ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Система терморегуляції серверного обладнання з підтримкою автономного живлення»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Комп'ютерна інженерія
(назва)

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

_____ Денис БОЛКУН
(підпис) Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача

Виконав: здобувач(ка) вищої освіти гр. КІД-42
Денис БОЛКУН
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник: Борис КОНДРАТЮК
науковий ступінь, Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
вчене звання

Рецензент: _____
науковий ступінь, Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
вчене звання

Київ 2026

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра Комп'ютерної інженерії
Ступінь вищої освіти: бакалавр
Спеціальність: 123 Комп'ютерна інженерія
Освітньо-професійна програма: Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедрою _____
_____ Ім’я, ПРІЗВИЩЕ
«____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Болкуна Денис Олександровича
(прізвище, ім’я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Система терморегуляції серверного обладнання з підтримкою автономного живлення,

керівник кваліфікаційної роботи Кондратюк Борис Олександрович, викладач,
(Ім’я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 20.02.2026 р. № 51

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «___» _____ 2026 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: Серверне обладнання (вентилятори 4 pin ШІМ-керуванням), резервне джерело живлення постійного струму на базі LiFePO4 акамуляторів, мікроконтролерна платформа ESP32, датчики мікроклімату та температури (BME280, DHT22, DS18B20), модулі моніторингу електроживлення (ZMPT101B, INA219), мережевий протокол MQTT, середовище апаратно-програмної симуляції Wolwi.

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

1. Дослідження впливу температурних режимів на серверне обладнання,огляд систем кліматконтролю та технології автономного живлення.
2.Розробка підсистеми моніторингу живлення.
3.Створення блок-схеми та алгоритмів штатного й адаптивного охолодження на основі ШІМ-керування.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація, структурна схема мікропроцесерноїсистеми, блок-схеми алгоритмів роботи, порівняльні таблиці.*

6. Дата видачі завдання «___» _____ 20__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір та аналіз літературних джерел, вивчення стандартів (ASHRAE TC 9.9) та існучих систем охолодження	15.03-25.03.2026	Виконано
2	Обгрунтування вибору мікроконтролера EPS32, датчиків та модулів живлення.	25.03-26.03.2026	Виконано
3	Розробка структурної та принципової схеми системи адаптивного терморегулювання	27.03-03.04.2026	Виконано
4	Розробка алгоримів штатного та адаптивного охолодження на освнові рівнів заряду АКБ	04.04-20.04.2026	Виконано
5	Програмна реалізація системи, MQTT-протокол та обмін даними з сервером.	20.04-30.04.2026	Виконано
6	Тестування контуру терморегуляції в середовищі Wokwi аналіз отриманих результатів.	01.05-10.05.2026	Виконано
7	Оформлення ілістраційного матеріалу та подання роботи на кафедру.	11.05-.05.2026	Виконано

Здобувач(ка) вищої освіти _____ Денис Болкун

(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник

кваліфікаційної роботи _____ Борис КОНДРАТЮК

(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра: _____ стор., _____ рис., ____ табл., 25 джерел.

Мета роботи - розробка комплексної енергоефективної системи терморегуляції з підтримкою безперебійного живлення для забезпечення безперервної роботи серверного обладнання в умовах довготривалих відключень електромережі.

Об'єкт дослідження - процес терморегуляції та забезпечення роботоздатності серверного обладнання в умовах нестабільного електропостачання.

Предмет дослідження - апаратно-програмні засоби та алгоритми керування адаптивною системою терморегуляції сервера з використанням мікроконтролерної платформи, датчиків мікроклімату та ШІМ-управління.

Короткий зміст роботи: У роботі проведено аналіз існуючих систем клімат-контролю та резервного живлення телекомунікаційних шаф і дата-центрів. Виявлено проблему надмірного споживання енергії класичними системами охолодження під час блекаутів. Запропоновано апаратно-програмне рішення на базі мікроконтролера ESP32, що інтегрує датчики мікроклімату (DHT22, BME280), моніторинг температури акумуляторів (DS18B20) та модулі контролю живлення (ZMPT101B, INA219). Розроблено багаторівневий адаптивний алгоритм охолодження, який динамічно змінює інтенсивність роботи вентиляторів за допомогою ШІМ-сигналу залежно від наявності мережі 220В та залишкового заряду LiFePO4 акумуляторів. Проведено ізольоване тестування контуру терморегуляції у середовищі Wokwi.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТЕРМОРЕГУЛЯЦІЯ, СЕРВЕРНЕ ОБЛАДНАННЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР ESP32, АВТОНОМНЕ ЖИВЛЕННЯ, ШІМ-КЕРУВАННЯ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (IoT), MQTT, LiFePO4.

ЗМІСТ

ВСТУП..... 8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ВИРІШЕНЬ ПИТАНЬ...... 11
1.1 Надійність та продуктивність серверного обладнання з впливом температури на систему. 11
1.2 Класичні систем охолодження в серверних кімнатах та телекомунікаційних шафах. 13
1.3 Особливості функціонування систем резервного та автономного живлення. 17
1.4 Проблема надмірного споживання енергії системами клімат-контролю під час відключень електроенергії. 21
1.5 Вимоги до системи терморегуляції, що проєктується. 22
РОЗДІЛ 2. АПАРАТНЕ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ. 23
2.1 Розробка загальної схеми пристрою. 23
2.2 Вибір та обґрунтування мікроконтролерної платформи. 25
2.3 Підбір сенсорів та модулів управління. 29
2.4 Проєктування підсистеми моніторингу джерела живлення. 34
2.5 Розробка принципової електричної схеми системи. 37
РОЗДІЛ 3. АЛГОРЕФМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ...... 41
3.1 Розробка блок-схеми загального алгоритму роботи пристрою. 41
3.2 Алгоритм штатного охолодження (робота від основної мережі). 43
3.3 Алгоритм адаптивного/економного охолодження (автономне живлення та зниження обертів). 45
3.4 Програмна реалізація: опис структри коду, налаштуання переривань та роботи з датчиками. 46
ВИСНОВКИ 48

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах сучасних викликів, пов'язаних із систематичними атаками на енергетичну інфраструктуру та нестабільністю електромережі, забезпечення безперебійної роботи серверного обладнання є критично важливим завданням. Зростання обчислювальних потужностей сучасних серверів супроводжується пропорційним збільшенням тепловиділення, що створює постійний ризик перегріву та деградації компонентів (тротлінг, апаратні збої, втрата даних). Традиційні системи клімат-контролю споживають значну кількість енергії і характеризуються високими пусковими струмами компресорів, що створює надмірне навантаження на джерела безперебійного живлення (ДБЖ) під час блекаутів. У зв'язку з цим, розробка інтелектуальної, енергоефективної системи терморегуляції, здатної адаптуватися до джерела живлення та економити заряд резервних акумуляторів, є вкрай актуальним інженерним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика забезпечення температурних режимів та енергонезалежності серверного обладнання широко висвітлюється у працях вітчизняних та зарубіжних фахівців, а також регламентується міжнародними стандартами (наприклад, ASHRAE TC 9.9, Uptime Institute)[1,3]. Існують різноманітні рішення для охолодження дата-центрів: від класичних систем CRAC/CRAH до новітніх технологій Direct-to-Chip та імерсійного (занурюваного) охолодження. Однак більшість цих підходів орієнтована на великі промислові об'єкти з гарантованим централізованим живленням. Питання створення гнучких, мікроконтролерних систем охолодження для малих серверних кімнат та телекомунікаційних шаф, які могли б автономно змінювати алгоритми роботи залежно від залишкової ємності батарей (зокрема сучасних LiFePO4 елементів).

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є розробка комплексної енергоефективної системи терморегуляції з підтримкою безперебійного живлення для забезпечення безперервної роботи серверного

обладнання в умовах довготривалих відключень електромережі. Для досягнення поставленої мети було сформульовано та вирішено такі завдання:

– проаналізувати вплив температурних режимів на надійність серверів, а також дослідити існуючі системи охолодження та технології резервного живлення;

– обґрунтувати вибір оптимальної мікроконтролерної платформи, сенсорів мікроклімату та модулів моніторингу електроживлення;

– спроєктувати апаратну архітектуру та розробити принципову електричну схему системи із забезпеченням гальванічної розв'язки та узгодженням логічних рівнів;

– розробити блок-схему та алгоритми штатного й адаптивного (економного) охолодження на основі ШІМ-керування вентиляторами з урахуванням залишкового заряду АКБ (SoC);

– здійснити програмну реалізацію базового контуру терморегуляції, налаштувати мережеву взаємодію (MQTT) та провести ізольоване тестування розроблених алгоритмів у середовищі моделювання.

Об'єкт дослідження - процес терморегуляції та забезпечення роботоздатності серверного обладнання в умовах нестабільного електропостачання.

Предмет дослідження - апаратно-програмні засоби та алгоритми керування адаптивною системою терморегуляції сервера з використанням мікроконтролера ESP32, датчиків мікроклімату та ШІМ-управління.

Методи дослідження. У роботі використано методи системного аналізу (для дослідження предметної області та огляду технологій), методи схемотехнічного проєктування (для розробки принципових електричних схем), методи теорії автоматичного керування (для реалізації пропорційного ШІМ-регулювання та гістерезису), а також методи програмної інженерії, об'єктно-орієнтованого програмування та комп'ютерного моделювання (Unit-тестування).

Наукова новизна та практична значущість отриманих результатів. Наукова новизна полягає у розробці комплексного багаторівневого алгоритму охолодження, який динамічно адаптує температурні пороги телекомунікаційної

шафи залежно від поточного стану (State of Charge) резервної акумуляторної батареї, застосовуючи профілі енергозбереження (Eco, Deep Eco, Critical). Практична значущість роботи полягає у створенні готового до імплементації проєкту апаратно-програмного комплексу на базі доступної мікроконтролерної платформи ESP32. Система дозволяє відмовитися від енергоємних компресорів під час блекаутів, прецизійно керує швидкістю серверних вентиляторів без створення акустичного шуму.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 52 сторінки.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ВИРІШЕНЬ ПИТАНЬ.

1.1 Надійність та продуктивність серверного обладнання з впливом температури на систему.

На даний момент часу дата-центри та серверні кімнати є основою будь-якої інформаційної інфраструктури. Банальним прикладом є моє місце роботи яке не пов’язане ніяк з IT-сферою, але там також присутні сервери які потрібні для зберігання інформації і не тільки. Згідно зі стандартами таке обладнання повинно працювати цілодобово та безперервно, 24/7 як кажуть у суспільстві. Основною вимогою до таких систем є і буде надійність найвищого рівня, що часто ще класифікують як стандарт “п’ять дев’яток”[3]. При досягнені таких високих показників вимагається не тільки апаратне резервування компонентів а й дотримання умов експлуатації серверного обладнання серед яких є один основний це дотримання температурного режиму системи.

При роботі серверу, компоненти які встановленні в нашому обладнанні такі як процесори, оперативна пам’ять, жорсткі диски тощо, споживають “величезну” кількість енергії приблизно 95-100% перетворюється в тепло а лише невеличка частка тимчасово існує у вигляді електромагнітних сигналах, світла в індикаторах та механічної сили в вентиляторах. Тому ця проблема є не приємною особливо для маленьких сетапів або використання великого обладнання у маленьких закритих коморах. В приклад можна привести блейд-сервери (рис. 1.1) які встановлюють у спільне шасі для економія місця в серверних кімнатах, тим самим можна поставити більше обладнання в менш об’ємну кімнату. В той же час зростає і щільність тепловиділення на одиницю об’єму.



Рисунок 1.1 - блейд-сервери

Коли температурні норми відхиляються від рекомендованих настає момент коли сервери отримують гарний “удар” по компонентах та отримують негативний вплив від щільності тим самим знижується продуктивність так званий тротлінг. У наш час в більшості процесорів оснащенні термозахистом у такий спосіб при досягненні неприпустимої температури процесор починає знижувати свою ефективність заради його ж безпеки[4]. Що відбувається в цей момент ви хочете запитати, а я вам можу відповісти він починає знижувати свою тактову частоту та/або пропускає такти, як я вже говорив тротлінг, щоб зменшити власну температуру. Також ще існує такий варіант зниження температури як аварійне відключення за для збереження компонентів від перегрівання.

Деградація та скорочення терміну служби компонентів це невід’ємне у серверів які не виконують температурні норми. При роботі з підвищеними температурами напівпровідникові елементи скорочують свою тривалість життя в системі що призводить до відключення системи. Я знаю ще такий факт що при підвищенні на температури на кожні 10 °C вище норми призводить до скорочення їхнього терміну експлуатації приблизно вдвічі. Особливо боляче від перегріву всяким акумуляторам та джерелам безперебійного живлення також і магнітним накопичувачів для останніх це часто закінчується втратою інформації яка там знаходиться

Отже, як ми вияснили охолодження - це не проста річ якою можна нехтувати, а майже головний фактор про який потрібно дбати заради більшої ефективності, довго тривалості та стабільнішої роботи всього обладнання в серверних кімнатах.

1.2 Класичні систем охолодження в серверних кімнатах та телекомунікаційних шафах.

Зазвичай для охолодження та відведення зайвого тепла яке генерується під час роботи, використовують так звані системи клімат-контролю. З інформації яку було отримано, використання побутових приладів в серверних кімнатах не є ефективним рішенням, навіть напівпромислові системи інколи не здатні достатньо відводити тепло. Із побутових систем має ця на увазі кондиціонери які ставлять в квартирах для зниження температури повітря. Вони не розраховані на цілодобову роботу в довгій перспективі та і самі по собі вони сушать повітря чим наважають на небезпеку фахівці і саме обладнання, що створює ризик накопичення статичної електрики.

Тому для того щоб охолоджувати центри обробки даних, серверні кімнати або інше обладнання є таке рішення як традиційне кондиціювання (CRAC/CRAH)[2,5,6], працює в основному через фальшпідлогу. CRAC використовує компресори, а CRAH - холодну воду для тепло обміну. Це є напевно одна з найпростіших систем для монтажу та обслуговування, але вони підходять тільки для невеликих серверних. Але в таких системах є проблема зі змішуванням холодного та гарячого повітря, через цю проблему створюється зони перегріву та значно знижує ефективність при щільній постановці.



Рисунок 1.2 - Computer Room Air Conditioning (CRAC) for Data Centre “Canatec”

Периметральне охолодження це тип який утримує оптимальний баланс ефективності, надійності та має точний контроль мікроклімату. Система працює за принципом розміщення кондиціонерів вздовж стін та обов’язково повинна поєднуватись з фізичною ізоляцією “холодних” та “гарячих” коридорів. Єдине що потребує так це правильної геометрії кімнати та однакових стійок.

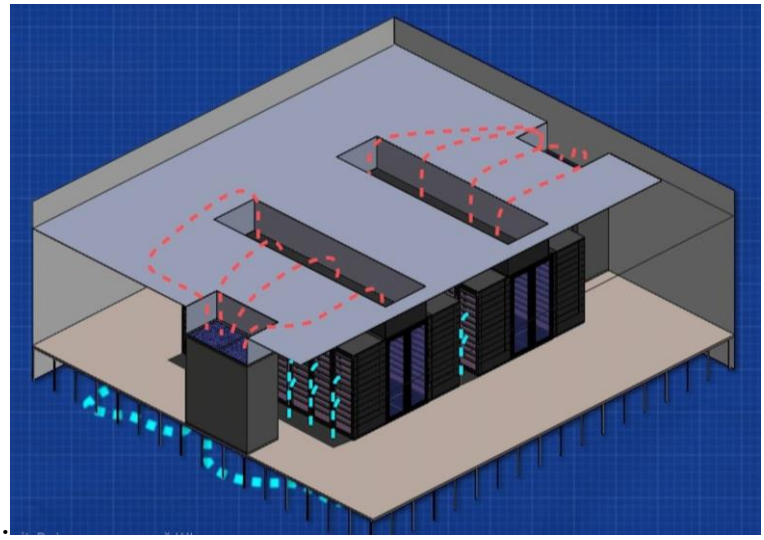


Рисунок 1.3. - Периметральне охолодження при використанні CRAC

Випарне охолодження працює за принципом випаровування води як не дивно. Цей процес відносно CRAH працює по іншому, тут гаряче повітря пропускається через такі вологі касети на які постійно подається звичайнісінька

вода. Тут процес схожий з тим як людина виходить з води, тепла, а висовуючись у повітря, вода починає випаровуватись зі шкіри та забирає тепло. Ця система була б чудовою для охолодження бо вона витрачає не багато електроенергії, але має величезні два мінус, вона потребує багато води, тому що вона випаровується прямо у повітря та потрібно щоб завжди був сухий клімат для максимальної ефективності.

Технологія прямого охолодження процесорів (Direct-to-Chip, D2C)[7] набуває неймовірної актуальності через різкий “бум” в сфері штучного інтелекту. Все більше серверів почали експлотуватись як звичайні промислові обчислювальні комплекси, хоча раніше вони були потужними серверами для зберігання або обробки великої кількості даних. Тому зараз Direct-to-Chip стає основним видом охолодження для інфраструктури штучного інтелекту. По самій суті воно не намагається охолодити все обладнання в стійці, воно тільки подає холодну рідину до пластинок які встановлені на графічних та звичайних процесорах. Це взагалі інший вид теплообміну, він не потребує великих кімнат та допомагає збільшити кількість стійок в результаті чого росте продуктивність. Холодні пластини можуть також охолоджувати інші елементи які потребують охолодження під час активної роботи, до таких можна віднести банальні модулі пам’яті, які в нас час є головним в побудові серверів зі штучним інтелектом.

Але такі системи не обходяться без проблем. Однією із трьох є гнучкість в реконструкції, тому що при збільшені тепловиділення в майбутньому, перебудувати шлях труб або взагалі схему охолодження буде майже неможливо. Також сильно впливає людський фактор при складанні такої складної системи, де маленька помилка буде коштувати дуже дорого. І з головних болей цієї системи є циркулювання охолоджувальної рідини поряд з дорогим обладнання, тому щоб все працювало в мирі та злагоді потрібно пильно слідкувати за станом труб та чистотою рідини.

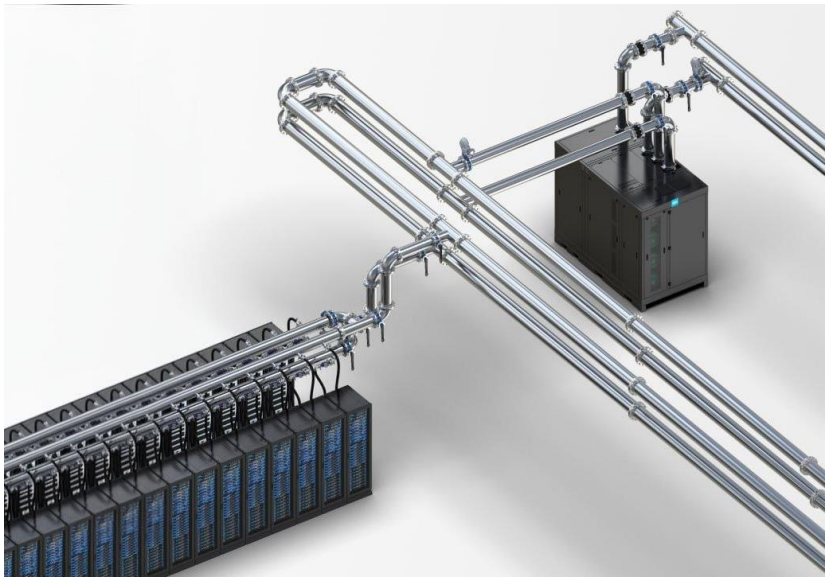


Рисунок 1.4 - Приклад обладнання для технології Direct-to-Chip

Та на останок закриває наш список новітнє однофазне занурюване охолодження[8]. Ця інновація неймовірна, сервер залитий повністю, по-голову, рідиною діелектриком, найчастіше з фторовмісними сполуками або також можуть і бути синтетичні вуглеводні олії. Цей метод має високу енергоефективність, тиху роботу в серверній кімнаті тому що тут немає вентиляторів, а все обладнання знаходиться в замкнутому резервуарі з рідиною яка тісно контактує з усіма елементами та швидко передає тепло. В то же час йде циркуляція через зовнішній теплообмінник за допомогою насосів. Також цей метод краще захищає плати від корозії, вологи та пилу яка на них діє в звичайних умовах що продовжує життя всієї системи. Єдине що не дає масово використовувати цей метод, це вартість та складність обслуговування занурених серверів.

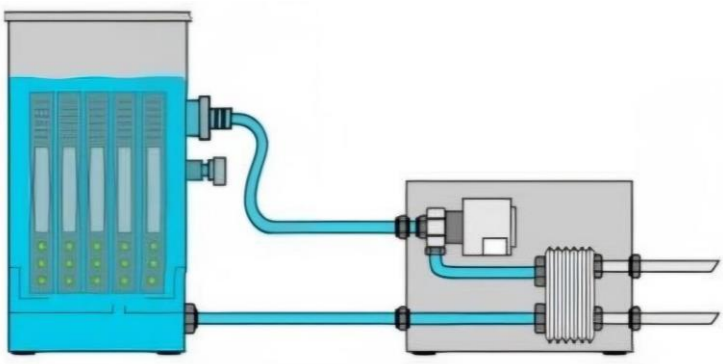


Рисунок 1.5 - Частина обладнання для технології однофазного занурення

1.3 Особливості функціонування систем резервного та автономного живлення.

В момент роботи серверного обладнання дуже великим фактором є безперервність системи, а з цим є великі проблеми через недостачу електроенергії в країні в наслідок атак сусідньої країна на підстанції. Внаслідок нестабільної роботи можуть бути проблеми зі збереженням даних, зупинки обчислювальних процесів, недоступність сервісів та найстрашнішим це деградація компонентів. З метою усунення ризиків знеструмлення системи та за для збереження даних обов'язково потрібно встановлювати незалежне живлення.

У дійсності процеси енергонезалежності діляться на два типи, резервне та автономне. Перше, резервне, в основному забезпечують генераторами. Особливість цих систем це тещо вони можуть підтримувати роботу досить довго, але вони кладуть на вівтар саме головне це час який їм потрібен для запуску та виходу на робочу потужність. Для таких моментів коли потрібна стабільна робота серверів, використовують друге, автономне, живлення щоб обладнання не вимикалось після вимкнення подачі напруги, вони так то мовить підхоплюють цей момент та надають навантаження з накопиченої електроенергії.

Цим вузлом в незалежності є ДБЖ (джерело безперебійного живлення). Він ще виступає як захист від перенавантаження, після відключення він отримує "удар" по собі, а не по техніці, тим самим є щитом від деградації елементів системи які чутливі до різких відключень. У пристроях такого роду спочатку заходить мережа яка "випрямляється" у постійний струм для зарядки батарей які встановлені в систему або в сам ДБЖ що є не доцільним у великих системах, про які в нас йде мова. А перегодом вбудований або вставлений в систему інвертор генерує змінний струм з ідеальної синусоїдною для живлення. У такій системі для перемикання треба менше ніж 10 мілісекунд на поновлення постачання, у тим спосіб забезпечує захист апаратури від стрибків, імпульсів чи відхилень частоти.



Рисунок 1.6 - APC Smart-UPS SRT 10000VA

Фундаментальним складником, що окреслює час це звісно ж самі батареї/накопичувачі енергії. Колись в давні роки, відносно, використовували свинцеві але на наш час вони не є раціональними та слушним рішенням бо нині присутні кращі літій-іонні (Li-ion) та літій-залізо-фосфатні (LiFePO4) елементи живлення [16]. У них характеристики мають гарні показники, з тривіального можна назвати що у них кількість циклів заряду та розряду більше ніж в минулих “поколіннях” тим самим вони довго триваліші, також вони мають вищу щільність енергії, здатність передавати великі струми, що робить вибір не складним. Хоча водночас яку б технологію не розглядати то вони всі чутливі до навколишніх середовищ.

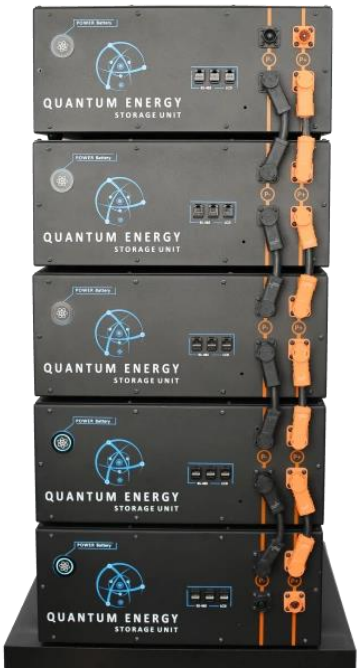


Рисунок 1.7 - Промисловий LiFePO4 акумулятор

Саме тут виникає технічний вузол під час проєктування систем автономного живлення, що потребує вирішення. Всі кондиціонери та чилери характеризуються величезним стартовим струмом та високим безперервним споживанням. Це створює вкрай небезпечну ситуацію під час блекаутів.

Таблиця 1.1 - Порівняльний аналіз мікроконтролерних платформ

Характеристика	**Свинцево-кислотні (VRLA / AGM)**	**Літій-іонні (Li-ion NMC)**	**Літій-залізо-фосфатні (LiFePO4)**
Кількість робочих циклів	300 – 500	1000 – 2000	3000 – 6000+
Допустима глибина розряду (DoD)	До 50% (глибший розряд вбиває АКБ)	До 80-90%	До 95-100%
Чутливість до температур	Дуже висока. Деградують при температурі >25°C	Висока. Є ризик термічного розгону (загоряння)	Низька. Стабільно працюють до +60°C
Час повної зарядки	8 – 12 годин	2 – 4 години	1 – 3 години
Питома щільність енергії	Низька (30-50 Вт·год/кг), дуже важкі	Найвища (150-250 Вт·год/кг), легкі	Середня (90-120 Вт·год/кг)
Вартість за 1 кВт·год	Найнижча	Висока	Середня / Висока

Згідно з даними таблиці, застарілі акумулятори типу VRLA є економічно та технічно неефективними для сучасних умов частих відключень через довгий час заряджання (до 12 годин) та швидку деградацію при підвищених температурах.

Найбільш доцільним вибором для резервування серверного обладнання є літій-залізо-фосфатні (LiFePO4) батареї. Незважаючи на дещо більшу вартість порівняно зі свинцевими аналогами, вони мають найвищий ресурс, надзвичайно швидко заряджаються та, що найважливіше для даного проєкту, є абсолютно пожежобезпечними і термічно стабільними.

1.4 Проблема надмірного споживання енергії системами клімат-контролю під час відключень електроенергії.

Дивлячись на статистку з інтернету щоб заживити системи клімат контролю потрібно витрачати більше ніж одну третю всього енергоспоживання серверної кімнати, тому інженери стикаються з економічною проблемою забезпечення безперебійного живлення у системах охолодження. В таких випадках зарезервувати велику потужність за допомогою акумуляторів не є найкращим рішенням дивлячись на те як працюють холодильні пристрої.

Пускові струми, це те що стає головною проблемою. При запуску компресорного двигуна споживання завжди перевищує стандартне значення на у 3, або навіть у 7 разів. В випадках які ми розглядаємо впровадження безперебійної системи, цей стрибок може привести до перенавантаження інвертора і скоріше його відключення від аварії, що саме страшне знеструмить і саме обладнання серверу. Внаслідок ми маємо стандартне рішення для проєктування, це ДБЖ чисто для обчислювальних машин. Системи охолодження та кондиціонування знеструмленими.

Як ми вже вище писали сучасні серверні шафи характеризуються високою щільністю тепловиділення. Ти самим при зупинці, відключення електроенергії, та при продовженні функціональності серверу, тепло яке виділялось не має шляхів для відведення. Температура починає зростати і починає досягти критичних позначок за 10 – 15 хвилин. Дорогі масиви виявляються марними по причині виходу з ладу обладнання раніше ніж вичерпується заряд батарей.

Вирішення цієї проблеми вимагає розробки енергоефективної системи охолодження, яка б мала мінімальне енергоспоживання.

1.5 Вимоги до системи терморегуляції, що проєктується.

Головне завдання при проєктуванні системи є забезпечення нормального температурного режиму в умовах автономного живлення, в той же час мінімізувати витрати енергії під час роботи обладнання від акумуляторів.

Для вирішення завдання поставленого на початку роботи, спроєктована система повинна відповідати технічним та функціональним критеріям:

– адаптивність до джерела живлення: Система повинна розпізнавати стан електромережі та рівень заряду батарей;

– багаторівневий алгоритм охолодження: Робота від мережі повинна максимально підтримувати ідеальний стан мікроклімату та в економному режимі під час відключень, де невеличке підвищення температури буде допустиме заради довшої роботи акумуляторів;

– енергоефективність апаратної частини: відмова від використання компресорів з високими пусковими струмами;

– мікроконтролерне управління: Базою системи буде сучасний мікроконтролер який буде зчитувати дані з масиву датчиків, обробляти їх та генерувати ШІМ-сигнали для управління вентилятором;

– точність вимірювання: Наявність датчиків контролю за мікрокліматом;

– IoT-інтеграція: Система повинна буде мати інтерфейс де будуть відображатись стан системи, також алгоритм сповіщення неполадок.

РОЗДІЛ 2. АПАРАТНЕ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ.

2.1 Розробка загальної схеми пристрою.

В той час коли проєктується будь-яка мікропроцесорна система, початком її роботи завжди є схема структури. Вона дозволяє визначити головні місця системи, їхнє призначення та принципи взаємодії. Зазвичай архітектура термогуляції будують за принципом модулів, який забезпечує гнучкість у роботі з налаштуванням. Основним, також його називають центральним елементом архітектури є мікроконтролер, який збирає всю інформацію та координує. Надалі, в наступних пунктах, буде більш детально про контролери, тому перейдемо до самої схеми та побудови її (рис.2.1).

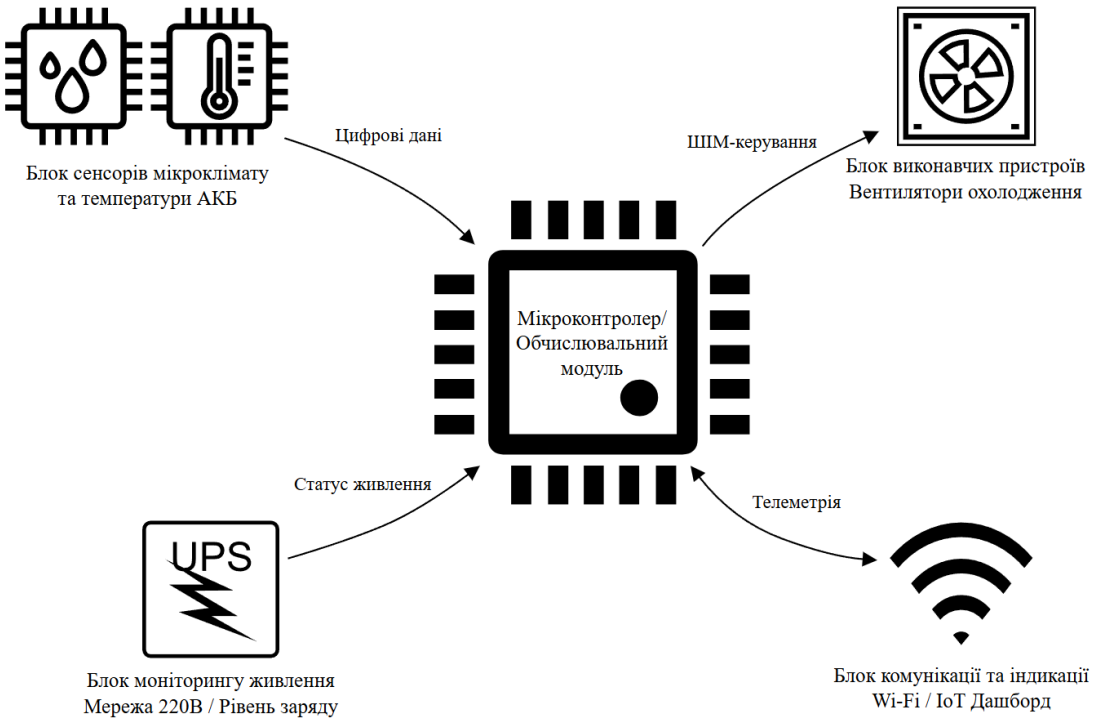


Рисунок 2.1 - Схема мікропроцесорної системи.

Взаємодія між усіма вузлами системи яку ми маємо вище, відбувається за принципом циклічного опитування та безперервного зворотного зв’язку між

собою. Всі ці процеси можна розділити на етапи: збір інформації, аналіз стіну, виконання дій та передача телеметрії.

Перший та найважливіший етап, - це збір усіх даних з датчиків, як це виглядає? Та дуже просто мікроконтролер з певною періодичністю звертається до блоку сенсорів. По шинах даних він отримує актуальні показники температури та вологості з самої шафи, а також і батарей які гріються, це робиться за для зберігання їхньому термічному пошкодженню. Одночасно йде запит і до блоку моніторингу живлення, отримуючи відповідь, ми бачимо наявність напруги та дані про стан заряду акумуляторів.

Другим, є обробка та прийнята рішень, головне завдання яке дається мікропроцесору, це визначення поточного процесу роботи інфраструктури. У випадку якщо система фіксує наявність основної мережі живлення то мікроконтролер активує звичайний режим охолодження. Згідно якщо відбувається протилежне, приходить сигнал про знеструмлення, роботу саме від АКБ, то процесор проходить у режим адаптивного енергозбереження.

Третє, керування виконавчими пристроями, візьмем у приклад вентилятори, на основі отриманої інформації робить аналогічне рішення, він генерує сигнал широтно-імпульсної модуляції. Цей сигнал подається до блоку пристроїв. Змінюючи ширину імпульсу, мікроконтролер плавно піднімає або знижує швидкість обертання вентиляторів. Тим самим ми можемо точково контролювати весь процес.

Четверте та останнє, це комунікація та оповіщення, тут все дуже просто отримані результати за допомогою wi-fi модуля який вбудований у систему підтримує зв’язок із дашбордом. Усі дані зібрані під час роботи утворюють пакети даних і відправляють їх на сервер. Це дозволяє адміністраторам контролювати стан всього обладнання в режимі real-life та отримувати сповіщення в разі критичних ситуацій або несправностей системи.

Таким чином ми отримуємо розроблену схему яка забезпечує повний цикл автономного контролю за мікрокліматом із дистанційними можливостями.

2.2 Вибір та обґрунтування мікроконтролерної платформи.

Центральним головним компонентом є мікроконтролер, який повинен виконувати роль інтелекту для збору даних, управління пристроями та мережевої взаємодії, як вже говорили вище. Для вибору оптимального платформи було проведено аналіз трьох найпопулярніших рішень: Arduino, STM32 та EPS32.

Основним критеріями для вибору були: вбудований Wi-Fi модуль (заради IoT-функціоналу), кількість каналів ШІМ, обчислювальна потужність та енергоефективність.

Для розгляду першим ділом підпало одне з найпопулярніших рішень, це Arduino, а саме плати в основі яких сікроконтролери ATmega328P(рис.2.2.1) або ATmega2560. Їхнею перевагою є і буде простота програмування та величезна кількість різних цікавих бібліотек у її використанні. Проте вони не такі і ідеальні як можуть здатись на перший погляд. Одні з критичних недоліків є обчислювальна потужність у розмірі 16 МГц та вкрай малий обсяг оперативної пам’яті, від 2 до 8 КБ SRAM, що роблять неможливим її використання зі сучасними протоколами обміну даних такі як MQTT поверх TSL/SSL. Також крім цього вони не мають вбудованого апаратно-мережевого інтерфейсу для підключення до мережі. Ускладнювати схему не є гарним рішенням бо в наслідок таких “апгрейдів” з’являються нові точки відмови.



Рисунок 2.2 - Плата Arduino UNO R3 (ATmega328P)

Окремо ще розглянуто потужнішу 8-бітну платформу з сімейства AVR, - ATmega2560. Згідно з технічної сертифікацією яку я знайшов у відкритому англомовному джерелі даний чип має розширену периферію. Недивлячись на те що він якби потужніший але він не підходить під наші вимоги які було виставлено на початку. Далі продемонстровано як виглядає його скелет у роботі(рис. 2.3)[12].

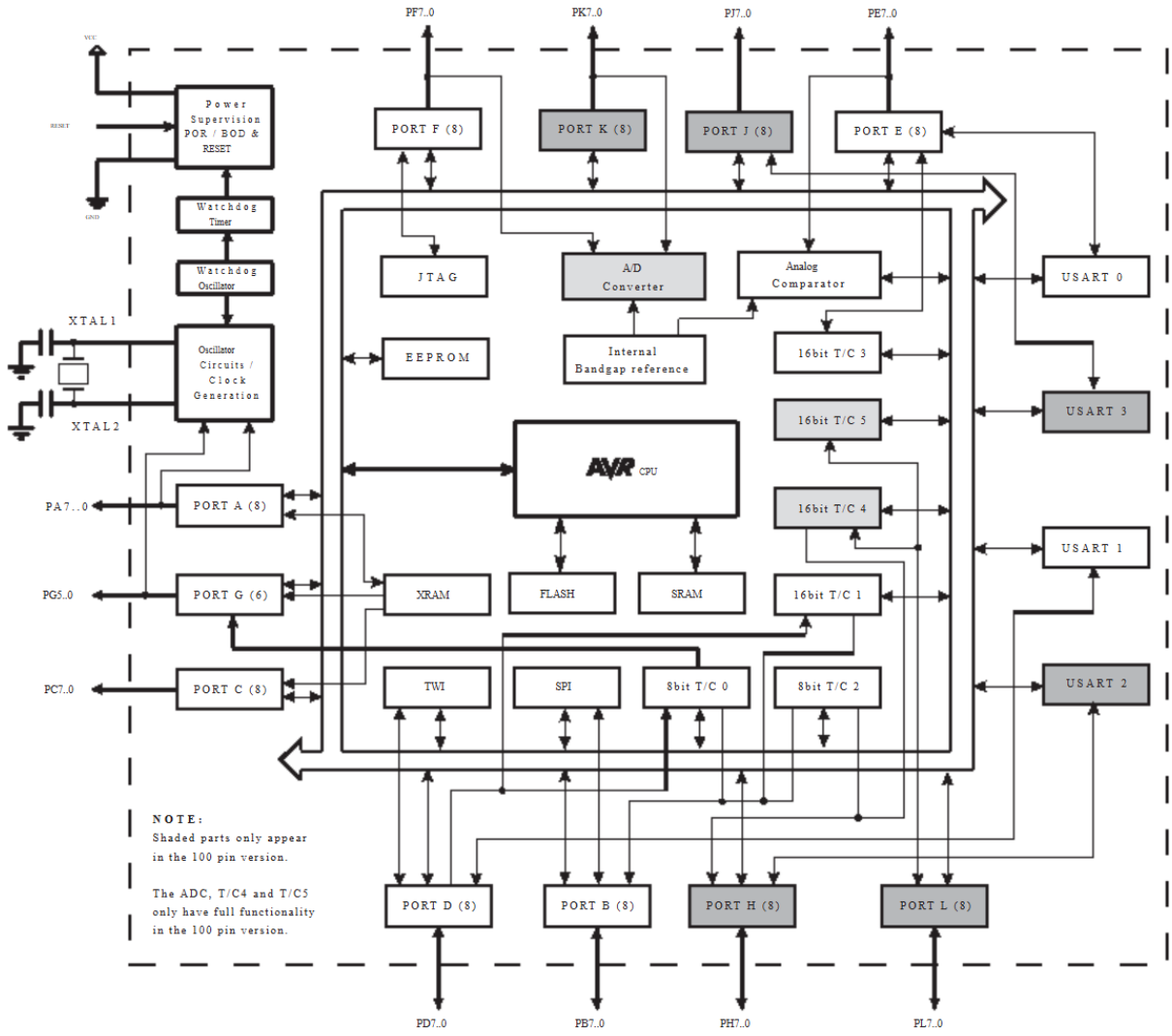


Рисунок 2.3 - Блок діаграми ATmega2560

Вторе, що попало в руки під час дослідження це 32-ух-бітні мікроконтролери з сімейства STM32 (рис. 2.4), грунтом яких є ARM Cortex-M. Вони даю значний приріст у продуктивності, високі частоти та досить велику кількість таймерів які допомагають генерувати більш точні ШІМ-сигнали. Однак ось воно золото, але ні базові лінійки з цього сімейства не мають вбудованих

радіомодулів. Проєктування системи на їхній базі потребувало значно складнішої обв’язки, що не є економічно та технологічно.



Рисунок 2.4 - Налагоджувальна плата STM32F103C8T6

Враховуючи виявлені обмеження конкурентних рішень, найбільш оптимальним вибором стала високоінтегрована система на кристалі (SoC) ESP32-WROOM-32 від компанії Espressif Systems[13,14]. Ця платформа була розроблена спеціально для вузлів Інтернету речей (IoT) промислового класу і поєднує в собі потужну обчислювальну підсистему з інтегрованими мережевими можливостями.

Вибір мікроконтролера ESP32 базується на наступних архітектурних та технічних перевагах:

– багатоядерна архітектура та операційна система реального часу (RTOS): Серцем ESP32 є двоядерний 32-бітний процесор Tensilica Xtensa Dual-Core 32-bit LX6 мікроархітектури Harvard, що працює на частоті до 240 МГц. Продуктивність системи досягає 600 DMIPS. Важливою особливістю є апаратна підтримка операційної системи реального часу FreeRTOS[21]. Це дозволяє розпаралелити процеси: одне ядро процесора (PRO_CPU) може виділятися виключно для обслуговування стека протоколів Wi-Fi та TCP/IP, тоді як друге ядро (APP_CPU) буде займатися опитуванням датчиків та математичними розрахунками терморегуляції. Такий підхід гарантує, що затримки в бездротовій мережі жодним чином не вплинуть на своєчасне увімкнення охолодження серверів;

– інтегрований радіотракт: Чип містить повністю інтегрований трансивер стандарту Wi-Fi 802.11 b/g/n (діапазон 2.4 ГГц) та двомодовий модуль Bluetooth (Classic та Bluetooth Low Energy v4.2). Наявність цих інтерфейсів безпосередньо на кристалі позбавляє необхідності розведення складних високочастотних ланцюгів на друкованій платі;

– підсистема генерації ШІМ (LEDC): Для керування серверними вентиляторами критично важливим є використання ШІМ-сигналу високої частоти (згідно зі стандартами Intel - 25 кГц), що запобігає виникненню акустичного шуму (писку) в обмотках двигунів. ESP32 оснащено спеціалізованим апаратним контролером LEDC, який підтримує 16 незалежних каналів генерування ШІМ із можливістю програмного налаштування як частоти (до 40 МГц), так і роздільної здатності (від 1 до 20 біт)[20]. Це дозволить керувати цілим масивом кулерів з максимальною плавністю;

– організація пам'яті: Чип має 520 КБ вбудованої оперативної пам'яті (SRAM), чого з великим запасом вистачає для роботи з JSON-об'єктами та формування масивних пакетів даних для відправки на сервер телеметрії. Крім того, модуль WROOM-32 має 4 МБ вбудованої Flash-пам'яті (SPI Flash) для зберігання програмного коду та файлової системи конфігурацій;

– енергоефективність (Power Management): Оскільки розроблювана система повинна працювати від резервних акумуляторів під час відключень електроенергії, власне споживання плати управління має значення. ESP32 підтримує технологію динамічного масштабування напруги та частоти, а також містить окремий співпроцесор з наднизьким енергоспоживанням (Ultra-Low Power, ULP), що дозволяє гнучко керувати енергоспоживанням модуля;

Для наочності, порівняння ключових технічних характеристик розглянутих платформ наведено у таблиці 2.1

Таблиця 2.1 - Порівняльний аналіз мікроконтролерних платформ

Характеристика	**ATmega328P (Arduino UNO)**	**STM32F103C8T6 (Blue Pill)**	**ESP-WROOM-32**
Архітектура ядра	8-bit AVR	32-bit ARM Cortex-M3	32-bit Xtensa Dual-Core
Тактова частота	16 МГц	72 МГц	160 –240 МГц
Оперативна пам'ять(SRAM)	2 КБ	20 КБ	520 КБ
Flash-пам'ять	32 КБ	64/128 КБ	4 МБ (модуль WROOM)
Вбудований Wi-Fi/Bluetooth	Відсутній	Відсутній	Wi-Fi (b/g/n) + BLE 4.2
ШІМ канали(PWM)	6 апатних	15 через таймери	16 високоточних LEDC
Робоча напруга логіки	5 В	3.3 В	3.3 В

Таким чином, мікроконтролерний модуль ESP32 є безальтернативним лідером за сукупністю характеристик "продуктивність/мережеві можливості" і повністю відповідає вимогам до апаратної частини інтелектуальної системи терморегуляції, що розробляється.

2.3 Підбір сенсорів та модулів управління.

Для забезпечення надійного та адаптивного контролю мікроклімату в серверній шафі розроблена система використовує комплексний підхід до збору телеметричних даних. Він полягає у розділенні моніторингу на загальний, вологість та температура повітря і точковий, температура конкретних критичних вузлів, таких як акумуляторні батареї ДБЖ.

За для вимірювання базових параметрів повітря використовуються цифрові сенсори з високою точністю. Розглянемо датчик DHT22, також відомий як AM2302, який є ємнісним модулем вимірювання відносної вологості та температури. Цей сенсор передає відкалібрований цифровий сигнал по однопровідній шині single-bus. Завдяки використанню ексклюзивної технології збору цифрових сигналів та наявності 8-бітного мікроконтролера всередині корпусу, датчик забезпечує високу надійність та стабільність вимірювань. Робочий діапазон DHT22 становить від 0 до 100% для відносної вологості та від -40°C до +80°C для температури. Його абсолютна точність становить ±2% для вологості (максимально до ±5%) та ±0.5°C для температури. Важливою перевагою для серверних приміщень є здатність передавати сигнал на великі відстані - до 20 метрів. Напруга живлення модуля знаходиться в межах від 3.3 В до 6 В постійного струму. Датчик також вирізняється низьким енергоспоживанням: струм у режимі очікування, stand-by, становить лише 40-50μA, а під час вимірювання - 1-1.5mA.[9]

Для більш прецизійного локального моніторингу в роботі застосовується комбінований цифровий датчик BME280, який вимірює вологість, атмосферний тиск та температуру. Він підтримує сучасні цифрові інтерфейси I^2C з частотою до 3.4 МГц та SPI, 3- або 4-провідний, з частотою до 10 МГц. Сенсор відрізняється надзвичайно низьким енергоспоживанням: струм у режимі сну становить всього 0.1μ А. Під час вимірювання вологості та температури з частотою оновлення 1 Гц струм споживання дорівнює 1.8μA, а при повному циклі вимірювання (вологість, тиск, температура) - 3.6μA. Робочий діапазон температур становить від -40° С до +85°C, а вологість вимірюється в межах від 0 до 100% з точністю ±3%. Унікальною апаратною особливістю BME280 є наявність вбудованого IIR-фільтра (Infinite Impulse Response). Цей фільтр ефективно пригнічує короткочасні збурення в показниках, наприклад, спричинені різким зачиненням дверей серверної чи потоками вітру, що розвантажує центральний процесор системи від необхідності програмної фільтрації. Напруга живлення ядра датчика VDD знаходиться в діапазоні від 1.71 В до 3.6 В, що ідеально узгоджується з логічними рівнями мікроконтролера ESP32[10].



Рисунок 2.5 - датчики DHT22



Рисунок 2.6 - датчики BME280

Запобіганню термічному розгону резервних акумуляторів (LiFePO4/VRLA) застосовуються цифрові термометри DS18B20. Унікальною особливістю цього датчика є підтримка протоколу 1-Wire, який вимагає лише одного порту мікроконтролера для двосторонньої комунікації. Кожен пристрій містить унікальний 64-бітний серійний код, зашитий у вбудовану пам'ять ROM. Це забезпечує можливість паралельного підключення багатьох сенсорів на одну лінію (multidrop capability), що радикально спрощує архітектуру розподілених систем вимірювання температури.

Діапазон вимірювання DS18B20 становить від -55°C до +125°C, при цьому в найбільш критичному діапазоні від -10°C до +85°C гарантується похибка не більше ±0.5°C. Роздільна здатність термометра конфігурується програмно і може становити від 9 до 12 біт. Максимальний час перетворення температури у 12-бітне цифрове значення займає 750 мілісекунд. Окрім цього, датчик здатен працювати в режимі «паразитного живлення» (parasite power), за якого він отримує енергію безпосередньо з лінії передачі даних, усуваючи необхідність прокладання окремої шини живлення. Напруга живлення мікросхеми лежить в межах від 3.0В до 5.5В.

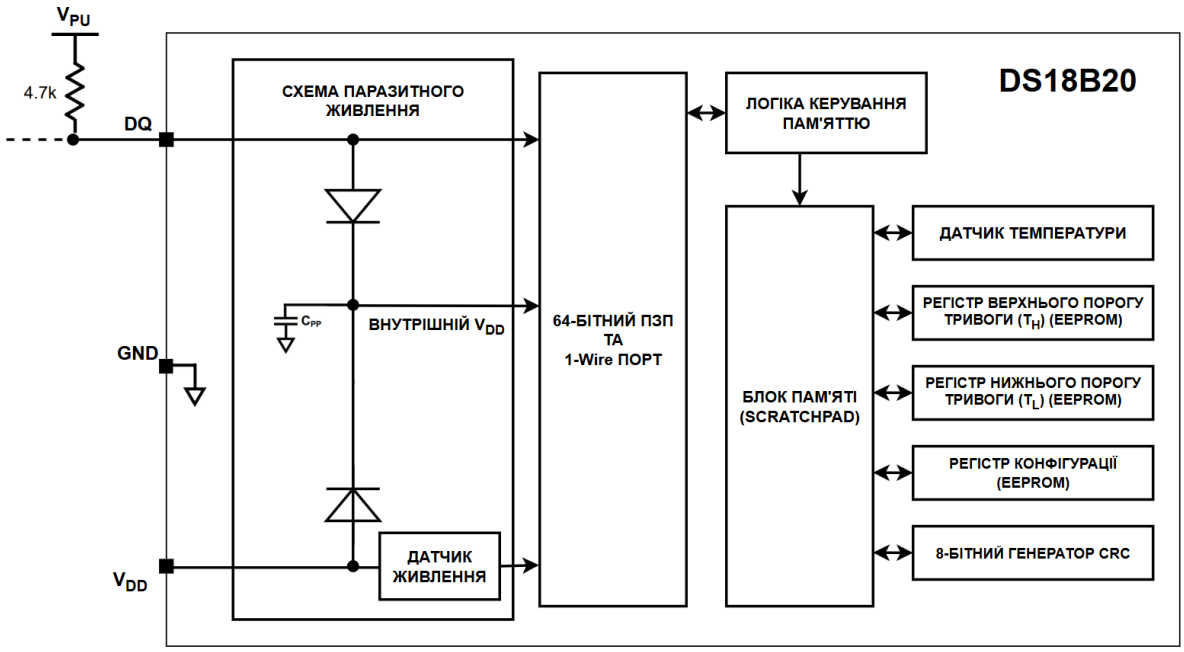


Рисунок 2.7 - Діагарама DS18B20

Отже, комбіноване використання сенсорів BME280, DHT22 та DS18B20 дозволяє побудувати гнучку та енергоефективну архітектуру моніторингу. Загальний контроль мікроклімату забезпечується прецизійними датчиками з мінімальним струмом споживання, тоді як шина 1-Wire дозволяє масштабувати точковий контроль температури акумуляторів без перевитрати вільних портів мікроконтролера. Такий комплексний підхід гарантує безперервну видимість теплового стану серверної шафи та забезпечує миттєве реагування системи на появу будь-яких локальних зон перегріву.

Для забезпечення безперебійної та автономної роботи системи критично важливо контролювати джерела живлення: наявність напруги в основній електромережі 230 В та рівень заряду резервних акумуляторів ДБЖ.

Для безпечного визначення наявності змінного струму в мережі застосовується модуль на базі трансформатора напруги ZMPT101B. Він забезпечує необхідну гальванічну розв'язку між високовольтною лінією та низьковольтною логікою мікроконтролера. Згідно з технічною документацією, номінальний робочий струм трансформатора становить від 1 до 2 мА. Для роботи в мережах з напругою 230 В у схемі передбачено струмообмежувальний резистор великого номіналу, який дозволяє знизити розсіювану потужність на модулі. Модуль підтримує використання "активного" виходу на базі операційного підсилювача, що гарантує високу точність, малий фазовий зсув та хорошу здатність до навантаження. У нашій системі цей модуль формує миттєвий логічний сигнал для ESP32 про знеструмлення серверної, ініціюючи перехід системи в адаптивний аварійний режим охолодження.

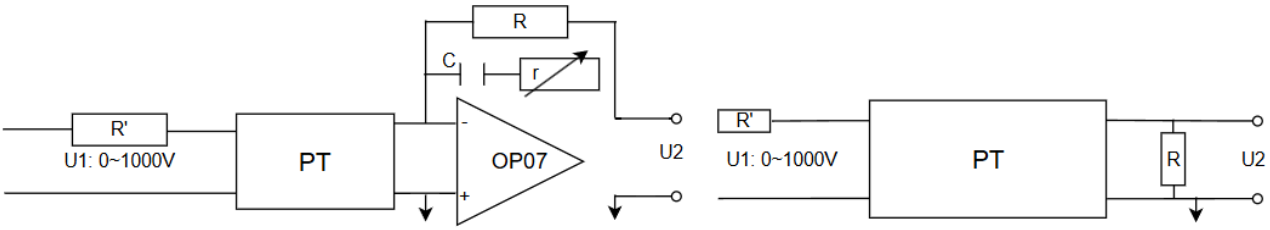


Рисунок 2.8 - Діагарама ZMPT101B

Контроль стану акумуляторних батарей , вимірювання напруги, споживаного струму та потужності, здійснюється за допомогою прецизійного цифрового монітора живлення INA219 від Texas Instruments. Цей мікросхемний модуль взаємодіє з центральним процесором через шину I^2C з підтримкою 16 програмованих адрес і здатен вимірювати напругу на шині від 0 В до +26 В. Це повністю покриває потреби моніторингу стандартних 12-вольтових або 24-вольтових акумуляторних збірок дата-центру. Вбудований 12-бітний аналого-цифровий перетворювач АЦП) разом із програмованим підсилювачем PGA

дозволяють масштабувати діапазон вимірювання падіння напруги на шунті, досягаючи кроку вимірювання LSB лише 10 мкВ. Завдяки наявності калібрувального регістра та апаратного множника, INA219 виконує обчислення у фоновому режимі та видає значення струму безпосередньо в амперах, а потужності - у ватах, що значно розвантажує обчислювальне ядро мікроконтролера. При цьому власний струм споживання датчика в робочому режимі не перевищує 1 мА.

Останньою ланкою апаратної частини системи є масив високопродуктивних серверних вентиляторів постійного струму з 4-контактним (4-pin) інтерфейсом. На відміну від застарілих систем, де швидкість обертання змінюється шляхом зниження напруги живлення, розроблений пристрій використовує метод широтно-імпульсної модуляції.

На відповідний керуючий контакт вентилятора мікроконтролер ESP32 подає прямокутний високочастотний сигнал близько 25 кГц). Змінюючи шпаруватість імпульсів Duty Cycle від 0% до 100%, мікроконтролер плавно регулює швидкість обертання лопатей. Електроживлення вентилятора при цьому залишається стабільним 12 В. Такий підхід забезпечує максимальний коефіцієнт корисної дії електродвигунів вентиляторів, запобігає їхньому перегріву та повністю усуває низькочастотний акустичний шум , що є стандартом для професійного серверного обладнання.

2.4 Проєктування підсистеми моніторингу джерела живлення.

Підсистема моніторингу живлення є критично важливим вузлом розробленого пристрою, оскільки саме її дані ініціюють перехід системи охолодження з базового режиму в аварійний (адаптивний). Архітектурно підсистема розділена на два незалежні контури: високовольтний (моніторинг мережі змінного струму 220 В) та низьковольтний (телеметрія резервних акумуляторів постійного струму).

Для фіксації факту знеструмлення серверної використовується модуль на базі трансформатора ZMPT101B. Його головна функція в цій схемі - забезпечення

надійної гальванічної розв'язки (до 3000 В) між силовою лінією та чутливими портами (GPIO) мікроконтролера ESP32. Модуль підключений паралельно до входу джерела безперебійного живлення (ДБЖ). Вбудований у модуль операційний підсилювач налаштований у режимі компаратора: за наявності напруги в мережі на виході модуля формується логічна одиниця, а при знеструмленні - логічний нуль. Це дозволяє мікроконтролеру фіксувати відключення електроенергії через апаратне переривання (Interrupt) практично миттєво, без необхідності постійного опитування датчика.

Коли система фіксує перехід на резервне живлення, активується алгоритм глибокого моніторингу акумуляторної батареї. Для цього в розрив мінусового (або плюсового) проводу між АКБ та навантаженням встановлюється прецизійний шунт, підключений до мікросхеми INA219.

Завдяки вбудованому АЦП, мікросхема INA219 виконує вимірювання двох ключових параметрів:

– U_{bus}- напруга на шині живлення (напруга самої батареї);

– U_{shunt}- падіння напруги на вимірювальному шунті.

Спираючись на закон Ома, струм навантаження I обчислюється мікроконтролером за формулою: $I = \frac{U_{shunt}}{R_{shunt}}$ де R_{shunt} - опір каліброваного шунта.

Після цього система обчислює поточну споживану потужність: $P = U_{bus} \cdot I$

Оскільки в роботі було обґрунтовано використання літій-залізо-фосфатних (LiFePO4) акумуляторів, класичний метод визначення рівня заряду лише за напругою є неефективним. Це пов'язано з тим, що крива розряду акумуляторів LiFePO4 є надзвичайно пологою: напруга тримається на рівні 13.2–12.8 В більшу частину часу роботи, і стрімко падає лише на останніх 10% ємності.

Тому в розробленій підсистемі застосовано алгоритм "Кулонівського підрахунку". Цей метод полягає в математичному інтегруванні струму, що протікає через шунт INA219, у часі. Залишкова ємність акумулятора $C_{residual}$ розраховується за формулою: $C_{residual} = C_{no\,\min al} - \int_{t_0}^{t} I(t)dt$

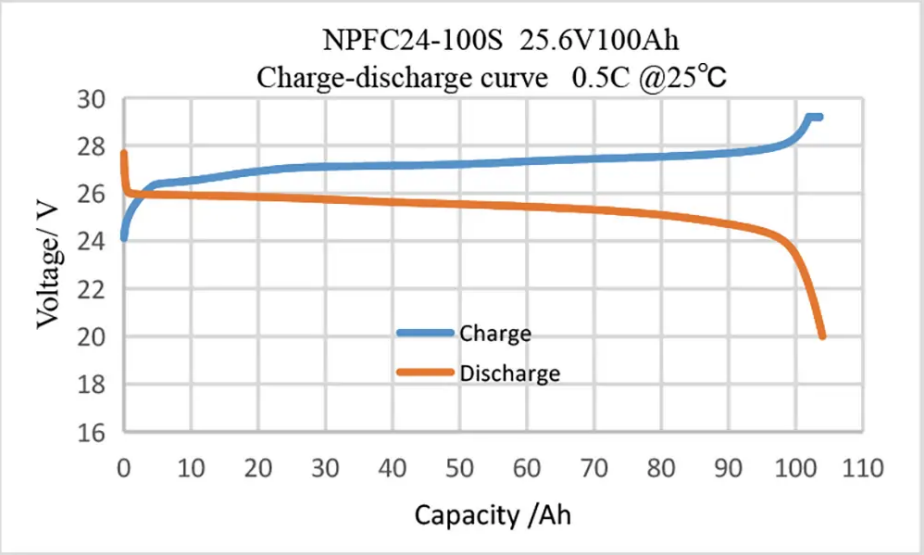


Рисунок 2.9 - Графік заряду та розряду LiFePO4 батарей

Обчислене значення залишкової ємності конвертується у відсотки (SoC) і передається по мережі Wi-Fi до IoT-дашборду адміністратора. Одночасно цей показник використовується як змінна для алгоритму ШІМ-управління вентиляторами: чим менший залишок заряду $C_{residual}$, тим вищий поріг допустимої температури встановлює система для економії енергії на обертанні кулерів.

Результатом проєктування даної підсистеми є розроблений алгоритм моніторингу джерела живлення, який циклічно виконується на одному з ядер мікроконтролера ESP32. Блок-схема розробленого алгоритму представлена:

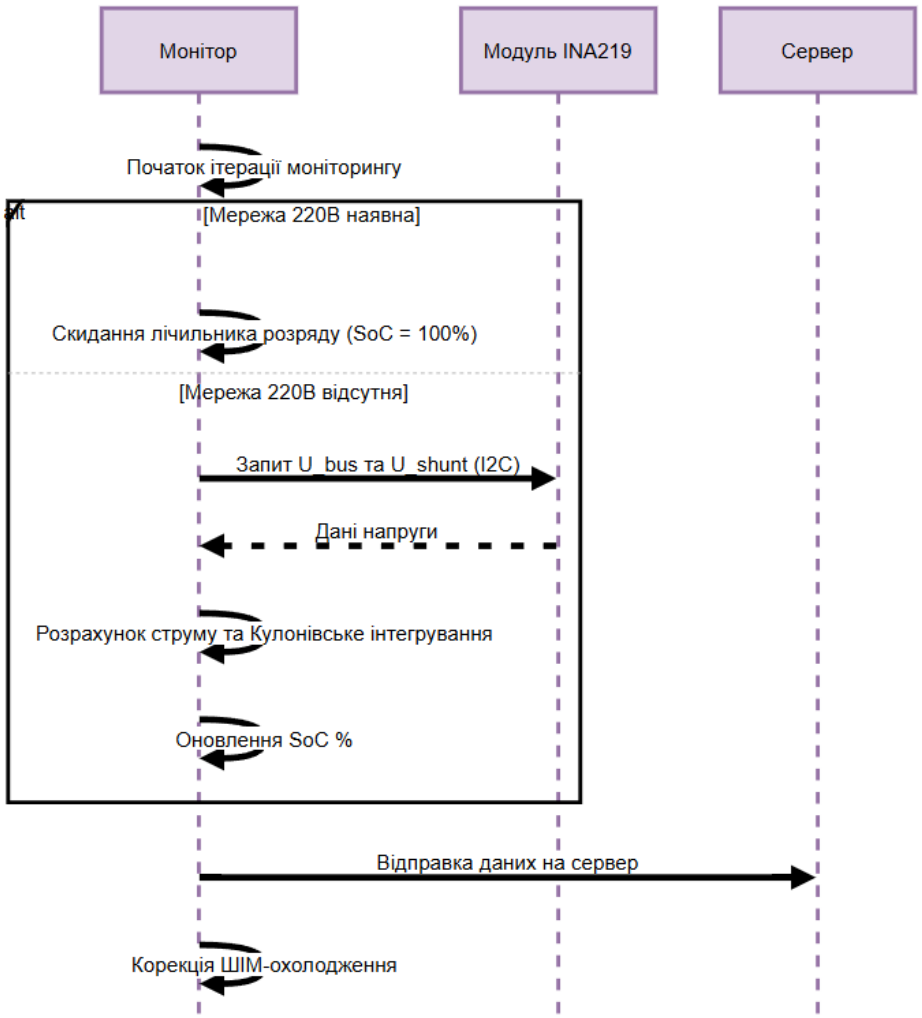


Рисунок 2.10 - Алгоритм роботи схеми моніторину

2.5 Розробка принципової електричної схеми системи.

На основі розробленої структурної схеми та обраної елементної бази було спроєктовано принципову електричну схему системи адаптивного терморегулювання. Головним завданням під час розробки схеми було забезпечення стабільного живлення мікроконтролера, коректне узгодження логічних рівнів цифрових шин та безпечне керування силовими виконавчими пристроями.

Оскільки базовим джерелом резервного живлення є акумуляторна збірка з номінальною напругою 12 В, а логіка мікроконтролера ESP32 та більшості сенсорів вимагає напруги 3.3 В, у схемі передбачено використання понижуючого DC-DC перетворювача напруги (наприклад, на базі імпульсного стабілізатора LM2596). Це

забезпечує високий ККД перетворення та запобігає перегріву плати управління. Виконавчі пристрої (серверні вентилятори) отримують живлення 12 В безпосередньо від акумуляторної шини, минаючи мікроконтролер. Для коректного функціонування керуючих сигналів усі землі (GND) високовольтної та низьковольтної частин схеми об'єднані в єдину точку (Star Ground), що мінімізує наведення та земляні петлі.

Збір телеметричних даних реалізовано через дві основні цифрові шини:

– Шина I^2C (Inter-Integrated Circuit): До апаратних виводів мікроконтролера GPIO21 лінія даних SDA та GPIO22 лінія тактування SCL паралельно підключені датчик мікроклімату BME280 та модуль моніторингу потужності INA219. Розподіл пристроїв на шині здійснюється за їхніми унікальними апаратними адресами. Обидві лінії підтягнуті до напруги 3.3 В через резистори номіналом 4.7 кОм для забезпечення крутих фронтів цифрового сигналу;

– Шина 1-Wire: Масив локальних температурних датчиків акумуляторних батарей DS18B20 підключений до цифрового виводу GPIO4. Відповідно до специфікації інтерфейсу Dallas 1-Wire, лінія даних (DQ) також підтягнута до шини живлення 3.3 В через резистор 4.7 кОм. Датчики заживлені за стандартною 3-провідною схемою (VDD, GND, DQ) для забезпечення максимальної стабільності при частих опитуваннях.

Модуль детекції наявності основної мережі ZMPT101B підключений до виводу GPIO34. Цей пін мікроконтролера ESP32 працює виключно в режимі входу (Input Only) і не має внутрішніх підтягуючих резисторів, що робить його ідеальним для зчитування дискретного сигналу з компаратора модуля ZMPT101B. Трансформаторна розв'язка модуля гарантує повну гальванічну ізоляцію ESP32 від мережі 220 В.

Керування блоком охолодження реалізовано через цифровий вивід GPIO18. Цей пін генерує апаратний високочастотний ШІМ-сигнал (PWM), який подається на 4-й (керуючий) контакт серверних вентиляторів. Датчик Холла (тахометр вентилятора, 3-й контакт) підключений до виводу GPIO19 через дільник напруги

для моніторингу фактичної швидкості обертання лопатей (RPM) та виявлення можливих апаратних збоїв кулерів.

Таблиця 2.2 - Електричні з’єднання системи управліннння

Модуль / Компонент	**Контакт модуля**	**Підключення (ESP32 або живлення)**	**Призначення / Примітка**
Шина живлення логіки	Понижуючий DC-DC	VIN ← 12V (від АКБ)	Живлення від резервної батареї
		VOUT → 3.3V шина	Формування напруги для ESP32 та датчиків
Мікроконтролер ESP32	Живлення	3V3 та GND	Отримує живлення від DC-DC
BME280 (Датчик мікроклімату)	VIN / GND	3.3V / GND	Живлення датчика
	SDA	GPIO 21	Шина I2C (Лінія даних)
	SCL	GPIO 22	Шина I2C (Лінія тактування)
INA219 (Монітор живлення)	VCC / GND	3.3V / GND	Живлення логіки мікросхеми
	SDA	GPIO 21	Шина I2C (Паралельно з BME280)
	SCL	GPIO 22	Шина I2C (Паралельно з BME280)
	VIN+ / VIN-	У розрив плюсового кабелю АКБ	Вимірювальний шунт для струму

Продовження таблиці 2.2

Модуль / Компонент	**Контакт модуля**	**Підключення (ESP32 або живлення)**	**Призначення / Примітка**
DS18B20 (Температура АКБ)	VDD / GND	3.3V / GND	Живлення датчика
	DQ	GPIO 4	Шина 1-Wire (через Pull-up резистор 4.7 кОм до 3.3V)
ZMPT101B (Детектор 220В)	VCC / GND	3.3V / GND	Живлення логіки модуля
	OUT (Digital)	GPIO 34 (Input Only)	Дискретний сигнал наявності мережі 220В
Серверні вентилятори 12V	12V / GND	12V / GND (від шини АКБ)	Силове живлення (в обхід ESP32!)
(4-pin PWM)	PWM (Керування)	GPIO 18	Генерація ШІМ-сигналу (25 кГц)
	Tach (Тахометр)	GPIO 19	Зчитування RPM (через дільник напруги)

На основі наведеної вище таблиці з'єднань та вимог до узгодження логічних рівнів, у середовищі автоматизованого проєктування електронних схем (EDA) було розроблено загальну принципову електричну схему підсистеми управління. Розроблена схема демонструє повну гальванічну ізоляцію високовольтних кіл, спільну шину заземлення (GND) для сигнальних ліній та апаратні підтягуючі резистори для цифрових шин передачі даних. Принципова електрична схема системи адаптивного терморегулювання та моніторингу представлена в додатку 1

РОЗДІЛ 3. АЛГОРЕФМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.

3.1 Розробка блок-схеми загального алгоритму роботи пристрою.

Основою програмного забезпечення розробленої системи адаптивного терморегулювання є безперервний цикл моніторингу, який координує роботу апаратної периферії мікроконтролера ESP32, приймає рішення щодо управління виконавчими механізмами та забезпечує мережеву взаємодію з серверами. Загальний алгоритм роботи пристрою можна розділити на чотири основні логічні блоки: ініціалізація, збір телеметрії, обчислення керуючого впливу та передача даних.

При подачі живлення мікроконтролер виконує первинне налаштування апаратних інтерфейсів. Відбувається ініціалізація шин передачі даних I^2C та 1-Wire, перевірка наявності підключених датчиків BME280, INA219, DS18B20 та налаштування ШІМ-контролера LEDC на частоту 25 кГц для генерації стандартизованого керуючого сигналу для серверних вентиляторів. Далі система встановлює з'єднання з локальною мережею Wi-Fi та підключається до центрального MQTT-брокера для обміну даними з серверним обладнанням[17,18].

На початку кожної ітерації головного циклу система здійснює опитування датчиків на двох рівнях:

– Фізичний рівень: зчитування температури і вологості всередині телекомунікаційної шафи, температури акумуляторної батареї, а також моніторинг параметрів живлення (струм споживання, напруга АКБ та наявність мережі 220В від модуля ZMPT101B);

– Мережевий рівень (Software Polling): отримання телеметричних даних безпосередньо від серверів (рівень завантаження процесорів CPU Load та внутрішня температура серверних компонентів) через протокол MQTT.

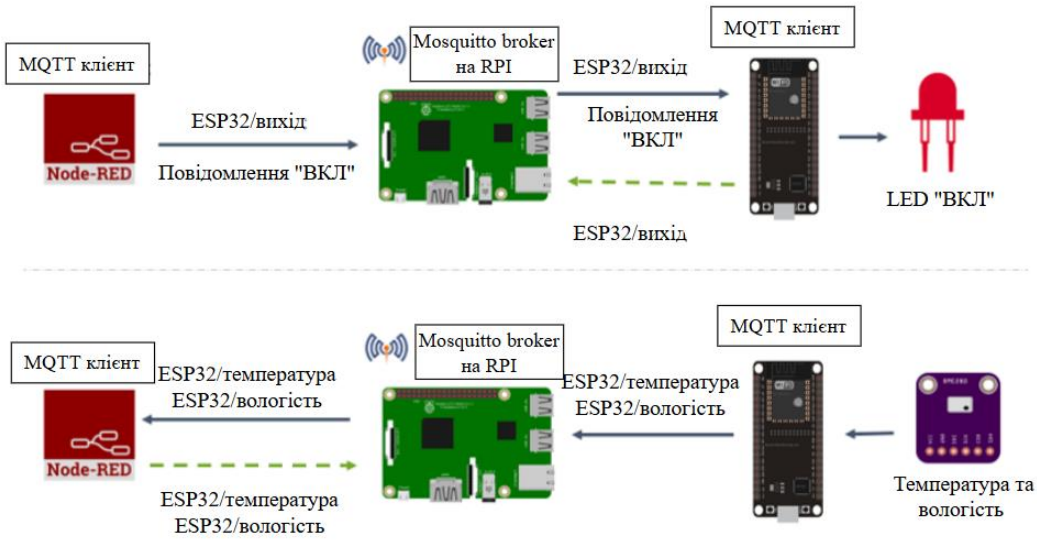


Рисунок 3.1 - Структурна схема двостороннього обміну даними між мікроконтролером ESP32 та MQTT-брокером Mosquitto

Блок прийняття рішень та плавного регулювання забезпечує максимальної енергоефективності та уникнення різких акустичних стрибків, управління вентиляторами реалізовано за принципом пропорційного (плавного) регулювання. Алгоритм визначає «найгарячішу» точку системи - порівнює температуру в шафі та мережеві дані про навантаження серверів. На основі максимального значення обчислюється необхідний коефіцієнт заповнення ШІМ-сигналу. При зростанні температури або обчислювального навантаження, оберти вентиляторів плавно збільшуються від базових 20% до 100%.

Додатково в цьому блоці реалізована логіка аварійного захисту. Якщо детектор ZMPT101B фіксує відсутність напруги 220В, система переходить у режим живлення від АКБ. Алгоритм безперервно аналізує залишковий заряд батареї SoC. При досягненні критичного рівня заряду (наприклад, менше 10%), контролер ESP32 формує та надсилає по мережі команду "Graceful Shutdown", ініціюючи безпечне та штатне завершення роботи операційних систем серверів для запобігання втраті даних.

На завершальному етапі ітерації мікроконтролер формує пакет даних JSON Payload, що містить усі зібрані фізичні показники та поточний стан ШІМ-

керування, і публікує його в системний топік MQTT-брокера. Ці дані використовуються для візуалізації на панелі адміністратора (Dashboard). Після відправки алгоритм переходить у стан короткочасної затримки (Delay / RTOS Yield) для звільнення ресурсів мікроконтролера, після чого цикл повторюється, щоб побачити блок-схему звертайтесь до (додатку 2).

3.2 Алгоритм штатного охолодження (робота від основної мережі).

Режим штатного охолодження активується мікроконтролером ESP32 за умови наявності стабільної напруги в електромережі 220В, що безперервно фіксується модулем гальванічної розв'язки ZMPT101B. Оскільки в цьому стані система не обмежена ємністю акумуляторної батареї, головною метою алгоритму є прецизійне підтримання теплового балансу серверного обладнання за мінімального рівня акустичного шуму та зносу механічних частин кулерів.

Температурні межі для алгоритму керування обрані на основі міжнародних рекомендацій ASHRAE TC 9.9 для телекомунікаційного та IT-обладнання класу A2. Згідно зі стандартом, мікроконтролер використовує дані з високоточного датчика BME280 для підтримання температури в шафі (T_{cab}) у межах цільового діапазону. Нижній поріг початку активного охолодження встановлено на рівні $T_{min} = 25°C$, а критичний поріг - $T_{max} = 35°C$.[1]

Керування швидкістю обертання вентиляторів здійснюється за принципом пропорційного регулювання за допомогою апаратно-генерованого ШІМ-сигналу (Pulse-Width Modulation) з частотою 25 кГц. Для обчислення необхідного коефіцієнта заповнення (PWM_{out}) у діапазоні від PWM_{min}(20%) до PWM_{max} (100%) застосовується формула лінійної інтерполяції:$PWM_{out} = PWM_{min} + \frac{T_{cab} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \times (PWM_{max} - PWM_{min})$

Для уникнення явища осциляції постійного циклічного збільшення та зменшення обертів при незначних температурних флуктуаціях, у програмну реалізацію введено алгоритм температурного гістерезису. Зниження обертів

кулерів відбувається лише за умови, що температура впала на $1.5°C$ нижче поточного розрахункового значення.

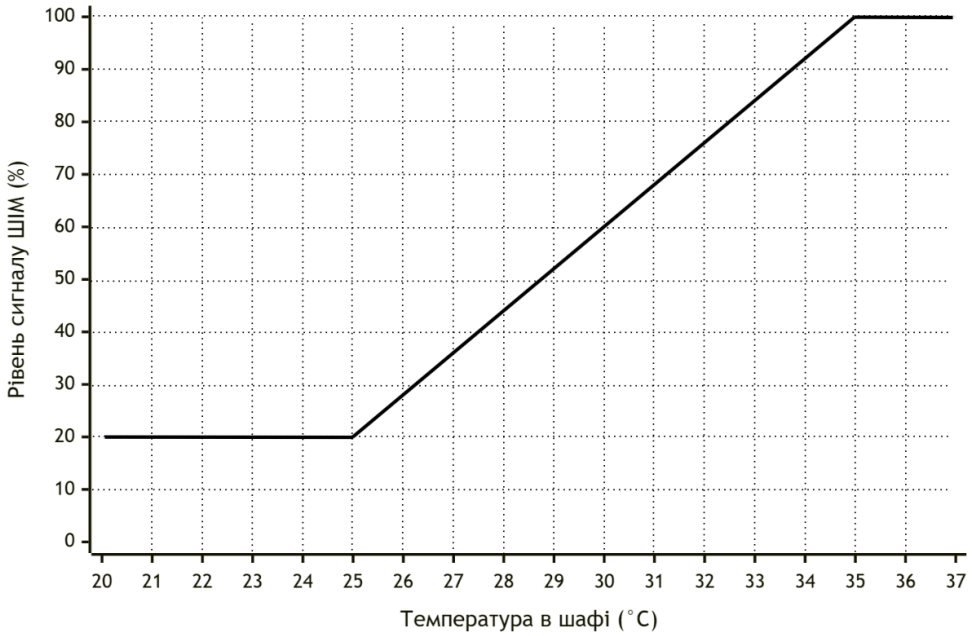


Рисунок 3.3 - Залежність потужностей охолодження (ШІМ) від температури

Крім того, система використовує предиктивний підхід до охолодження на основі телеметричних даних, що надходять через протокол MQTT. Оскільки сервери мають високу теплову інерцію, локальний датчик температури реагує на нагрівання із затримкою. Тому, якщо система моніторингу фіксує пікове завантаження центральних процесорів серверів ($L_{cpu} > 80$), мікроконтролер застосовує упереджувальний коригуючий коефіцієнт $K_{load} = 1.3$, миттєво підвищуючи рівень ШІМ-сигналу на 30% до моменту фактичного нагрівання повітряного середовища шафи. Такий гібридний (фізико-програмний) підхід забезпечує високу відмовостійкість обчислювального вузла.

3.3 Алгоритм адаптивного/економного охолодження (автономне живлення та зниження обертів).

У разі фіксації модулем ZMPT101B відсутності напруги в основній електромережі 220В, мікроконтролер ESP32 миттєво ініціює апаратне переривання та переводить систему терморегулювання у режим адаптивного охолодження. Головним завданням алгоритму на цьому етапі стає мінімізація енергоспоживання самими вентиляторами для максимального подовження часу автономної роботи (UPS / Battery Life) серверного обладнання.

Основою для прийняття рішень у цьому режимі є поточний рівень заряду акумуляторної батареї який безперервно обчислюється на основі даних про напругу та струм розряду, що надходять від прецизійного цифрового сенсора INA219 по шині I^2C.

Для реалізації економного охолодження температурні пороги, описані в режимі штатної роботи, динамічно зсуваються вгору, дозволяючи серверам працювати при трохи вищих, але безпечних температурах. Алгоритм поділяє залишковий заряд АКБ на три логічні зони, до кожної з яких застосовується власний профіль енергозбереження.

Профіль «Eco» - Система працює у режимі помірної економії. Максимальний рівень ШІМ-сигналу апаратно обмежується на рівні 70%. Вентилятори працюють на знижених обертах, що зменшує їх енергоспоживання за кубічною залежністю від швидкості обертання.

Профіль «Deep Eco» режим жорсткої економії. Мікроконтролер дозволяє температурі всередині телекомунікаційної шафи зростати до 40 С. Базова швидкість вентиляторів знижується до абсолютного мінімуму 15%, а їхнє прискорення відбувається повільніше. Для програмної реалізації вводиться понижуючий коефіцієнт заряду K_{bat}, який прямо пропорційно залежить від залишкової ємності АКБ і зменшує загальний керуючий вплив на кулери.

Профіль «Critical» Аварійний режим. Коли заряд батареї досягає критичної позначки, подальше підтримання роботи системи стає неможливим.

Мікроконтролер формує екстрене повідомлення і через протокол MQTT публікує команду «Graceful Shutdown» у відповідний топік брокера. Сервери, підписані на цей топік, отримують команду і починають безпечно зберігати дані та вимикати операційні системи, уникаючи пошкодження файлових систем від раптового знеструмлення. На цьому етапі вентилятори фіксуються на мінімальних обертах (20%) виключно для відведення залишкового тепла від вимкнених компонентів до повного виснаження батареї.

Такий багаторівневий алгоритм дозволяє досягти компромісу між тепловою безпекою серверного обладнання та часом його роботи під час довготривалих відключень електроенергії.

3.4 Програмна реалізація: опис структри коду, налаштуання переривань та роботи з датчиками.

У процесі розробки програмного забезпечення було застосовано методологію модульного тестування. Оскільки повномасштабна симуляція комплексної IoT-системи з одночасним використанням мережевого стеку Wi-Fi, з'єднанням з MQTT-брокером та багатозадачністю FreeRTOS у хмарному середовищі Wokwi стикається з обмеженнями обчислювальних ресурсів симулятора (таймаути мережевих з'єднань, апаратні затримки компіляції), було прийнято рішення розділити тестування[19.22].

Для первинної верифікації апаратного рівня абстракції Hardware Abstraction Layer було створено спрощений віртуальний стенд, який ізольовано тестує виключно критичний контур зворотного зв'язку: «зчитування мікроклімату → реакція системи охолодження» (рис. 3.4).

До складу тестового стенда увійшли:

- Мікроконтролер ESP32 як головний обчислювальний модуль;
- Датчик DHT22 для динамічного моніторингу температури та вологості;

– Світлодіодний індикатор (LED), підключений через струмообмежувальний резистор до ШІМ-каналу контролера, який виконує роль візуалізатора інтенсивності роботи серверних вентиляторів.

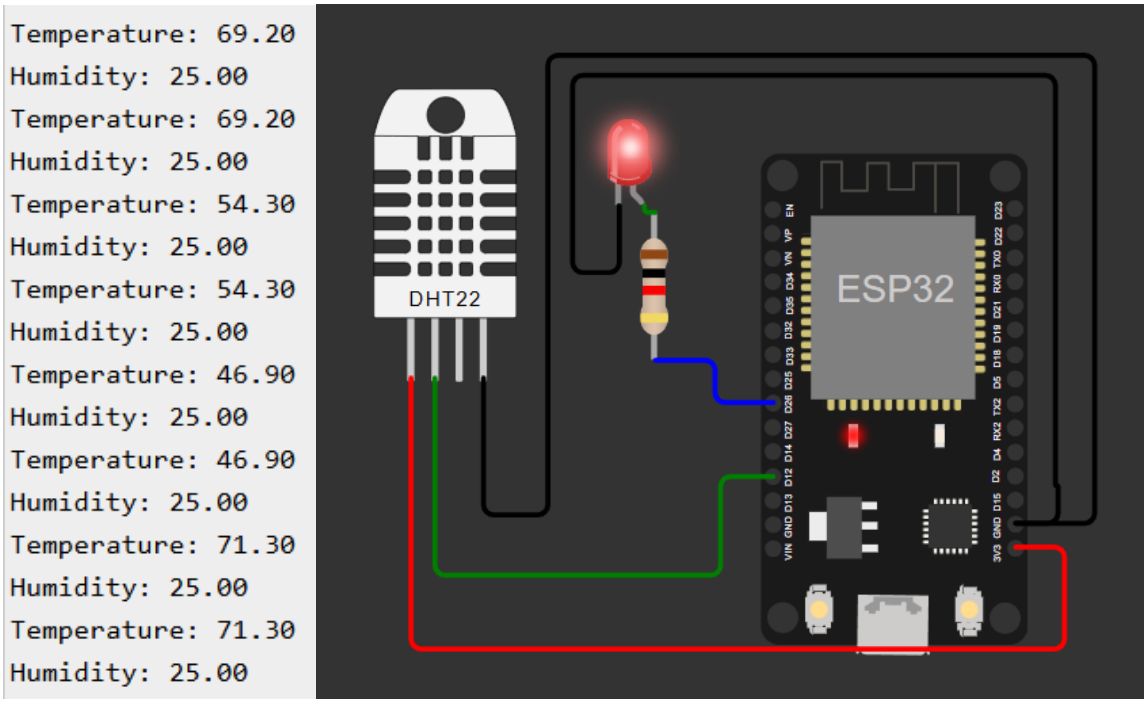


Рисунок 3.4 – Ізольоване тестування базового алгоритму опитування датчиків та генерації керуючого сигналу в середовищі Wokwi

Як видно з вікна термінала (рис. 3.4), мікроконтролер успішно ініціалізував шину передачі даних та забезпечив стабільне циклічне опитування датчика DHT22 без втрати пакетів фіксуються динамічні зміни температури від $46.90°C$ до $71.30°C$ при стабільній вологості.

Цей експеримент практично підтверджує, що ядро мікроконтролера здатне коректно зчитувати фізичні показники середовища та формувати відповідний керуючий сигнал на виконавчі пристрої.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було вирішено актуальне інженерне завдання - розроблено комплексну енергоефективну систему терморегуляції з підтримкою автономного живлення для забезпечення безперервної роботи серверного обладнання.

У результаті проведених досліджень, проєктування та практичної реалізації отримано наступні результати:

– проаналізовано існуючі методи охолодження та резервного живлення серверних приміщень. Встановлено, що класичні рішення клімат-контролю мають надмірно високі пускові струми компресорів і є неефективними при живленні від ДБЖ під час стабілізаційних відключень електроенергії. Обґрунтовано необхідність переходу до адаптивних систем ШІМ-охолодження постійного струму та використання сучасних LiFePO4 акумуляторів завдяки їхній термічній стабільності та довговічності;

– спроєктовано апаратну архітектуру відмовостійкого вузла керування. Обґрунтовано використання мікроконтролерної платформи ESP32 (із підтримкою FreeRTOS та вбудованим Wi-Fi) як головного обчислювального ядра. Підібрано комплекс прецизійних сенсорів: цифрові датчики BME280 та DHT22 для контролю мікроклімату, DS18B20 (шина 1-Wire) для моніторингу температури батарей, а також модулі ZMPT101B і INA219 для апаратного контролю стану енергоживлення;

– розроблено принципову електричну схему системи. Забезпечено надійну гальванічну розв'язку високовольтних кіл, узгодження логічних рівнів цифрових шин (I^2C, 1-Wire) та реалізовано схему прямого апаратного керування серверними вентиляторами за допомогою високочастотного ШІМ-сигналу (25 кГц), що дозволило позбутися акустичного шуму та підвищити загальний ККД системи охолодження;

– досліджено багаторівневий алгоритм адаптивного охолодження та логіку динамічної зміни температурних порогів та швидкості обертання

вентиляторів (від 15% до 100%) залежно від наявності мережі 220В. Впроваджено метод "Кулонівського підрахунку" для визначення залишкового заряду (SoC) резервної батареї та запропоновано профілі енергозбереження («Eco», «Deep Eco», «Critical») для максимального подовження часу автономної роботи;

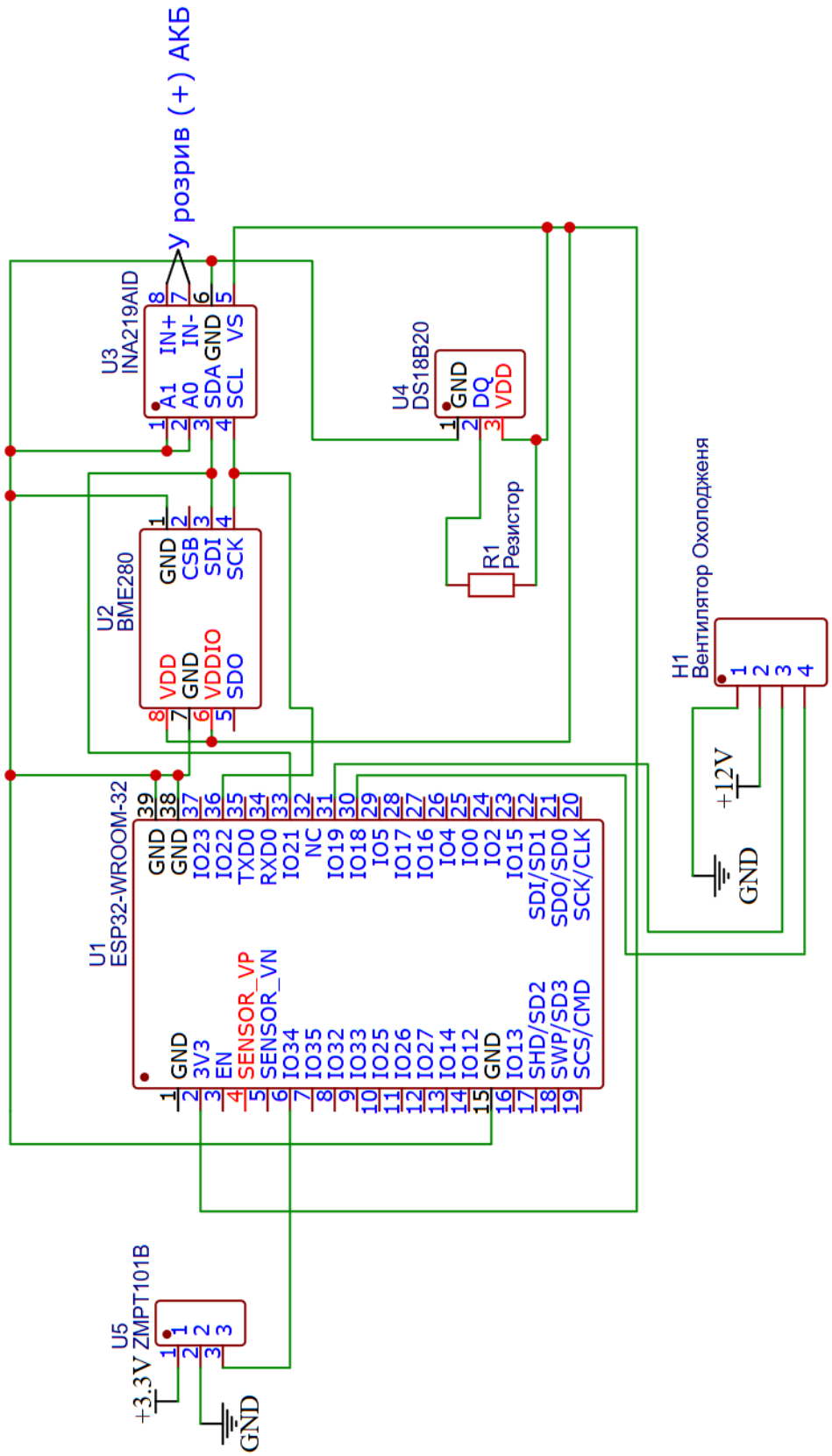
– проведено дослідне модульне тестування комплексу з використанням середовища апаратно-програмної симуляції Wokwi. Тестування ізольованого контуру терморегуляції підтвердило коректність роботи датчиків, безпомилкову генерацію керуючих ШІМ-сигналів та правильність відпрацювання алгоритмів при імітації блекауту;

Отримані результати підтверджують повне досягнення поставленої мети дослідження. Розроблений апаратно-програмний комплекс відзначається високою відмовостійкістю, низьким енергоспоживанням і є готовим до практичного впровадження в інфраструктуру телекомунікаційних шаф та серверних кімнат малого бізнесу.

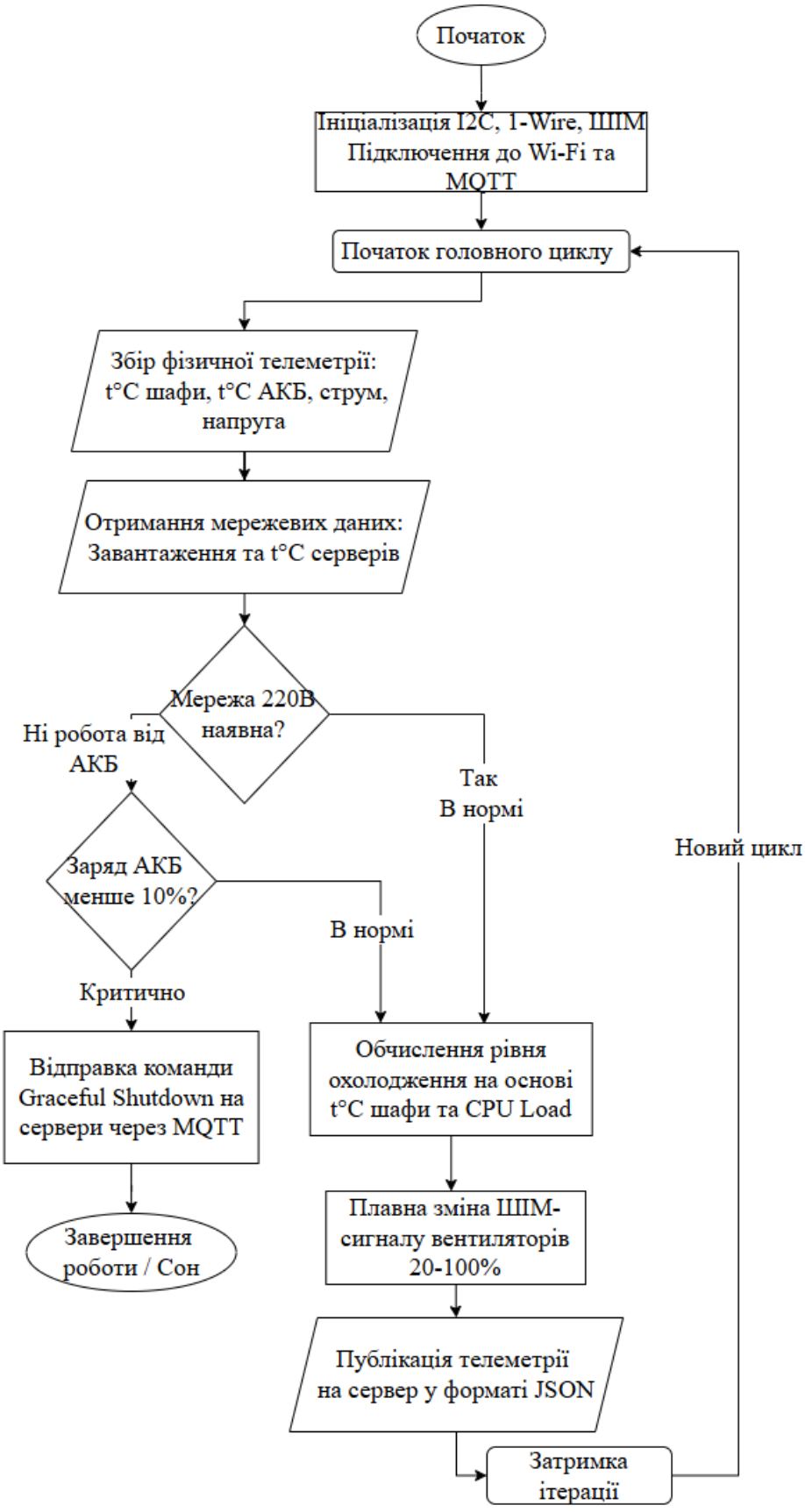
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ASHRAE TC 9.9. Thermal Guidelines for Data Processing Environments. 5th ed. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021;
2. Garvis S., Niemann J. The Different Technologies for Cooling Data Centers. White Paper 59. – Schneider Electric Data Center Science Center, 2018. – 23 p;
3. Uptime Institute. Tier Standard: Topology. – New York: Uptime Institute LLC, 2021. – 20 p;
4. Особливості серверного обладнання | Всеосвіта. Всеосвіта. [Електроний ресурс] URL: https://vseosvita.ua/lesson/osoblyvosti-servernoho-obladnannia-789406.html;
5. Охолодження серверної та ЦОД: вибір системи для дата-центру | ЕсЛюдгер. ЕсЛюдгер. [Електроний ресурс] URL:https://www.esludger.com.ua/uk/okholodzhennia-servernoi-okholodzhennia-tsod-vybir-data-tsentr.html;
6. 6 популярних методів охолодження дата-центрів: їхні переваги та недоліки | GigaCenter. GigaCenter. [Електроний ресурс] URL: https://gigacenter.ua/ua/news/6-populyarnih-metod-v-oholodzhennya-datacentr-v-hn-perevagi-ta-nedol-ki;
7. Direct-to-Chip Cooling: Precision Technology behind AI | LinkedIn. LinkedIn. [Електроний ресурс] URL: https://www.linkedin.com/pulse/direct-to-chip-cooling-precision-technology-behind-ai-oq7kf/ ;
8. Single-Phase Immersion Cooling: An Efficient Cooling Solution | Fluorines Chemicals. Fluorines Chemicals. [Електроний ресурс] URL: https://ua.fluorines-chemicals.com/info/single-phase-immersion-cooling-an-efficient-c-17538278230107136.html ;
9. DHT22 Datasheet | AllDatasheet. AllDatasheet. [Електроний ресурс] URL: https://www.alldatasheet.com/html-pdf/1132459/ETC2/DHT22/1153/10/DHT22.html ;
10. BME280 Datasheet | AllDatasheet. AllDatasheet. [Електроний ресурс] URL:https://www.alldatasheet.com/html-pdf/1132060/BOSCH/BME280/173/1/BME280.html ;
11. ATmega328P Automotive Microcontrollers Datasheet | Microchip Technology. Microchip Technology. [Електроний ресурс] URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf ;

12. ATMEGA2560 Datasheet | AllDatasheet. AllDatasheet. [Електроний ресурс] URL: https://www.alldatasheet.com/html-pdf/107092/ATMEL/ATMEGA2560/630/4/ATMEGA2560.html ;
13. ESP32 Series Datasheet | Espressif Systems. Espressif Systems. [Електроний ресурс] URL: https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf ;
14. ESP32 Technical Reference Manual | Espressif Systems. Espressif Systems. [Електроний ресурс] URL: https://documentation.espressif.com/esp32_technical_reference_manual_en.pdf ;
15. Плата Arduino UNO | Arduino Kit. Arduino Kit. [Електроний ресурс] URL: https://arduinokit.com.ua/ua/p2443129646-plata-arduino-uno.html ;
16. Types of Lithium-ion | Battery University. Battery University. [Електроний ресурс] URL: https://www.batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion ;
17. MQTT Essentials | HiveMQ. HiveMQ. [Електроний ресурс] URL: https://www.hivemq.com/mqtt/ ;
18. ESP32 MQTT – Publish and Subscribe with Arduino IDE | Random Nerd Tutorials. Random Nerd Tutorials. [Електроний ресурс] URL: https://randomnerdtutorials.com/esp32-mqtt-publish-subscribe-arduino-ide/ ;
19. Building a Simulated IoT System using ESP32, MQTT & Node-RED in Wokwi | Medium. Medium. [Електроний ресурс] URL: https://medium.com/@pranavvijayakumar20/building-a-simulated-iot-system-using-esp32-mqtt-node-red-in-wokwi-175e78da28b3 ;
20. LED Control (LEDC) API Reference | Espressif Systems. Espressif Systems. [Електроний ресурс] URL: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v5.3/esp32/api-reference/peripherals/ledc.html ;
21. ESP32 and FreeRTOS Setup Guide | YouTube. YouTube. [Електроний ресурс] URL: https://www.youtube.com/watch?v=Cr292cziTaI ;
22. Wokwi - Online Arduino and ESP32 Simulator | Wokwi. Wokwi. [Електроний ресурс] URL: https://wokwi.com/ ;
23. Cisco Packet Tracer | Networking Academy. Networking Academy. [Електроний ресурс] URL: https://www.netacad.com/courses/packet-tracer ;
24. Diagramming and drawing tool | draw.io. [Електроний ресурс] URL: https://www.drawio.com/ ;



Електрична схема системи адаптивного терморегулювання та моніторингу



Блок-схема алгоритму адаптивного терморегулювання та моніторингу [24]

Додаток В

ДЕМОНСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ

(Презентація)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій
Кафедра Комп'ютерної інженерії

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА

на тему: «Система терморегуляції серверного обладнання з підтримкою автономного живлення»

Виконав студент групи КІД-42

Керівник кваліфікаційної роботи:
Кондратюк Борис Олександрович, викладач кафедри

Мета роботи – розробка комплексної енергоефективної системи терморегуляції з підтримкою безперебійного живлення для забезпечення безперервної роботи серверного обладнання в умовах довготривалих відключень електромережі.

Об`єкт процес терморегуляції та забезпечення роботоздатності серверного обладнання в умовах нестабільного електропостачання.

Предмет дослідження – апаратно-програмні засоби та алгоритми керування адаптивною системою терморегуляції сервера з використанням мікроконтролерної платформи, датчиків мікроклімату та ШІМ-управління.

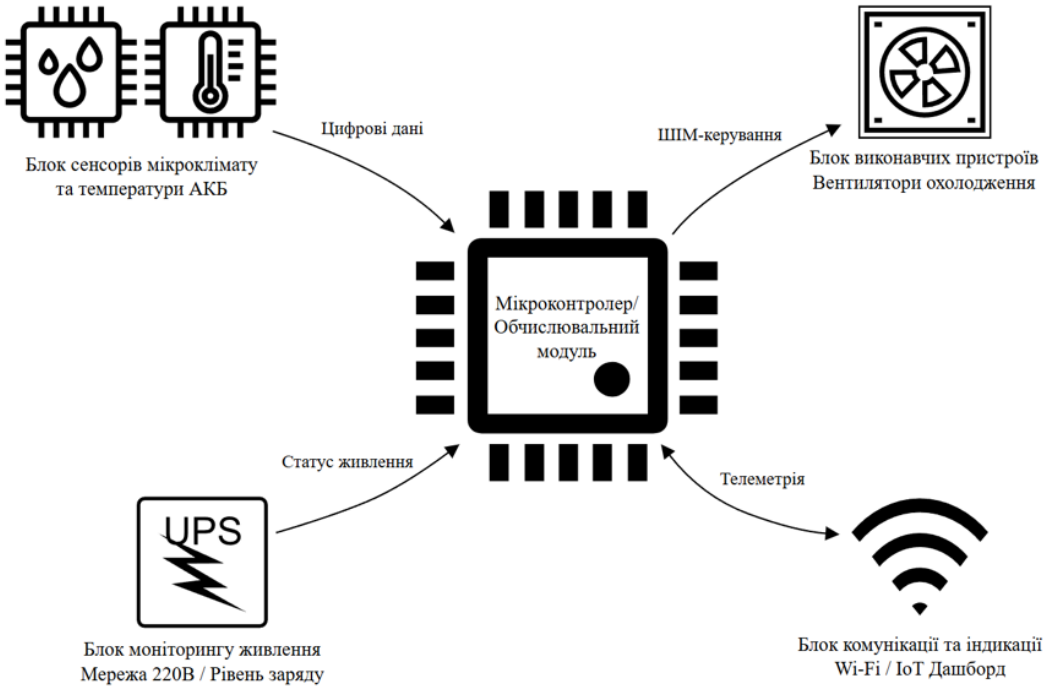
Актуальність обраної теми

В умовах нестабільного електропостачання класичні системи охолодження серверів швидко виснажують та перевантажують джерела безперебійного живлення (ДБЖ) через високе енергоспоживання. Тому розробка енергоефективної системи терморегуляції, яка автоматично адаптується до роботи від автономного живлення та економить заряд акамуляторів, є критично необхідною для захисту обладнання від перегрів під час довготривалих блекаутів.

АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ВИРІШЕНЬ ПИТАНЬ:

- Проведено аналіз серверного обладнання з впливом температури на систему.
- Проаналізовано класичні системи охолодження в серверних кімнатах .
- Визначено, що LiFePO4 це найкращий варіант з вибору акамуляторів для систем резервного та автономного живлення.
- Поставили умови для побудови системи терморегуляції, що проєктується .

Схема мікропроцесорної системи, з простим описом роботи



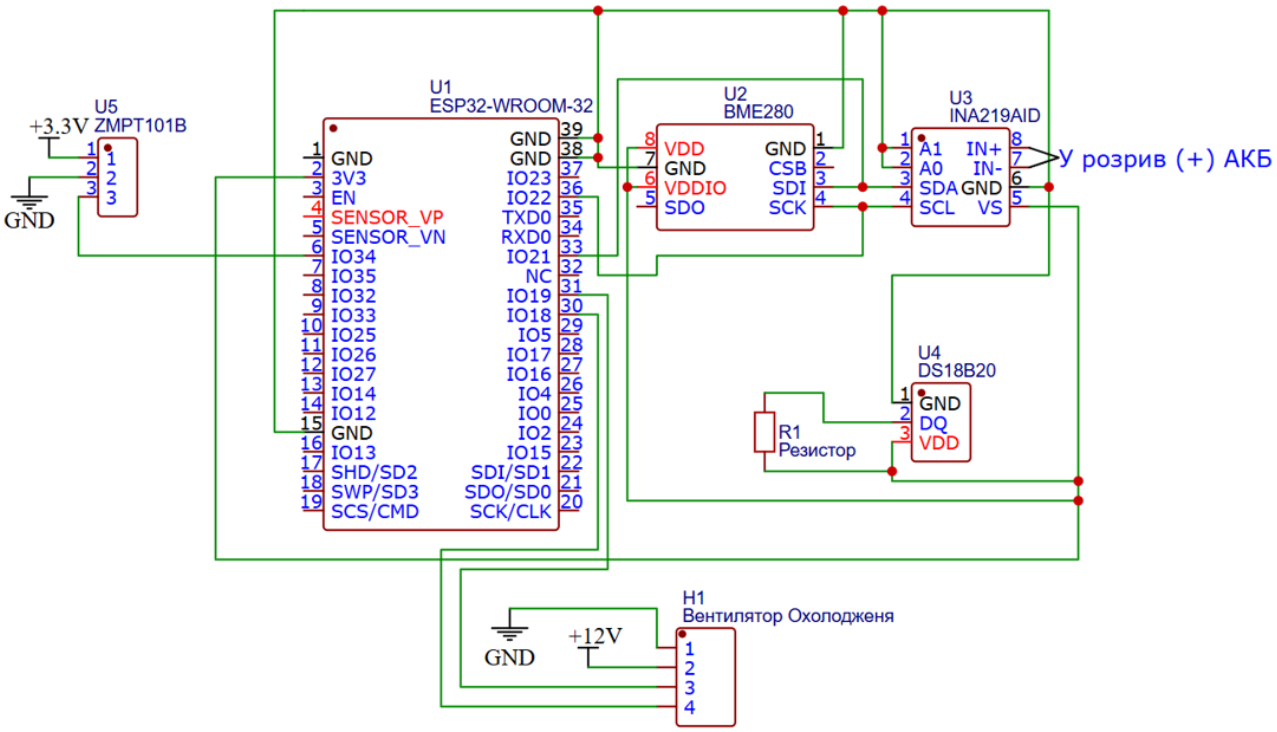
Вибір та обґрунтування мікроконтролерної платформи.

- Основним критеріями для вибору були: вбудований Wi-Fi модуль (заради IoT-функціоналу), кількість каналів ШІМ, обчислювальна потужність та енергоефективність.
- Для вибору оптимального платформи було проведено аналіз трьох найпопулярніших рішень: Arduino, STM32 та EPS32.
- Мікроконтролерний модуль ESP32 є безальтернативним лідером за сукупністю характеристик "продуктивність/мережеві можливості" і повністю відповідає вимогам до апаратної частини інтелектуальної системи терморегуляції, що розробляється.

Підбір сенсорів та модулів управління.

- Для вимірювання базових параметрів повітря використовуються цифрові сенсори з високою точністю такиим ми обрали DHT22
- Запобіганню термічному розгону резервних акумуляторів (LiFePO4/VRLA) вибрали цифрові термометри DS18B20
- Для більш прецизійного локального моніторингу в роботі застосовуємо комбінований цифровий датчик BME280, який вимірює вологість, атмосферний тиск та температуру
- Для безпечного визначення наявності змінного струму в мережі застосовуємо модуль на базі трансформатора напруги ZMPT101B. Він забезпечує необхідну гальванічну розв'язку між високовольтною лінією та низьковольтною логікою мікроконтролера.

Електрична схема системи адаптивного терморегулювання та моніторингу



Електротехнічні розрахунки вузлів схеми

1. Узгодження рівнів тахометра (Дільник напруги 12 В → 3.3 В)
- Мета: захист опору GPIO19 мікроконтролера ESP32
- Формула: $Vout = Vin \cdot \frac{R_2}{R+R_2}$.
- Розрахунок: При R = 10 кОм та R2 = 3.3 кОм

$$Vout = 12 \cdot \frac{3.3}{10 + 3.3} = 2.97 \text{ В}$$

- Висновок: 2.97 В – безпечний рівень для логіки 3.3 В.

2. Струм підтяжки шини 1-Wire (Датчик DS18B20)
- Мета: Забезпечення стабільної передачі цифрового сигналу
- Формула: $I = \frac{V}{R}$ (Закон Ома).
- Розрахунок: За стандартом R = 4.7 кОм

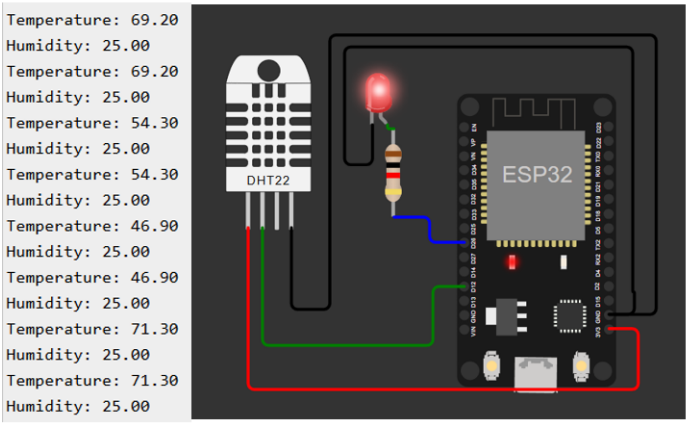
$$I = \frac{3.3}{4700} \approx 0.7 \text{ мА}$$

- Висновок: Оптимальний струм, що не перевантажує вихідний каскад датчика.

3. Енергетичний баланс (Вибір DC-DC перетворювача)
- Навантаження 3.3 В: ESP32 (~240 мА) + Датчик (~7 мА) + Запас (20%) ≈ 300 мА.
- Рішення: Обрано модуль LM2596 (номінал до 3 А), що забезпечує 10-кратний запас надійності.

До складу тестового стенда увійшли:

- Мікроконтролер ESP32 як головний обчислювальний модуль;
- Датчик DHT22 для динамічного моніторингу температури та вологості;
- Світлодіодний індикатор (LED), підключений через струмообмежувальний резистор до ШІМ-каналу контролера, який виконує роль візуалізатора інтенсивності роботи серверних вентиляторів.



Ізольоване тестування базового алгоритму опитування датчиків та генерації керуючого сигналу в середовищі Wokwi

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було вирішено актуальне інженерне завдання — розроблено комплексну енергоефективну систему терморегуляції з підтримкою автономного живлення для забезпечення безперервної роботи серверного обладнання. Отримані результати підтверджують повне досягнення поставленої мети дослідження. Розроблений апаратно-програмний комплекс відзначається високою відмовостійкістю, низьким енергоспоживанням і є готовим до практичного впровадження в інфраструктуру телекомунікаційних шаф та серверних кімнат малого бізнесу