримати 64 різні

комбінації з кроком регулювання 100 Вт. Це забезпечує досить точне відстеження доступної потужності сонячних панелей.

Для спрощення системи можна використовувати менше комбінацій. Вибираються найбільш практичні варіанти. Наприклад, можна обмежитися 14 комбінаціями, що забезпечують рівномірне покриття діапазону потужностей від 0 до 3300 Вт.

1.3.4 Гібридні системи

Комбіновані системи здатні використовувати як сонячну енергію, так і централізоване електропостачання (рис. 1.3) [6]. Перемикання між джерелами відбувається в автоматичному режимі відповідно до поточних потреб та наявності сонячного випромінювання. Такі системи особливо ефективні для забезпечення безперебійного гарячого водопостачання.

Алгоритм роботи гібридної системи враховує декілька факторів: поточну потужність сонячних панелей, температуру води в бойлері, час доби та день тижня, тарифи на електроенергію. На основі цих даних контролер приймає рішення про використання того чи іншого джерела енергії.

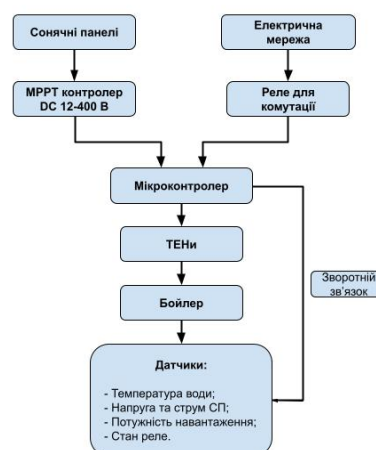


Рисунок 1.3 – принципова схема гібридної системи керування

Переключення між джерелами може відбуватися плавно або ступінчасто. Плавне переключення забезпечує кращий комфорт користування, але потребує складнішої схемотехніки. Ступінчасте переключення простіше у реалізації та більш надійне.

1.3.5 Енергоакумуючі системи

Енергоакумуючі системи забезпечують резервування надлишків електроенергії від фотоелектричних панелей з метою її подальшого використання при недостатньому освітленні або у темний час доби [7].

Ці системи особливо ефективні в регіонах з нестабільним електропостачанням або високими тарифами на електроенергію. Накопичена протягом дня сонячна енергія може використовуватися ввечері або вранці для підігріву води без використання мережевої електроенергії.

Основними типами акумуляторів для таких систем є свинцево-кислотні, літій-іонні та літій-залізо-фосфатні. Кожен тип має свої переваги та недоліки.

1.4 Огляд існуючих на ринку систем на контролерів

На ринку України представлено декілька типів контролерів для керування нагрівальними елементами бойлерів від сонячних панелей. Розглянемо основні категорії та їх характеристики.

1.4.1 Професійні контролери відстеження точки максимальної потужності

SolarMax Kerberos є типовим представником професійних контролерів MPPT для нагріву води [8]. Цей пристрій має ефективність перетворення близько 99%, що забезпечує максимальне використання доступної сонячної енергії (рис. 1.4).

До основних переваг системи належать: надійний захист від короткого замикання та зворотної полярності; власний рідкокристалічний дисплей для моніторингу параметрів роботи; корпус з високим ступенем захисту; розширений діапазон робочих температур від -20°C до $+60^{\circ}\text{C}$; можливість роботи з високовольтними панелями; тривалий гарантійний період до 5 років.

Недоліками цієї системи є: значно вища ціна порівняно з конкурентами (від 15000 грн); складність встановлення, що потребує залучення фахівців; неможливість самостійного оновлення прошивки; відсутність мережевого підключення Wi-Fi або Ethernet; обмежена сумісність лише з певними типами нагрівальних елементів; складність інтеграції з сучасними системами моніторингу.

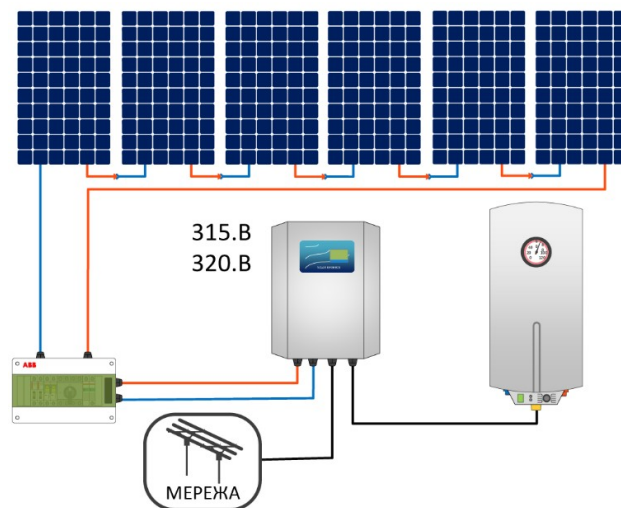


Рисунок 1.4 – схема підключення контролера SolarMax Kerberos

Система автоматично визначає оптимальну робочу точку сонячних панелей та підтримує її протягом дня. При зниженні сонячної активності контролер може автоматично підключати додаткове живлення з електричної мережі для підтримання необхідної температури води.

1.4.2 Бюджетні ступінчасті контролери

На інтернет-майданчиках типу OLX доступні бюджетні варіанти ступінчастих контролерів відстеження точки максимальної потужності для нагріву води за ціною від 3000 до 8000 грн. Ці пристрої мають базовий функціонал та просту конструкцію [9].

Переваги бюджетних рішень: дуже доступна ціна; простота встановлення та налаштування; наявність базового захисту від перенапруги; компактні розміри для встановлення у обмеженому просторі; низьке енергоспоживання контролера; простий інтерфейс, зрозумілий початківцям; доступність запчастин; достатня функціональність для невеликих систем; можливість ручного налаштування режимів; швидка доставка в межах України.

На рис. 1.5 показано загальний вигляд та схему підключення бюджетного ступінчастого контролера.

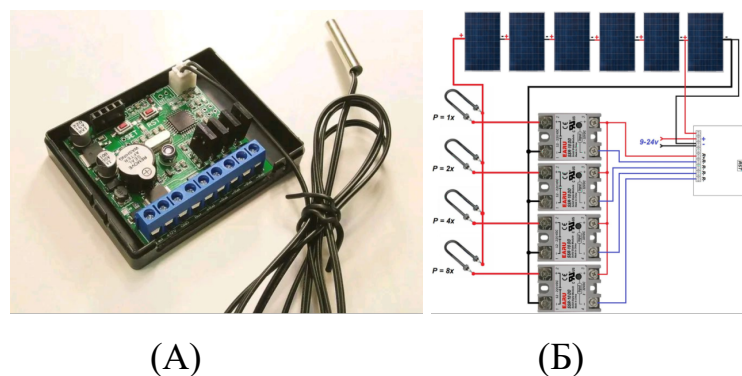


Рисунок 1.5 – бюджетний контролер для нагрівання води. А – загальний вигляд контролера, Б – схема підключення контролера

Недоліки таких систем: низька якість виконання та компонентів; обмежена максимальна потужність підключення до 2000 Вт; відсутність захисту від вологи (низький рівень захисту); нестабільна робота при граничних температурах; короткий термін гарантії (6-12 місяців); обмежена точність вимірювання параметрів; відсутність аналізу ефективності роботи.

Такі контролери підходять для простих систем з обмеженим бюджетом, але можуть мати проблеми з надійністю та точністю регулювання.

1.4.3 Універсальні MPPT контролери

SK2000-DIAN та подібні універсальні контролери займають середню позицію за ціною та функціональністю [10]. Вони розраховані на роботу з різними типами навантажень, хоча не є спеціалізованими для нагріву води.

Основні переваги: потужність до 2000 Вт; надійний металевий корпус з ефективним охолодженням; захист від перегріву, перевантаження та короткого замикання; підтримка різних типів акумуляторів; функція температурної компенсації; автоматичне визначення напруги системи (12/24/48В); захист акумуляторів від глибокого розряду; доступна ціна в категорії середнього рівня.

На рис. 1.6 показано загальний вигляд універсального MPPT контролера.

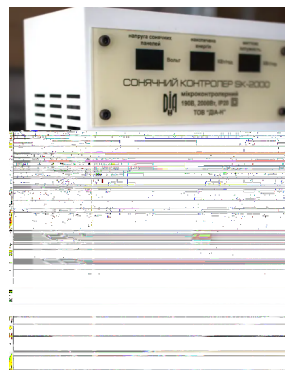


Рисунок 1.6 – універсальний MPPT контролер

Недоліки універсальних контролерів: відсутність спеціалізованих функцій для нагріву води; обмежені можливості інтеграції з системами моніторингу; неможливість віддаленого керування; відсутність збереження історії роботи; обмеження на максимальну вхідну напругу від панелей; неможливість створення власних алгоритмів роботи.

1.4.4 Самостійно створені пристрої на базі Arduino/ESP32

Окремою категорією є саморобні контролери на базі мікроконтролерів Arduino або ESP32. Такі рішення дозволяють створити повністю налаштовану систему під конкретні потреби користувача (рис. 1.7).

Переваги саморобних систем: повна гнучкість налаштування та програмування; можливість додавання веб-інтерфейсу та Wi-Fi підключення; низька вартість компонентів (500-1500 грн); можливість модернізації та розширення функціональності; повний контроль над алгоритмами роботи; можливість інтеграції з різними датчиками; збереження даних на SD-карту; створення мобільного додатку для керування.

Недоліки: потребує значних знань в електроніці та програмуванні; відсутність сертифікації безпеки; складність діагностики несправностей; потреба у постійній підтримці програмного коду.

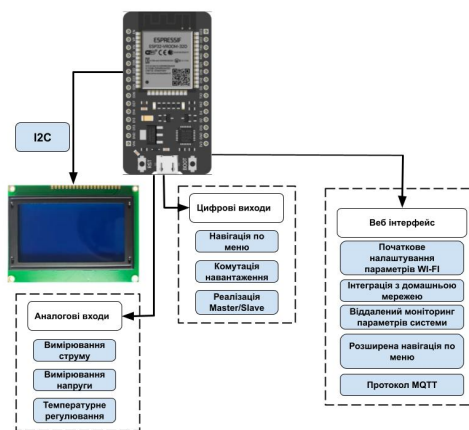


Рисунок 1.7 – структурна схема саморобного контролера на базі ESP32

1.5 Порівняння розглянутих варіантів систем

Після вивчення різних варіантів систем керування можна визначити основні вимоги до сучасних пристроїв для керування нагрівальними елементами бойлерів від сонячних панелей.

Для зручності порівняємо основні характеристики різних типів систем керування в таблиці 1.1:

Таблиця 1.1 – Порівняння систем керування

Показники	Саморобні системи	Бюджетні контролери	Універсальні контролери	Професійні системи
Ціна (грн)	500-1500	3000-8000	8000-10000	15000-25000
Точність температури	$\pm 2-5^{\circ}\text{C}$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	$\pm 1-2^{\circ}\text{C}$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
Веб-інтерфейс	Ні	Іноді	Так	Так
Місцевий екран	Ні	Так	Так	Так
Облік енергії	Ні	Частково	Так	Так
Надійність	Середня	Середня	Висока	Висока
Термін окупності	6-12 місяців	1-2 роки	1-3 роки	2-4 роки

З таблиці видно, що кожен тип контролерів має свої переваги та недоліки. Професійні системи найнадійніші, але дуже дорогі. Бюджетні - доступні за ціною, але можуть швидко зламатися. Універсальні контролери - це середній варіант між ціною та якістю, але вони не призначені спеціально для нагрівачів. Саморобні системи можна налаштувати під себе, але потрібні знання електроніки.

Професійні системи коштують 15000-25000 грн, але працюють стабільно весь час з мінімальним обслуговуванням. Вони ретельно перевірені та сертифіковані для роботи в різних умовах, використовують 95-99% доступної сонячної енергії.

Бюджетні контролери коштують 3000-8000 грн, але можуть вийти з ладу через 3-5 років через погану якість деталей. Найчастіше виходять з ладу силові реле, блоки живлення, контакти іржавіють через поганий захист від вологи. Використовують лише 85-90% енергії через прості алгоритми роботи.

Саморобні системи мають найдешевші деталі (500-1500 грн), але потребують багато часу на створення та налагодження. При правильному виконанні можуть працювати так само добре, як професійні.

З вище проведеного аналізу можна стверджувати, що існуючі на ринку контролери і системи мають суттєві недоліки. Професійні системи занадто дорогі та складні для домашнього використання. Дешеві варіанти не забезпечують потрібної надійності та функцій.

Найбільша проблема - відсутність спеціальних контролерів саме для керування нагрівачами змінної потужності. Більшість пристроїв створені для зарядки акумуляторів або роботи з інверторами, що не дозволяє ефективно використовувати їх для нагрівання води. Системи для зарядки акумуляторів використовують алгоритми, які не підходять для керування нагрівачами. Це призводить до неефективного використання сонячної енергії.

Існуючі системи мають програми роботи, в яких неможливе налаштування під конкретні потреби. Користувач не може встановити свій графік роботи або оптимізувати систему.

Більшість контролерів не записують історію роботи, тому неможливо проаналізувати ефективність або знайти проблеми. Користувач не знає, скільки енергії використано за місяць або як працювала система, коли його не було вдома.

Тому розробка доступної за ціною, надійної та функціональної системи керування з можливістю віддаленого доступу та гнучкими налаштуваннями є актуальним завданням для ефективного використання сонячної енергії в побуті.

1.6 Вимоги до системи, яка розробляється

Розроблена система керування повинна бути створена спеціально для роботи з нагрівачами різної потужності. Програма керування має забезпечувати найкраще використання змінної потужності сонячних панелей протягом дня.

Користувач повинен мати можливість самостійно налаштовувати систему.

Контролер має мати простий та зрозумілий веб-інтерфейс для налаштування та перегляду роботи. Інтерфейс повинен добре працювати як на комп'ютерах, так і на телефонах. Потрібні функції збереження історії роботи,

показ графіків використання енергії, аналіз ефективності сонячних панелей та ведення статистики за різні періоди часу.

Розроблена система повинна поєднувати кращі якості існуючих пристроїв та виправляти їх недоліки. Використання якісних компонентів та продумана конструкція дозволять зробити систему дешевшою за професійні, але з такими ж можливостями та надійністю.

Систему потрібно проектувати так, щоб користувач міг встановити її самостійно без додаткової допомоги фахівців.

Модульна конструкція дозволить легко пристосувати систему під різну потужність сонячних панелей та кількість нагрівачів. Програма повинна підтримувати різні варіанти підключення без перепрограмування.

Важливою функцією є захист від перегріву води. Система повинна постійно контролювати температуру води в бойлері та температуру повітря навколо блоку керування.

При досягненні максимально допустимої температури води (зазвичай 70-80°C) всі нагрівальні елементи автоматично відключаються. Це відбувається незалежно від наявності енергії від сонячних панелей. Повторне включення відбувається тільки після зниження температури нижче встановленого порогу з урахуванням гістерезису.

Температурний захист електронних компонентів контролера активується при температурі повітря вище 60°C. У цьому випадку система переходить у режим захисту з відключенням всіх навантажень та сигналізацією про аварійну ситуацію.

Використання Wi-Fi підключення та веб-інтерфейсу зробить систему сучасною та сумісною з розумним будинком.

Використання мікроконтролера ESP32 забезпечить достатню потужність для складних програм керування та підтримку Wi-Fi без додаткових модулів.

Система з двома контролерами розділить функції: один мікроконтролер керуватиме нагрівачами, а ESP32 забезпечуватиме веб-інтерфейс та зв'язок. Це підвищить надійність системи та спростить створення прошивки.

Отже, потрібно розробити спеціальний контролер, який поєднає переваги дорогих професійних систем (надійність, ефективність) з доступною ціною бюджетних варіантів. Додатково він матиме можливості для контролю та налаштування через Інтернет.

Такий пристрій повинен оптимально використовувати енергію сонячних панелей, мати гнучкі налаштування для різних варіантів підключення нагрівачів та надавати користувачу повну інформацію про роботу системи в зручному вигляді.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Розробка апаратно-програмного комплексу контролера

Для практичної реалізації автоматизованої ступінчастої системи керування нагрівальними елементами (АСКТ) та оптимального балансування їх роботи з енергією від сонячних панелей було розроблено та виготовлено експериментальний зразок контролера. Розроблений контролер забезпечує балансування навантаження та ефективне використання сонячної енергії через автоматичний підбір комбінації нагрівальних елементів (ТЕНів) в залежності від параметрів генерації та потреб користувача.

На рис. 2.1 представлена структурна схема розробленої системи, що відображає взаємодію всіх функціональних блоків.

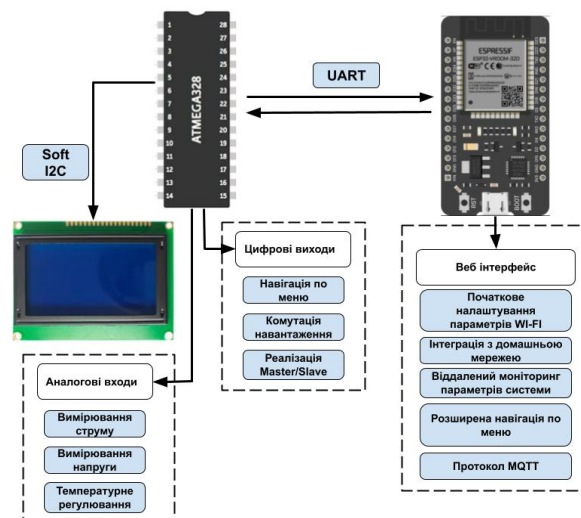


Рисунок 2.1 - Принципова структурна схема автоматизованої ступінчастої системи керування нагрівальними елементами

Основою контролера АСКТ є двокомпонентна система, що складається з двох взаємодіючих модулів. Перший - базовий модуль на основі мікроконтролера ATmega328P-PU, який виконує основні функції керування та вимірювання параметрів. Другий - комунікаційний Wi-Fi модуль на базі ESP32, що забезпечує мережеву взаємодію та веб-інтерфейс для користувача.

2.1.1 Апаратна частина контролера

Конструктивно автоматизована ступінчаста система керування нагрівальними елементами (АСКТ) складається з двох взаємодіючих модулів, що забезпечує оптимальний розподіл функцій та підвищену надійність. Базовий модуль на ATmega328P-PU керує комбінаціями ТЕНів через 6 вихідних пінів, які працюють як цифрові виходи для керування транзисторними ключами.

Для відображення інформації використовується графічний дисплей LCD ST7567SSW, підключений через програмно-емульований I2C інтерфейс. Користувач взаємодіє з системою через енкодер з кнопкою, що дозволяє налаштовувати параметри без зовнішніх пристроїв.

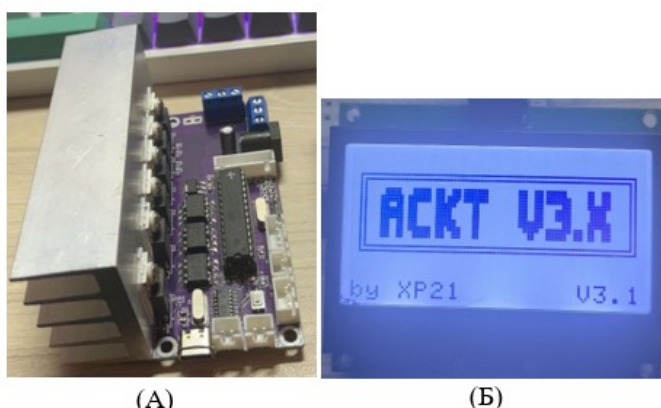


Рисунок 2.2 - Базовий модуль АСКТ на основі ATmega328P-PU з графічним дисплеєм. А – плата керування, Б – початковий екран при ввімкненні системи.

На рис. 2.2 представлено базовий модуль системи АСКТ, що є центральним елементом керування, а також дисплей, на якому відображається необхідна інформація про систему.

Для вимірювання параметрів системи використовуються аналогові входи. Контролер вимірює та показує електричні параметри: напругу сонячних панелей, яка вимірюється через прецизійний резистивний дільник з точністю до 0.1 В, споживаний струм за допомогою низькоомного шунта з додатковим підсилювачем сигналу на базі операційного підсилювача з точністю до 0.01 А,

активну потужність як добуток напруги та струму, а також спожиту енергію в кВт·год з накопиченням у енергонезалежній пам'яті. Така схема дозволяє системі точно вимірювати напругу, струм та обчислювати потужність в реальному часі.

Контролер АСКТ оснащений точною системою температурного регулювання, що базується на NTC термісторі, який забезпечує вимірювання температури з точністю до $0,1^{\circ}\text{C}$. Залежно від сфери застосування система виконує різні функції:

При роботі з бойлерами пристрій підтримує задану користувачем температуру води. Контролер автоматично вимикає нагрівальні елементи при досягненні заданого значення та відновлює їх роботу після охолодження води, забезпечуючи постійний комфортний рівень нагріву.

У випадку встановлення на опалювальні котли система функціонує як пристрій температурного захисту, запобігаючи перегріву шляхом своєчасного відключення ТЕНів при досягненні граничних значень температури.

Важливою особливістю алгоритму регулювання є використання гістерезису в 5°C , завдяки якому система плавно відновлює роботу нагрівальних елементів тільки після суттєвого охолодження теплоносія. Це технічне рішення запобігає частому циклічному перемиканню ТЕНів і значно подовжує термін служби силових комутаційних елементів контролера та самих нагрівачів.

Комунікаційний модуль на ESP32 забезпечує Wi-Fi підключення для інтеграції системи в домашню мережу. Він містить веб-сервер для надання користувацького інтерфейсу та підтримує MQTT протокол для інтеграції з системами домашньої автоматизації. Для зберігання налаштувань та веб-інтерфейсу використовується SPIFFS файлова система. Модуль також автоматично відновлює підключення до мережі при втраті зв'язку та має режим точки доступу для початкового налаштування.

На рис. 2.3 показано комунікаційний модуль АСКТ, який забезпечує зв'язок з домашньою мережею та зовнішніми системами.

Система підтримує два основних режими роботи, що налаштовуються на апаратному рівні [11]. У Master режимі контролер надає дозвіл на роботу іншим контролерам, що працюють у режимі Slave. У Slave режимі контролер отримує дозвіл на роботу від Master пристрою через спеціальний пін керування Permission, що дозволяє організувати каскадну роботу декількох контролерів для максимального використання сонячної енергії, коли бойлер досягає заданої температури (рис. 2.4).

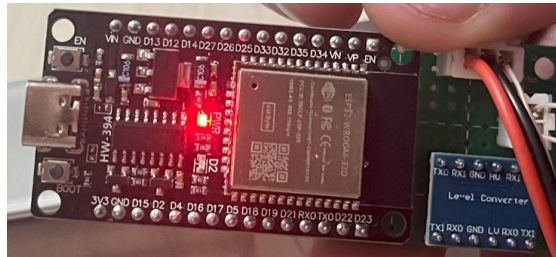


Рисунок 2.3 - Комунікаційний модуль АСКТ на базі ESP32

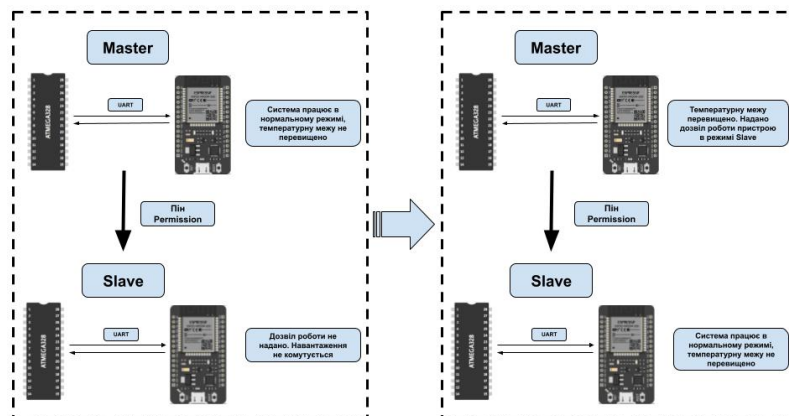


Рисунок 2.4 - Схема роботи АСКТ в режимі Master/Slave з підключенням декількох контролерів до однієї сонячної станції

Керування навантаженням відбувається через комутацію комбінацій ТЕНів за допомогою 6 транзисторних ключів (рис. 2.5), що дозволяє створити $2^6 = 64$ різних комбінацій потужності. Для кожної комбінації визначаються оптимальні границі напруги, в межах яких вона забезпечує найбільш ефективне використання сонячної енергії.

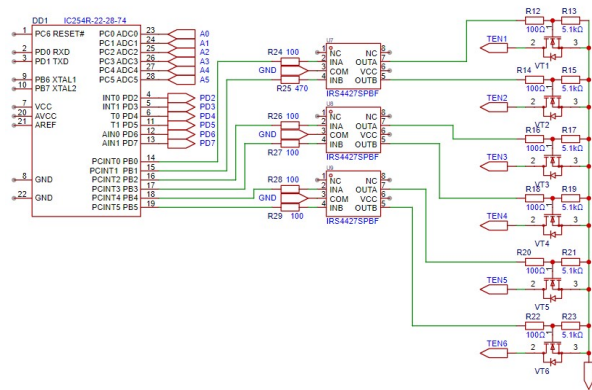


Рисунок 2.5 - Схема підключення ТЕНів до транзисторних ключів системи АСКТ

Для збереження налаштувань та забезпечення енергонезалежності система використовує вбудовану EEPROM пам'ять ATmega328P-PU для критичних параметрів (бажана температура нагріву, лічильник спожитої енергії) та SPIFFS файлову систему ESP32 для зберігання розширених налаштувань, таких як параметри мережі та MQTT конфігурація.

2.1.2 Програмна частина контролера

Програмне забезпечення АСКТ розділено на дві взаємодіючі частини, що відповідають апаратній архітектурі. Прошивка ATmega328P-PU відповідає за основні алгоритми керування та вимірювання, відображення інформації на дисплеї та взаємодію з енкадером. Вона містить меню налаштувань для автономної роботи та використовує протокол UART для обміну даними з ESP32.

Система регулярно зберігає критичні параметри (бажана температура, лічильник спожитої енергії) у енергонезалежній пам'яті. Для уникнення зайвого зносу EEPROM пам'яті використовується алгоритм, який відстежує зміни значень та здійснює запис тільки при суттєвих змінах. Так, наприклад, лічильник спожитої енергії оновлюється в EEPROM тільки при зміні цілої частини значення, що суттєво подовжує термін служби пам'яті.

Для забезпечення стабільної роботи протягом тривалого часу створено функцію Watchdog, яка автоматично перезавантажує систему при зависанні.

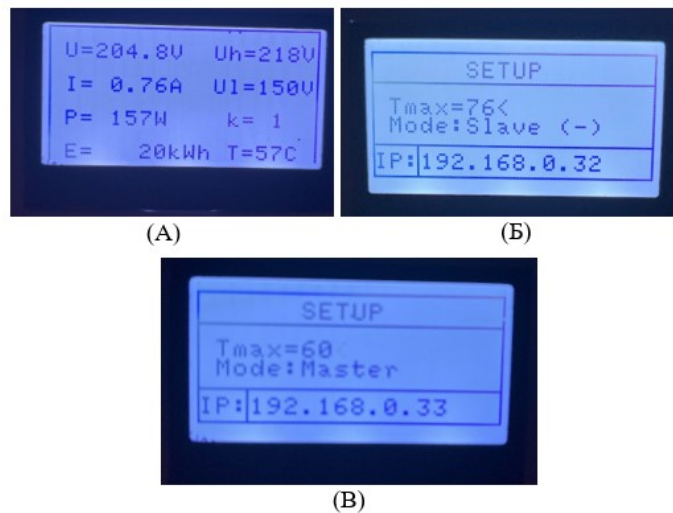


Рисунок 2.6 - Меню базового модуля АСКТ на дисплеї з відображенням основних параметрів роботи. А – головна сторінка з відображенням всіх необхідних параметрів системи. Б – меню системи в режимі Slave без дозволу роботи. В – меню системи в режимі Master, яке дає дозвіл роботи іншому контролеру в режимі Slave.

Меню на фізичному дисплеї містить наступні параметри:

1. Головний екран - відображає поточні значення напруги (U), струму (I), потужності (P) та спожитої енергії (E);
2. Параметри комбінації - показує поточний крок (k), верхню (UMax) та нижню (UMin) межі напруги;
3. Температурний режим - відображає поточну температуру (T) та задану температуру (Tmax);
4. Налаштування - дозволяє змінювати задану температуру, переглядати IP-адресу;
5. Режим роботи - показує поточний режим (Master/Slave) та стан дозволу в режимі Slave («+» – дозволено, «-» – заборонено);

На рис. 2.6 показано приклад меню на дисплеї базового модуля, що дозволяє користувачу контролювати всі важливі параметри системи.

Для навігації та перемикання між режимами використовується натискання та обертання енкодера. Для входу в режим меню необхідно натиснути на енкодер. В режимі меню обертання енкодера змінює значення максимальної температури, а повторне натискання зберігає налаштування та повертає користувача на екран параметрів системи.

Рисунок 2.7 – Меню конфігурації MQTT у веб-інтерфейсі ESP32

Прошивка ESP32 базується на WebServer бібліотеці з адаптивним веб-інтерфейсом для комп'ютерів та мобільних пристроїв [12]. Вона також містить MQTT клієнт для інтеграції з Home Assistant та іншими системами домашньої автоматизації. Важливими функціями є автоматичне відновлення підключення при втраті зв'язку та режим точки доступу для початкового налаштування, що значно спрощує процес введення пристрою в експлуатацію.

На рис. 2.7, 2.8 показано інтерфейс веб-додатку, що дозволяє керувати системою з будь-якого пристрою в домашній мережі.

Веб-інтерфейс системи містить наступні розділи:

1. Панель моніторингу - головний екран з відображенням усіх параметрів роботи системи:

- Електричні параметри (напруга, струм);
- Енергетичні параметри (потужність, спожита енергія);
- Температурні параметри (поточна та задана температура);

- Параметри регулювання (поточний крок, межі напруги, номінальна потужність);
 - Режим роботи системи (Master/Slave, стан дозволу);
2. Графіки - сторінка з відображенням історії змін параметрів:
- Графік потужності за останні 24 години;
 - Графік температури за останні 24 години;
3. Налаштування:
- Налаштування максимальної температури;
 - Конфігурація MQTT (адреса сервера, порт, логін, пароль, префікс);
 - Кнопка скидання лічильника енергії;
 - Кнопка скидання наявної конфігурації WI-FI;
4. Налаштування мережі в режимі точки доступу:
- Налаштування динамічної IP-адреси пристрою;
 - За потреби – налаштування статичної IP-адреси пристрою;

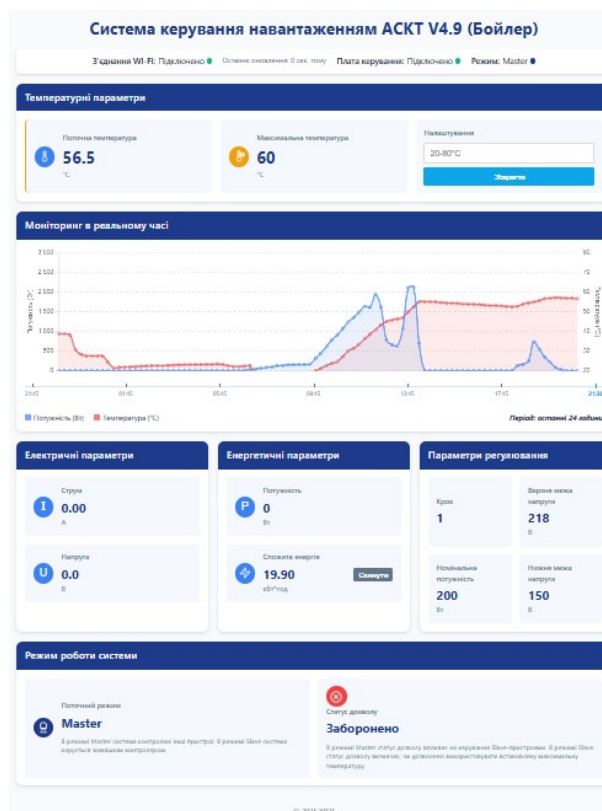


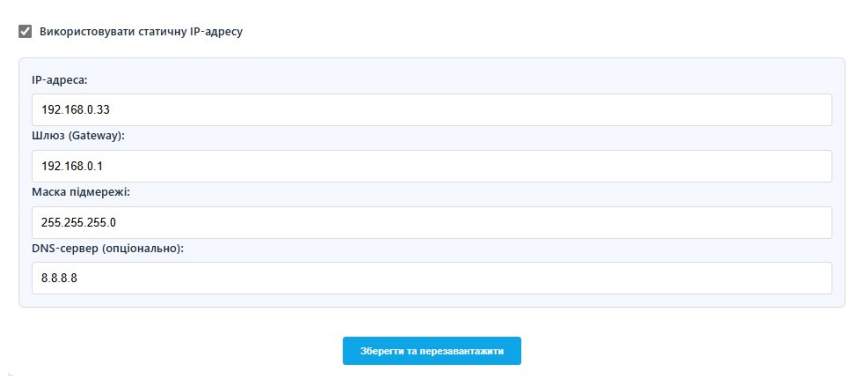
Рисунок 2.8 – Загальний вигляд веб-інтерфейсу ESP32

Інтеграція з системами домашньої автоматизації працює через MQTT-протокол, що дозволяє взаємодіяти з популярними системами, такими як Home Assistant. Система автоматично публікує дані основних параметрів у відповідні топіки, підтримує функцію Auto Discovery для автоматичного виявлення пристрою системою домашньої автоматизації, а також надає можливість віддаленого управління через MQTT команди. Це дозволяє інтегрувати контролер у сценарії розумного будинку, наприклад, для оптимізації використання сонячної енергії для нагріву води або підтримання оптимальної температури в будинку.

При першому ввімкненні, або у випадку, коли неможливо під'єднатись до збереженої в пам'яті мережі WI-FI контролер створює власну точку доступу для початкового налаштування, яка активується автоматично при першому запуску або у випадку неможливості підключення до збереженої мережі. У стаціонарному режимі система підключається до домашньої Wi-Fi мережі і може працювати як з динамічною, так і зі статичною IP-адресою. Для підвищення надійності функціонує автоматичне відновлення з'єднання при втраті зв'язку, а також вбудований DNS-сервер для режиму точки доступу, що спрощує початкове налаштування. На рис. 2.9, 2.10 представлено екран налаштування Wi-Fi, що з'являється при першому запуску системи або при скиданні налаштувань, а також додаткові параметри для конфігурації статичної IP-адреси.

The screenshot displays the Wi-Fi configuration screen for the ASKT V4.8 module. The title is 'Налаштування Wi-Fi АСКТ V4.8'. Below the title, it indicates the current mode: 'Режим роботи: Налаштування мережі'. The main section is 'Параметри підключення Wi-Fi', which contains input fields for 'Назва мережі (SSID):' and 'Пароль:'. There are buttons 'Скасувати' and 'Повторити' next to these fields. A checkbox labeled 'Використовувати статичну IP-адресу' is present, with a 'Зберегти та перезавантажити' button below it. The 'Доступні мережі Wi-Fi' section lists available networks: 'TP-Link_F9E6' (Signal strength: 58% (-71 dBm)) and 'netis_38D2FD' (Signal strength: 8% (-96 dBm)). At the bottom, there is a small copyright notice: '© 2025 XP21 | Після збереження налаштувань пристрій перезавантажиться та спробує підключитися до вказаної мережі'.

Рисунок 2.9 - Екран налаштування Wi-Fi на комунікаційному модулі АСКТ



The screenshot shows a web-based configuration interface for the ASCT module. At the top, there is a checked checkbox labeled "Використовувати статичну IP-адресу" (Use static IP address). Below this, there are four input fields with the following labels and values: "IP-адреса:" with "192.168.0.33", "Шлюз (Gateway):" with "192.168.0.1", "Маска підмережі:" with "255.255.255.0", and "DNS-сервер (опціонально):" with "8.8.8.8". At the bottom right of the form area is a blue button labeled "Зберегти та перезавантажити" (Save and reload).

Рисунок 2.10 – Налаштування статичної IP-адреси на комунікаційному модулі АСКТ

Програмне забезпечення використовує протокол UART для комунікації між модулями, що забезпечує передачу всіх вимірюваних параметрів, синхронізацію налаштувань, передачу команд керування та стійкість до завад через контроль цілісності даних за допомогою контрольних сум. При комунікації між модулями ATmega328P-PU та ESP32 враховується можливі помилки передачі даних. Кожен пакет даних починається з маркера 0xAA, далі йде код команди, дані та завершується маркером 0xBB. Для критичних команд, таких як встановлення бажаної температури нагріву, додатково використовується контрольна сума, що дозволяє виявити та відкинути пошкоджені пакети. Протокол підтримує широкий набір команд, включаючи передачу параметрів, встановлення налаштувань, скидання лічильника енергії та обмін службовою інформацією (рис. 2.11).

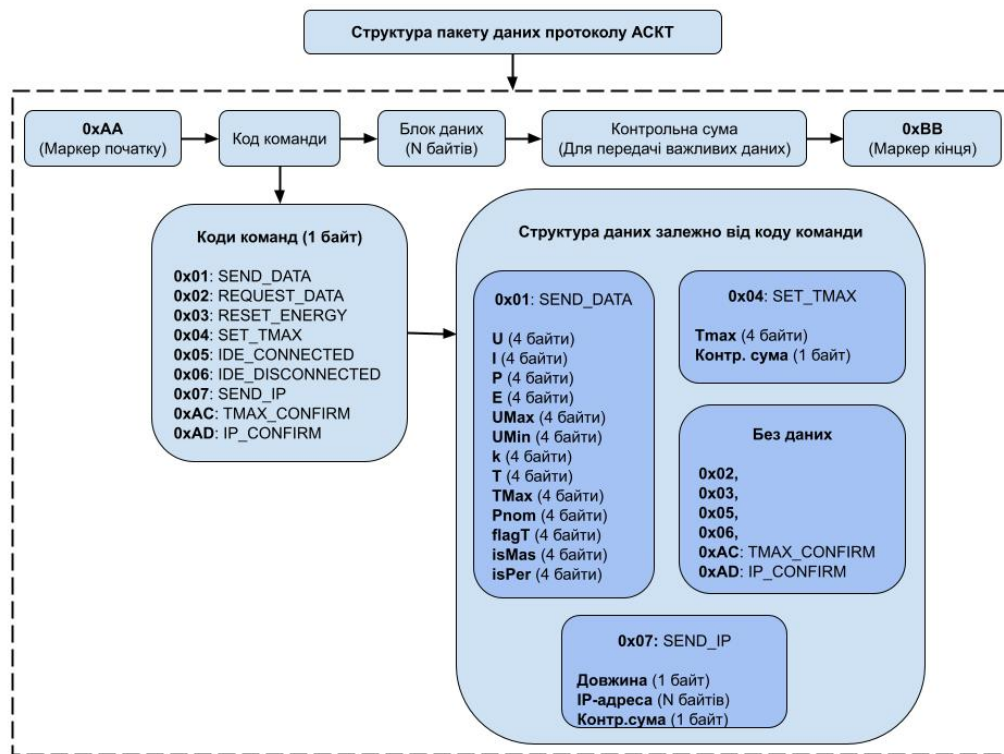


Рисунок 2.11 - Структура пакету даних в протоколі комунікації між модулями АСКТ

2.2 Алгоритми керування та особливості реалізації контролера

Програмне забезпечення базового модуля реалізує інтелектуальний алгоритм вибору оптимальної комбінації ТЕНів для максимально ефективного використання енергії сонячних панелей. В основі алгоритму лежить система динамічних порогових значень напруги. Для кожної з 64 можливих комбінацій ТЕНів визначено специфічні верхні (U_{Max}) та нижні (U_{Min}) пороги напруги, в межах яких забезпечується найефективніше перетворення сонячної енергії.

Система безперервно моніторить напругу сонячних панелей і при її виході за встановлені межі здійснює плавний перехід на іншу комбінацію ТЕНів. Якщо напруга перевищує верхній поріг для поточної комбінації, система підключає додаткові ТЕНи, збільшуючи загальну потужність. При падінні напруги нижче нижнього порогу відбувається перехід на менш потужну комбінацію для оптимального використання доступної енергії.

На рис. 2.12 показано графік роботи системи, на якому видно чітке відпрацювання роботи алгоритму регулювання температури з гістерезисом, що забезпечує стабільну роботу без частих перемикань.



Рисунок 2.12 - Графік роботи алгоритму температурного регулювання

2.2.1 Вимірювання та розрахунок параметрів системи

В процесі роботи система використовує ряд математичних формул для вимірювання та розрахунку фізичних параметрів. Нижче наведено основні формули, що використовуються в алгоритмах АСКТ.

Для вимірювання високої напруги використовується резистивний дільник напруги з подальшим перерахунком:

$$U_{\text{вим}} = U_{\text{АЦП}} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}; \quad (2.1)$$

де $U_{\text{вим}}$ - вимірювана напруга сонячних панелей,

$U_{\text{АЦП}}$ - напруга на вході АЦП,

R_1 та R_2 - опори резисторів дільника.

У програмному кодi це реалiзовано наступним чином:

$$Coeff_U = \frac{1}{\frac{R_1 + R_2}{R_2}}; \quad (2.2)$$

$$U = filt_U \cdot Coeff_U; \quad (2.3)$$

де $filt_U$ - вiдфiльтроване значення напруги з АЦП,

$Coeff_U$ - коефiцiєнт перерахунку.

Для вимiрювання струму використовується низькоомний шунт та операцiйний пiдсилювач. Значення струму обчислюється наступною формулою:

$$I_{\text{вим}} = \frac{U_{\text{АЦП}}}{R_s \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right)}; \quad (2.4)$$

де $I_{\text{вим}}$ - вимiрюваний струм,

$U_{\text{АЦП}}$ - напруга на входi АЦП,

R_s - опiр шунта,

R_3 та R_4 - опори резисторiв у схемi пiдсилювача.

У програмному кодi це реалiзовано як:

$$Coeff_I = \frac{1}{R_s \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right)}; \quad (2.5)$$

де $filt_I$ - вiдфiльтроване значення напруги з АЦП для каналу вимiрювання струму,

$Coeff_I$ - коефiцiєнт перерахунку.

Активна потужність розраховується як добуток виміряної напруги та струму:

$$P = U \cdot I; \quad (2.6)$$

Особливістю системи є точний облік спожитої електроенергії з використанням абсолютного часу. На відміну від простого інтегрування потужності з певним кроком, система враховує реальний час між вимірюваннями, що дозволяє отримати більш точні результати навіть при нерегулярних вимірюваннях або перезавантаженнях системи. Це особливо важливо для оцінки ефективності використання сонячної енергії та ведення точної статистики споживання. Для обчислення спожитої енергії даним методом використовується наступна формула:

$$E = E_{\text{попереднє}} + \frac{P \cdot \Delta t}{1000}; \quad (2.7)$$

де E - спожита енергія в кВт·год, P - поточна потужність у Вт, Δt - час між вимірюваннями в годинах.

Для вимірювання температури з NTC термістора використовується наближена формула:

$$T = T_0 + (R_{NTC} - R_0) \cdot k_T; \quad (2.8)$$

де T - температура в °C,

T_0 - опорна температура,

R_{NTC} - виміряний опір термістора,

R_0 - опір термістора при опорній температурі,

k_T - температурний коефіцієнт.

У системі АСКТ для більш точного обчислення виміряної температури використовується рівняння Стейнхарта-Харта:

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R) + C \cdot (\ln(R))^3; \quad (2.9)$$

де T - температура в Кельвінах,

R - опір термістора,

A, B, C - коефіцієнти Стейнхарта-Харта.

2.2.2 Алгоритми цифрової фільтрації сигналів

Для підвищення точності вимірювань використовуються алгоритми цифрової фільтрації сигналів з аналогових датчиків [13]. Серед них: медіанна фільтрація для усунення імпульсних завад та плаваюче середнє для згладжування сигналу. Це дозволяє досягти високої точності вимірювання напруги та струму навіть в умовах нестабільного вихідного сигналу від сонячних панелей.

На рис. 2.13 представлено блок-схему алгоритму обробки сигналів, що використовується в системі АСКТ для забезпечення точних вимірювань.

Для усунення випадкових викидів та імпульсних завад використовується медіанний фільтр, принцип роботи якого полягає у виборі середнього за значенням елемента з відсортованого масиву останніх вимірювань:

$$y[n] = \text{median}(x[n - N + 1], \dots, x[n - 1], x[n]); \quad (2.10)$$

де $y[n]$ - відфільтроване значення,

$x[n]$ - поточне вимірювання,

N - розмір вікна фільтра.

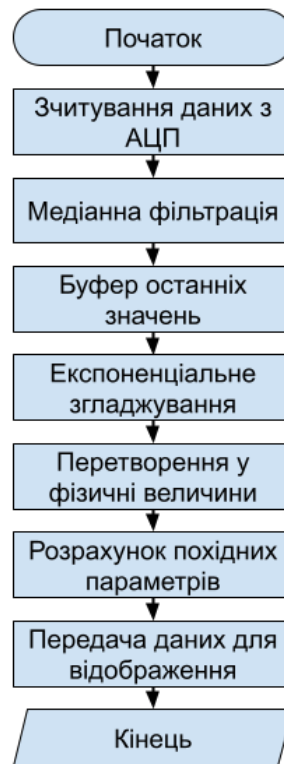


Рисунок 2.13 - Блок-схема алгоритму фільтрації сигналів

Для додаткової фільтрації використовується алгоритм експоненціального згладжування:

$$y[n] = \alpha \cdot x[n] + (1 - \alpha) \cdot y[n - 1]; \quad (2.11)$$

де $y[n]$ - відфільтроване значення,

$x[n]$ - вхідне значення (після медіанної фільтрації),

α - коефіцієнт згладжування ($0 < \alpha < 1$). У системі АСКТ використовується значення $\alpha=0.96$ для забезпечення швидкої реакції на зміни вхідного сигналу з достатнім рівнем згладжування.

Такі підходи до фільтрації дозволяють системі АСКТ забезпечувати стабільні та точні вимірювання електричних параметрів навіть в умовах шумів та завад у вимірювальних каналах.

2.3 Калькулятор бітових масок для оптимізації комбінацій ТЕНів

Для ефективного вибору комбінацій ТЕНів розроблено спеціальний інструмент – калькулятор бітових масок, який дозволяє визначити оптимальні комбінації нагрівальних елементів для досягнення максимальної ефективності системи (рис. 2.14, 2.15).

Рисунок 2.14 - Інтерфейс калькулятора бітових масок для системи АСКТ

Рисунок 2.15 – Меню введення опорів ТЕНів

Алгоритм роботи калькулятора наступний:

1. Користувач вводить кількість ТЕНів та їх номінальні потужності або опори.
2. Калькулятор генерує всі можливі комбінації вмикання ТЕНів (від 0 до 2^{n-1} , де n - кількість ТЕНів).

3. Для кожної комбінації обчислюється сумарна потужність:

$$P_i = \sum_{i=1}^n P_i \cdot b_i; \quad (2.12)$$

де P_i - потужність i -го ТЕНа,

b_i - бінарний стан (0 або 1) i -го ТЕНа в комбінації.

4. При використанні опорів ТЕНів замість потужностей, потужність обчислюється за формулою:

$$P_i = \frac{U^2}{R_i}; \quad (2.13)$$

де U - напруга живлення,

R_i - опір i -го ТЕНа.

5. Для комбінацій із паралельним підключенням кількох ТЕНів, загальний опір обчислюється за формулою:

$$\frac{1}{R_{\text{заг}}} = \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{R_i}; \quad (2.14)$$

а потужність такої комбінації:

$$P = \frac{U^2}{R_{\text{заг}}}; \quad (2.15)$$

6. Отримані комбінації сортуються за зростанням потужності та фільтруються за критерієм мінімального приросту потужності. Тобто, якщо

приріст потужності між сусідніми комбінаціями менший за заданий користувачем, така комбінація видаляється з результатів.

7. Для кожної відібраної комбінації формується бітова маска у вигляді двійкового числа, яка потім конвертується у байтове представлення для використання в мікроконтролері.

Після завершення розрахунків калькулятор створює набір даних, необхідних для роботи системи АСКТ. Основними результатами є масив бітових масок для прямого керування ТЕНами через транзисторні ключі та масив значень потужності для всіх обраних комбінацій нагрівальних елементів. В результаті роботи калькулятора також формуються наочні таблиці з параметрами: таблиця приросту потужностей (рис. 2.18), таблиця параметрів ТЕНів з обчисленими опорами при заданій напрузі масиву сонячних панелей (рис. 2.16), а також таблиця потужностей при напрузі сонячних панелей з відповідними приростами (рис. 2.17). Усі ці дані використовуються як для проектування системи, так і безпосередньо контролером для вибору оптимальної комбінації ТЕНів залежно від поточної напруги сонячних панелей.

Параметри ТЕНів		
№ ТЕНа	Опір (Ом)	Потужність при напрузі СП (Вт)
1	100.00	480
2	200.00	240
3	400.00	120
4	800.00	60

Рисунок 2.16 - Таблиця параметрів ТЕНів з розрахованими опорами та потужностями при заданому рівні напруги сонячних панелей

Порогові значення напруги для перемикання між комбінаціями ТЕНів (U_{Max} та U_{Min}) були визначені дослідним шляхом з використанням емпіричного методу тестування різних комбінацій та вимірювання їх ефективності при різних рівнях напруги від сонячних панелей.

№	Бітова маска	Активні ТЕНи	Потужність (Вт)	Приріст (Вт)
0	80000	-	0	0
1	80001	4	60	60
2	80010	3	120	60
3	80011	3, 4	180	60
4	80100	2	240	60
5	80101	2, 4	300	60
6	80110	2, 3	360	60
7	80111	2, 3, 4	420	60
8	81000	1	480	60
9	81001	1, 4	540	60
10	81010	1, 3	600	60
11	81011	1, 3, 4	660	60
12	81100	1, 2	720	60
13	81101	1, 2, 4	780	60
14	81110	1, 2, 3	840	60
15	81111	1, 2, 3, 4	900	60

Рисунок 2.17 - Таблиця потужностей комбінацій при робочій напрузі сонячних панелей з обчисленими приростами

Результати				
Результати розрахунку				
<pre>// Бітові маски для різних комбінацій ТЕНів byte komb[16] = {80000, 81000, 80100, 81100, 80010, 81010, 80110, 81110, 80001, 81001, 80101, 81101, 80011, 81011, 80111, 81111}; // Відповідні потужності для кожної комбінації int Pmax[16] = {0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500};</pre>				
Копіювати				
Таблиця приросту потужностей				
№	Бітова маска	Активні ТЕНи	Потужність (Вт)	Приріст (Вт)
0	80000	-	0	0
1	81000	1	100	100
2	80100	2	200	100
3	81100	1, 2	300	100
4	80010	3	400	100
5	81010	1, 3	500	100
6	80110	2, 3	600	100
7	81110	1, 2, 3	700	100
8	80001	4	800	100
9	81001	1, 4	900	100
10	80101	2, 4	1000	100
11	81101	1, 2, 4	1100	100
12	80011	3, 4	1200	100
13	81011	1, 3, 4	1300	100
14	80111	2, 3, 4	1400	100
15	81111	1, 2, 3, 4	1500	100

Рисунок 2.18 - Таблиця приросту потужностей з відображенням бітових масок та активних ТЕНів

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Опис наявної системи керування

Розроблена автоматизована ступінчаста система керування нагрівальними елементами (АСКТ) була впроваджена для керування комплексною системою, що складається з електричного бойлера та опалювального котла. Дана система призначена для максимально ефективного використання енергії сонячних панелей при забезпеченні потреб у гарячому водопостачанні та опаленні.

Сучасні тенденції розвитку енергетики України орієнтовані на впровадження відновлюваних джерел енергії та підвищення енергоефективності систем теплопостачання. Це зумовлює необхідність створення інтелектуальних систем керування, здатних оптимально розподіляти енергетичні ресурси між різними споживачами.

Основна система складається з двох основних компонентів:

1. Електричний бойлер ємністю 150 л з п'ятьма ТЕНами загальною потужністю 3000 Вт (200, 400, 800, 800, 800 Вт);
2. Опалювальний котел з шістьма ТЕНами загальною потужністю 3300 Вт (250, 500, 500, 500, 750, 800 Вт);

Сонячна електростанція складається з 6 панелей потужністю 550 Вт кожна, що забезпечує пікову потужність 3300 Вт. Структурна схема системи з режимом Master/Slave представлена на рис. 3.1.

Загальний вигляд контролера бойлера АСКТ, який забезпечує автоматизоване керування нагрівальними елементами показано на рисунку 3.2.

Принцип роботи системи Master/Slave базується на принципі почергового використання енергії від сонячних панелей. Контролер бойлера працює в режимі Master і має найвищий пріоритет у використанні сонячної енергії. Коли температура води в бойлері досягає заданого рівня (наприклад, 60°C), Master-контролер подає сигнал дозволу на роботу Slave-контролера котла через спеціальний пін Permission.

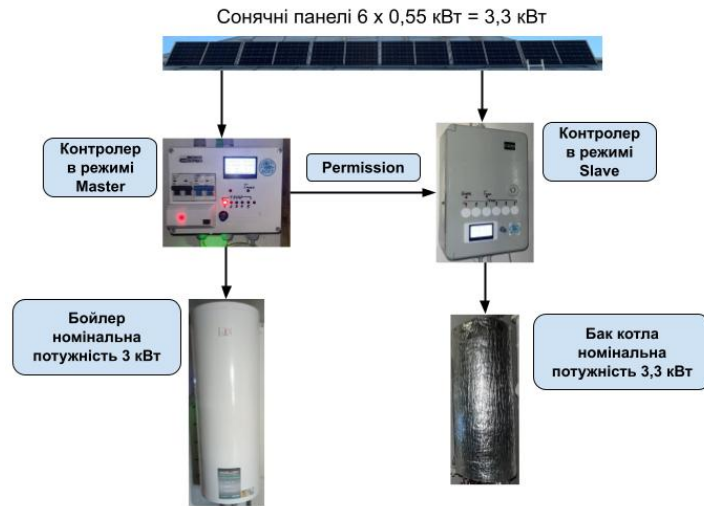


Рисунок 3.1 - Структурна схема системи АСКТ з режимом Master/Slave

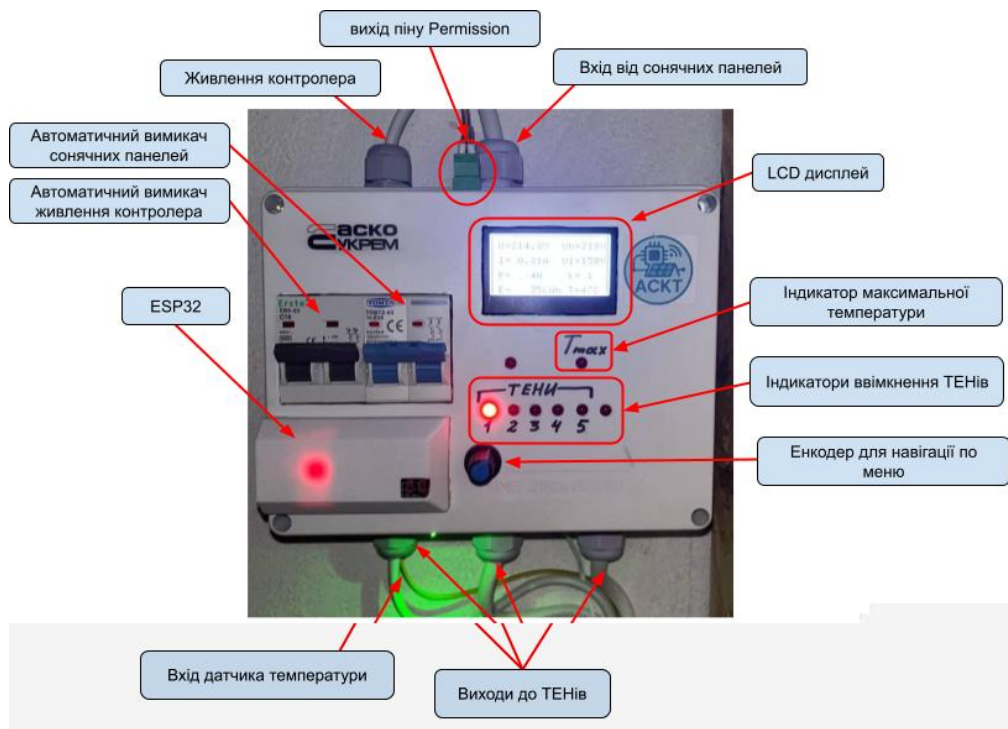


Рисунок 3.2 - Загальний вигляд контролера бойлера АСКТ

Алгоритм роботи системи наступний:

1. При наявності достатньої енергії від сонячних панелей Master-контролер активує відповідну комбінацію ТЕНів бойлера
2. Коли бойлер нагрітий до заданої температури, Master-контролер надає дозвіл Slave-контролеру

3. Slave-контролер активує ТЕНи котла, використовуючи доступну енергію

4. При зниженні потужності панелей або зниженні температури бойлера нижче порогового значення (55°C з урахуванням гістерезису 5°C), Master відбирає дозвіл у Slave-контролера

Така схема роботи забезпечує оптимальне використання доступної сонячної енергії з урахуванням пріоритетів споживання.

3.2 Характеристики нагрівальних елементів системи

Розподіл потужностей ТЕНів у системі було розраховано з використанням розробленого калькулятора бітових масок для забезпечення максимальної гнучкості регулювання. Детальні характеристики представлено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Характеристики ТЕНів системи

Компонент	Кількість ТЕНів	Потужність ТЕНів, Вт	Загальна потужність, Вт	Режим роботи
Бойлер 150л	5	200, 400, 800, 800, 800	3000	Master
Котел опалення	6	250, 500, 500, 500, 750, 800	3300	Slave
Загалом	11	-	6300	-

Для бойлера використовується система з 5 ТЕНів, що забезпечує 16 різних рівнів потужності від 0 до 3000 Вт. Вибір оптимальних комбінацій базується на принципах енергоефективного керування навантаженням. Матриця комбінацій ТЕНів бойлера представлена в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Комбінації ТЕНів бойлера (Master-контролер)

№	Бітова маска	Активні ТЕНи	Потужність, Вт	Приріст, Вт
0	B00000	-	0	0
1	B10000	1	200	200
2	B01000	2	400	200
3	B11000	1,2	600	200
4	B00100	3	800	200
5	B10100	1,3	1000	200

№	Бітова маска	Активні ТЕНи	Потужність, Вт	Приріст, Вт
6	B01100	2,3	1200	200
7	B11100	1,2,3	1400	200
8	B00110	4,5	1600	200
9	B10110	1,4,5	1800	200
10	B01110	2,4,5	2000	200
11	B11110	1,2,4,5	2200	200
12	B00111	3,4,5	2400	200
13	B10111	1,3,4,5	2600	200
14	B01111	2,3,4,5	2800	200
15	B11111	1,2,3,4,5	3000	200

Для котла використовується система з 6 ТЕНів, що забезпечує 14 оптимальних рівнів потужності від 0 до 3300 Вт. Комбінації розраховані для рівномірного розподілу потужності. Матриця комбінацій ТЕНів котла представлена в табл. 3.3.

На рисунку 3.3 показано загальний вигляд контролера котла АСКТ.

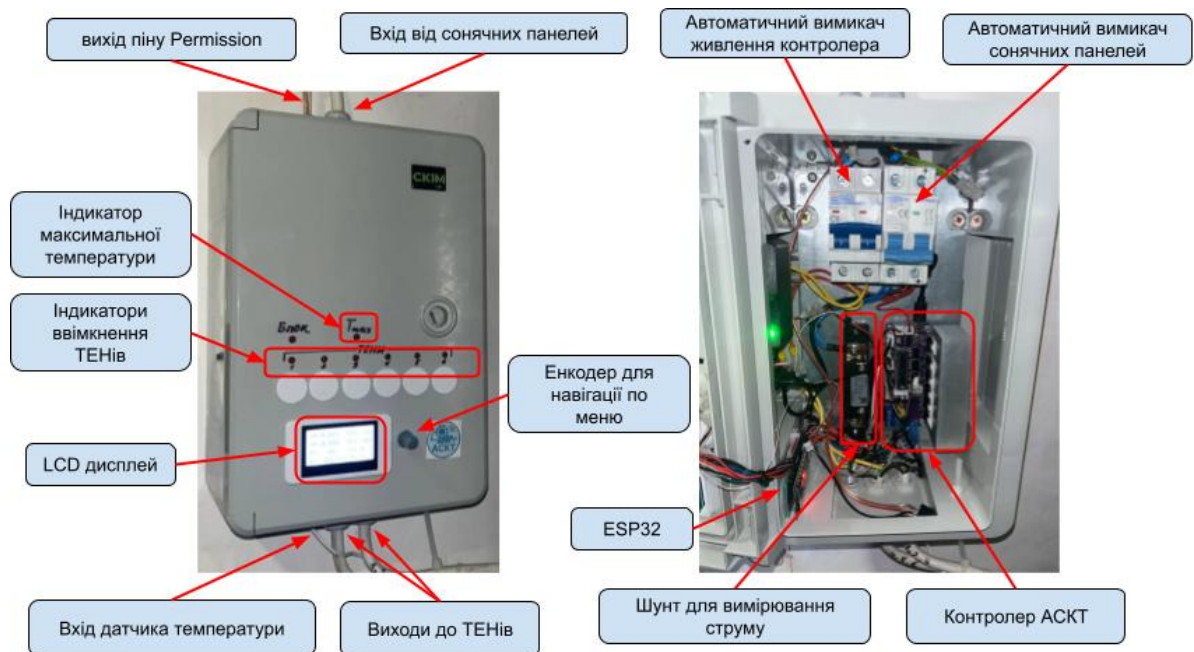


Рисунок 3.3 - Загальний вигляд контролера котла АСКТ

Таблиця 3.3 - Комбінації ТЕНів котла (Slave-контролер)

№	Бітова маска	Активні ТЕНи	Потужність, Вт	Приріст, Вт
0	B000000	-	0	0
1	B100000	1	250	250
2	B010000	2	500	250

№	Бітова маска	Активні ТЕНи	Потужність, Вт	Приріст, Вт
3	B110000	1,2	750	250
4	B011000	2,3	1000	250
5	B111000	1,2,3	1250	250
6	B011100	2,3,4	1500	250
7	B111100	1,2,3,4	1750	250
8	B111010	1,2,4,5	2000	250
9	B011110	2,3,4,5	2250	250
10	B111110	1,2,3,4,5	2500	250
11	B111011	1,2,4,5,6	2800	300
12	B011111	2,3,4,5,6	3050	250
13	B111111	1,2,3,4,5,6	3300	250

На рисунку 3.4 представлено котел з встановленим контролером АСКТ.



Рисунок 3.4 - Загальний вигляд котла з контролером АСКТ

3.3 Розрахунок ефективності використання сонячної енергії

Для розрахунку ефективності системи необхідно врахувати кліматичні особливості Тернопільського району. Регіон характеризується помірно-

континентальним кліматом з середньою річною інсоляцією близько 1150 кВт·год/м² на рік [14].

Система сонячних панелей складається з 6 монокристалічних панелей потужністю 550 Вт кожна, що забезпечує загальну пікову потужність 3300 Вт. Панелі встановлені під оптимальним кутом 35° з орієнтацією на південь відповідно до рекомендацій для географічної широти Тернополя [15].

Денна генерація розраховується за формулою:

$$P_{\text{ном}} \cdot I \cdot K_{\text{г}} \quad (3.1)$$

де $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність сонячних панелей, кВт;

I – середня денна інсоляція, кВт·год/м²/день;

$K_{\text{г}}$ – коефіцієнт генерації, що враховує втрати в системі та ефективність панелей за різних умов освітлення.

Сезонний розподіл генерації енергії представлено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 - Сезонний розподіл генерації сонячної енергії в Тернопільському районі [16]

Місяць	Середня інсоляція, кВт·год/м ² /день	Коефіцієнт генерації	Денна генерація, кВт·год	Місячна генерація, кВт·год
Січень	1.2	0.11	3.96	122.76
Лютий	2.1	0.19	6.93	194.04
Березень	3.5	0.32	11.55	358.05
Квітень	4.8	0.44	15.84	475.2
Травень	5.9	0.54	19.47	603.57
Червень	6.2	0.57	20.46	613.8
Липень	6.0	0.55	19.8	613.8
Серпень	5.4	0.49	17.82	552.42
Вересень	4.0	0.36	13.2	396.0
Жовтень	2.8	0.25	9.24	286.44
Листопад	1.8	0.16	5.94	178.2
Грудень	1.0	0.09	3.3	102.3
Сума	-	-	-	4496.58

3.4 Розрахунок споживання електроенергії системи

Розрахунок базується на реальних потребах середньостатистичної сім'ї з 4 осіб у приватному будинку площею 120 м² відповідно до нормативів енергоспоживання для житлових будівель [17].

Для розрахунку споживання енергії на нагрівання 150 л води від 15°C до 60°C використовується формула:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T. \quad (3.2)$$

де Q – необхідна енергія для нагрівання води, кДж;

m – маса води, кг;

c – питома теплоємність води (4,186 кДж/(кг·К));

ΔT – різниця температур (кінцева температура – початкова температура), К.

$$Q = 150 \cdot 4.186 \cdot (60 - 15) = 7.85 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Споживання енергії на опалення розраховано за формулою:

$$Q_o = \frac{V \cdot \Delta T \cdot k}{\eta}. \quad (3.3)$$

де V - об'єм будинку, м³;

ΔT - різниця температур, °C;

k - коефіцієнт теплопередачі будинку, Вт/(м³·К);

η - ККД системи опалення.

Середнє споживання енергії на нагрівання води та опалення представлено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 - Споживання електроенергії на нагрівання води та опалення

Період	Нагрів води, кВт·год/місяць	Опалення, кВт·год/місяць	Загальне споживання, кВт·год/місяць
Січень	165	900	1065
Лютий	165	820	985
Березень	165	650	815
Квітень	165	380	545
Травень	165	120	285
Червень	165	0	165
Липень	165	0	165
Серпень	165	0	165
Вересень	165	80	245
Жовтень	165	320	485
Листопад	165	640	805
Грудень	165	850	1015
Сума	1980	4760	6740

Система АСКТ з режимом Master/Slave забезпечує інтелектуальний розподіл енергії між бойлером та котлом залежно від пріоритетів та наявної потужності від сонячних панелей

Ефективність використання розрахована за формулою:

$$E = \frac{E_{зв}}{E_r} \cdot 100\%. \quad (3.4)$$

де E – ефективність використання сонячної енергії, %;

$E_{зв}$ – загальне використання сонячної енергії, кВт·год;

E_r – загальна генерація сонячної електростанції, кВт·год.

Ефективність розподілу представлена в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 - Розподіл сонячної енергії між компонентами системи

Місяць	Генерація СЕС, кВт·год	Використання бойлером (Master), кВт·год	Використання котлом (Slave), кВт·год	Загальне використання, кВт·год
Січень	122.76	122.76	0	122.76
Лютий	194.04	165.00	29.04	194.04
Березень	358.05	165.00	193.05	358.05
Квітень	475.20	165.00	310.20	475.20

Місяць	Генерація СЕС, кВт·год	Використання бойлером (Master), кВт·год	Використання котлом (Slave), кВт·год	Загальне використання, кВт·год
Травень	603.57	165.00	120.00	285.00
Червень	613.80	165.00	0.00	165.00
Липень	613.80	165.00	0.00	165.00
Серпень	552.42	165.00	0.00	165.00
Вересень	396.00	165.00	80.00	245.00
Жовтень	286.44	165.00	121.44	286.44
Листопад	178.20	165.00	13.20	178.20
Грудень	102.30	102.30	0.00	102.30
Сума	4496.58	1942.06	866.93	2808.99

3.5 Розрахунок економії та ефективності системи

Система АСКТ забезпечує адаптивне керування навантаженням, що дозволяє використовувати максимальну кількість доступної сонячної енергії в межах потреб споживання.

Економія розраховується за формулою:

$$E_{\text{грн}} = E_{\text{с}} \cdot T_{\text{ел}} \quad (3.5)$$

де $E_{\text{грн}}$ – економія в грошовому еквіваленті, грн;

$E_{\text{с}}$ – використання сонячної енергії, кВт·год;

$T_{\text{ел}}$ – тариф на електроенергію, грн/кВт·год.

На даний момент тариф на електроенергію складає 4,32 грн/кВт·год. Розрахунок економії представлено в табл. 3.7.

Таблиця 3.7 - Розрахунок економії електроенергії

Місяць	Використання сонячної енергії, кВт·год	Економія, грн
Січень	122.76	530.32
Лютий	194.04	838.25
Березень	358.05	1546.78
Квітень	475.20	2052.86
Травень	285.00	1231.20
Червень	165.00	712.80

Місяць	Використання сонячної енергії, кВт·год	Економія, грн
Липень	165.00	712.80
Серпень	165.00	712.80
Вересень	245.00	1058.40
Жовтень	286.44	1237.42
Листопад	178.20	769.82
Грудень	102.30	441.94
Сума	2341.99	11845.39

3.6 Збільшення ефективності системи шляхом утеплення баку котла

Для підвищення ефективності системи були реалізовані заходи щодо зменшення тепловтрат бойлера. Правильне утеплення теплоакumuлюючих елементів є одним з ключових факторів підвищення енергоефективності систем теплопостачання.

На рисунку 3.5 представлено бойлер до проведення робіт з утеплення.



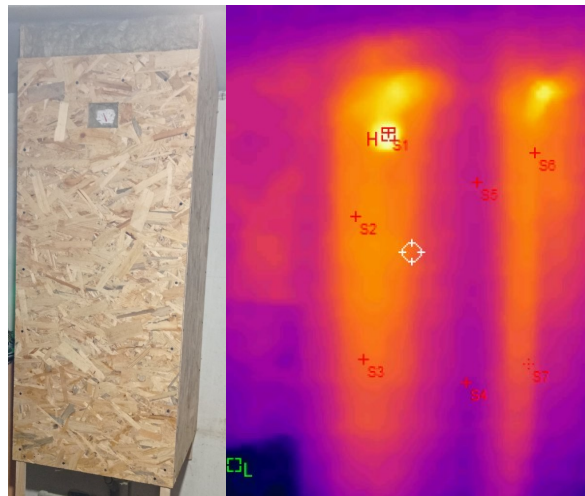
(A)

(B)

Name	Type	High	Low	Avg
S1	Dot	24,7	24,7	24,7
S2	Dot	30,3	30,3	30,3
S3	Dot	30,3	30,3	30,3
S4	Dot	27,1	27,1	27,1
S5	Dot	24,7	24,7	24,7
S6	Dot	25,4	25,4	25,4
S7	Dot	25,4	25,4	25,4

Рисунок 3.5 - Загальний вигляд бойлера до утеплення. А – Фотографія бойлера у видимому спектрі, Б – тепловізійний знімок бойлера, В – Таблиця температурних вимірювань контрольних точок

Після утеплення мінеральною ватою товщиною 50 мм бойлер набув вигляду, показаного на рисунку 3.6.



(A)

(Б)

Name	Type	High	Low	Avg
S1	Dot	31,1	31,1	31,1
S2	Dot	23,0	23,0	23,0
S3	Dot	21,9	21,9	21,9
S4	Dot	19,5	19,5	19,5
S5	Dot	20,2	20,2	20,2
S6	Dot	22,9	22,9	22,9
S7	Dot	21,3	21,3	21,3

(B)

Рисунок 3.6 - Загальний вигляд бойлера після утеплення. А – Фотографія бойлера у видимому спектрі, Б – тепловізійний знімок бойлера, В – Таблиця температурних вимірювань контрольних точок

До утеплення при температурі води в бойлері 50°C та температурі поверхні бойлера 30°C тепловтрати розраховувалися за формулою теплопередачі [18]:

$$Q = k \cdot S \cdot \Delta T. \quad (3.6)$$

де Q – тепловтрати, Вт;

k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К);

S – площа поверхні, м²;

ΔT – різниця температур між поверхнею та навколишнім середовищем, К.

Для бойлера ємністю 150 л (діаметр 0.45 м, висота 0.95 м) площа поверхні дорівнює:

$$S = \pi \cdot d \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 3.14 \cdot 0.45 \cdot 0.95 + 2 \cdot 3.14 \cdot 0.225^2 = 1.67 \text{ м}^2.$$

Коефіцієнт теплопередачі до утеплення: $k = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [19]

Різниця температур: $\Delta T = 30 - 20 = 10^\circ\text{C}$

Тепловтрати до утеплення:

$$Q_1 = 25 \cdot 1.67 \cdot 10 = 417.5 \text{ Вт.}$$

Для утеплення бойлера використано мінеральну вату товщиною 50 мм з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda = 0.04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ [19]. Після утеплення новий коефіцієнт теплопередачі розрахуємо за формулою:

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{\delta}{\lambda}} \quad (3.7)$$

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{25} + \frac{0.05}{0.04}} = 0.775 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Температура поверхні після утеплення знизилася до 23°C , що дає $\Delta T = 23 - 20 = 3^\circ\text{C}$.

$$Q_2 = 0.775 \cdot 1.67 \cdot 3 = 3.88 \text{ Вт.}$$

Зниження тепловтрат складає:

$$\Delta Q_1 = 417.5 - 3.88 = 413.62 \text{ Вт або } 99,1\%.$$

Утеплення бойлера дозволяє воді остигати набагато повільніше, що дає змогу більше нагрівати воду в баку нагрівання котла від сонячних панелей. Це призводить до зменшення споживання природного газу для опалення.

Додаткова економія природного газу від утеплення бойлера розраховується виходячи з того, що при повільнішому остиганні бойлера система може більше часу використовувати сонячну енергію замість газу. Це дає приблизну додаткову економію близько 150 м³ природного газу на рік.

На даний момент тариф за 1 м³ природного газу складає 7,96 грн.

Звідси, розрахуємо економію газу:

$$150 \cdot 7,96 = 1194 \text{ грн/рік.}$$

Загальна економія складає

$$E_3 = 11845,39 + 1194 = 13039,39 \text{ грн/рік.}$$

3.7 Розрахунок терміну окупності системи

Для розрахунку терміну окупності враховано вартість основних компонентів системи, представлену в табл. 3.8.

Таблиця 3.8 - Вартість компонентів системи АСКТ

Компонент	Кількість	Вартість за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
Контролер АСКТ	2	1000	2000
Сонячні панелі 550 Вт	6	3000	18000
Монтажні конструкції	1	6000	6000
Додаткове обладнання	1	4000	4000
Загальна вартість системи	-	-	30000

Термін окупності розраховується за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{B_{\text{заг}}}{E_3}. \quad (3.8)$$

де $T_{\text{ок}}$ – термін окупності системи, років;

$B_{\text{заг}}$ – загальна вартість системи, грн;

E_3 – загальна річна економія від використання системи, грн/рік.

$$T_{\text{ок}} = \frac{30000}{13039,39} = 2,3 \text{ роки.}$$

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Заходи щодо забезпечення безпеки при роботі

Розроблена в кваліфікаційній роботі автоматизована ступінчаста система керування нагрівальними елементами (АСКТ) з живленням від сонячних панелей призначена для експлуатації в побутових умовах та може використовуватися в навчальних лабораторіях електроенергетичних спеціальностей для демонстрації принципів роботи систем керування відновлюваними джерелами енергії.

Розроблена система працює з живленням контролера від мережі 230 В змінного струму з системою захисного заземлення TN-S. Живлення системи керування здійснюється від стабілізованого джерела постійного струму напругою 5 В та 12 В. Сонячні панелі генерують постійну напругу в діапазоні від 0 до 250 В залежно від інсоляції.

Під час експлуатації розробленої системи виникають наступні фактори небезпеки: ураження електричним струмом персоналу при роботі з нагрівальними елементами, сонячними панелями та мережею 230 В, механічні ушкодження при обслуговуванні системи, термічні опіки при контакті з нагрітими поверхнями бойлера, пожежна небезпека при перегріві електронних компонентів, а також ураження високою напругою сонячних панелей до 50 В постійного струму [20].

З метою запобігання електротравматизму в системі передбачені комплексні заходи безпеки. Всі струмопровідні частини мережі 230 В та високовольтної частини сонячних панелей закриті захисними ізоляційними кожухами, в силових колах застосована подвійна ізоляція проводів. Корпуси електричних приладів та блоків керування виконані з неструмопровідних матеріалів або заземлені, а клемні коробки сонячних панелей мають ступінь захисту не нижче IP65.

Система оснащена пристроєм захисного відключення з номінальним диференційним струмом 30 мА для мережі 230 В та окремим контролем ізоляції

для кола сонячних панелей постійного струму. Всі металеві корпуси електроустановок під'єднані до системи захисного заземлення, передбачено автоматичне відключення живлення при виникненні аварійних режимів.

Для забезпечення безпеки при роботі з високою напругою сонячних панелей встановлено попереджувальні знаки про небезпеку високої напруги на всіх елементах фотоелектричної системи. З'єднувальні кабелі сонячних панелей виконані спеціальним кабелем для фотоелектричних систем з підвищеною стійкістю до УФ-випромінювання. Передбачено роз'єднувач постійного струму для безпечного відключення сонячних панелей та встановлено пристрої захисту від перенапруги в колі постійного струму [21].

Температурний захист реалізовано шляхом постійного контролю температури води з автоматичним відключенням нагрівальних елементів при досягненні 70°C . Передбачено захист електронних компонентів від перегріву з відключенням при температурі понад 60°C , корпуси нагрівальних елементів теплоізовані для запобігання опікам. На передній панелі блоку керування розміщені індикаторні світлодіоди, що сигналізують про стан системи: наявність живлення від мережі та сонячних панелей, режим роботи, аварійні ситуації. Веб-інтерфейс системи дозволяє контролювати всі параметри дистанційно.

Оскільки в розробленій системі присутні електронні компоненти та полімерні матеріали, що можуть загорітися, в приміщенні експлуатації повинні бути передбачені засоби пожежогасіння. Матеріали, які можуть загорітися в процесі експлуатації: ізоляція проводів, друковані плати, корпуси електронних компонентів, елементи кріплення. Основними засобами пожежогасіння для електроустановок є вогнегасник вуглекислотний типу ВВК-2 або ВВК-5, вогнегасник порошковий типу ВП-5 та ящик із сухим піском об'ємом $0,5\text{ м}^3$ [22].

4.2 Розрахунок захисного заземлення для системи

Згідно з вимогами ПУЕ та ДНАОП 0.00-1.21-98, всі електроустановки напругою понад 50 В змінного струму та 120 В постійного струму повинні мати систему захисного заземлення. Розроблена система АСКТ працює з мережею 230 В змінного струму та сонячними панелями, що можуть генерувати напругу до 250 В постійного струму, тому обов'язково потребує влаштування захисного заземлення.

Захисне заземлення являє собою навмисне електричне з'єднання з землею або її еквівалентом металевих неструмопровідних частин, які можуть опинитися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції. Призначення захисного заземлення полягає в зменшенні напруги дотику до безпечної величини при замиканні фази на корпус [23].

Для розрахунку заземлення використано наступні вихідні дані: тип ґрунту - суглинки зі значенням питомого опору $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, глибина промерзання ґрунту 0,8 м, тип заземлювача - вертикальні стрижні довжиною 2,5 м діаметром 12 мм, глибина закладання з'єднувальної смуги 0,7 м. Допустимий опір заземлення для установок до 1000 В становить $R_{\text{доп}} = 4 \text{ Ом}$, для фотоелектричних систем з напругою до 250 В постійного струму також $R_{\text{доп}} = 4 \text{ Ом}$ [24].

Опір вертикально забитого в землю електрода визначається за формулою:

$$R_{\text{ел}} = \left(\frac{\rho}{2\pi l} \right) \cdot \left(\ln \left(2 \frac{l}{d} \right) + 0.5 \cdot \ln \left(\frac{4t + l}{4t - l} \right) \right). \quad (4.1)$$

де $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – питомий опір ґрунту;

$l = 2,5 \text{ м}$ – довжина електрода;

$d = 0,012 \text{ м}$ – діаметр електрода;

$t = 0,7 + 2,5/2 = 1,95 \text{ м}$ – відстань від поверхні землі до центру електрода.

$$R_{\text{ел}} = \left(\frac{100}{2\pi \cdot 2.5} \right) \cdot \left(\ln \left(2 \frac{2.5}{0.012} \right) + 0.5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 1.95 + 2.5}{4 \cdot 1.95 - 2.5} \right) \right) =$$

$$= 6.37 \cdot (\ln(416.7) + 0.5 \cdot \ln(1.44)) = 6.37 \cdot (6.03 + 0.18) = 39.6 \text{ Ом.}$$

Необхідна кількість заземлювачів визначається за формулою:

$$n = \frac{R_{\text{ел}}}{\eta \cdot R_{\text{доп}}}, \quad (4.2)$$

де $\eta = 0,69$ – коефіцієнт використання заземлювачів для $n = 4$.

Отже:

$$n = \frac{39.6}{0.69 \cdot 4} = 14.3 \approx 15 \text{ шт.}$$

Приймаємо 15 вертикальних заземлювачів, розташованих по колу діаметром 12 м.

Опір з'єднувальної смуги розраховується за формулою:

$$R_{\text{см}} = \left(\frac{\rho}{2\pi l_{\text{см}}} \right) \cdot \ln \left(\frac{l_{\text{см}}^2}{bh} \right). \quad (4.3)$$

де $l_{\text{см}} = \pi \cdot 12 = 37,7 \text{ м}$ – довжина смуги;

$b = 0,04 \text{ м}$ – ширина смуги;

$h = 0,7 \text{ м}$ – глибина закладання.

$$R_{\text{см}} = \left(\frac{100}{2\pi \cdot 37.7} \right) \cdot \ln \left(\frac{37.7^2}{0.04 \cdot 0.7} \right) = 0.42 \cdot \ln(50536) = 4,5 \text{ Ом.}$$

Загальний опір заземлюючого пристрою становить:

$$R_{\text{заг}} = \frac{R_{\text{ел}} \cdot R_{\text{см}}}{\frac{R_{\text{ел}}}{n} + R_{\text{см}} \cdot \eta_{\text{см}}}. \quad (4.4)$$

де $\eta_{\text{см}} = 0,45$ – коефіцієнт використання з'єднувальної смуги.

$$R_{\text{заг}} = \frac{39,6 \cdot 4,5}{\frac{39,6}{15} + 4,5 \cdot 0,45} = \frac{178,2}{2,64 + 2,03} = 3,8 \text{ Ом.}$$

Отриманий опір $R_{\text{заг}} = 3,8 \text{ Ом} < R_{\text{доп}} = 4 \text{ Ом}$, що задовольняє вимогам ПУЕ як для мережі змінного струму 230 В, так і для системи сонячних панелей постійного струму до 250 В.

4.3 Заходи безпеки життєдіяльності при експлуатації системи

З метою забезпечення безпечних умов експлуатації розробленої системи АСКТ передбачені комплексні технічні та організаційні заходи. Живлення системи керування здійснюється безпечною напругою 5 В та 12 В постійного струму, що значно знижує ризик ураження електричним струмом при обслуговуванні блоків керування. Всі електричні з'єднання виконані проводами з подвійною ізоляцією, корпуси блоків керування виготовлені з діелектричних матеріалів або мають ступінь захисту IP54.

Система оснащена пристроями автоматичного відключення при перевищенні максимально допустимої температури, виникненні струмів витоку в мережі 230 В, пошкодженні ізоляції в колі сонячних панелей, перевантаженні системи та відхиленнях напруги сонячних панелей за межі робочого діапазону. Передбачено головний вимикач для мережі 230 В, роз'єднувач постійного струму для сонячних панелей та аварійний вимикач "СТОП" для негайного відключення всієї системи [25].

Для фотоелектричних систем застосовуються особливі заходи безпеки. Всі компоненти системи сонячних панелей позначені спеціальними знаками небезпеки високої напруги постійного струму. Використовуються сертифіковані MC4 роз'єми для фотоелектричних систем, що унеможливляють випадкове роз'єднання. Встановлено пристрої виявлення дугового розряду в колі постійного струму, всі високовольні елементи розташовані в недоступних для випадкового дотику місцях.

Всі особи, що працюють з системою, повинні пройти спеціальний інструктаж з техніки безпеки при роботі з фотоелектричними системами та мати допуск до роботи з електроустановками. Не рідше одного разу на рік проводиться перевірка опору заземлення, стану ізоляції кіл змінного та постійного струму, працездатності захисних пристроїв, калібрування датчиків температури та електричних параметрів.

При обслуговуванні системи використовуються діелектричні рукавички на напругу до 1000 В, захисні окуляри, інструмент з ізольованими рукоятками та показчик напруги для перевірки відсутності напруги. Роботи з системою проводяться тільки при відключених електричних колах та після перевірки відсутності напруги.

Для запобігання пожежі та її локалізації передбачено автоматичне відключення при перегріві компонентів, використання негорючих матеріалів для корпусів, встановлення датчиків диму в приміщенні та спеціальні засоби пожежогасіння для електроустановок постійного струму. При виявленні пошкодження ізоляції необхідно негайно відключити систему аварійним вимикачем, відключити роз'єднувач сонячних панелей, перевірити стан заземлення та визначити причину пошкодження силами електротехнічного персоналу [26].

При виникненні пожежі слід відключити всі електричні кола, використати вуглекислотний або порошковий вогнегасник, категорично заборонено використовувати воду для гасіння електроустановок. Дотримання зазначених заходів безпеки забезпечує безпечну експлуатацію автоматизованої

ступінчастої системи керування нагрівальними елементами з урахуванням специфіки роботи як з мережею змінного струму 230 В, так і з високовольтними сонячними панелями постійного струму до 250 В.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В результаті проведених досліджень у кваліфікаційній роботі було знайдено рішення поставленої задачі. Розроблено автоматизовану ступінчасту систему керування нагрівальними елементами (АСКТ) з живленням від сонячних панелей, яка забезпечує максимально ефективне використання відновлюваних джерел енергії.

2. Проведено детальний аналіз існуючих систем управління електричним навантаженням. Досліджено професійні MPPT-контролери, бюджетні ступінчасті контролери, універсальні системи та самостійно виготовлені пристрої. Виявлено, що існуючі рішення мають серйозні недоліки: професійні системи коштують занадто дорого (15000-25000 грн), дешеві варіанти не забезпечують потрібної надійності, а універсальні контролери не призначені спеціально для керування нагрівальними елементами.

3. Розроблено нову двокомпонентну архітектуру системи. Система складається з основного модуля на ATmega328P-PU для керування навантаженнями та комунікаційного модуля на ESP32 для веб-інтерфейсу та мережевого зв'язку. Така архітектура забезпечує правильний розподіл функцій, підвищену надійність та можливість окремого оновлення компонентів системи.

4. Створено розумні алгоритми ступінчастого керування, які забезпечують 64 різні комбінації нагрівальних елементів з автоматичним вибором найкращої конфігурації залежно від поточної напруги сонячних панелей. Впроваджено систему гістерезису для запобігання частого перемикання та збільшення терміну служби обладнання.

5. Розроблено повноцінний веб-інтерфейс з адаптивним дизайном для комп'ютерів та мобільних пристроїв. Веб-інтерфейс містить панель контролю в реальному часі, графіки історії роботи, налаштування параметрів та MQTT-підключення для роботи з системами розумного будинку, такими як Home Assistant.

6. Впроваджено унікальний режим Master/Slave, який дозволяє підключати кілька споживачів (бойлер, котел опалення) до однієї сонячної електростанції з

автоматичним розподілом енергії за пріоритетами. Це забезпечує максимальне використання доступної потужності панелей при задоволенні потреб користувача.

7. Проведено детальні розрахунки ефективності системи для Тернопільського району. Розрахунки показали можливість використання 2342 кВт*год сонячної енергії на рік з економією 11845 грн на електроенергії та додатковою економією 1194 грн на природному газі завдяки утепленню бойлера. Розрахований період окупності системи становить 2,3 роки.

8. Розроблено спеціальний калькулятор бітових масок, який автоматизує процес підбору оптимальних комбінацій нагрівальних елементів для різних конфігурацій системи.

9. Створена система забезпечує точне вимірювання електричних параметрів (напруга $\pm 0,1$ В, струм $\pm 0,01$ А) та температури ($\pm 0,1^\circ\text{C}$). Точність досягається завдяки використанню якісних датчиків та алгоритмів цифрової фільтрації сигналів: медіанної фільтрації та експоненціального згладжування.

10. Впроваджено повну систему захисту. Система має температурний захист від перегріву води, функцію Watchdog для автоматичного перезавантаження при зависанні та надійне збереження важливих параметрів.

11. Розроблена система АСКТ поєднує переваги професійних рішень (надійність, ефективність 95-99% використання сонячної енергії) з доступною ціною бюджетних варіантів (близько 1000 грн за контролер). Система додає унікальні можливості дистанційного керування і гнучкого налаштування, що робить її найкращим рішенням для домашнього використання.

12. Проведено успішне тестування системи в реальних умовах роботи протягом тривалого часу. Тестування підтвердило стабільну роботу алгоритмів, надійність обладнання та економічну ефективність запропонованого рішення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Оробчук Б.Я. Впровадження систем телемеханіки керування енергооб'єктами в навчальному процесі / Богдан Оробчук, Олександр Рафалюк, Сергій Піскун // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування», 8-9 червня 2017 року. – Т. : ТНТУ, 2017. – С. 224-226.
2. Varetskyi Y. Smart grid implementation in Ukrainian power systems: challenges and opportunities // IEEE Power and Energy Magazine. – 2020. – Vol. 18, No. 3. – P. 45-52.
3. Necaibia S., Kelaiaia M.S., Labar H., Necaibia A., Castronuovo E.D. Enhanced auto-scaling incremental conductance MPPT method, implemented on low-cost microcontroller and SEPIC converter // Solar Energy. – 2019. – Vol. 180. – P. 152–168.
4. Bendib B., Belmili H., Krim F. A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Vol. 45. – P. 637–648.
5. Omeiza L.A., Abid M., Dhanasekaran A., Subramanian Y., Raj V., Kozak K., Mamudu U., Azad A.K. Application of solar thermal collectors for energy consumption in public buildings – An updated technical review // Journal of Engineering Research. – 2023. – Vol. 17. – 17 p.
6. Bünning F., Huber B., Heer P., Aboudonia A., Lygeros J. Experimental demonstration of data predictive control for energy optimization and thermal comfort in buildings // Energy and Buildings. – 2020. – Vol. 211. – Article 109792.
7. Карпчук Г., Вальчак Н., Дубровський В., Лисенко О. Оцінка технічно досяжного потенціалу сонячної енергії в Україні з урахуванням сучасних фотоелектричних технологій // EPJ Photovoltaics. – 2024. – Vol. 15. – Art. 9.
8. SolarMax Kerberos MPPT контролер для сонячного нагріву води [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://solarmax.com.ua/thermalsolar/pvgvp/>

9. Ступінчастий MPPT контролер для нагріву води від сонячних панелей [Електронний ресурс] // OLX. – Режим доступу: <https://www.olx.ua/d/uk/obyavlenie/stupnchastiy-mppt-kontroler-dlya-nagrvu-vodi-vd-sonyachnih-paneleyd-IDWKF1v.html>
10. SK2000-DIAN Сонячний контролер заряду [Електронний ресурс] // Sun Energy. – Режим доступу: <https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-charge-controllers/sk2000-dian>
11. Оробчук Б.Я., Старик Ю.І. Впровадження технологічної радіомережі обміну даними. Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 27-28 листоп. 2019.) // М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ТНТУ, 2019. – Т. 3, С. 63-64.
12. El-Khozondar H.J., Nassar Y.F. A Smart Energy Monitoring System using ESP32 Microcontroller // e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. – 2024. – Vol. 9. – P. 100666.
13. Manoharan P., Subramaniam A., Babu T.S., Padmanaban S., Holm-Nielsen J.B., Mitolo M., Ravichandran S. Improved Perturb and Observation Maximum Power Point Tracking Technique for Solar Photovoltaic Power Generation Systems // IEEE Systems Journal. – 2021. – Vol. 15. – No. 2. – P. 3024–3035.
14. Козак К., Тарасенко М., Лукман О. Енергоефективність та екологічність атомних електростанцій та вітроенергетичних установок // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2023. – Т. 1. – С. 90-98.
15. Печенюк А., Гарасимчук І., Потапський П., Вусатий М., Дубик В., Пукас В. Renewable energy of Ukraine in global conditions energy transformations // Grassroots Journal of Natural Resources. – 2022. – Vol. 5. – № 4.
16. Anderson J.M., Thompson K.L., Rodriguez C.A. Optimization of Solar Panel Orientation and Inclination for Maximum Energy Harvesting in Residential Applications // IEEE Transactions on Sustainable Energy. – 2019. – Vol. 10. – № 4. – P. 1876-1885.

17. Trypolska G. Energy Efficiency Policies and Measures in Ukraine: Assessment and Recommendations // International Energy Agency Country Review. – 2015. – Vol. 1. – P. 1-180.
18. Snezhkin Yu. F., Khalatov A. A. Thermal energy systems efficiency analysis for heating applications // Industrial Heat Engineering Journal. – 2020. – Vol. 42, No. 3. – P. 15-23.
19. Ali M.N., Mahmoud K., Lehtonen M., Darwish M.M.F. An efficient fuzzy-logic based variable-step incremental conductance MPPT method for grid-connected PV systems // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 26420–26430.
20. Правила улаштування електроустановок. 7-ме видання, перероблене та доповнене. – К.: Мінпаливенерго України, 2017. – 617 с.
21. Основи охорони праці: підручник для студентів вищих навчальних закладів / За ред. М.П. Гандзюка. – К.: Каравела, 2009. – 408 с.
22. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К.: Основа, 2016. – 296 с.
23. ДСТУ 3892-99. Безпека функціональна. Системи зв'язані з безпекою. Загальні вимоги. – К.: Держстандарт України, 1999. – 56 с.
24. Безпека життєдіяльності: підручник / О.М. Бондаренко, В.О. Овчаренко, П.С. Власенко та ін. – К.: Центр учбової літератури, 2020. – 432 с.
25. ДСТУ ІЕС 60364-4-41:2018. Електричні установки низької напруги. Частина 4-41: Заходи безпеки. Захист від ураження електричним струмом (ІЕС 60364-4-41:2017, IDT). – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 78 с.
26. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови і безпечної експлуатації парових та водогрійних котлів. – К.: Основа, 2018. – 168 с.

ДОДАТОК А

**Специфікація до принципової електричної схеми базового модуля на базі
ATMEGA328P-PU**

Поз. позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
	Роз'єми		
X1, X4, X6-X9	Роз'єм ХН-2Р-2.54	6	
X2, X5	Роз'єм ХН-5Р-2.54	2	
X3	Гніздо КН-TYPE-C-16P	1	USB Type C
X10	Роз'єм ХН-4Р-2.54	1	Піни 4 шт
X11	Роз'єм ХН-6Р-2.54	1	DC 5.5x2.1
X12	Роз'єм ХН-7Р-2.54	1	
X13	Клемна колодка DG301-5.0-03P-12-00A(H)	1	
X14	Клемна колодка DG301-5.0-04P-12-00A(H)	1	
	Конденсатори		
C1, C2, C7,C8, C11, C12	0805-0.1uF	6	
C6	0805-10uF	1	
C3, C4, C9, C10	0603-22pF	4	
C5	50V22uF Bipolar	1	
	Резистори		
R1, R2	0805-2 kОм	2	
R3, R4	0805-131 kОм	2	
R6-R8, R10- R12, R28, R32, R35, R38, R41, R44, R47	0603-5.1 kОм	13	
R9	0805-10 kОм	1	
R13-R18	0805-470 Ом	6	
R19	0805-100 kОм	1	

Поз. позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
R20	1206-5.36 kОм	1	
R21-R24	1206-66 kОм	4	
R5, R27, R29, R31, R34, R37, R40, R43, R46	0603-100 Ом	9	
R30, R33, R36, R39, R42, R45	0603-1.5 kОм	6	
R25, R26	0805-4.7 kОм	2	
	Мікросхеми		
DA1	Операційний підсилювач LM2904	1	
DD1	CH340G	1	USB-UART
DD2	ATmega328P-PU	1	
VU1-VU3	Транзисторний драйвер IRS4427PBF	3	
	Транзистори		
VT3-VT8	Транзистор Infineon SPP20N60C3	6	
VT1, VT2	2N7002	2	
	Кварцові резонатори		
G1	HC-49S 12 MHz	1	
G2	HC-49S 16 MHz	1	
	Індуктивності		
L1	0805-10uH	1	
U6	Стаб. AMS1117-5.0	1	
VD1	BAS316	1	Діод

Поз. позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
S1	SW-SMD_L6.0-W3.7-LS8.0	1	Reset

ДОДАТОК Б

Специфікація до схеми підключення

Поз. позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
A1	Базовий модуль АСКТ	1	
A2	ESP32	1	
A3	Рідкокристалічний дисплей 128х64	1	
PV1-PV6	Сонячна панель 550 Вт	6	
Q1	Автоматичний вимикач постійного струму 2Р 16А	1	
Q2	Автоматичний вимикач змінного струму 2Р 3А	1	
EC1	Цифровий енкодер	1	
RT1-RT5	Трубчастий електронагрівач (ТЕН)	5	
Rs	Шунт	1	
NTC	Терморезистор NTC 3950 100k	1	
HL1-HL6	Індикаторний світлодіод	6	