

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет комп'ютерних наук і технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра програмних засобів

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему СТВОРЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ
ЦИФРОВОЇ ПЛАТФОРМИ ЗЕЛЕНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL RESEARCH
OF A DIGITAL PLATFORM FOR A GREEN UNIVERSITY

Виконав: студент 2 курсу, групи КНТ-113м

Спеціальності 121 Інженерія

програмного забезпечення

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Інженерія програмного забезпечення

ТУЛЕНКОВ А.В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ПАРХОМЕНКО А.В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент ЗЕЛЕНЬОВА І.Я.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ПЗ, д.т.н, проф.
Сергій СУББОТІН
« » 2024 року

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

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

Слайди презентації

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-5 Основна частина	ПАРХОМЕНКО А.В., доцент		
Нормоконтроль	БЄЛОВА А.В., асистент		

7. Дата видачі завдання « 04 » вересня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз предметної області	1 тиждень	Розділ 1
2	Дослідження методів вирішення проблеми	2-3 тиждень	Розділ 2
3	Проектування ПЗ	4-5 тиждень	Розділ 3
4	Конструювання ПЗ	6-8 тижні	Розділ 4
5	Тестування та експериментальне дослідження програмного забезпечення.	9 тиждень	Розділ 5
6	Оформлення пояснювальної записки та документів до неї.	10 тиждень	ПЗ, Додатки
7	Нормоконтроль та рецензування.	11 тиждень	
8	Захист роботи.	12 тиждень	

Студент(ка)

_____ Артем ТУЛЕНКОВ
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

_____ Анжеліка ПАРХОМЕНКО
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи магістра:
93 с., 15 табл., 33 рис., 2 дод., 73 джерел.

ЗЕЛЕНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, ЦИФРОВА ПЛАТФОРМА, БЕЗДРОТОВИЙ
ЗВ'ЯЗОК, КОМПРКОВА МЕРЕЖА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

Об'єкт дослідження – процес зеленої цифрової трансформації університету.

Предмет дослідження – методи та засоби розробки підсистеми збору та передачі локальних метеорологічних даних для цифрової платформи зеленого університету.

Мета роботи – дослідження та розробка архітектури цифрової платформи зеленого університету та підсистеми збору та передачі даних для підвищення енергоефективності.

Матеріали, методи та технічні засоби: мова програмування C++, середовище програмування Platformio IDE, модулі ESP32, Lora-модуль sx1262, одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 3 B+ під управлінням операційної системи HomeAssistant OS, персональний комп'ютер Intel(R) Core(TM) i7-7500U під управлінням OS Windows 10 Home.

Результати. Розроблено та протестовано програмно-апаратне забезпечення підсистеми збору та передачі метеорологічних даних для цифрової платформи зеленого університету.

Висновки. Розроблене програмно-апаратне забезпечення може використовуватись для отримання локальних метеорологічних даних, що дозволить підвищити енергоефективність зеленого університету.

Галузь використання – університети, підприємства, компанії.

ABSTRACT

Explanatory note to the diploma qualifying work of the master: a 93 pages., 15 tables, 33 figures, 2 appendixes, 73 sources.

GREEN UNIVERSITY, DIGITAL PLATFORM, WIRELESS COMMUNICATION, CELLULAR NETWORK, ENERGY EFFICIENCY.

Object of study is the process of green digital transformation of the university.

Subject of study is the methods and means of developing a subsystem for collecting and transmitting local meteorological data for a digital platform of a green university.

The purpose of the work is to research and develop the architecture of a digital platform for a green university and a data collection and transmission subsystem to improve energy efficiency.

Materials, methods and equipment: C++ programming language, Platformio IDE programming environment, ESP32 modules, Lora module sx1262, Raspberry Pi 3 B+ single-board computer running HomeAssistant OS, Intel(R) Core(TM) i7-7500U personal computer running Windows 10 Home.

Results. A software and hardware of the subsystem for collecting and transmitting meteorological data for the digital platform of a green university was developed and tested.

Conclusions. The developed software and hardware can be used to obtain local meteorological data, which will increase the energy efficiency of a green university.

The field of application is universities, enterprises, companies.

ЗМІСТ

	С.
Перелік скорочень та умовних познач	8
Вступ	9
1 Аналіз концепції "зелений університет"	10
1.1 Загальний опис концепції	10
1.2 Дослідження існуючого досвіду зелених університетів	11
1.3 Аналіз поточного стану Національного університету «Запорізька політехніка»	12
1.4 Огляд стратегій реалізації концепції зеленого університету	17
1.5 Постановка завдань дипломної роботи	21
2 Огляд цифрових сервісів зеленого університету	23
2.1 Складові цифрової платформи	23
2.2 Дослідження підходів до реалізації платформи	24
2.3 Висновки до розділу 2	27
3 Проєктування цифрової платформи зеленого університету	28
3.1. Призначення системи та аналіз вимог	28
3.2. Розробка архітектури	29
3.3. Аналіз та вибір інструментарію розробки	33
3.4 Вибір програмної платформи	38
3.5 Вибір мови програмування та середовища розробки	41
3.6 Висновки до розділу 3	44
4 Розробка підсистеми збору та передачі даних цифрової платформи зеленого університету	47
4.1 Розробка алгоритмів функціонування	47
4.2 Структура програмного забезпечення вузлів	49
4.3 Опис особливостей програмної реалізації мережевих вузлів	50

4.4	Опис апаратної реалізації вузлів	53
4.5	Опис інтерфейсу операційної системи сервера	55
4.6	Висновки до розділу 4	57
5	Експериментальні дослідження	58
5.1	Тестування технології Loga	58
5.2	Проведення практичного експерименту та тестування	61
5.3	Висновки до розділу 5	63
	Висновки	64
	Перелік джерел посилання	66
	Додаток А Текст програми	74
	Додаток Б Слайди презентації	83

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК

- ЗУ – зелений університет;
ПЗ – програмне забезпечення;
ЦП – цифрова платформа.

ВСТУП

Сталий розвиток сучасного суспільства неможливий без ефективного впровадження екологічних ініціатив у різних сферах життя, зокрема в освіті. Університети відіграють ключову роль у формуванні екологічної свідомості [1] забезпечуючи молодь знаннями та практичними навичками для реалізації принципів сталого розвитку. Одним із інноваційних рішень у цьому напрямі є створення цифрових платформ [2]. Актуальність дослідження зумовлена потребою впровадження інноваційних підходів для ефективного управління ресурсами університету, зменшення екологічного впливу та популяризації екологічної свідомості серед студентів і співробітників, а також долучення до всесвітніх ініціатив. Необхідність такої роботи підтверджується ініціативами Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, спрямованими на впровадження систем енергетичного менеджменту в закладах освіти, підприємствах та організаціях.

В межах дослідження буде проаналізовано методи розробки цифрової платформи для підтримки екологічних технічних ініціатив у закладі вищої освіти НУ «Запорізька політехніка». Ця платформа має інтегрувати функції енергоменеджменту, моніторингу ресурсів та сприяти залученню університетської спільноти до реалізації екологічних проєктів через аналіз даних.

Мета роботи – дослідження та розробка архітектури цифрової платформи зеленого університету та підсистеми збору та передачі даних для підвищення енергоефективності.

1 АНАЛІЗ КОНЦЕПЦІЇ "ЗЕЛЕНИЙ УНІВЕРСИТЕТ"

1.1 Загальний опис концепції

"Зелений університет" (ЗУ) — це концепція, що спрямована на створення екологічно стійкого освітнього середовища. Цей підхід інтегрує екологічну відповідальність, енергоефективність та сучасні технології для зменшення впливу на навколишнє середовище, а також просування екологічних проблем у суспільстві, зокрема посеред майбутніх випускників університету - освідченого топ-менеджерського складу підприємств. Поширення ЗУ набуває у всьому світі [3].

Концепція ЗУ є невід'ємною частиною глобальної ініціативи зі збереження довкілля та досягнення цілей сталого розвитку ООН [4] на що перш за все впливають глобальні та локальні зміни клімату [5]. Стратегія ООН до 2030 року та ініціатива ЮНЕСКО "Освіта для сталого розвитку" підкреслили ключову роль університетів у побудові більш сталого суспільства.

Зелений університет як освітня установа, забезпечує свої потреби в енергоресурсах та матеріалах, не завдаючи шкоди можливостям інших країн і майбутніх поколінь задовольняти власні ресурси та витримує основні напрями розвитку екосвідомого університету. Основними аргументами підтримки концепції зеленого університету є: соціальна відповідальність, вирішення глобальних проблем студентами, прогресія долучень до концепції, заощадження за допомогою розумного використання ресурсів, та отримання доходу [6].

Таким чином зелений університет також акцентує увагу на інтеграції сучасних екологічних технологій у свою діяльність. Це включає використання відновлюваних джерел енергії, запровадження систем моніторингу та управління ресурсами, створення сприятливого середовища для екосвідомих наукових досліджень та інновацій. Значна увага приділяється формуванню культури сталого розвитку серед студентів і співробітників через просвітницькі заходи,

тематичні конференції та практичні ініціативи. Таким чином, зелений університет стає не лише технічною платформою, але й прикладом для громади та майбутніх поколінь.

1.2 Дослідження існуючого досвіду зелених університетів

Університет Цінхуа [7] продемонстрував значні успіхи у реалізації концепції "зеленого університету", проте стикався з викликами оцінки довгострокового впливу впроваджених заходів. Попри це, університет став ключовим лідером екологічних трансформацій ще з 1998 року.

Аналіз ресурсів [8]-[9] показав що основний напрям реалізації концепції полягає у реорганізації поточних підходів дотримання основ сталого розвитку.

Університети Румунії провели дослідження [10] про сприйняття студентами та викладачами озеленення кампусів та прогалин у реалізації ініціатив "зеленого університету" та виявили потребу у покращенні інтеграції екологічних ініціатив. Автори [11] також досліджують можливості інтеграції цифровізації й сталого розвитку для підвищення ефективності екологічних ініціатив, а також дослідження [12] у Південній Африці роблять акцент на організаційних методах впровадження екологічних програм, мінімізуючи роль цифрових технологій. Проте описовий аналіз [13] університетів Малайзії підкреслює важливість впровадження цифрових технологій для контролю споживання ресурсів і досягнення сталого розвитку.

Досвід Університету Флоренції [14] демонструє шлях до сталого зеленого університету, зосереджуючись на питаннях енергоефективності, і як наслідок цифровізації, а дослідження [15] акцентують увагу на тому, що майже всі цифрові сервіси для університетів орієнтовані на енергозбереження, оптимізацію витрат і підвищення безпеки.

Автори дослідження [16] пропонують використання хмарних сервісів для побудови моделей, що підвищують енергоефективність університетів, а автори [17] визначили основні вимоги до IoT-платформ для інтеграцій з інфраструктурою та оцінки енергоефективності.

Дослідження, проведені у кампусі Близькосхідного технічного університету Північного Кіпру [18] запропонували інтеграцію відновлюваних джерел енергії для створення мікромереж з цифровим контролем, а дослідження [19] довели ефективність впровадження цифрових платформ моніторингу енергозбереження для досягнення сталого розвитку.

Ці численні дослідження підкреслюють важливість цифрових технологій у побудові "зелених університетів", демонструючи як успіхи, так і виклики у цій галузі.

1.3 Аналіз поточного стану Національного університету «Запорізька політехніка»

НУ «Запорізька політехніка» активно долучається до масштабних іноваційних проєктів у сфері сталого розвитку, але не входить у рейтинги зелених університетів. У рамках проєкту «Реформи у сфері енергоефективності в Україні» [20] що реалізується Німецьким товариством міжнародного співробітництва (GIZ GmbH) за підтримки уряду Німеччини, Національний університет «Запорізька політехніка» бере участь у компоненті «Професійні кваліфікації» [21] Цей компонент передбачає створення енерго-інноваційного хабу ЕнІнХаб [22] на базі університету, який стане платформою для проведення навчальних та просвітницьких заходів у галузі енергоефективності. Діяльність ЕнІнХабу включає розробку освітніх програм з енергоефективності та зелених технологій, проведення курсів для підвищення кваліфікації та перекваліфікації, а також

співпрацю з навчальними закладами. Крім того, хаб організовує просвітницькі програми, створює бізнес-партнерства та проводить заходи з енергоефективності.

Усі гуртожитки університету оснащені індивідуальними тепловими пунктами за підтримки компанії Danfos, а також здійснено заходи з підвищення енергоефективності, зокрема встановлення енергоефективних вікон та утеплення будівель. Тепловий пункт дозволяє контролювати та погодозалежно керувати температурою теплоносія у бідівлі через хмарний сервіс (рис 1.1, рис. 1.2), що в цілому дозволяє знизити нераціональне використання тепла з допомогою електронного контролера з погодною компенсацією температури теплоносія, що використовується в системах централізованого теплопостачання, опалення та охолодження.



Рисунок 1.1 – Поточні значення об’ємів використання тепла в гуртожитку

На даху гуртожитку ВСП "Запорізький електротехнічний фаховий коледж Національного університету «Запорізька політехніка»" встановлені сонячні колектори для постачання гарячої води, але без системи диспетчеризації та моніторингу.

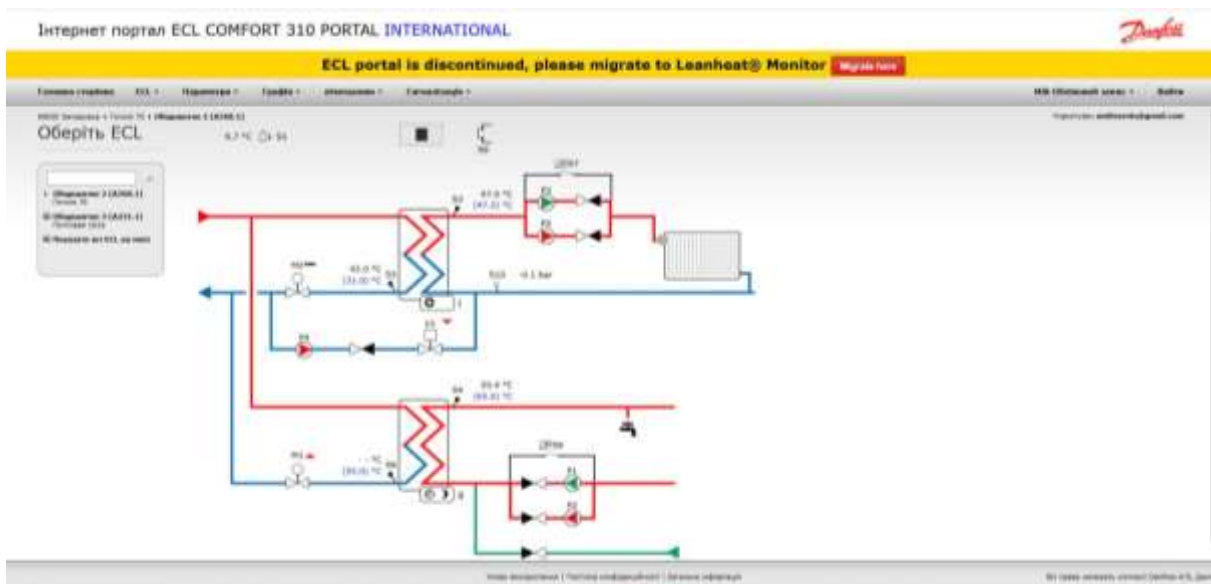


Рисунок 1.2 – Система енергоефективного керування тепловими пунктами гуртожитків

Університету надано когенераційну установку загальною потужністю 500 кВт, що забезпечить енергоефективне стабільне енерго- та теплопостачання корпусів та гуртожитків університету (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Монтаж когенераційної установки

Також університету було надано відремонтовані газотурбінні генератори від ООО «Мотор Січ», що не є екологічним рішенням але є резервним та може бути динамічним рішенням у критичних ситуаціях (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Синхронні генератори

Також НУ «Запорізька політехніка» має додаткові малі резервні генератори (рис. 1.5)



Рисунок 1.5 – Малий резервний генератор

Перелік реалізованих та поточних заходів НУЗП та актуальні задачі наведено в табл. 1.1

Таблиця 1.1 - Перелік заходів НУЗП із зеленої трансформації

Реалізовані заходи НУЗП	Поточні заходи	Актуальні задачі НУЗП
Встановлення КГУ	Створення положень про систему енергоменеджменту	Аудит енергетичної системи
Встановлення локальних генераторів	Енергетичний аудит будівель	Збільшення використання відновлюваних джерел енергії
Перепідключення розподілу мереж		Інтеграція оновленої системи управління відходами
Інтеграція теплових пунктів		Інтеграція ІОТ-систем моніторингу
Долучення до масштабних міжнародних проєктів		Проведення екологічних заходів

Університет реалізує окремі проєкти з енергоефективності та використання сонячної енергії, спрямовані на привиття студентам основ сталого розвитку. Ці ініціативи включають навчання та практичні заходи, які допомагають студентам зрозуміти важливість енергоефективних технологій і їх вплив на сталий розвиток.

Проєкт «Автономний ліхтар» за підтримки компанії InfocomLTD встановлено на одному із корпусів університету (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Автономний ліхтар

В умовах війни особливо актуальними є питання створення розподілених системи генерації та споживання, питання пов'язані із встановленням альтернативних джерел для забезпечення роботи основної критичної інфраструктури і відповідно для цього можуть використовуватись сучасні цифрові рішення.

1.4 Огляд стратегій реалізації концепції зеленого університету

Перший у світі масштабний рейтинг UI GreenMetric World University Rankings [23], який визначає рівень екологічності університетських кампусів був створений Університетом Індонезії у 2010 році, та став ключовим інструментом для оцінки внеску університетів у сталий розвиток.

Серед 19 закладів освіти України які представлені у рейтингу лідируючими є: Український національний лісотехнічний університет, Сумський державний університет, Національний університет «Острозька академія», НУ «Львівська політехніка». Кожен університет був оцінений балами за допомогою методології [24] та критеріїв [25].

В основу методології оцінки входять 6 основних показників (рис. 1.7).

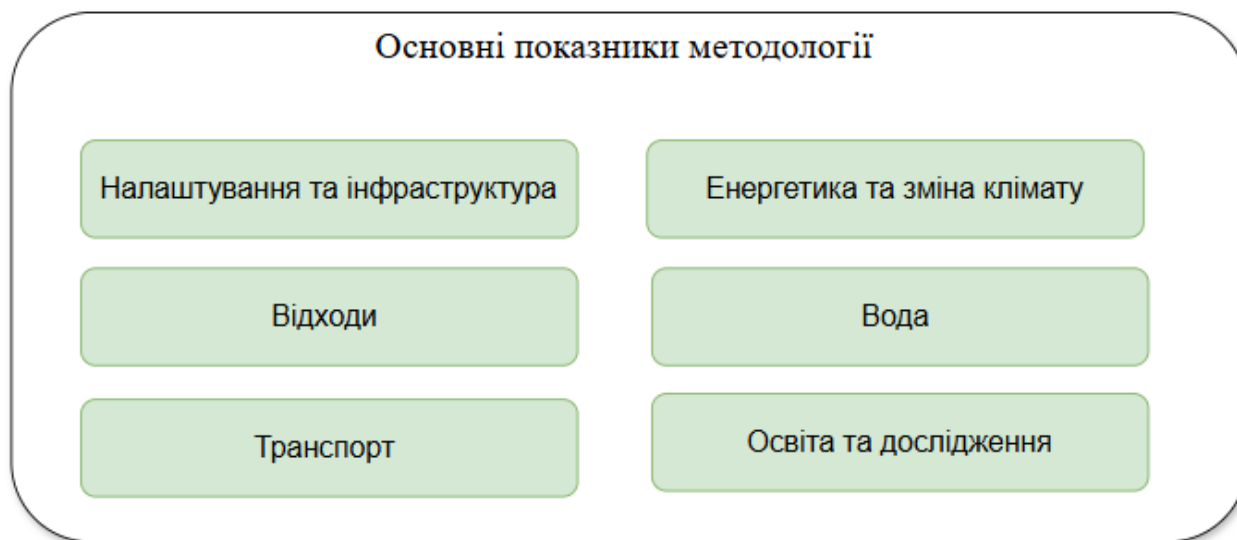


Рисунок 1.7 – Основні показники методології оцінки ЗУ

Ці аспекти спрямовані на створення екологічно відповідального кампусу та сприяння сталому розвитку.

Показник "Налаштування та інфраструктура" відображає екологічність будівель і наявність зелених зон університету. "Енергетика та зміна клімату", оцінює використання енергоефективних технологій і скорочення викидів на території. "Відходи", стосується переробки, зменшення пластику та ефективного управління сміттям. "Вода" аналізує раціональне використання та збереження водних ресурсів. "Транспорт" включає розвиток екологічного транспорту й зменшення автомобільних викидів. "Освіта та дослідження". охоплює екопрограми, дослідження та заходи сталого розвитку.

Кожен показник описаний критеріями, а всі критерії описані індикаторами у відсоткових, чисельних або категоріальних параметрах. Загальна максимальна кількість балів дорівнює 10000, а кількість критеріїв оцінки дорівнює майже 100.

Критеріями є розмір університету, співвідношення зелених зон, кількість програм переробки, кількісні характеристики сортувальних зон, велосипедна інфраструктура, кількість електричного автотранспорту та навіть кількість

екологічних заходів. Енергетичними критеріями є енергоефективність будівель, кількісні характеристики відновлювальних джерел енергії, політики енергозбереження, тощо.

Аналіз робіт [26]-[28] показав, що цифрові інформаційні технології в концепції зеленого університету допомагають ефективно управляти ресурсами, зменшувати енергоспоживання та викиди оптимізувати управління відходами і знижувати витрати, тобто вимірювати енергетичні індикатори, а також системи моніторингу енергоспоживання, розумне освітлення дозволяють оптимізувати використання ресурсів. Розумні крани, автоматичне сортування сміття, мобільні додатки для карпулінгу та віртуальні лабораторії сприяють зменшенню витрат і екологічному вихованню. Штучний інтелект та big data аналізують вплив екологічних заходів, а відновлювані джерела енергії інтегруються з системами моніторингу для підвищення енерго ефективності університету.

Енергетика та зміна клімату. Дослідження роботи [29] доводить доцільність використання акумуляторної енергетичної системи та системи керування попитом у розумних енергетичних островах [30] Університет може бути представлений у вигляді окремих будівель як островів які працюють на відновлювальній енергії та взаємодіють через систему попиту та спросу. Аналогом островів може бути стратегія екологічно-енергоефективного кластера, яка розподіляє дію цифрових екологічних технологій на зони які взаємодіють між собою у різних ступенях для підсилення загальної ефективності. Дослідження [31] доводить ефективність поетапного впроваджувати енергоефективних технології освітлення, систем управління енергоспоживанням та утепленням.

Університетські кампуси ідеально підходять для впровадження мікромереж завдяки їхній автономності, можливості здійснення довгострокових інвестицій, постійній потребі в енергії протягом усього дня та наявності значних площ, таких як стадіони, дахи і паркувальні зони. [32] Налаштування та інфраструктура. Автори [33] пропонують використовувати Iot-пристрої для

моніторингу та управління споживанням ресурсів (електрики, води, тепла) для мінімізації витрат. А в роботі [34] доводять ефективність зелених насаджень та використання сонячних панелей у меті зниження нагрівання будівлі, що може привести до зменшення витрат на охолодження. Використовучі підхід співпраці з місцевими громадами або ОСББ для розвитку спільних енергетичних проєктів, наприклад створення сонячних електростанцій та обмін енергією реалізовується стратегія енергетичної співпраці.

Вода. Дослідження [35] вказують на доцільність та попит вторинного використання непитної або технічної води з метою її загальної доступності. Кампуси університетів також мають зелені насадження до яких можна застосувати непитну воду після систем рекуперації. Дані процеси також потребують цифрофізації.

Транспорт. Дослідження 1996 року [36] вказували на актуальність зміни індивідуального транспорту на розвиток велосипедної дружньої інфраструктури, проте дослідження [37] вказують на доцільність тенологічної інтеграції електричного транспорту на території кампусів з метою зменшення екологічних викидів, а також використання інфраструктури для досліджень.

Освіта та дослідження. Мобільні додатки та веб-платформи сприяють залученню студентів та працівників до екологічних ініціатив. Через них можна отримувати інформацію про сталий транспорт, планувати екорозв'язки, чи брати участь у програмах спільного використання ресурсів. [38] Відходи. Автори [39] пропонують інтеграцію концепції зеленого університету в цілому та зниження відходів через просвітницьку дію.

На основі аналізу досліджень, можна зробити висновок, що концепція зеленого університету вимагає інтеграції цифрових екологічних технологій у різні аспекти інфраструктури та управління ресурсами. Основними напрямками є впровадження енергоефективних рішень, оптимізація управління водними і відходовими ресурсами, розвиток екологічного транспорту, а також створення

інноваційних освітніх програм для підвищення екологічної свідомості спільноти. Реалізація таких підходів сприяє не лише зниженню екологічного впливу університету, але й формує стійку екосистему, яка здатна адаптуватися до сучасних викликів у сфері сталого розвитку.

1.5 Постановка завдань дипломної роботи

У розділі було розглянуто досвід міжнародних університетів та було зроблено висновок про актуальність використання цифровізації для задач створення та підтримки ЗУ. Було проведено огляд методики та критеріїв оцінки стану ЗУ.

Аналіз показав, що НУ «Запорізька політехніка» не є зеленим університетом та не є присутнім у рейтингу, але робить впевнені кроки на шляху до підвищення своєї енергоефективності. На основі проведених досліджень можна відзначити, що цифровізація є актуальним та оптимальним шляхом досягнення сталого розвитку, тому тема роботи є актуальною. Актуальним є створення цифрової платформи університету, яка буде мати можливості використання у задачах сталого розвитку зеленого університету.

Мета роботи – дослідження та розробка архітектури цифрової платформи зеленого університету та підсистеми збору та передачі даних для підвищення енергоефективності.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні завдання:

- дослідити існуючі підходи до реалізації цифрової платформи ЗУ;
- проаналізувати структурні та функціональні особливості цифрової платформи ЗУ;
- виконати аналіз вимог та розробити архітектуру цифрової платформи ЗУ;

- обрати технології та інструментарій розробки підсистеми збору та передачі даних цифрової платформи;
- розробити підсистему збору та передачі даних цифрової платформи;
- провести тестування та оцінити результати роботи розробленого рішення.

2 ОГЛЯД ЦИФРОВИХ СЕРВІСІВ ЗЕЛЕНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

2.1 Складові цифрової платформи

Основні компоненти цифрової платформи зеленого університету створюють цілісну екосистему, яка забезпечує сталий розвиток та ефективне управління ресурсами.

Моніторинг і управління ресурсами, компонент, що включає системи збору й аналізу даних про споживання енергії, води, утилізацію відходів, та генерації. [40] Сенсори та інтелектуальні лічильники дозволяють університету в реальному часі оцінювати ефективність використання ресурсів і запроваджувати заходи для їх оптимізації.

Інтеграції IoT-технологій [41] створюють основу для автоматизованого управління інфраструктурою університету. Вони забезпечують контроль мікроклімату в приміщеннях, оптимізацію освітлення, та моніторинг екологічного стану території.

Модулі для аналізу великих обсягів даних допомагають знаходити шляхи зменшення вуглецевого сліду університету. Штучний інтелект дозволяє прогнозувати споживання ресурсів і моделювати сценарії для оптимізації енергоефективності [42] Автори використали веб-платформу [43] для залучення до екологічної освіти студентів, підприємств та викладачів.

Платформа повинна мати засоби інтеграція існуючих відновлюваних джерел енергії інфраструктурою що призначені для генерації зеленої енергії, такої як сонячні батареї або вітрові генератори. Це дозволить університету використовувати більше відновлюваних ресурсів та сприяти енергетичній незалежності. Кожен із цих компонентів доповнює інші, створюючи гармонійну екосистему для сталого розвитку університету. На рисунку 2.1 зображено основні складові цифрової платформи.



Рисунок 2.1 – Складові цифрової платформи ЗУ

2.2 Дослідження підходів до реалізації платформи

Платформи стають основою для досягнення цілей сталого розвитку завдяки інтеграції та поєднанню технологій.

Аналіз технологій та апаратних засобів для реалізації задач концепції зеленого університету наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Аналіз технологій та апаратних засобів для реалізації ЗУ

Опис	Основний контролер для датчиків	Технологія	Сервер
1	2	3	4
Новий інтегрований підход до просторів кампусу для коворкінгу та дозвілля [44]	ESP32	BLE	Local (RaspberryPI)

Кінець таблиці 2.1

1	2	3	4
Моніторинг зеленої енергії на кампусі [45]	-	Lora	-
Архітектуру зеленої системи енергоменеджменту кампусу на основі IoT [46]	ESP32	WI-FI	Cloud
Платформа Інтернету речей (IoT) на основі інфраструктури бездротової сенсорної мережі для моніторингу [47]	ESP32	Wi-Fi	Local (RaspberryPI)
Вивчення поведінки людей і шумове забруднення у кампусі як маломасштабному Smart City [48]	Raspberr yPI	Wi-Fi	-
Архітектура екосистеми IoT яка може бути реалізовані у вищих навчальних закладах [49]	ESP32	Wi-Fi	Local (UP2 board)
Рішення Smart Campus на платформі інтероперабельних протоколів "розумного дому" [50]	ESP32	Lora	Local (RaspberryPI)
Система розумного управління водними ресурсами на основі технології LoRa для кампусів [51]	ATmega 328P	Lora	-
Архітектура на основі туманних обчислень LoRaWAN для забезпечення зв'язку з вузлами в кампусі [52]	-	LoraWan	Cloud

Аналіз наукових робіт (Таблиця 2.1) показав, що найчастіше для основного контролеру давачів та сенсорів використовують контролер ESP32 який підтримує технології передачі невеликої відстані Wi-Fi та BLE (Bluetooth Low Energy). Найбільш використовуваними технологіями передачі даних у системах які реалізують ЗУ є Wi-Fi та LoRa. У якості основних серверів використовують локальний мікрокомп'ютер на основі Raspberry PI, рідше – хмарні сервіси.

Оцінка технологій виявила, що технологія LoRa має великі переваги ніж Wi-Fi у задачах сталого розвитку. Технологія LoRa має велику дальність дії, стійкий протокол, та велику проникність сигналу у міській забудові. Сама технологія є масштабованою та енергоефективною і не потребує використання великої кількості енергоресурсів для своєї роботи.

Огляд реалізованих платформ показав, що платформи на основі технології Ble та Wi-Fi мають обмежену локальну дію, а рішення з використанням хмарних серверів є доволі витратними для повних функцій.

У наведених роботах не було визначено проблематику кібербезпеки зеленого університету за використанням наведених технологій. Як приклад, кібербезпека в умовах війни полягає в захисті критичної інфраструктури, пов'язаної з енергетичними, водними та транспортними системами, що використовують IoT та цифрові платформи.

Загрози включають кібератаки на відновлювані джерела енергії, системи моніторингу ресурсів та дані екологічних досліджень, що потребує посиленої безпеки для забезпечення безперервної роботи та загальної стійкості. Цей недолік потрібно врахувати при проєктуванні ЦП.

2.3 Висновки до розділу 2

На основі аналізу підходів до реалізації було виділено основні складові цифрових платформ які необхідно врахувати при побудові цифрової платформи зеленого університету, а саме моніторинг, іот-технології, веб-платформа, аналіз даних та можливість інтеграції.

Було проведено огляд сучасних платформ, засобів та протоколів. Доведено актуальність використання технології Loga та одноплатних комп'ютерів. Таким чином, для реалізації концепції зелений університет пропонується створення цифрової платформи яка дотримується принципів енергоефективності та безпеки.

3 ПРОЄКТУВАННЯ ЦИФРОВОЇ ПЛАТФОРМИ ЗЕЛЕНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

3.1. Призначення системи та аналіз вимог

Було прийнято рішення створити цифрову платформу із врахуванням поточного досвіду набутого під час дослідження.

На основі проведеного аналізу також було сформульовано спочатку нефункціональні вимоги.

Нефункціональні вимоги:

- платформа повинна приймати дані з усіх вузлів mesh-мережі;
- мережеві вузли повинні передавати інформацію про стан середовища;
- сервер повинен обробляти отримані дані, записувати їх у локальну базу даних та надавати захищений доступ;
- система повинна відображати стан усіх вузлів мережі;
- додавання нових вузлів у мережу повинно виконуватись автоматично без потреби в ручному перепідключенні;
- вузли повинні бути реалізовані на енергоефективних контролерах;
- система повинна мати можливість розширення;
- технологія передачі даних у мережі повинна бути енергоефективною;

Функціональні вимоги:

- система повинна забезпечувати стабільну роботу мережі при збої окремих вузлів завдяки функції самовідновлення;
- система повинна оновлювати дані від нод не рідше, ніж раз на 5 секунд;
- передача даних між вузлами та сервером повинна здійснюватися зашифрованими каналами;
- неавторизований доступ до сервера повинен бути заблокований;

- сервер повинен автоматично відновлювати налаштування після збою.

3.2. Розробка архітектури

Основна задача, яку вирішує платформа - це створення цифрової основи з можливістю подальшого розширення та уніфікації.

Узагальнену архітектуру цифрової платформи наведено на рисунку 3.1.

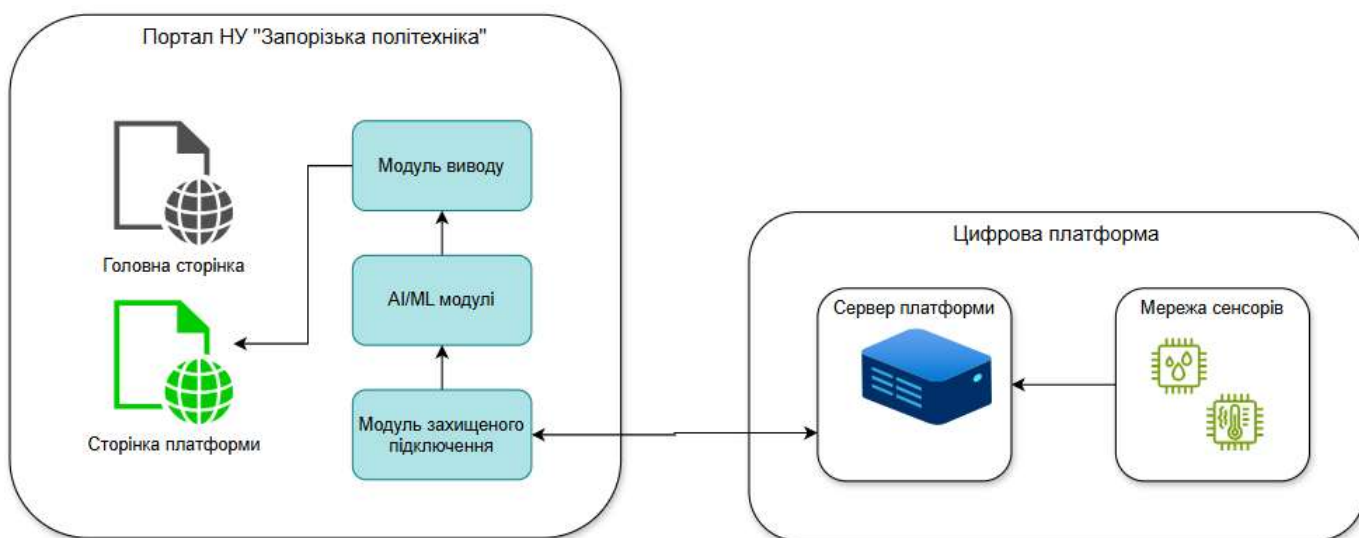


Рисунок 3.1 – Узагальнена архітектура цифрової платформи

Для проєктування ЦПЗУ було проаналізовано портал НУЗП. Портал працює на безпечній та ефективній системі керування сайтом (CMS) Drupal. CMS підтримує створення власних модулів та їх подальшу інтеграцію. Таким чином у подальшому запропоновано створення трьох модулів для CMS, а саме модуля захищеного підключення до цифрової платформи, модулі штучного інтелекту та обробки даних, та модуль виводу інформації на сторінку платформи на порталі.

Основними компонентами цифрової платформи будуть сервер та мережа сенсорів. Мережа сенсорів матиме змогу самоорганізації за комірковою

топологією та передачі даних до серверу. Сервер платформи отримуватиме дані із мережі сенсорів, зберігатиме та надаватиме API доступ до даних та сутностей через захищений протокол зв'язку.

Розроблену узагальнену структуру сервера платформи наведено на рисунку 3.2.

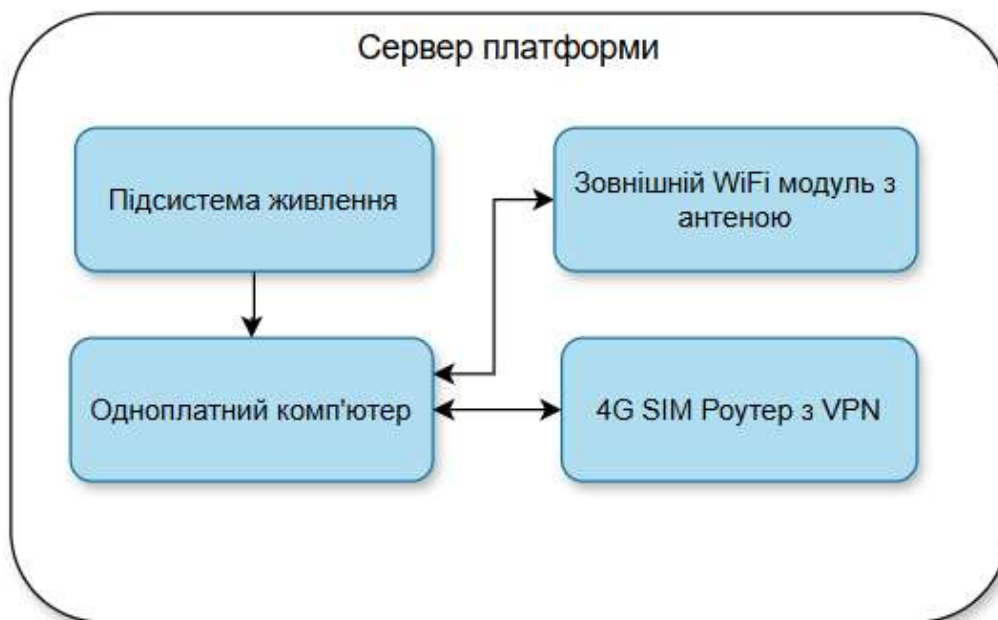


Рисунок 3.2 – Узагальнена структура сервера платформи

Підсистема живлення має забезпечити якісне живлення компонентів сервера платформи, а саме одноплатного комп'ютера з операційною системою, зовнішніх модулів зв'язку WIFI та інтернету через 4G Sim роутер.

Mesh-мережа сенсорів - це інноваційна технологія, яка дозволяє групі вузлів автоматично створювати ефективну комунікаційну інфраструктуру без централізованого управління пов'язану цифровим зв'язком. Кожен сенсорний вузол виконує роль як сенсора, так і передавача, утворюючи динамічну, адаптивну мережу, що забезпечує: стійкість, надійність, ефективність та універсальність (рис. 3.3).

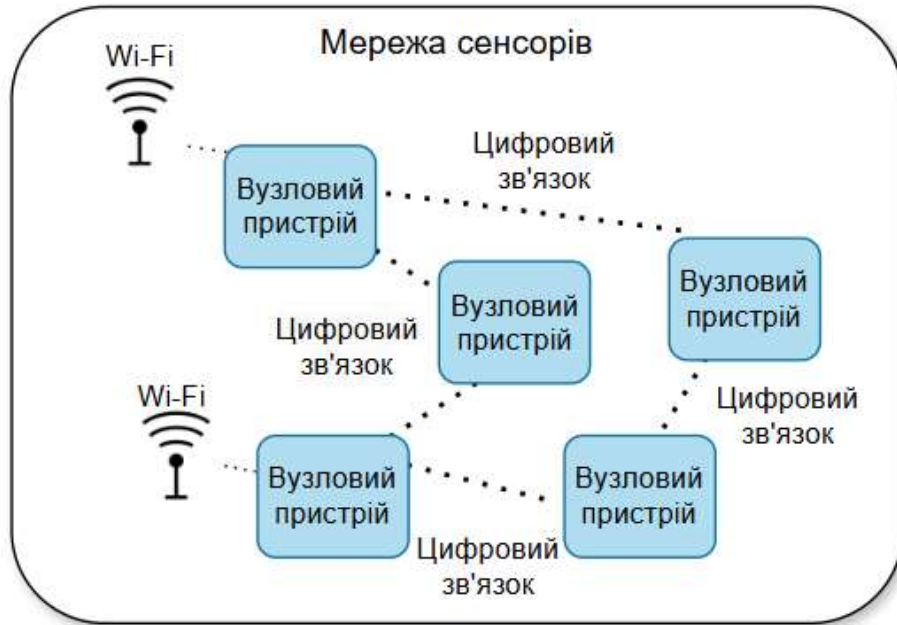


Рисунок 3.3 – Узагальнена структура mesh-мережі вузлових пристроїв

Зв'язок між мережними вузловими пристроями (рис. 3.4) відбуватиметься за допомогою цифрового енергоефективного зв'язку. Передача даних між мережею та сервером відбувається через короткострокову комунікацію за допомогою Wi-Fi мережі.

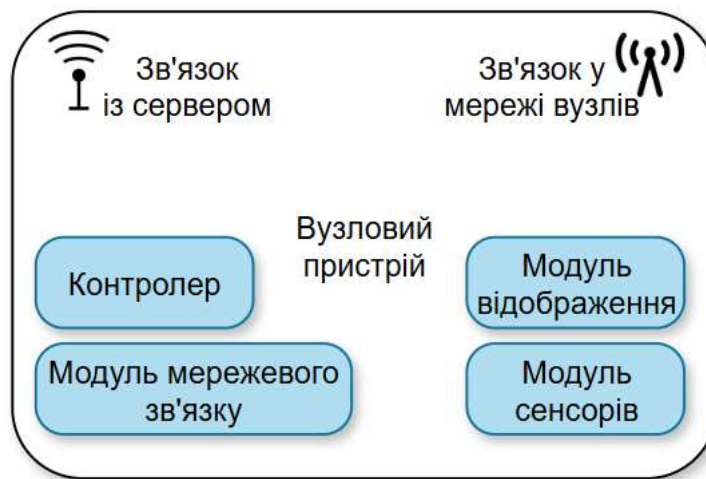


Рисунок 3.4 – Узагальнена структура вузлового пристроя

Кожен вузол матиме свій контролер якій виконує програмні задачі та опитування підключених сенсорів. Модуль зв'язку дозволить пристрою передавати дані між іншими пристроями у своїй мережі. Модуль відображення виводить локальні дані на екран.

Міжмережева взаємодія включає в себе мережу вузлів яка взаємодіє з мережею сервер, передаючи дані із однієї мережі в іншу. Перевагою є відсутність єдиного місця взаємодії мережі вузлів із мережею сервера, так як кожен вузловий пристрій має можливість взаємодії із мережею сервера. Мережа сервера поєднується із порталом через захищений тунель зв'язку.

Пропоновану структуру міжмережевої взаємодії зображено на рис. 3.5.



Рисунок 3.5 – Міжмережева структура підмереж

Детальну пропоновану архітектуру цифрової платформи наведено на рис. 3.6.

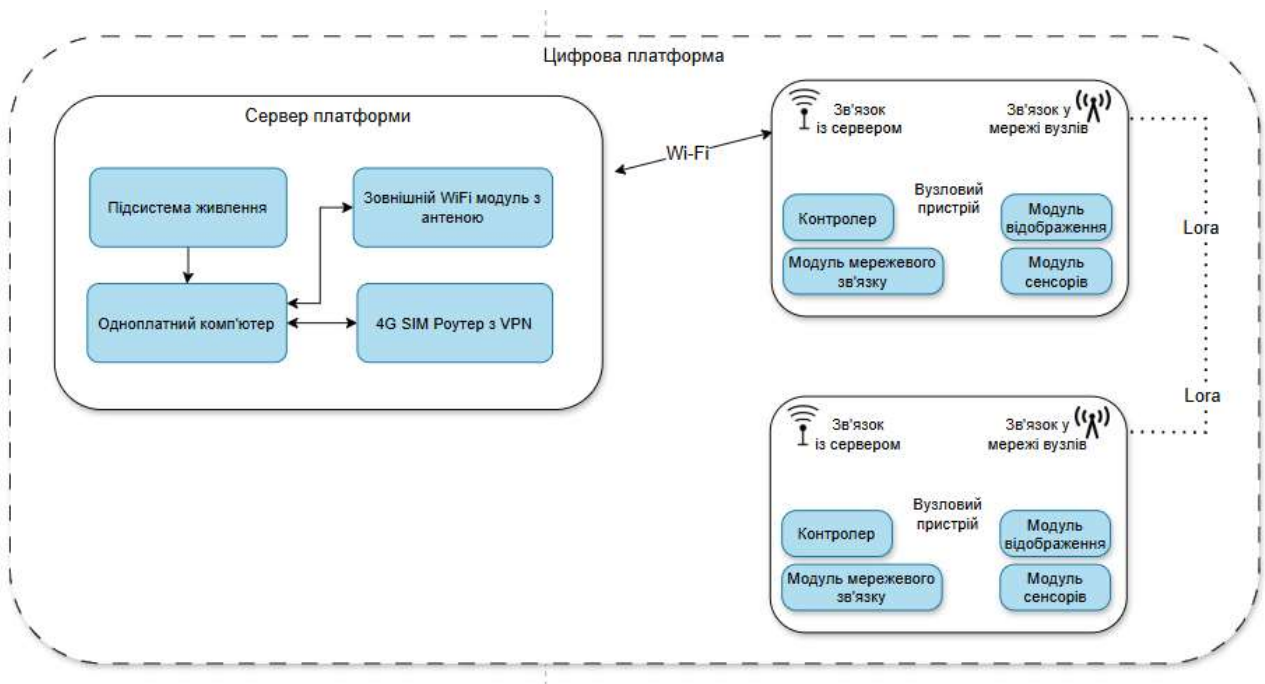


Рисунок 3.6 – Архітектура цифрової платформи

У роботі буде поєднано структури вузлових пристроїв, структуру мережі вузлів та структуру серверу платформи в єдину платформу, що взаємодіє за наведеною міжмережевою структурою. Головною особливістю запропонованого підходу є функціонування mesh-мережі вузлів, оснащених сенсорами, яка забезпечує передачу даних від мережі вузлів до серверної структури без утворення «вузьких місць» передачі даних. Механізм самоорганізації мережі дозволяє динамічно змінювати топологію мережі вузлів, що сприяє її гнучкому масштабуванню та адаптації до зміни умов експлуатації.

3.3. Аналіз та вибір інструментарію розробки

Було проаналізовано апаратні платформи з метою обрання оптимальної платформи для реалізації задач сервера. Результати аналізу наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика одноплатних комп'ютерів [53]-[55]

Характеристика / Платформа	Raspberry Pi	Orange Pi	Odroid	Rock Pi4
Процесор	ARM Cortex-A, різні моделі	Різноманітні, часто Amlogic	Різноманітні, включаючи Samsung Exynos	Rockchip RK3399
Оперативна пам'ять	Від 512 МБ до 8 ГБ	Від 512 МБ до 8 ГБ	Від 1 ГБ до 8 ГБ	Від 1 ГБ до 4 ГБ
Графіка	VideoCore, підтримка різних відеоформатів	Mali, підтримка різних відеоформатів	Mali, підтримка різних відеоформатів	Mali-T860 MP4
Зберігання	MicroSD карта	MicroSD карта, eMMC	MicroSD карта, eMMC, SATA	MicroSD карта, eMMC
Порти	USB, Ethernet, HDMI, GPIO	USB, Ethernet, HDMI, GPIO	USB, Ethernet, HDMI, GPIO, SATA	USB, Ethernet, HDMI, GPIO
Розширення	HATs, різноманітні модулі	HATs, різноманітні модулі	HATs, різноманітні модулі	HATs, різноманітні модулі
Операційна система	Raspberry Pi OS, інші дистрибутиви Linux	Android, Linux	Android, Linux	Android, Linux
Ціна	Від бюджетної до середньої	Від бюджетної до середньої	Від середньої до високої	Від середньої до високої
Енергоефективність	Зазвичай висока	Зазвичай висока	Залежить від моделі	Зазвичай висока

Енергоефективність одноплатних комп'ютерів оцінюється за допомогою комплексного оцінювання, прямих вимірювань споживаної потужності та тепловиділення. Для реалізації цифрової платформи було обрано одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 3B+ з використанням пасивного корпусу-радіатора, що забезпечує тепловідвід, та не потребує додаткового охолодження.

Було проведено порівняльний аналіз контролерів для реалізації мережесетив mesh-нод. Результати аналізу наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняльна характеристика контролерів [56]-[58]

Контролер Характеристика	ESP32-WROOM-32	Arduino Nano 33 IoT	STM32F401RE
Процесор	Tensilica LX6 dual-core 240 МГц	ATSAMD21G18 48 МГц	ARM Cortex-M4 168 МГц
Оперативна пам'ять	520 КБ	256 КБ	96 КБ
Флеш-пам'ять	4 МБ	1 МБ	512 КБ
Вбудований Wi-Fi	802.11 b/g/n/e/i/k/v/r/n	802.11 b/g/n	Немає
Вбудований Bluetooth	Bluetooth 5.0 BLE	Bluetooth 5.0 BLE	Немає
Аналогові входи	18	6	16
Цифрові входи/виходи	32	20	54
SPI	2	1	2
I2C	2	1	3
UART	3	1	3
Таймери	16	6	14
АЦП	12-bit	12-bit	12-bit
DAC	2	1	1
Живлення	3.3 В	5 В	3.3 В
Розмір	25.4 x 51 mm	18 x 53.3 mm	21 x 38 mm
Ціна	Середня	Середня	Нижня
Середовище розробки	Arduino IDE, ESP-IDF	Arduino IDE	STM32CubeIDE
Сплячі режими	Глибокий сон, сон з підтримкою RTC, активний сон	Глибокий сон, сон з підтримкою RTC	Глибокий сон, сон з підтримкою RTC, різні режими зниженого енергоспоживання

Було проведено порівняння технологій радіозв'язку для роботи Mesh мережі вузлів. Результати порівняння наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняльна характеристика технології радіозв'язку [59]-[61]

Технологія	Дальність	Швидкість	Енергоспоживання	Топологія мережі
LoRa	До кількох кілометрів	Низька (декілька кбіт/с)	Дуже низьке	Зіркова, сітчаста
Wi-Fi	До 100 метрів в приміщенні	Висока (до кількох сотень Мбіт/с)	Середнє	Зіркова
ESP-NOW	До 100 метрів	Середня (до кількох Мбіт/с)	Низьке	Зіркова
Zigbee	До 100 метрів	Середня (до 250 кбіт/с)	Низьке	Сітчаста
Bluetooth	До 10 метрів	Середня (до 3 Мбіт/с)	Низьке	Зіркова, пірінгова
NB-IoT	До кількох кілометрів	Дуже низька (кілька кбіт/с)	Дуже низьке	Стільникова

У результаті порівняння та аналізу буде створено мережу сенсорів на базі мікроконтролерів ESP32 із підтримкою технології LoRa, яка забезпечує передачу даних у рамках децентралізованої mesh-мережі. Mesh-архітектура дозволяє сенсорам взаємодіяти між собою для передачі даних навіть у випадках, коли деякі з них знаходяться поза прямим радіусом дії мережі сервера. Завдяки такому підходу досягається висока надійність зв'язку та збільшується зона покриття мережі.

Ключовою особливістю цієї системи є використання LoRa-модуляції, що забезпечує надзвичайно низьке енергоспоживання та можливість передавання даних на значні відстані (до кількох кілометрів), що особливо актуально для розташування сенсорів у великих або важкодоступних зонах.

Додатково до LoRa-модуляції частина пристроїв, які знаходяться в зоні дії Wi-Fi точки доступу, підключаються до локальної мережі Wi-Fi, що реалізовано на сервері. Ці пристрої виконують роль шлюзів (gateway), які отримують дані з mesh-мережі вузлів LoRa, обробляють їх та передають локально на сервер. Завдяки цьому сервер отримує доступ до актуальних даних навіть з тих сенсорів, які фізично не мають доступу до Wi-Fi, але є частиною LoRa mesh-мережі вузлів. Порівняння радіомодулів наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Порівняння радіомодулів Lora [62]

Характеристика	SX1276	SX1272	SX1262	SX1211	SX1275
Основне призначення	Універсальний, LoRaWAN	Дальність, швидкість	Базовий	Низьке енергоспоживання	Дальність, швидкість
Частотний діапазон (МГц)	150-928	150-928	150-928	868/915	150-928
Максимальна потужність передавача (dBm)	~22	~22	~20	~14	~20
Чутливість (dBm)	~-148	~-148	~-146	~-138	~-146
Максимальна швидкість передачі даних (bps)	50 kbps	50 kbps	30 kbps	10 kbps	50 kbps
Споживання струму в режимі передачі (мА)	~100	~100	~80	~30	~80
Споживання струму в режимі очікування (мкА)	~10	~10	~10	~1	~10
Підтримка протоколів	LoRa, LoRaWAN	LoRa	LoRa	LoRa	LoRa, FSK
Споживання енергії	Низьке	Низьке	Низьке	Дуже низьке	Низьке

Для вузлів мережі було обрано радіомодулі sx1262, що є розповсюдженим перевіреним рішенням з малими енерговитратами та запасом потужності та широким частним діапазоном, що працює на частоті 868 mHz. Архітектуру зв'язку наведено на рисунку 3.7.

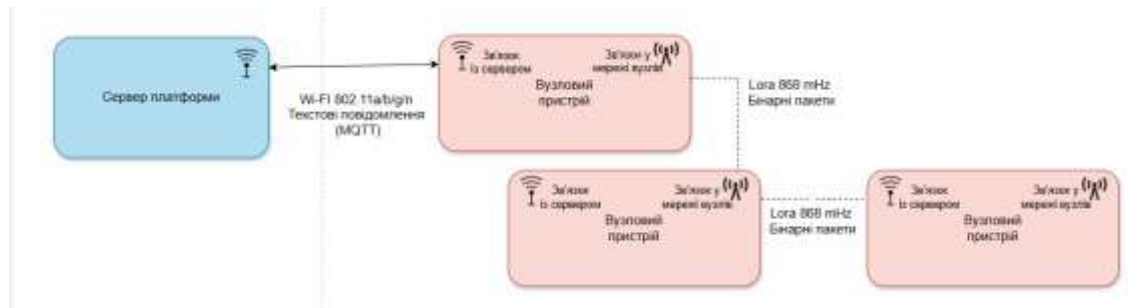


Рисунок 3.7 – Архітектура зв'язку у ЦП

Сервер на базі Raspberry PI 3b+ виконує функції центрального вузла для збору та збереження даних із сенсорів. Платформа поєднує переваги LoRa mesh-мережі та Wi-Fi для створення надійної, масштабованої інфраструктури, що забезпечує ефективний збір даних у реальному часі. Такий підхід знаходить застосування у проєктах зі сталого розвитку та екологічного моніторингу.

3.4 Вибір програмної платформи

В якості платформи яка буде розгорнута на сервері доцільно обрати готове рішення тому, що існують потужні готові рішення систем автоматизації які відповідають сучасним умовам гнучкості, безпеки та оновлення. Порівняння систем наведено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Порівняння систем автоматизації [63]-[66]

Характеристика	Home Assistant	OpenHAB	ioBroker	Node-RED	Jeedom	Hubitat Elevation
1	2	3	4	5	6	7
Тип системи	Відкрита	Відкрита	Відкрита	Інструмент	Пропрієтарна	Пропрієтарна
Мова програмування	Python	Java, JavaScript	JavaScript	Node.js (JavaScript)	PHP	Groovy
Інтерфейс користувача	Веб-інтерфейс, мобільні додатки (iOS, Android)	Веб-інтерфейс, мобільні додатки (iOS, Android)	Веб-інтерфейс, мобільні додатки (iOS, Android)	Веб-інтерфейс для візуального програмування	Веб-інтерфейс, мобільні додатки (iOS, Android)	Веб-інтерфейс, мобільні додатки (iOS, Android)
Спільнота	>100 000 користувачів на форумах	>50 000 користувачів на форумах	Десятки тисяч користувачів	Сотні тисяч розробників Node.js	Десятки тисяч користувачів, переважно франкомовна	Десятки тисяч користувачів

Кінець таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6	7
Гнучкість	Дуже висока, повна кастомізація	Висока, модульна структура, тисячі додаткових компонентів	Висока, тисячі адаптерів для різних пристроїв	Висока, візуальне програмування, велика кількість вузлів	Висока, але менше, ніж у відкритих платформах	Висока, але менше, ніж у відкритих платформ
Складність налаштування	Середня, вимагає деяких знань YAML	Середня, вимагає знань Java або JavaScript	Середня, вимагає знань JavaScript	Відносно проста завдяки візуальному інтерфейсу	Середня, добре документована	Середня, добре документована
Підтримка пристроїв	>1000 інтеграцій	>3000 інтеграцій	Тисячі адаптерів	Залежить від доступних вузлів	Сотні інтеграцій	Сотні інтеграцій
Ціна	Безкоштовна	Безкоштовна	Безкоштовна	Безкоштовна	Платна ліцензія	Платна ліцензія

Home Assistant OS є спеціалізованою операційною системою для автоматизації, яка забезпечує локальне виконання всіх процесів, що мінімізує

залежність від хмарних сервісів і підвищує швидкість реакції. Її архітектура, заснована на Docker, дозволяє легко інтегрувати численні пристрої та сервіси, забезпечуючи модульність і масштабованість. Крім того, Home Assistant OS забезпечує високу приватність і безпеку, оскільки всі дані залишаються локальними, але також присутня можливість API доступу.

ОС Home Assistant підтримує доповнення [67] та додатки [68]. Серед доповнень було обрано та встановлено наступні:

- AccessPoint – створення локальної точки доступу;
- Chrony – локальний сервер часу для синхронізації пристроїв;
- MariaDB – локальна база даних;
- WireGuard – протокол захищеного підключення;
- MosquitoBroker – Mqtt брокер для отримання даних із мережі вузлів;
- TasmotaAdmin – розширення для інтеграції пристроїв заснований на ПО Tasmota.

Серед інтеграцій було обрано та встановлено OpenWeatherMAP – сервіс, що надає погодні історичні, аналітичні та поточні дані для встановленої локації.

Для створення програмного забезпечення вузлів, що будуть функціонувати на основі контролера ESP32 потрібно обрати мову програмування.

3.5 Вибір мови програмування та середовища розробки

Вибір мови програмування для мікроконтролера ESP32 є багатофакторним завданням, що вимагає зваженого підходу між продуктивністю, розміром коду та складністю програмування. Порівняння мов програмування для вузлів ESP32 наведено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Порівняння мови програмування для Esp32 [69]-[73]

Мова програмування	Переваги	Недоліки
MicroPython	Простий синтаксис, схожий на Python. Швидкий розвиток прототипів. Велика спільнота та бібліотеки.	Обмежена продуктивність порівняно з C/C++. Менший контроль над апаратними ресурсами.
C++	Висока ефективність, повний контроль над апаратними ресурсами. Велика кількість бібліотек і фреймворків.	Складний синтаксис, високий поріг входу для новачків. Довший час розробки.
C	Висока ефективність, низькорівневий доступ до апаратних ресурсів.	Складний синтаксис, схильність до помилок. Вимагає глибоких знань принципів програмування.
Lua	Легкий і компактний інтерпретатор. Швидка розробка скриптів.	Менша популярність, менше бібліотек порівняно з іншими мовами.
JavaScript (Mongoose OS)	Популярна мова для веб-розробки. Можливість використання веб-технологій.	Менша ефективність порівняно з C/C++. Може бути складнішим для вбудованих систем.

У якості мережевих вузлів обрано контролер ESP32 для якого доцільно розроблювати код із використанням C++ завдяки повному контролю ресурсів контролера та наявною великою кількістю бібліотек.

Програмування для контролера ESP32 можна виконувати у наступних поширених середовищах: Eclipse, Visual Studio Code, PlatformIO, Arduino IDE. Порівняння середовищ розробки наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Порівняння середовищ розробки

Критерій	Eclipse	Visual Studio Code	PlatformIO	Arduino IDE
Зручність використання	Середня	Висока	Висока	Висока
Функціональність	Висока	Дуже висока	Висока	Середня
Спільнота	Дуже велика	Дуже велика	Велика	Дуже велика
Гнучкість	Висока	Висока	Висока	Середня
Вимоги до ресурсів	Середні	Середні	Середні	Низькі
Ліцензія	Безкоштовна (Eclipse Public License)	Безкоштовна (MIT)	Безкоштовна (MIT)	Безкоштовна (GNU GPL)
Підтримка відлагодження	Висока	Висока	Висока	Середня
Інтеграція з системами контролю версій	Висока	Висока	Висока	Середня
Підтримка різних архітектур	Так	Так	Так	Так (обмежена)
Вартість	Безкоштовна	Безкоштовна	Безкоштовна	Безкоштовна

Для програмування ПО вузлових пристроїв було використано особливості Visual Studio Code та Platformio. Середовище Platformio може використовуватись як плагін у Visual Studio Code поєднуючі весь функціонал в єдиному середовищі.

3.6 Висновки до розділу 3

У розділі було визначено призначення системи та вимоги. На основі поставлених вимог було розроблено загальну архітектуру, структуру сервера платформи та структуру вузлових пристроїв на основі коміркової мережі. Проведено аналіз апаратних засобів для реалізації серверу платформи та вузлових пристроїв. Для реалізації сервера обрано одноплатний комп'ютер Raspberry PI 3B+, а у якості контролера вузлових пристроїв обрано контролер ESP32, із модулем зв'язку Lora, в основі радіомодуля sx1262. Архітектуру ЦП зображено на рисунку 3.8. Аозроблена архітектура цифрової платформи відрізняється від існуючих набором компонентів та способом їх інтеграції, що дозволить організувати ефективний моніторинг показників, що впливають на енергоефективність зеленого університету.

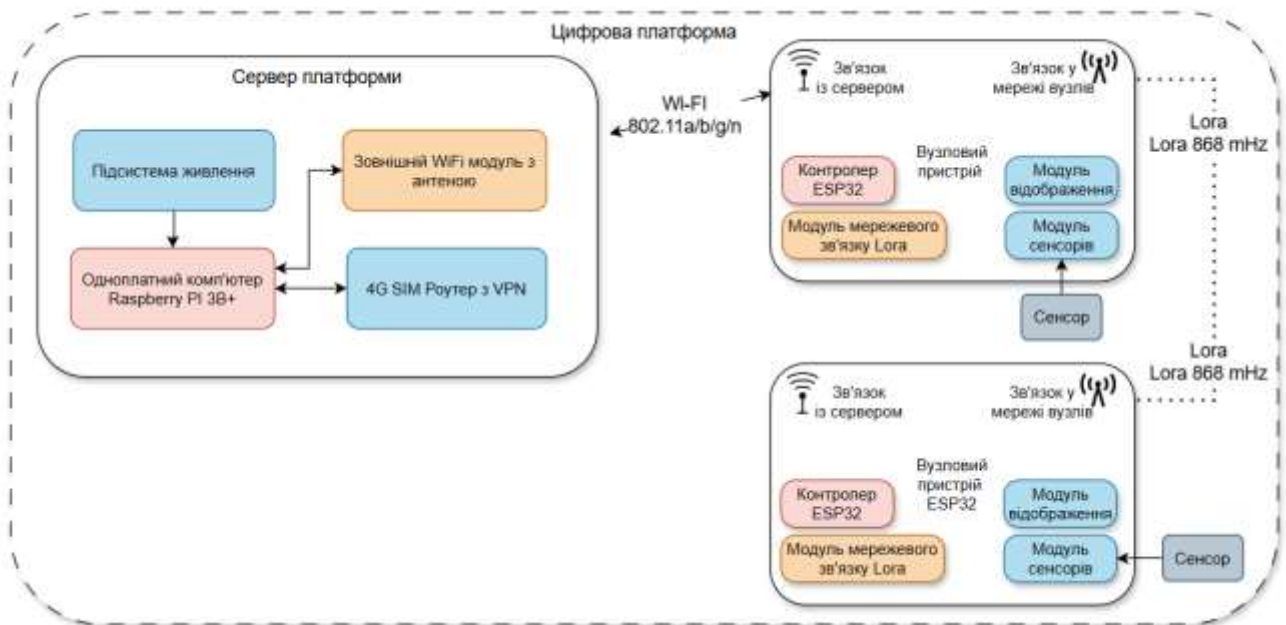


Рисунок 3.8 – Архитектура цифрової платформи

Розгорнуту схему реалізації серверу платформи з урахуванням всіх обраних складових наведено на рис. 3.9. Схему реалізації мережевого вузла наведено на рис. 3.10.

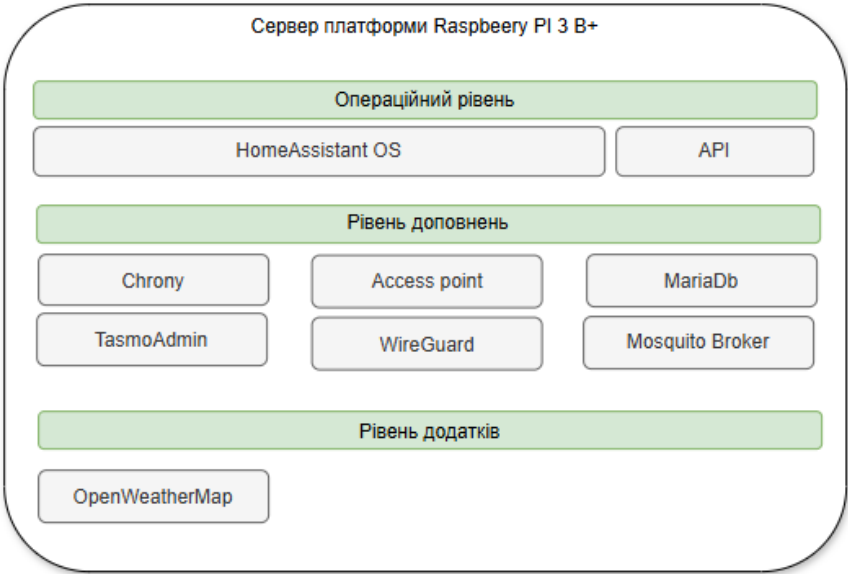


Рисунок 3.9 – Схема реалізації серверу платформи

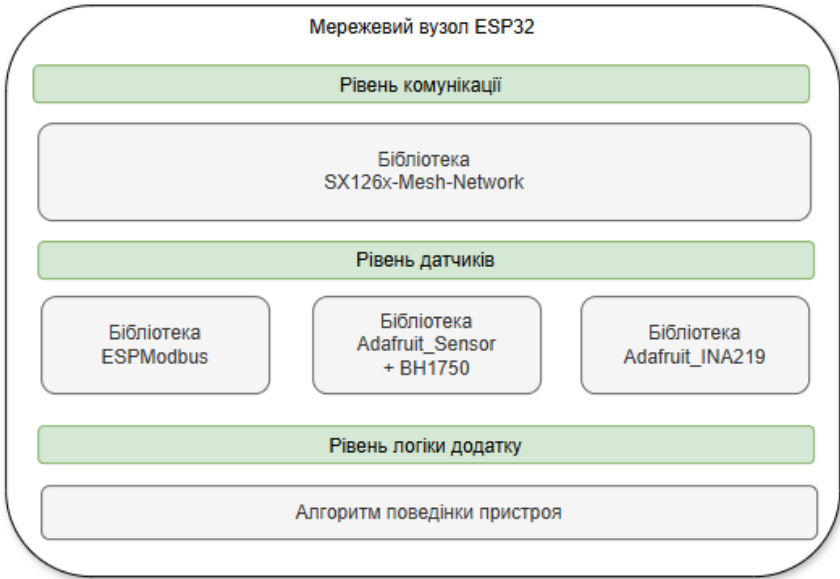


Рисунок 3.10– Схема реалізації мережевого вузла

Було здійснено порівняльний аналіз мов програмування та інструментів розробки, що дозволило визначити доцільність використання мови C++ для створення програмного забезпечення. На основі обраних мов було проведено огляд доступних середовищ розробки, серед яких Platformio була визначена як оптимальний професійний варіант завдяки високому рівню підтримки відповідного сімейства мікроконтролерів, зручності у використанні та оптимізованому використанню ресурсів.

4 РОЗРОБКА ПІДСИСТЕМИ ЗБОРУ ТА ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ЦИФРОВОЇ ПЛАТФОРМИ ЗЕЛЕНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

4.1 Розробка алгоритмів функціонування

Загальна робота ЦПЗУ полягає у прийомі даних із сенсорів, передача цих даних на сервер та їх збереження. Схему алгоритму роботи підсистему збору та передачі даних наведено на рис. 4.1 та включає в себе три потоки роботи компонентів ЦП, два з яких паралельні.

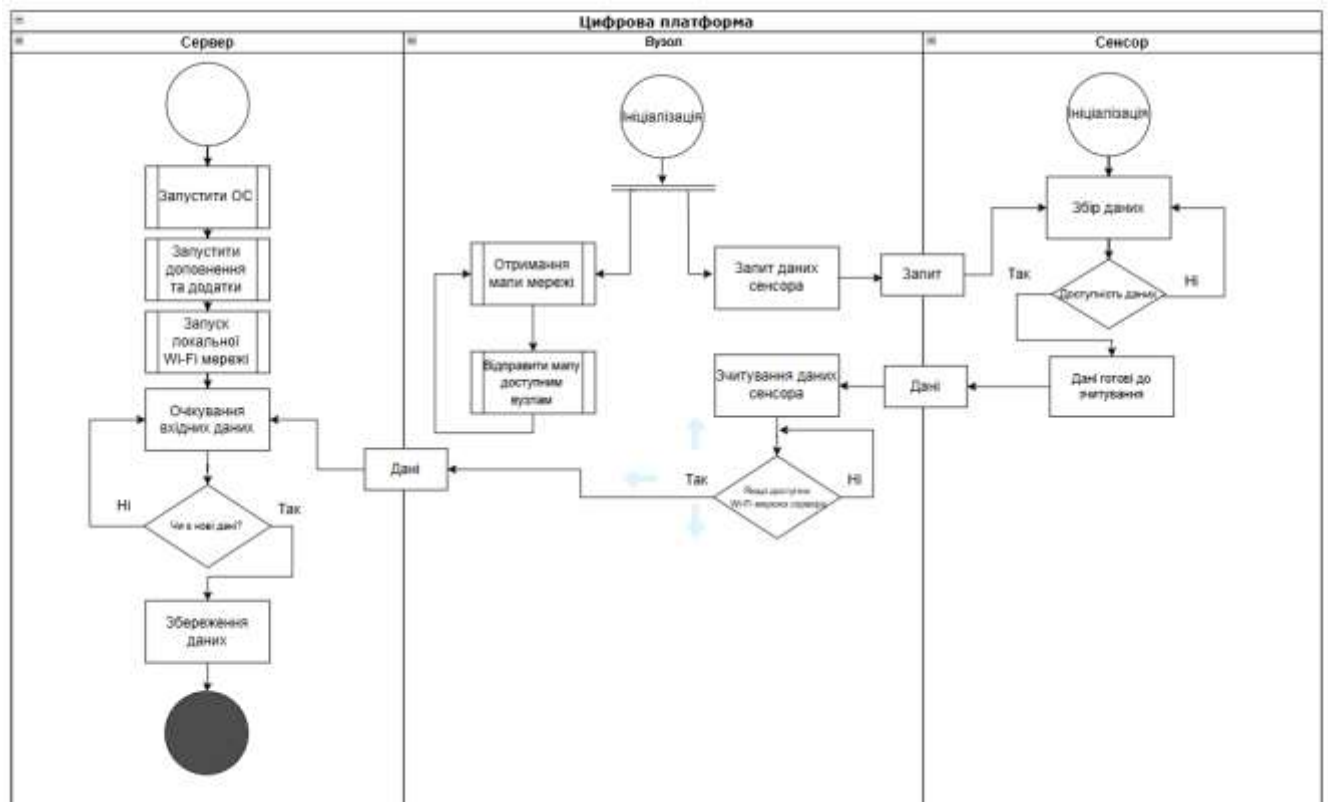


Рисунок 4.1 – Схема алгоритму роботи підсистеми збору та передачі даних

Для початку роботи ЦП запускається операційна система, далі відбувається запуск додатків та доповнень. Наступним кроком відбувається запуск локальної Wi-Fi мережі. Паралельно із запуском сервера мережеві вузли, після їх увімкнення починають самоорганізацію передаючи та отримуючі мапу

мережі. Після встановлення мережі кожен вузол отримує дані від сенсорів якщо було оновлення даних. Надалі відбувається передача даних із сенсорів всім вузлам мережі. Структуру пакетів у мережі наведено на рис. 4.2.

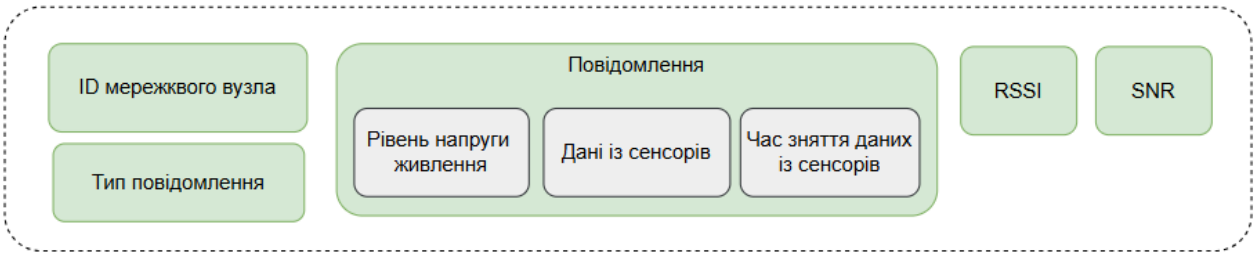


Рисунок 4.2 – Структура пакетів вузлових пристроїв у мережі

Опис елементів структури пакетів наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Елементи структури пакетів вузлових пристроїв

Назва елементу	Опис
ID мережевого вузла	Унікальний ідентифікатор вузла
Тип повідомлення	Широкомовна передача або адресна
Рівень напруги живлення	Рівень напруги акумулятора або зовнішнього живлення
Дані із сенсорів	Температура, тиск, та інше
Час зняття даних	Останній час оновлення даних із сенсорів
RSSI	Якість сигналу
SNR	Співвідношення якості сигналу до шуму

Також у мережі вузлів присутній другий тип повідомлень для оновлення мапи мережі (рис 4.3) який включає унікальний ідентифікатор вузла,

ідентифікатор першої передачі, останній час оновлення стану доступності вузла, та кількість стрибків для досягнення цього вузла.

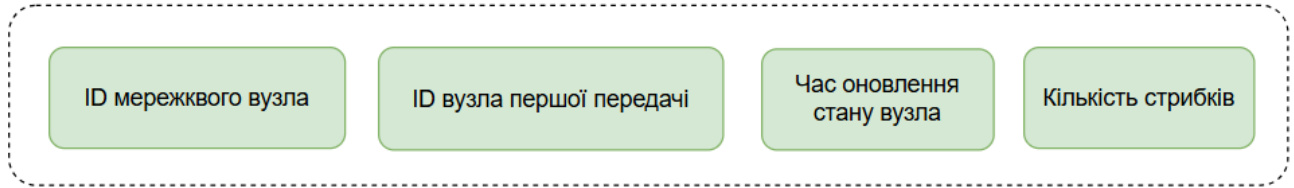


Рисунок 4.3– Структура повідомлень мапи вузлових пристроїв

4.2 Структура програмного забезпечення вузлів

Програмне забезпечення вузлів мережі використовує мікроконтролер ESP32 з бібліотеками для роботи з LoRa, та датчиком INA219. ПО можливо поділити на компоненти: ініціалізації, основного циклу, маршрутизації, логіки передачі, обробки сенсорів. Структурну схему ПЗ наведено на рис. 4.4.

Компонент ініціалізації налаштовує основні модулі: контролер Esp32, радіомодуль LoRa, дисплей, сенсори. Компонент основного циклу mainLoop перевіряє зміни напруги датчика INA219 та формує повідомлення для передачі, якщо ці зміни перевищують заданий поріг.

Компонент логіки передачі повідомлень базується на використанні широкомовних пакетів або маршрутизації через список вузлів.

Дані з сенсорів обробляються окремою функцією яка зчитує дані та повертає скомпанований результат. Компонент маршрутизації використовується для обробки списку вузлів, та оновлює маршрутні дані у випадку змін у мережі.



Рисунок 4.4 – Структурна схема програмного забезпечення вузлів

4.3 Опис особливостей програмної реалізації мережевих вузлів

У таблиці 4.2 наведено повний перелік компонентів програмного коду, які забезпечують роботу вузлового пристроя. Представлені змінні, константи, типи даних та функції, що використовуються у мережевих вузлах.

Таблиця 4.2 – Компоненти програмного коду

Тип	Змінна	Опис
1	2	3
int	PIN_ACTION_BUTTON, PIN_BATTERY, PIN_SENSOR_A4, PIN_SENSOR_A5, PIN_RADIO_RXEN, PIN_RADIO_TXEN, PIN_CONTROL, PIN_STATUS_LED	Номери пінів, підключених до відповідних компонентів
Ticker	ledTimer	Таймер для управління світлодіодом при прийомі передачі
dataMsg	transmissionData	Структура даних для передачі
nodesList	routingNode	Структура для зберігання інформації про маршрут
uint32_t	nodeIdentifiers, firstHops, hopCounts	Масиви для зберігання інформації про вузли в мережі
uint8_t	totalNodes	Кількість вузлів у мережі

Кінець таблиці 4.2

1	2	3
bool	routingListUpdated	Прапор, що вказує на оновлення списку маршрутів
time_t	randomTransmitTime	Час останньої відправки повідомлення
uint32_t	uniqueDeviceID	Унікальний ідентифікатор пристрою
uint8_t[8]	macAddress	MAC-адреса пристрою
int	messageLength	Довжина повідомлення
char[]	displayLine	Буфер для виведення на дисплей
uint16_t	payloadSize	Розмір прийнятих даних
int16_t, int8_t	receivedRssi, receivedSnr	Сила сигналу та співвідношення сигнал/шум прийнятого сигналу

Основні структури та їх опис наведено у таблиці 4.3

Таблиця 4.3 – Структури програмного забезпечення вузів

Структура	Поля	Опис
dataMsg	marker1, marker2, marker3, destination, source, messageType, payload	Структура для опису даних, що передаються
nodesList	nodeID, firstHop, hopCount	Структура для опису маршруту до вузла

Основні функції програмного забезпечення вузла наведено із описом у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Основні функції ПЗ вузлів

Функція	Опис
Initialize()	Ініціалізує пристрій
mainLoop()	Головний цикл програми
processData()	Обробляє прийняті дані
onRoutingListUpdate()	Обробляє подію оновлення списку маршрутів
generateBroadcastID()	Генерує унікальний ідентифікатор для широкого мовлення
queueTransmission()	Додає повідомлення в чергу на відправку
getNodeCount()	Повертає кількість вузлів у мережі
fetchNodeDetails()	Отримує інформацію про вузол
retrieveDeviceUniqueId()	Отримує унікальний ідентифікатор пристрою
initializeDisplay(), updateDisplayHeader(), writeDisplay(), refreshDisplay()	Функції для роботи з дисплеєм (якщо підключений)

4.4 Опис апаратної реалізації вузлів

Загальну схему структури прототипу ЦПЗУ наведено на рис. 4.5.

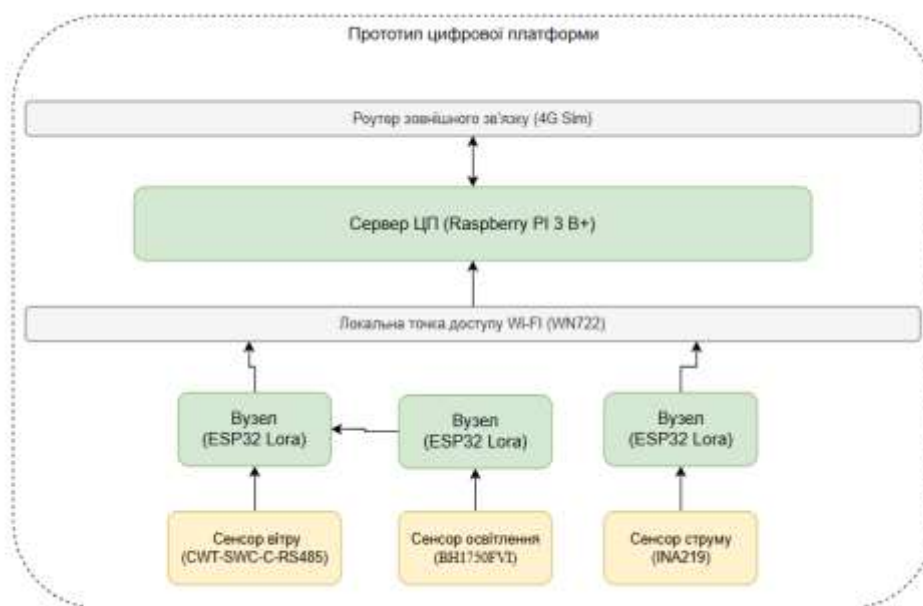


Рисунок 4.5 – Схема структури ЦПЗУ

Вузли мережі сенсорів побудовані на основі мікроконтролера ESP32-WROOM із розміщенням на платі радіомодулем Lora sx1262. Опціональний дисплей OLED-0.96 може бути підключений через роз'єм. До радіомодулів Lora можуть бути підключені антени великої та малої потужності. Зовнішній вигляд шістьох мережевих вузлів наведено на рис. 4.6.

Прототип серверу наведено на рис 4.7. Прототип включає у себе електричний захисний бокс, мікрокомп'ютер Raspberry Pi 3B+ із підключеним Wi-Fi модулем для створення локальної мережі, з можливістю підключення зовнішньої антени великої потужності. Також у боксі інтегровано 4G Sim роутер для зовнішнього зв'язку.



Рисунок 4.6 – Прототипи мережєвих вузлів ЦПЗУ



Рисунок 4.7 – Прототип сервера ЦПЗУ

Для тестування ЦПЗУ, у якості сенсорів вузлів було обрано наступні сенсори: Датчик вітру CWT-SWC-C-RS485, Датчик освітлення GY-302 BH1750FVI, та датчик струму INA219 разом із сонячною панеллю (рис. 4.8).

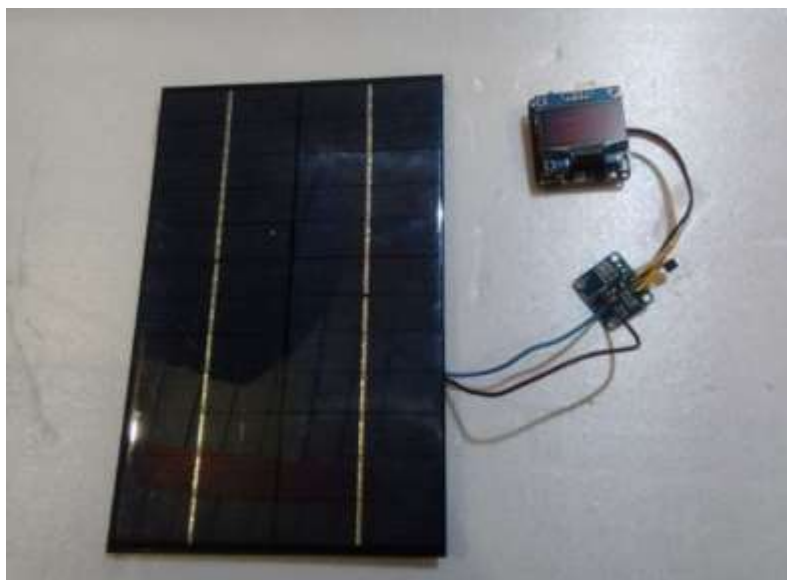


Рисунок 4.8 – Вузловий пристрій із датчиком струму INA219 та сонячною панеллю

4.5 Опис інтерфейсу операційної системи сервера

Для виконання основних функції прийому даних, збереження та захищеного зв'язку було створено візуальний інтерфейс для формалізації сутностей та зручного керування додатками ОС сервера. ОС сервера ЦП має окрему вкладку із метеоданими (стан погоди, стан неба, клас погоди, вологість, тиск, тип поточних опадів, ступінь хмарності, оцінка температури, швидкість вітру, тиску) отриманими з серверу сервісу OpenWeatherMap та підтримує можливість відображення графіків із даними (рис 4.9, рис. 4.10).

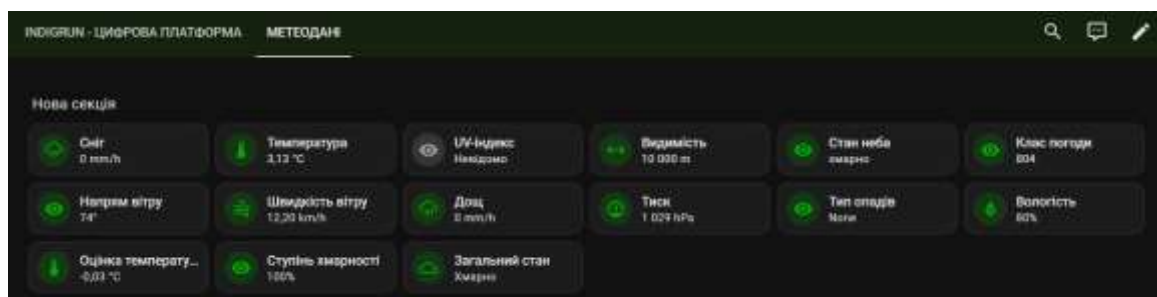


Рисунок 4.9 – Метеодані сервісу OpenWeatherMap

ОС сервер має можливість географічного зонування території (рис 4.11) та поділення на приміщення (рис 4.12).

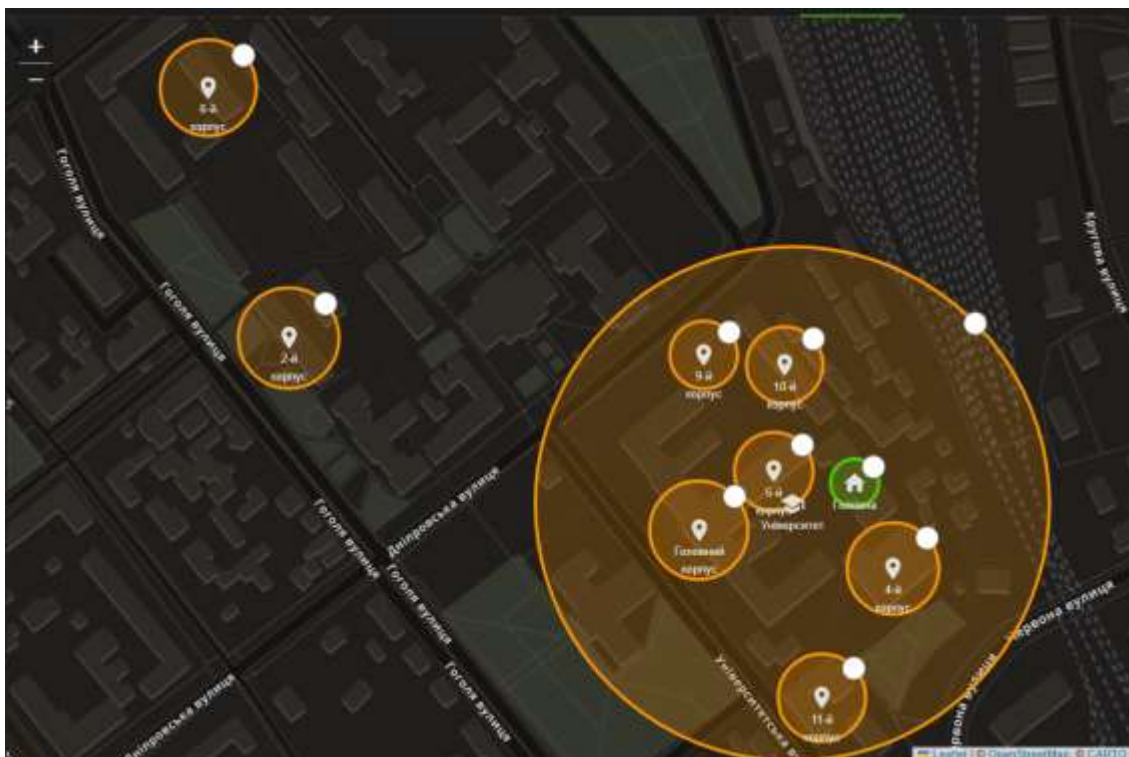


Рисунок 4.11– Географічне зонування

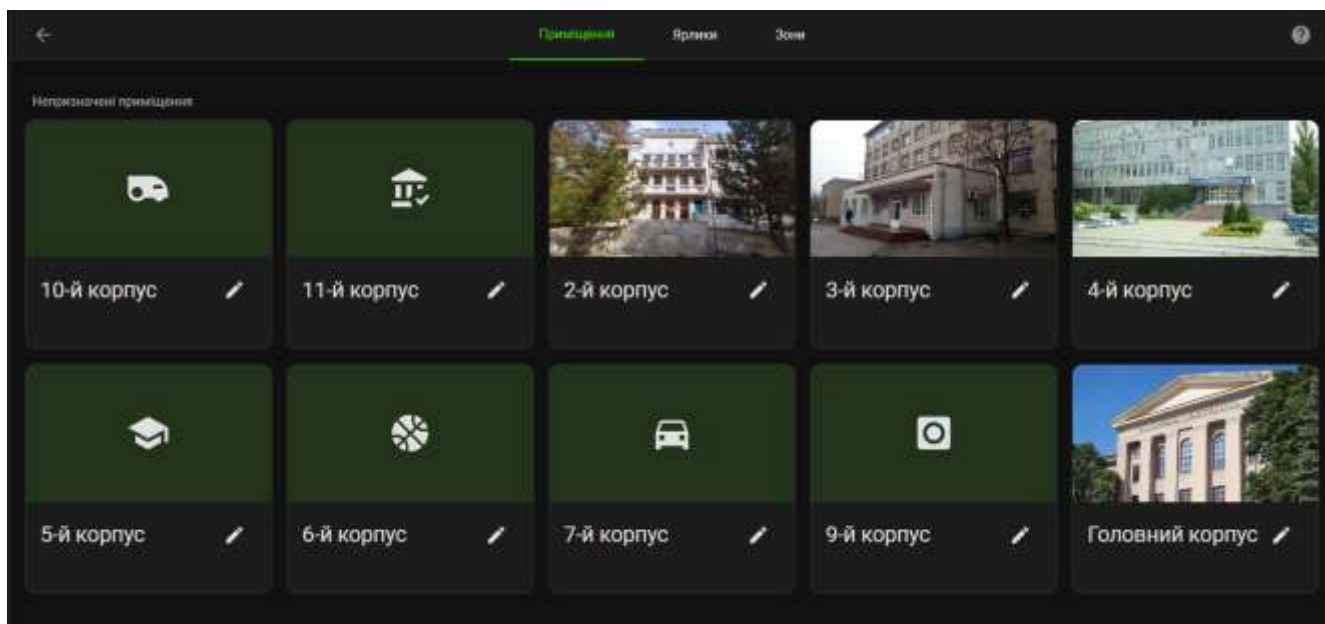


Рисунок 4.12 – Поділення на приміщення

4.6 Висновки до розділу 4

У даному розділі наведено схеми та опис алгоритму роботи ЦПЗУ, наведено структуру пакетів вузлових пристроїв у мережі, структуру повідомлень мапи вузлових пристроїв. Наведено та описано структурну схему програмного забезпечення вузлів по компонентно. Додатково було представлено повний перелік компонентів програмного коду із описом функціоналу. Обрано апаратне забезпечення для реалізації вузлів на основі ESP32 та Lora, а також обрано забезпечення для тестування.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

5.1 Тестування технології Lora

У цьому розділі представлено методику тестування LoRa Mesh мережі, побудованої на базі ESP32 із використанням бібліотеки Alora RFM1262. Тестування спрямоване на оцінку роботи мережі в умовах збоїв зв'язку, втрати вузлів та інших критичних ситуацій.

Були використані наступні налаштування Lora мережі (таб. 5.1).

Таблиця 5.1 – Налаштування мережі Lora

Назва	Можливі значення	Опис вибору	Використані значення
Фактор розповсюдження	6-12	Забезпечує баланс між дальністю і швидкістю	7
Пропускна здатність	7.8 кГц-500 кГц	Ширина для кращої швидкості передачі даних	250 кГц
Швидкість кодування мережі	4/5 – 4/8	Покращує стійкість до шуму	4/5
Довжина преамбули	6-12	Мінімальна для середніх відстаней	8
Розмір даних	1-255	Розмір корисного навантаження в байтах	150

Тестування мережі проводилося на частоті 866.2 МГц із розміром переданих повідомлень до 150 байт. Основними параметрами для аналізу були рівень успішності передачі повідомлень, час відновлення маршрутизації та доступність мережі в різних сценаріях. Частота оновлення мапи топології мережі

становила 30 секунд, тоді як повідомлення між вузлами передавалися кожні 60 секунд. У ході тестування оцінювалися чотири ключові аспекти роботи системи: стійкість мережі, робота мережі вузлів при втраті сервера, втрата мережі вузлів.

Стійкість мережі при відключенні одного з вузлів перевірялася шляхом навмисного фізичного одного з вузлів і аналізу перенаправлення даних через інші активні вузли. Було встановлено, що мережа відновлює маршрутизацію даних у середньому за 50 секунд. Успішність передачі повідомлень після втрати вузла знизилася на 10 %, однак залишалася стабільною в межах 90 %.

Для перевірки роботи мережі за відсутності локальної точки доступу Wi-Fi від сервера була відключена точка доступу. Спостереження показали, що вузли мережі продовжували обмін повідомленнями через Mesh мережу без втрат, а вузлові пристрої зберігали дані в собі. Максимальний обсяг буферизованих даних становив 2 МБ, що відповідає приблизно збереженням 13800 повідомленням, але при цьому можливе падіння пропускної здібності мережі так як надалі необхідно накопичувати нові і передавати накопичені дані.

Встановлено, що при втраті зв'язку із мережею сенсорів сервер залишався доступним для користувачів і надавав доступ до історичних даних. Відновлення зв'язку після його втрати займало близько 40 секунд.

Поведінка системи в умовах відсутності доступу сервера до інтернету оцінювалася шляхом відключення 4G роутера. Дані продовжували зберігатися на локальному сервері, що підтверджує автономність роботи системи. Після відновлення інтернет-з'єднання сервер успішно надавав доступ до збережених даних. Виявлено, що відсутність Інтернету не впливала на обмін повідомленнями всередині Mesh мережі.

Загалом, частота успішної передачі повідомлень у межах мережі залишалася стабільною на рівні 95%, навіть за умов втрати окремих вузлів. Середній час відновлення функціональності платформи після збоїв не перевищував 60 секунд, тоді як відсоток втрат даних у критичних ситуаціях

становив менше 5 %. Ці показники свідчать про високу надійність та автономність системи. Сценарії тестування та результати наведено у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Сценарії тестування та результати

№	Сценарій тестування	Основні параметри	Результати
1	Втрата одного вузла	Час відновлення маршрутизації, успішність передачі повідомлень	Відновлення за 50 сек., зниження успішності на 10%
2	Відсутність Wi-Fi на сервері	Обмін повідомленнями між вузлами, буферизація даних	Продовження обміну, буфер до 2 МБ
3	Втрата зв'язку з мережею сенсорів	Доступність сервера, час відновлення	Сервер доступний, відновлення за 40 сек.
4	Відсутність інтернету на сервері	Збереження даних, обмін повідомленнями в мережі	Дані зберігаються локально, обмін не порушується
Загальні результати		Успішність передачі, час відновлення, втрати даних	95% успішності, відновлення до 60 сек., менше 5% втрат

Запропонована методика дозволила оцінити стійкість LoRa мережі до різноманітних збоїв, таких як втрата вузлів, відсутність Wi-Fi або Інтернету. Результати дослідження демонструють, що система здатна забезпечувати передачу даних із мінімальними втратами та відновлювати функціональність у прийнятні часові рамки, це свідчить про високу надійність мережі та її придатність до використання.

5.2 Проведення практичного експерименту

Для реалізації концепції зеленого університету на ЦП було проведено експеримент із вимірюванням сонячної радіації та вимірюванням швидкості вітру на вузлах ЦП із подальною передачею на сервер.

Для вимірювань було використано цифрові датчик освітленості, зокрема BH1750. Даний датчик дозволяє здійснювати досить точні вимірювання освітленості в люксах (lux), що мали бути переведені в рівень сонячного освітлення в одиницях потужності на одиницю площі (Вт/м²) та виведені в інтерфейс сервера. Однак після практичного експерименту було виявлено, що максимальний рівень освітленості, який вони можуть виміряти, складає 65535 lux, що є недостатнім для точного вимірювання рівня освітленості в умовах яскравого денного світла. Тому було прийнято рішення застосувати бюджетну сонячну панель для вимірювання рівня сонячної радіації. Для вимірювань було використано датчик на базі INA219, який забезпечує точне вимірювання напруги та струму через сонячну панель. Сонячна панель з потужністю 6 Вт та напругою 6 В була використана як джерело сонячної енергії. Дані, отримані за допомогою INA219, дозволяли більш точно вимірювати потужність, яка надходить від панелі, з подальшим обчисленням рівня сонячної радіації.

Цей метод показав значну перевагу в точності вимірювань та стабільності результатів у порівнянні з попередніми підходом із датчком освітленості. Отримані дані наведено на рис. 5.1 та рис. 5.2.

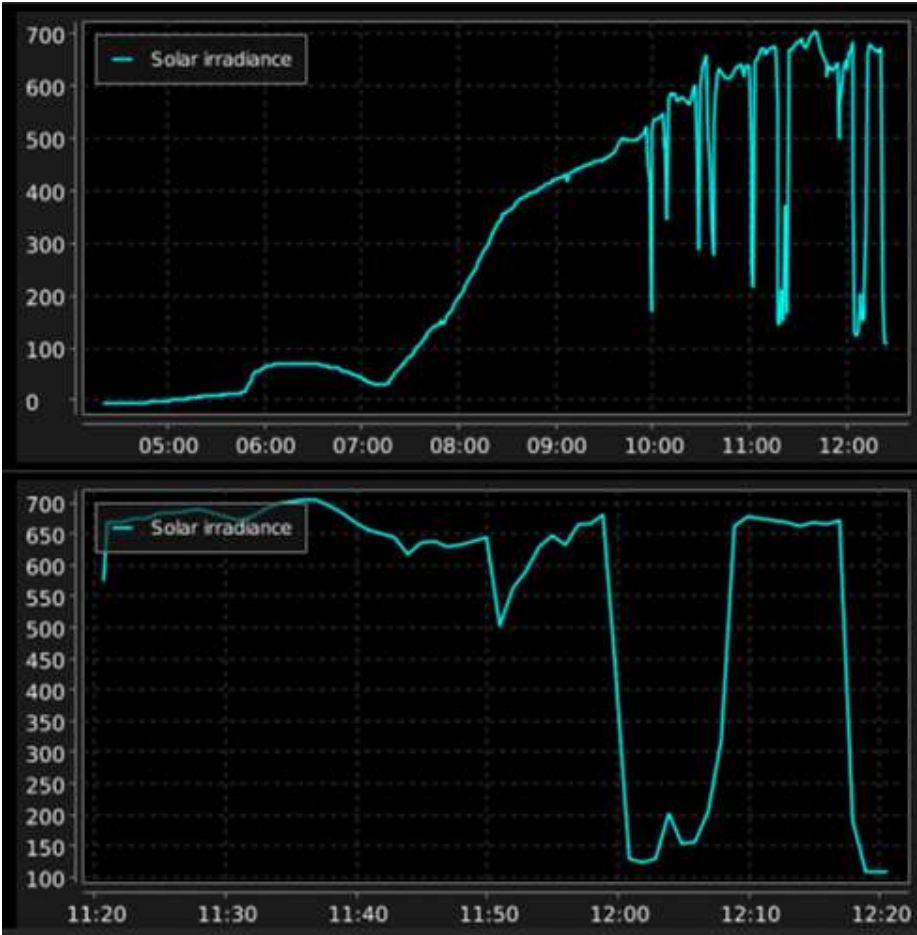


Рисунок 5.1 – Вимірювання сонячної радіації

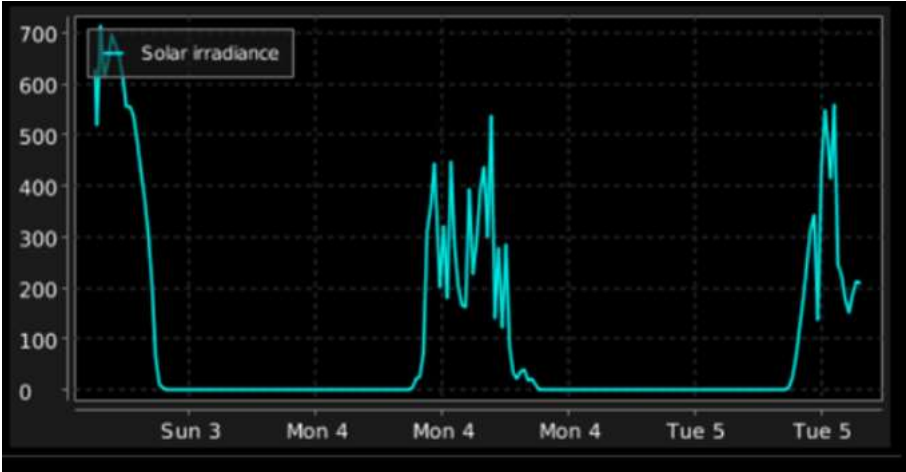


Рисунок 5.2 –Вимірювання сонячної радіації за 3 дні

Також було проведено експеримент вимірювання швидкості вітру на вузлах мережі сенсорів, з подальшою передачею на сервер. Результат вимірювань представлено на рисунку 5.3.

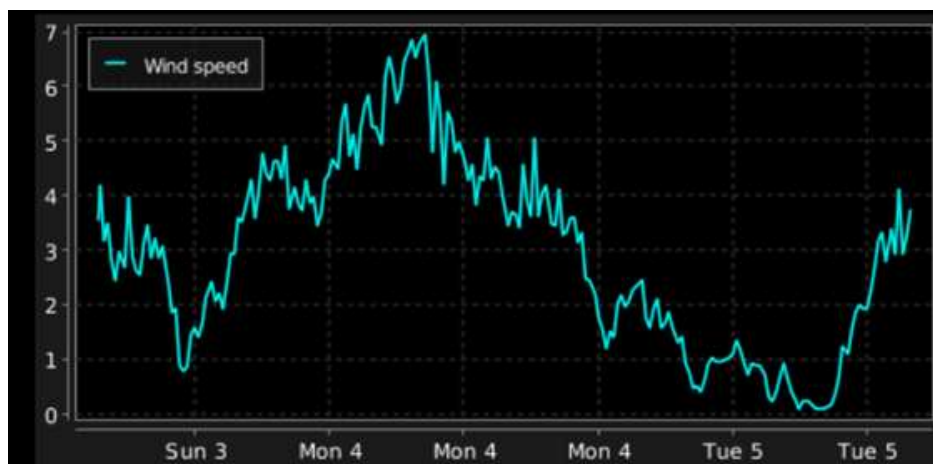


Рисунок 5.3— Графік вимірювання швидкості вітру

Таким чином, у результаті експерименту було виконано збір даних в мережі сенсорів та подальша передача на сервер ЦП. Отримані дані можливо корелювати із погодними сервісами або використовувати для подальших досліджень та проведення експериментів у сфері концепції зеленого університету.

5.3 Висновки до розділу 5

У розділі було наведено інтерфейс операційної системи серверу та описано проведення експерименту з вимірювання сонячної радіації та швидкості вітру із подальшою передачею даних до сервера цифрової платформи. Як результат було отримано дані вимірюювання та побудовано графіки даних із збереженням у локальній базі даних.

ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень цифровізація є актуальним та оптимальним шляхом досягнення сталого розвитку, тому тема роботи є актуальною.

На основі аналізу сучасних підходів було розроблено архітектуру цифрової платформи для зеленого університету, яка відповідає принципам енергоефективності та безпеки. Будо виділено основні компоненти цифрової платформи. Обрано апаратні засоби для реалізації.

Практична цінність роботи полягає тому, що розроблена підсистема збору та передачі даних забезпечує збір локальних метеорологічних даних (показників сонячної активності та швидкості вітру), їх аналіз і збереження даних у локальній базі. Використання недорогих апаратних компонентів, таких як Raspberry Pi 3B+ та ESP32, а також інноваційного протоколу зв'язку LoRa робить рішення доступним і придатним до масштабування.

Наукова новизна роботи полягає в розробці архітектури цифрової платформи, що відрізняється від існуючих набором компонентів та способом їх інтеграції, використовує сучасні IoT-технології, поєднує принципи енергоефективності та безпеки для вирішення задач сталого розвитку зеленого університету.

В рамках експерименту було реалізовано вимірювання сонячної радіації та швидкості вітру з передачею даних на сервер платформи. Результати вимірювань збережено у локальній базі даних та візуалізовано у вигляді графіків. Таким чином, запропонована цифрова платформа демонструє ефективність і готовність до використання для задач сталого розвитку університету.

Подальші дослідження будуть спрямовані на реалізацію повного функціоналу цифрової платформи, зокрема на інтеграцію із моделями прогнозування та аналітики.

Результати роботи доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях в Україні та оприлюднені в наступних публікаціях:

- Туленков, А.В. Аналіз методів та засобів інтелектуального проектування систем життєзабезпечення / А.В.Туленков, А.В.Пархоменко // Тиждень науки-2024: Щорічна НПК викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів та студентів, Запоріжжя, 15-19 квітня 2024: тези доповідей. – Запоріжжя, НУЗП, 2024. – С. 87.

- Туленков, А.В. Дослідження та реалізація технології LoRa для цифрової платформи зеленого університету / А.В.Туленков, А.В.Пархоменко // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: XII Міжнародна НПК, Запоріжжя, 10-12 грудня 2024: тези доповідей. – Запоріжжя, НУЗП, 2024. – С. (подано до друку).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Green university and academic performance: An empirical study on UI GreenMetric and World University Rankings. / [K. B. Atici, G. Yasayacak, Y. Yildiz et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 291. – P. 1–33.
2. A smart campus' digital twin for sustainable comfort monitoring. / [A. Zaballos, A. Briones, A. Massa et al.] // Sustainability. – 2020. – Vol. 12. – P.1-33.
3. Creating a “green university” in China: a case of Shenyang University / [Y. Geng, K. Liu, B. Xue et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2013. – Vol. 61. – P. 13–19.
4. 17 Goals to Transform Our World [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.un.org/en/climatechange/17-goals-to-transform-our-world>.
5. Дослідження щодо зміни клімату [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/zmina-klimatu/doslidzhennya-shhodo-zminy-klimatu>.
6. What is a green university? [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.greenofficemovement.org/green-university>.
7. Green university initiatives in China: a case of Tsinghua University. / W. Zhao, Y. Zou // International Journal of Sustainability in Higher Education. – 2015. – Vol. 16, № 4. – P. 491–506.
8. Савицький, Н. Придніпровська державна академія будівництва та архітектури на шляху модернізації і трансформації в «зелений» університет. / Н. Савицький // Український журнал будівництва та архітектури. – 2021. – № 1. – С. 7–13.
9. Зелений університет [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://env.teset.sumdu.edu.ua/zelenij-universitet>

10. Sima, M. An overview of campus greening initiatives at universities in Romania. / M. Sima, I. Grigorescu, D. Bălteanu // *International Journal of Sustainability in Higher Education*. – 2019. – Vol. 20, № 3. – P. 410–422.
11. Bridging digitalization and sustainability in universities: A Chinese green university initiative in the digital era. / [Y. Zou, N. Zhong, Z. Chen et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2024. – Vol. 469. – P. 1-16.
12. Tshivhase, L. A conceptual model to measure and manage the implementation of green initiatives at South African public universities. / L. Tshivhase, C. Bisschoff // *Frontiers in Sustainability*. – 2023. – Vol. 4. – P. 1-16.
13. Bokolo, A. Jnr. Green campus paradigms for sustainability attainment in higher education institutions: a comparative study. / A. Jnr Bokolo // *Journal of Science and Technology Policy Management*. – 2021. – Vol. 12, № 1. – P. 117–148.
14. The path toward a sustainable green university: The case of the University of Florence. / [S. Fissi, A. Romolini, E. Gori et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 279. – P 1-9.
15. Towards a smart campus: supporting campus decisions with Internet of Things applications. / [B. Valks, M. H. Arkesteijn, A. Koutamanis et al.] // *Building Research & Information*. – 2021. – Vol. 49, № 1. – P. 1–20.
16. Sopapradit, S. Green University Using Cloud Based Internet of Things Model for Energy Saving. / S. Sopapradit, P. Piriyaasurawong // *International Education Studies*. – 2020. – Vol. 13, № 9. – P. 123–128.
17. IoT based energy efficiency platform architecture design considerations. / [M. Batić, N. Tomašević, & S. Vraneš et al.] // *ICIST 2018 Proceedings*. – 2018. – P. 237–241.
18. An integrated photovoltaic/wind/biomass and hybrid energy storage systems towards 100% renewable energy microgrids in university campuses. / [L. Al-Ghussain, A. D. Ahmad, A. M. Abubaker et al.] // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – 2021. – Vol. 46. – P. 1-19.

19. The motivation and development impact of energy saving to sustainability in the construction of green campus: a case study of the Zhejiang University, China / [B. Zhu, Z. Wang, C. Sun et al.] // *Environment, Development and Sustainability*. – 2021. – Vol. 23. – P. 14068–14089.
20. Реформи у сфері енергоефективності в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.giz.de/de/weltweit/62753.html>.
21. Відомості про професійні кваліфікації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [mode: https://register.nqa.gov.ua/professional-qualifications](https://register.nqa.gov.ua/professional-qualifications).
22. Енерго-інноваційний хаб [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zp.edu.ua/eninhub>.
23. UI GreenMetric World University Rankings [Electronic resource]. – Access mode: <https://greenmetric.ui.ac.id/rankings/overall-rankings-2023>.
24. Methodology Greenmetric [Electronic resource]. – Access mode: <https://greenmetric.ui.ac.id/about/methodology>.
25. Criteria Greenmetric [Electronic resource]. – Access mode: <https://greenmetric.ui.ac.id/wp-content/uploads/2024/06/2024-UI-GreenMetric-Questionnaire-1.pdf>.
26. Пуцентейло, П. Застосування новітніх інформаційно-цифрових технологій в управлінні земельними ресурсами сільськогосподарських підприємств. / П. Пуцентейло, Н. Хома, С. Бабій // *Економічний дискурс*. – 2023. – № 1-2. – С. 96–110.
27. Дегтяр, В. О. Сутність та особливості процесу цифровізації в сучасному соціально-екологічному контексті / В. О. Дегтяр // *Лісотехнічна освіта і наука: виклики сьогодення та перспективи розвитку: Міжнародна науково-практична конференція, Львів, Україна, 23–25 жовтня 2024: матеріали* – Львів, 2024. – С. 1–4.
28. Татаринцева, Ю. Роль інформаційних технологій в забезпеченні сталого розвитку підприємства. / Ю. Татаринцева, Є. Строков // *Вісник*

Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" (економічні науки). – 2023. – № 3. – С. 93–98.

29. A review on energy storage and demand side management solutions in smart energy islands. / [D. Groppi, A. Pfeifer, D. Astiaso Garcia et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – Vol. 135. – P. 1–32.

30. Енергетичні острови під час блекауту [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://voe.com.ua/news/pro-enerhetychni-ostrovy-pid-chas-blekautu>.

31. Бізонич, Д. В. Результативність реформ у сфері енергоефективності та енергозбереження у межах галузі житлово-комунального господарства сучасної України. / Д. В. Бізонич // *Інвестиції: практика та досвід*. – 2021. – № 6. – С. 85–93.

32. Talei, H. Smart campus energy management system: Advantages, architectures, and the impact of using cloud computing. / H. Talei, M. Essaaidi, D. Benhaddou // *Smart Digital Environment: International conference (ICSDE '17)*, Rabat, 21-23 July 2017: proceedings. – Rabat, Morocco, 2017. – P. 1-7.

33. AbuAlnaaj, K. A strategic framework for smart campus. / K. AbuAlnaaj, V. Ahmed, S. Saboor // *Industrial Engineering and Operations Management (IEOM): International conference*, Dubai, 10-12 March 2020: proceedings. – Dubai, UAE, 2020. – Vol. 22. – P. 790-798.

34. Monitoring and detection of green smart campus with LoRa. / [K.-H. Tseng, M.-Y. Chung, L.-H. Chen et al.] // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, № 19. – P. 1-17.

35. Green smart technology for water (GST4Water): Life cycle analysis of urban water consumption. / [A. Bonoli, E. Di Fusco, S. Zanni, et al.] // *Water*. – 2019. – Vol. 11, № 2. – P. 389.

36. Tolley, R. Green campuses: cutting the environmental cost of commuting. / R. Tolley // *Journal of Transport Geography*. – 1996. – Vol. 4, № 3. – P. 213–217.

37. Sharifi, Z. The Electric Revolution: Fully Electric Transportation System on an Urban College Campus. / Z. Sharifi, M. Mansouri // INCOSE International Symposium. – 2024. – Vol. 34. – P. 958-966.

38. Bernacki, M. L. Mobile technology, learning, and achievement: Advances in understanding and measuring the role of mobile technology in education. / M. L. Bernacki, J. A. Greene, H. Crompton // Contemporary Educational Psychology. – 2020. – Vol. 60. – P. 1-35.

39. Moreira, G. Ap. Zero Waste Strategy for a Green Campus. / G. Ap. Moreira, E. Wanda Rutkowski // Journal of Sustainability Perspectives. – 2021. – Vol. 1. – P. 367–373.

40. Інформаційно-вимірювальна система моніторингу споживання енергоресурсів для будівлі університету / [А. В. Яворський, В. С. Цих, М. О. Карпаш та ін.] // Методи та прилади контролю якості. – 2022. – Вип. 2(49). – С. 46-57.

41. Qi, X. University education management based on Internet of Things technology. / X. Qi // Machine Learning and Big Data Analytics for IoT Security and Privacy: International conference (SPIoT-2020): proceedings. – Cham, Springer, 2021. – P. 805-810.

42. The effect of artificial intelligence on carbon intensity: evidence from China's industrial sector. / [J. Liu, L. Liu, Y. Qian et al.] // Socio-Economic Planning Sciences. – 2022. – Vol. 83. – P. 1-19.

43. Mode and mechanism of green innovation based on user involvement electronic platform under Chinese green education context. / [Y. Chen, J. Liu, Y. Li et al.] // Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education. – 2017. – Vol. 13, № 10. – P. 6619–6634.

44. Smart tree: An architectural, greening and ICT multidisciplinary approach to smart campus environments. / [S. Fortes, N. Hidalgo-Triana, J.-M. Sánchez-la-Chica et al.] // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 21. – P. 1-27.

45. Applying an integrated system of cloud management and wireless sensing network to green smart environments—green energy monitoring on campus. / [K.-H. Tseng, M.-Y. Chung, L.-H. Chen et al.] // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, № 17. – P. 1-15.
46. Lavanya, A. IoT-enabled green campus energy management system. / A. Lavanya, M. Jeevitha, M. A. Bhagyaveni // *International Journal of Embedded Systems and Applications*. – 2019. – Vol. 9, № 2. – P. 21–35.
47. IoT platform for energy sustainability in university campuses. / [P. Moura, J. I. Moreno, G. López López et al.] // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, № 2. – P. 1-22.
48. Toutouh, J. A low cost IoT cyber-physical system for vehicle and pedestrian tracking in a smart campus. / J. Toutouh, E. Alba // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, № 17. – P. 1-17.
49. Fostering environmental awareness with smart IoT planters in campuses. / [B. Tabuenca, V. García-Alcántara, C. Gilarranz-Casado et al.] // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, № 8. – P. 1-19.
50. RevoCampus: A distributed open source and low-cost smart campus. / [O. Debauche, R. A. Abdelouahid, S. Mahmoudi et al.] // *Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet): 3rd International conference, Marrakech, 4-6 September 2020: proceedings*. – Marrakech, Morocco, 2020. – P. 1-10.
51. Framework for a Green Campus-LoRa™-Based Low-Power Smart Water Management for Campus. / [S.V. Siddamal, V. Talikoti, P. Umrani et al.] // *ICTCS 2020: Information and Communication Technology for Competitive Strategies, 11-12 December 2020: proceedings*. – Jaipur, India, 2020. – P. 363-371.
52. Design and experimental validation of a LoRaWAN fog computing based architecture for IoT enabled smart campus applications. / [P. Fraga-Lamas, M. Celaya-Echarri, P. Lopez-Iturri et al.] // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19, № 15. – P. 1-30.
53. Raspberry Pi [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.raspberrypi.com>.

54. Orange Pi [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.orangepi.org/>.
55. ODROID-M2 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.hardkernel.com>.
56. ROCK Pi 4 [Electronic resource]. – Access mode: <https://wiki.radxa.com/Rockpi4>.
57. Espressif product selector [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.espressif.com/en/products/modules>.
58. Мікроконтролер Arduino Nano 33 IoT [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/prod6292-arduino-nano-33-iot-with-headers>.
59. Microcontroller Stm32f401 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f401re.html>.
60. LoRa [Electronic resource]. – Access mode: <https://lanmarket.ua/entsiklopediya/besprovodnye-tekhnologii/lora.html>.
61. Що таке Zigbee? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dusuniot.com/uk/blog/what-is-zigbee>.
62. Semtech Product Selector [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.semtech.com/design-support/product-guides>.
63. Home Assistant [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.home-assistant.io/>.
64. OpenHAB [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.openhab.org/>.
65. ioBroker - Open source automation platform [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.iobroker.net>.
66. Home automation Hubitat [Electronic resource]. – Access mode: <https://hubitat.com>.
67. Home Assistant addons [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.home-assistant.io/addons>.

68. Home Assistant integration [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.home-assistant.io/getting-started/integration>.

69. MicroPython [Electronic resource]. – Access mode: <https://micropython.org>.

70. Для чого використовують C++ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://apeps.kpi.ua/dlia-choho-vykorystovuiut-cpp>

71. Мова програмування C [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://yevshan.com.ua/info/007/content/content2.html>.

72. Lua RTOS [Electronic resource]. – Access mode: <https://github.com/whitecatboard/Lua-RTOS-ESP32>.

73. JavaScript and Espruino [Electronic resource]. – Access mode: <https://dev.to/francesco/rock-the-iot-world-with-javascript-and-espruino-3o44>.

ДОДАТОК А
Текст програми

A.1 Текст програми вузлових пристроїв

```

#include <Arduino.h>
#include <INA219.h>
#include <esp_log.h>
#include <Wire.h>
#include "main.h"

// Піни
#define PIN_ACTION_BUTTON 36
#define PIN_BATTERY 36
#define PIN_SENSOR_A4 32
#define PIN_SENSOR_A5 33
#define PIN_RADIO_RXEN 25
#define PIN_RADIO_TXEN 25
#define PIN_CONTROL 27
#define PIN_STATUS_LED 2

// Ініціалізація об'єкта INA219
INA219 ina219;

// Розміри панелі (у метрах)
const float panelWidth = 0.08; // ширина панелі (8 см)
const float panelHeight = 0.14; // висота панелі (14 см)
const float panelArea = panelWidth * panelHeight; // площа панелі
(m²)

/**
 * Ініціалізація датчика INA219
 */
void initializeSensor() {

```

```

    if (!ina219.begin()) {
        ESP_LOGE("INA219", "Помилка ініціалізації INA219");
    } else {
        ESP_LOGD("INA219", "INA219 успішно ініціалізовано");
    }
}

/*Функція для вимірювання сонячної радіації*/
float getSolarRadiation() {
    float current_mA = ina219.getCurrent_mA(); // Ток у мА
    float voltage_V = ina219.getBusVoltage_V(); // Напруга у В
    // Потужність панелі у Вт
    float power_W = (current_mA / 1000.0) * voltage_V;
    // Сонячна радіація у Вт/м²
    float solarRadiation = power_W / panelArea;
    ESP_LOGD("SOLAR", "Ток: %.2f мА, Напруга: %.2f В, Потужність:
%.2f Вт, Радіація: %.2f Вт/м²",
        current_mA, voltage_V, power_W, solarRadiation);
    return solarRadiation;
}

/** Таймер для управління світлодіодом */
Ticker ledTimer;
dataMsg transmissionData;
nodesList routingNode;
uint32_t nodeIdentifiers[48];
uint32_t firstHops[48];
uint8_t hopCounts[48];
uint8_t totalNodes;
char transmissionBuffer[512] = {0};

```

```

boolean routingListUpdated = false;

float previousSolarRadiation = 0.0; // Зберігання попереднього
значення радіації

void deactivateLED(void)
{
#ifdef IS_WROVER || defined(RED_ESP)
    digitalWrite(PIN_STATUS_LED, HIGH);
#else
    digitalWrite(PIN_STATUS_LED, LOW);
#endif
}

void Setup()
{
    pinMode(PIN_STATUS_LED, OUTPUT);
    digitalWrite(PIN_STATUS_LED, LOW);
    ESP_LOGD("INIT", "Початок конфігурації системи");
    uint8_t macAddress[8];
    retrieveDeviceUniqueId(macAddress);
    uniqueDeviceID += (uint32_t)macAddress[2] << 24;
    uniqueDeviceID += (uint32_t)macAddress[3] << 16;
    uniqueDeviceID += (uint32_t)macAddress[4] << 8;
    uniqueDeviceID += (uint32_t)macAddress[5];
    ESP_LOGD("INIT", "Node ID: %08lX", uniqueDeviceID);
#ifdef HAS_DISPLAY
    initializeDisplay();
#endif
    if (!initializeLoRa())
    {

```

```

        ESP_LOGE("INIT", "Помилка ініціалізації LoRa!");
    }

    // Ініціалізація датчика INA219
    initializeSensor();
}

void loop()
{
    delay(100);
    // Вимірювання сонячної радіації
    float solarRadiation = getSolarRadiation();
    ESP_LOGD("MAIN", "Сонячна радіація: %.2f Вт/м²", solarRadiation);
    // Умови на основі зміни значення радіації
    if (fabs(solarRadiation - previousSolarRadiation) > 0.10) {
        previousSolarRadiation = solarRadiation;
        if (random(0, 10) > 5) {
            transmissionData.marker1 = 'L';
            transmissionData.marker2 = 'o';
            transmissionData.marker3 = 'R';
            generateBroadcastID();
            transmissionData.destination = generateBroadcastID();
            transmissionData.source = uniqueDeviceID;
            transmissionData.messageType = LORA_BROADCAST;
            ESP_LOGD("LOOP", "Широкомовне повідомлення ID %08X",
transmissionData.destination);

            int messageLength = HEADER_SIZE + sprintf((char
*)transmissionData.payload, ">>BR from %08X<<", uniqueDeviceID);
            if (!queueTransmission(&transmissionData, messageLength))
            {
                ESP_LOGE("LOOP", "Помилка надсилання повідомлення");
            }
        }
    }
}

```

```

    } else {
        if (xSemaphoreTake(routingListAccess, (TickType_t)1000)
== pdTRUE) {
            totalNodes = getNodeCount();
            if (getNodeCount() >= 2) {
                getRoutingPath(nodeIdentifiers[random(0,
totalNodes)], &routingNode);
                xSemaphoreGive(routingListAccess);
                transmissionData.marker1 = 'L';
                transmissionData.marker2 = 'o';
                transmissionData.marker3 = 'R';
                if (routingNode.firstHop != 0) {
                    transmissionData.destination =
routingNode.firstHop;
                    transmissionData.source = routingNode.nodeID;
                    transmissionData.messageType = LORA_FORWARD;
                    ESP_LOGD("LOOP", "Маршрут до вузла через хоп
%08X", routingNode.firstHop);
                } else {
                    transmissionData.destination =
routingNode.nodeID;
                    transmissionData.source = uniqueDeviceID;
                    transmissionData.messageType = LORA_DIRECT;
                    ESP_LOGD("LOOP", "Пряме повідомлення до %08X",
transmissionData.destination);
                }
                int messageLength = HEADER_SIZE + sprintf((char
*)transmissionData.payload, ">>%08X<<", uniqueDeviceID);
                if (!queueTransmission(&transmissionData, messageLength)) {
                    ESP_LOGE("LOOP", "Помилка надсилання повідомлення");
                }
            } else {

```

```

        xSemaphoreGive(routingListAccess);
        ESP_LOGD("LOOP", "Недостатньо вузлів у списку");
    }
    } else {
ESP_LOGE("LOOP", "Неможливо отримати доступ до списку вузлів");
    }
}

    }

    if (routingListUpdated) {
        routingListUpdated = false;
        ESP_LOGD("LOOP", "Оновлення списку вузлів");
        if (xSemaphoreTake(routingListAccess, (TickType_t)1000) ==
pdTRUE) {
            totalNodes = getNodeCount();
#ifdef HAS_DISPLAY
                updateDisplayHeader();
                char displayLine[128];
                sprintf(displayLine, "%02X%02X", (uint8_t)(uniqueDeviceID
>> 24), (uint8_t)(uniqueDeviceID >> 16));
                writeDisplay(displayLine, 0, 11);
#endif

                for (int index = 0; index < totalNodes; index++) {
                    fetchNodeDetails(index, nodeIdentifiers[index],
firstHops[index], hopCounts[index]);
                }
                xSemaphoreGive(routingListAccess);
                ESP_LOGD("LOOP", "%d вузлів у списку", totalNodes + 1);
                ESP_LOGD("LOOP", "Вузол #01 ID: %08X", uniqueDeviceID);
                for (int index = 0; index < totalNodes; index++) {
                    if (firstHops[index] == 0) {

```

```

        ESP_LOGD("LOOP", "Вузол #%02d ID: %08X пряме
з'єднання", index + 2, nodeIdentifiers[index]);

    } else {

        ESP_LOGD("LOOP", "Вузол #%02d ID: %08X перший хоп
%08X кількість хопів %d", index + 2, nodeIdentifiers[index],
firstHops[index], hopCounts[index]);

    }

}

#ifdef HAS_DISPLAY

    refreshDisplay();

#endif

    } else {

        ESP_LOGE("LOOP", "Неможливо отримати доступ до списку
вузлів");

    }

}

}

void processData(uint32_t sourceID, uint8_t *receivedPayload,
uint16_t payloadSize, int16_t receivedRssi, int8_t receivedSnr)
{
    ESP_LOGD("LORA", "Дані отримані від вузла %08X", sourceID);
    for (int index = 0; index < payloadSize; index++) {
        ESP_LOGD("LORA", "%02X", receivedPayload[index]);
    }
    ESP_LOGD("LORA", "%s", receivedPayload);

#ifdef IS_WROVER || defined(RED_ESP)
    digitalWrite(PIN_STATUS_LED, LOW);
#else
    digitalWrite(PIN_STATUS_LED, HIGH);
#endif
}

```

```
#endif
#ifdef ESP32
    ledTimer.detach();
    ledTimer.once(1, deactivateLED);
#else
    timer.attachInterrupt(&deactivateLED, 1000 * 1000);
#endif
}

void onRoutingListUpdate(void)
{
    routingListUpdated = true;
}
```

ДОДАТОК Б
Слайди презентації



Рисунок Б.1 – Слайд 1



Рисунок Б.2 – Слайд 2




АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

Зелений університет (Green University, GU) – це концепція, яка передбачає інтеграцію принципів сталого розвитку та інноваційних технологій для збільшення екологічної відповідальності через впровадження енергоефективних технологій та раціонального використання ресурсів.

Основні показники методології

Налаштування та інфраструктура	Енергетика та зміна клімату
Відходи	Вода
Транспорт	Освіта та дослідження


3

Рисунок Б.3 – Слайд 3




АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ



Велика когенераційна установка



Синхронні генератори



Мала когенераційна установка



Автономний ліхтар



Система моніторингу теплопостачання

4

Рисунок Б.4 – Слайд 4



МЕТА ТА ЗАВДАННЯ РОБОТИ

Мета роботи – дослідження та розробка архітектури цифрової платформи зеленого університету та підсистеми збору та передачі даних для підвищення енергоефективності.

Завдання роботи:

- дослідити існуючі підходи до реалізації цифрової платформи ЗУ;
- проаналізувати структурні та функціональні особливості цифрової платформи ЗУ;
- виконати аналіз вимог та розробити архітектуру цифрової платформи ЗУ;
- обрати технології та інструментарій розробки підсистеми збору та передачі даних цифрової платформи;
- розробити підсистему збору та передачі даних цифрової платформи;
- провести тестування та оцінити результати роботи розробленого рішення.

5

Рисунок Б.5 – Слайд 5



ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДХОДІВ ДО РЕАЛІЗАЦІЇ ПЛАТФОРМИ

Опис	Основний контролер для даних	Технологія	Сервер
Новий інтегрований підхід до простору кампусу для моніторингу та доплат	ESP32	BLE	Local (Raspberry Pi)
Моніторинг зеленої енергії на кампусі	-	LoRa	-
Архітектуру зеленої системи енергоменеджменту кампусу на основі IoT	ESP32	Wi-Fi	Cloud
Платформа Інтернету речей (IoT) на основі інфраструктури бездротової сенсорної мережі для моніторингу	ESP32	Wi-Fi	Local (Raspberry Pi)
Вивчення поведінки людей і оцінювання забруднення у кампусі на основі інтелектуального Smart City	Raspberry Pi	Wi-Fi	-
Архітектура екосистеми IoT яка може бути реалізована у різних навчальних закладах	ESP32	Wi-Fi	Local (RPI's board)
Рішення Smart Campus на платформі інтероперабельних протоколів "розумного дому"	ESP32	LoRa	Local (Raspberry Pi)
Система розумного управління водними ресурсами на основі технології LoRa для кампусів	ATmega328P	LoRa	-
Архітектура на основі туманних обчислень LoRaWAN для забезпечення безпеки даних на кампусі	-	LoRaWAN	Cloud

6

Рисунок Б.6 – Слайд 6



Рисунок Б.7 – Слайд 7

Технологія	Дальність	Швидкість	Енергоспоживання	Топологія мережі
LoRa	До кількох кілометрів	Низька (декілька кбіт/с)	Дуже низьке	Зіркова, сітчаста
Wi-Fi	До 100 метрів в приміщенні	Висока (до кількох сотень Мбіт/с)	Середнє	Зіркова
ESP-NOW	До 100 метрів	Середня (до кількох Мбіт/с)	Низьке	Зіркова
Zigbee	До 100 метрів	Середня (до 250 кбіт/с)	Низьке	Сітчаста
Bluetooth	До 10 метрів	Середня (до 1 Мбіт/с)	Низьке	Зіркова, кільцева
NB-IoT	До кількох кілометрів	Дуже низька (кілька кбіт/с)	Дуже низьке	Сітчаста

8

Рисунок Б.8 – Слайд 8




АНАЛІЗ ТА ВИБІР ІНСТРУМЕНТАРІЮ РОЗРОБКИ

Назва інструменту	Platform	Language	License	Author
Arduino IDE	Windows, Mac OS, Linux	C++	GPL	Arduino
Visual Studio Code	Windows, Mac OS, Linux	C++, Python, JavaScript	MIT	Microsoft
IntelliJ IDEA	Windows, Mac OS, Linux	Java	Commercial	JetBrains
Eclipse IDE	Windows, Mac OS, Linux	Java	GPL	Eclipse Foundation
NetBeans IDE	Windows, Mac OS, Linux	Java	GPL	Oracle
Android Studio	Windows, Mac OS, Linux	Java, Kotlin	Apache License	Google
Xcode	Mac OS	Swift, Objective-C	Apple License	Apple

Назва інструменту	Platform	Language	License	Author
Arduino IDE	Windows, Mac OS, Linux	C++	GPL	Arduino
Visual Studio Code	Windows, Mac OS, Linux	C++, Python, JavaScript	MIT	Microsoft
IntelliJ IDEA	Windows, Mac OS, Linux	Java	Commercial	JetBrains
Eclipse IDE	Windows, Mac OS, Linux	Java	GPL	Eclipse Foundation
NetBeans IDE	Windows, Mac OS, Linux	Java	GPL	Oracle
Android Studio	Windows, Mac OS, Linux	Java, Kotlin	Apache License	Google
Xcode	Mac OS	Swift, Objective-C	Apple License	Apple

Назва інструменту	Platform	Language	License	Author
Arduino IDE	Windows, Mac OS, Linux	C++	GPL	Arduino
Visual Studio Code	Windows, Mac OS, Linux	C++, Python, JavaScript	MIT	Microsoft
IntelliJ IDEA	Windows, Mac OS, Linux	Java	Commercial	JetBrains
Eclipse IDE	Windows, Mac OS, Linux	Java	GPL	Eclipse Foundation
NetBeans IDE	Windows, Mac OS, Linux	Java	GPL	Oracle
Android Studio	Windows, Mac OS, Linux	Java, Kotlin	Apache License	Google
Xcode	Mac OS	Swift, Objective-C	Apple License	Apple

11

Рисунок Б.11 – Слайд 11



Рисунок Б.12 – Слайд 12



Рисунок Б.13 – Слайд 13



Рисунок Б.14 – Слайд 14



Рисунок Б.15 – Слайд 15



Рисунок Б.16 – Слайд 16



Рисунок Б.17 – Слайд 17

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Назва	Використані значення	Опис вибору	Можливі значення
Фактор розповсюдження	7	Забезпечує баланс між дальністю і швидкістю	6-12
Пропускна здатність	250 кГц	Ширина для кращої швидкості передачі даних	7.8 кГц-500 кГц
Швидкість кодування мережі	4/5	Покращує стійкість до шуму	4/5 – 4/8
Довжина преамбули	8	Мінімальна для середніх відстаней	6-12
Розмір даних	150	Розмір корисного навантаження в байтах	1-255

№	Сценарій тестування	Основні параметри	Результати
1	Втрата одного вузла	Час відновлення маршрутизації, успішність передачі повідомлень	Відновлення за 50 сек., зниження успішності на 10%
2	Відсутність Wi-Fi на сервері	Обмін повідомленнями між вузлами, буферизація даних	Продовження обміну, буфер до 2 МБ
3	Втрата зв'язку з мережею сенсорів	Доступність сервера, час відновлення	Сервер доступний, відновлення за 40 сек.
4	Відсутність інтернету на сервері	Збереження даних, обмін повідомленнями в мережі	Дані зберігаються локально, обмін не порушується
	Загальні результати	Успішність передачі, час відновлення, втрати даних	95% успішності, відновлення до 60 сек., менше 5% втрат

18

Рисунок Б.18 – Слайд 18




ВИСНОВКИ

Наукова новизна роботи полягає в розробці архітектури цифрової платформи, що відрізняється від існуючих набором компонентів та способом їх інтеграції, використовує сучасні IoT-технології, поєднує принципи енергоефективності та безпеки для вирішення задач сталого розвитку зеленого університету.

Практична цінність роботи полягає тому, що розроблена підсистема збору та передачі даних забезпечує збір локальних метеорологічних даних (показників сонячної активності та швидкості вітру), їх аналіз і збереження даних у локальній базі. Використання недорогих апаратних компонентів, таких як Raspberry Pi 3B+ та ESP32, а також інноваційного протоколу зв'язку LoRa робить рішення доступним і придатним до масштабування.

Подальші дослідження будуть спрямовані на реалізацію повного функціоналу цифрової платформи, зокрема на інтеграцію із моделями прогнозування та аналітики.

19

Рисунок Б.19 – Слайд 19




Перелік публікацій

- Туленков, А.В. Аналіз методів та засобів інтелектуального проєктування систем життєзабезпечення / А.В.Туленков, А.В.Пархоменко // Тиждень науки-2024: Щорічна НПК викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів та студентів, Запоріжжя, 15-19 квітня 2024: тези доповідей. – Запоріжжя, НУЗП, 2024. – С. 87.
- Туленков, А.В. Дослідження та реалізація технології LoRa для цифрової платформи зеленого університету / А.В.Туленков, А.В.Пархоменко // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: XII Міжнародна НПК, Запоріжжя, 10-12 грудня 2024: тези доповідей. – Запоріжжя, НУЗП, 2024. – С. (подано до друку).

20

Рисунок Б.20 – Слайд 20