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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Апаратно-програмний комплекс контролю енергоживлення вузлів локальної мережі»

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

_____ Вадим ШЕВЧУК
(підпис) Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача

Виконав: здобувач вищої освіти гр. КІД-42
Вадим ШЕВЧУК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

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

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

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

Шевчука Вадима Ігоровича
(прізвище, ім’я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Апаратно-програмний комплекс контролю енергоживлення вузлів локальної мережі,

керівник кваліфікаційної роботи Кондратюк Борис Олександрович, викладач, затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій
від 20.02.2026 № 51

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

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: Мережеве обладнання (маршрутизатори, термінал ONU), резервне джерело живлення постійного струму на базі Li-ion елементів (18650), середовище розробки Python, Telegram Bot API, технічна документація на мережеві протоколи TCP/IP та ICMP.

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

1. Аналіз проблеми безперебійного живлення та вибір методів моніторингу мережевих вузлів.
2. Проєктування архітектури апаратно-програмного комплексу та розробка алгоритму роботи програмного модуля моніторингу.
3. Практична реалізація комплексу, налаштування правил маршрутизації та тестування розробленої системи.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація, структурна схема мережі, блок-схема алгоритму роботи програмного модуля, фрагменти коду моніторингу, скріншоти тестування системи.*

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір даних та аналіз проблематики моніторингу мереж	09.03–23.03.2026	Виконано
2	Розробка теоретичної частини	24.03–01.04.2026	Виконано
3	Проєктування топології мережевої інфраструктури та підсистеми резервного живлення	02.04–11.04.2026	Виконано
4	Розробка програмного модуля моніторингу (Python) та інтеграція Telegram-бота	12.04–26.04.2026	Виконано
5	Розгортання комплексу у Docker та тестування розробленої системи	27.04–03.05.2026	Виконано
6	Оформлення висновків за результатами тестування та аналізу	04.05–06.05.2026	Виконано
7	Розробка презентації та ілюстративного матеріалу	07.05–10.05.2026	Виконано
8	Здача роботи на кафедру	18.05–21.05.2026	Виконано

Здобувач(ка) вищої освіти _____ Вадим ШЕВЧУК

(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник

кваліфікаційної роботи _____ Борис КОНДРАТЮК

(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра: 49 стор., 5 рис., 4 табл., 20 джерел.

Мета роботи - розробка відмовостійкого апаратно-програмного комплексу для безперервного контролю стану енергоживлення вузлів локальної мережі з функцією автоматизованого інформування.

Об'єкт дослідження - процес забезпечення відмовостійкості та моніторингу енергоживлення в локальних обчислювальних мережах.

Предмет дослідження - апаратно-програмні засоби та методи контролю стану енергоживлення мережевих вузлів на базі протоколів TCP/ICMP та API-інтерфейсів.

Короткий зміст роботи:

У роботі проведено аналіз існуючих методів моніторингу мережевого обладнання в умовах стабілізаційних відключень електроенергії. Запропоновано апаратно-програмне рішення, що використовує резервний маршрутизатор у якості сенсора наявності електроживлення за допомогою налаштування правил маршрутизації (NAT). Розроблено програмний модуль моніторингу на мові Python з інтеграцією системи сповіщень через Telegram API.

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

ЛОКАЛЬНА МЕРЕЖА, БЕЗПЕРЕБІЙНЕ ЖИВЛЕННЯ, МОНІТОРИНГ, МАРШРУТИЗАТОР, PYTHON, TELEGRAM API, NAT, ВІДМОВОСТІЙКІСТЬ.

ЗМІСТ

ВСТУП **10**

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ТА МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОГО ЖИВЛЕННЯ **9**

1.1 Вплив стабілізаційних відключень на працездатність мережевої інфраструктури 9

1.2. Теоретичні аспекти та аналіз технологій акумулювання енергії для систем резервного живлення 12

1.3. Порівняльний аналіз програмних засобів та мережевих протоколів моніторингу 16

1.4. Обґрунтування вибору мови програмування, технологій розробки та середовища контейнеризації 19

РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ **23**

2.1. Вибір апаратного забезпечення та проєктування підсистеми резервного живлення 23

2.2. Проєктування логічної топології та схеми мережевої взаємодії 26

2.3. Архітектура програмного модуля та середовище розгортання 28

2.4. Аналіз кібербезпеки та захисту мережевого периметра 31

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ **34**

3.1. Конфігурація мережевого обладнання та налаштування правил маршрутизації 34

3.2. Програмна реалізація модулів моніторингу та управління повідомленнями 37

3.3. Розгортання комплексу у середовищі контейнеризації Docker 42

3.4. Комплексне тестування системи, аналіз відмовостійкості та профілювання продуктивності 45

3.5. Розробка експлуатаційної документації та регламенту адміністрування комплексу 49

ВИСНОВКИ **53**

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ **56**

ДОДАТОК А..... **58**

ДОДАТОК Б..... **63**

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах сучасних викликів, пов'язаних із нестабільністю функціонування енергетичної інфраструктури, критично важливим завданням є забезпечення безперебійної роботи локальних обчислювальних мереж. Стабілізаційні та аварійні відключення електроенергії безпосередньо впливають на доступність мережевих сервісів, роботу маршрутизаційного обладнання та терміналів зв'язку. Традиційні системи моніторингу часто виявляються неефективними, оскільки самі залежать від наявності живлення, або потребують впровадження високовартісних спеціалізованих апаратних сенсорів (IoT-реле, розумних розеток, плат на базі мікроконтролерів). У зв'язку з цим, розробка апаратно-програмних комплексів, здатних здійснювати автономний моніторинг стану електромережі з використанням наявного резервного мережевого обладнання та методів маршрутизації, є вкрай актуальним інженерним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика забезпечення відмовостійкості мереж та моніторингу їх вузлів розглядається в роботах багатьох вітчизняних та закордонних дослідників. Значний внесок у розвиток методів діагностики телекомунікаційних мереж зробили такі вчені, як В.Г. Бабенко, А.М. Давиденко та інші. Сучасні підходи до побудови систем моніторингу (зокрема Zabbix, Prometheus, системи класу NMS) дозволяють ефективно відслідковувати стан сервісів, однак вони переважно орієнтовані на рівень програмного забезпечення та логічної зв'язності. Водночас питання створення бюджетних та відмовостійких рішень для фізичного контролю енергоживлення на рівні кінцевих споживачів (малих офісів або домашніх мереж) залишається недостатньо розкритим і потребує нових підходів до інтеграції існуючого апаратного забезпечення.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є розробка відмовостійкого апаратно-програмного комплексу для безперервного контролю стану енергоживлення вузлів локальної мережі з функцією автоматизованого інформування.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано та вирішено такі завдання:

- проаналізувати існуючі методи та засоби моніторингу локальних мереж в умовах нестабільного енергопостачання;
- дослідити протоколи мережевого рівня та вибрати оптимальні технології для реалізації програмної частини комплексу;
- спроєктувати апаратну архітектуру відмовостійкої мережі із застосуванням підсистеми резервного живлення на базі Li-ion елементів;
- розробити алгоритм роботи та програмний модуль моніторингу з використанням мови програмування Python та інтеграцією Telegram API;
- здійснити практичну реалізацію розробленого комплексу, налаштувати правила маршрутизації та провести тестування системи в реальних умовах експлуатації.

Об'єкт дослідження - процес забезпечення відмовостійкості та моніторингу енергоживлення в локальних обчислювальних мережах.

Предмет дослідження - апаратно-програмні засоби та методи контролю стану енергоживлення мережевих вузлів на базі протоколів TCP/ICMP та API-інтерфейсів.

Методи дослідження. У роботі використано методи системного аналізу (для дослідження предметної області та існуючих рішень), методи теорії обчислювальних мереж (для проєктування топології та налаштування маршрутизації), а також методи програмної інженерії та об'єктно-орієнтованого програмування (для розробки програмного модуля моніторингу).

Наукова новизна та практична значущість отриманих результатів. Практична значущість роботи полягає у створенні повністю функціонального комплексу, який дозволяє здійснювати точний моніторинг наявності електроенергії без використання спеціалізованих IoT-датчиків напруги. Запропоноване архітектурне рішення, яке використовує резервний маршрутизатор як апаратний сенсор середовища шляхом застосування технології трансляції мережевих адрес

(NAT), може бути легко масштабоване та впроваджене в інфраструктуру малого бізнесу або для приватного використання.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 49 сторінок

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ТА МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОГО ЖИВЛЕННЯ

1.1 Вплив стабілізаційних відключень на працездатність мережевої інфраструктури

Стабільність функціонування сучасних інформаційно-комунікаційних систем безпосередньо залежить від надійності та безперервності систем електропостачання. В умовах системного енергетичного дефіциту та впровадження графіків обмеження споживання, проблема забезпечення безперервного доступу до мережі Інтернет на рівні кінцевого споживача («останньої милі») перейшла з розряду сервісних переваг у категорію критичних інженерних завдань. Для розуміння глибини впливу відключень на мережеву інфраструктуру необхідно провести детальний аналіз фізичного та канального рівнів передачі даних у різних топологіях побудови мереж доступу.

Історично найбільш розповсюдженою технологією підключення багатоквартирних будинків була архітектура FTTB (Fiber to the Building - оптика до будинку). У такій схемі магістральний оптичний канал провайдера термінується на активному керованому комутаторі рівня L2 (Layer 2), що встановлюється в технічному приміщенні або під’їзді будівлі. Подальша доставка сигналу до квартир здійснюється за допомогою мідного кабелю типу «кручена пара» (UTP/FTP). Головною вразливістю FTTB в умовах блекаутів є пряма залежність кожного активного вузла від побутової мережі 220 В. Навіть якщо ядро мережі провайдера має потужне резервування, знеструмлення одного будинку призводить до вимкнення комутатора, що миттєво розриває зв'язок для всіх абонентів у радіусі 100 метрів.

На відміну від FTTB, сучасна технологія GPON (Gigabit Passive Optical Network) базується на використанні повністю пасивних компонентів у проміжному сегменті. Це дозволяє забезпечити роботу мережі навіть за умови відсутності

електроенергії у всьому житловому кварталі, за умови наявності живлення на вузлі провайдера та у абонента.

Для обґрунтування вибору технології моніторингу та аналізу вразливостей системи проведемо розширене порівняння параметрів доступу, що наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Порівняння технологій моніторингу.

Параметр порівняння	**Архітектура FTTB (Ethernet)**	**Архітектура GPON (Passive)**
Середовище передачі до абонента	мідний кабель (UTP Cat 5e);	оптичне волокно (G.652/G.657);
Потреба у живленні проміжних вузлів	обов’язкова (220 В);	відсутня (пасивні спліттери);
Стійкість до електромагнітних наводок	низька (вразливість до гроз);	абсолютна (діелектричне волокно);
Максимальна швидкість завантаження	до 1000 Мбіт/с;	до 2488 Мбіт/с;
Метод розділення середовища	комутація пакетів;	часове мультиплексування (TDM);
Енергозалежність «останньої милі»	висока;	нульова.

Технологія GPON використовує деревоподібну топологію (Point-to-Multipoint) та працює на фізичному рівні моделі OSI за допомогою світлових хвиль різних діапазонів. Низхідний потік (від провайдера до клієнта) транслюється на довжині хвилі 1490 нм, а висхідний - на 1310 нм. Якщо абонент використовує телебачення (RF Video), задіюється додаткова довжина хвилі 1550 нм. Пасивні розгалужувачі (спліттери) розділяють оптичну потужність сигналу між клієнтами, що виключає необхідність в активних регенераторах.

Однак, незважаючи на автономність магістралі, клієнтське обладнання - термінал ONU (Optical Network Unit) та Wi-Fi маршрутизатор - залишаються активними пристроями. При раптовому зникненні напруги 220 В відбуваються наступні деструктивні процеси:

- припинення роботи прийомопередавача лазерного модуля ONU, що призводить до статусу «LOS» (Loss of Signal) на стороні провайдера;
- очищення динамічних таблиць комутації (MAC-address table) та ARP-кешу;
- миттєвий розрив існуючих TCP-сесій (Transmission Control Protocol) та UDP-потоків;
- деградація роботи систем «розумного будинку», камер відеоспостереження та серверів локального зберігання даних (NAS).

Для запобігання цим процесам абоненти масово впроваджують джерела безперебійного живлення постійного струму (DC-UPS). Проте таке рішення створює парадоксальну інженерну ситуацію, відому як проблема «сліпої зони» моніторингу. Оскільки маршрутизатор продовжує працювати від акумулятора, його внутрішня операційна система (наприклад, на базі Linux/OpenWrt) не фіксує переходу на резервний канал.

Стандартні засоби мережевого моніторингу (ICMP ping), які орієнтовані на перевірку логічної доступності IP-адреси, будуть звітувати про 100% стабільність вузла. Водночас, користувач або системний адміністратор втрачають розуміння реального стану вхідної мережі 220 В. Це унеможливлює:

- прогнозування часу вичерпання заряду акумуляторних батарей (наприклад, Li-ion 18650);
- автоматизацію сценаріїв енергозбереження (вимкнення другорядних споживачів у мережі);
- збір статистичних даних щодо реальних графіків відключень для подальшого аналізу стабільності інфраструктури.

Таким чином, розробка апаратно-програмного комплексу, що здатен диференціювати логічну доступність мережевого обладнання та фізичну наявність

живлення в мережі, є критично важливим етапом побудови сучасної відмовостійкої локальної мережі. Це вимагає впровадження спеціалізованих алгоритмів зондування, які базуються не лише на перевірці канального зв'язку, а й на виявленні апаратних станів периферійних пристроїв-сенсорів.

1.2. Теоретичні аспекти та аналіз технологій акумулювання енергії для систем резервного живлення

Забезпечення автономності мережевого обладнання на рівні абонента вимагає глибокого розуміння фізичних та електрохімічних процесів, що відбуваються в системах резервного живлення. Історично для підтримки роботи комп’ютерної техніки застосовувалися джерела безперебійного живлення змінного струму (AC-UPS). Архітектура таких пристроїв передбачає подвійне перетворення енергії: спочатку змінний струм 220 В перетворюється на постійний струм для заряду акумуляторної батареї (зазвичай 12 В), а при зникненні вхідної напруги спеціальний інвертор знову підвищує напругу батареї до 220 В змінного струму.

Головним недоліком такого підходу є вкрай низька енергоефективність при роботі з малопотужними навантаженнями (маршрутизаторами та терміналами ONU, сумарне споживання яких рідко перевищує 10-15 Вт). Втрати на перетворення в інверторі AC-UPS, а також подальші втрати в штатних блоках живлення самих маршрутизаторів (які знову перетворюють 220 В на 9 В або 12 В постійного струму), призводять до того, що загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) системи падає до 40-50 %. Решта енергії розсіюється у вигляді тепла.

Сучасним індустріальним стандартом для телекомунікаційного обладнання SOHO (Small Office/Home Office) є використання ДБЖ постійного струму (DC-UPS). Вони подають живлення безпосередньо на пристрій, минаючи етап генерації змінного струму 220 В. Ефективність таких систем безпосередньо залежить від типу використаних акумуляторних комірок. Донедавна стандартом де-факто були свинцево-кислотні акумулятори, виготовлені за технологією AGM (Absorbent Glass Mat) або GEL.

Експлуатація свинцево-кислотних батарей у системах моніторингу та зв’язку має низку суттєвих обмежень, основними з яких є:

- деградація пластин (сульфатація) при тривалому перебуванні в розрядженому стані;
- вузький діапазон робочої ємності, оскільки розряд нижче 50 % від номіналу експоненціально зменшує загальний ресурс циклів батареї;
- низька питома щільність енергії (близько 30-40 Вт·год/кг), що унеможливлює створення компактних пристроїв;
- сильна залежність реальної ємності від струму розряду.

Останній пункт описується емпіричним рівнянням Пейкерта (Peukert's law), яке демонструє нелінійність віддачі енергії. Формула залежності має вигляд:

$$C_p = I^k \times t$$

де C_p - ємність Пейкерта, яка є постійною для конкретної батареї; I - струм розряду, виражений в амперах; t - час розряду в годинах; k - константа Пейкерта (для свинцево-кислотних акумуляторів значення k варіюється в межах від 1,1 до 1,3). Згідно з цією закономірністю, при збільшенні навантаження ефективна ємність батареї стрімко падає, що робить розрахунки часу автономної роботи вкрай неточними без апаратного контролю.

Вирішенням цих проблем став перехід на літієві технології, зокрема літій-іонні (Li-ion, хімія NCA або NMC) та літій-залізо-фосфатні (LiFePO4) елементи. Принцип їх дії базується на процесах інтеркаляції - зворотному впровадженні іонів літію в кристалічну решітку матеріалів катода та анода під час заряду і розряду. Для детального аналізу застосовності цих технологій у системах безперебійного живлення маршрутизаторів складено порівняльну таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 Електрохімічні та експлуатаційні характеристики сучасних акумуляторних комірок

Характеристика	**Свинцево-кислотні (AGM)**	**Літій-іонні (NMC 18650)**	**Літій-залізо-фосфатні (LiFePO4)**
Номінальна робоча напруга комірки, В	2,0;	3,7;	3,2;
Гранична напруга розряду, В	1,75;	2,5;	2,0;
Життєвий цикл (до втрати 20 % ємності)	250-300;	500-1000;	2000-4000;
Питома енергетична щільність, Вт·год/кг	30-40;	150-250;	90-120;
Внутрішній опір (імпеданс), мОм	15-30;	10-25;	5-15;
Ефект Пейкерта	сильно виражений;	майже відсутній;	майже відсутній.

Як видно з таблиці, літій-іонні комірки (зокрема, популярного форм-фактора 18650) мають найвищу щільність енергії, що дозволяє створювати надзвичайно компактні DC-UPS з великим запасом автономності. Напруга однієї комірки змінюється від 4,2 В у повністю зарядженому стані до 2,5 В у розрядженому.

Ця зміна напруги є критичним фактором для проєктування систем моніторингу. Оскільки маршрутизатор вимагає стабілізованої напруги (наприклад, рівно 12 В або 9 В), у конструкції DC-UPS застосовуються високочастотні імпульсні DC-DC перетворювачі (Buck converter для пониження напруги або Boost converter для її підвищення). Робота імпульсного перетворювача базується на законі збереження енергії: потужність на вході перетворювача завжди має дорівнювати потужності на виході плюс втрати на тепло.

Математично споживаний від акумуляторів струм описується наступним рівнянням:

$$I_{in} = \frac{V_{out} \cdot I_{out}}{V_{in} \cdot \eta}$$

Де I_{in} - струм, що відбирається від акумулятора; V_{out} та I_{out} - напруга і струм навантаження (роутера); V_{in} - поточна напруга на клемах акумулятора; η - ККД імпульсного перетворювача (зазвичай становить 0,85-0,95).

Із цього рівняння випливає фундаментальна проблема автономних мережевих вузлів: у міру розряду акумулятора його напруга V_{in} падає, що змушує DC-DC перетворювач пропорційно збільшувати споживаний струм I_{in} для підтримки стабільної потужності на виході. Таке лавиноподібне зростання струму в кінці циклу розряду призводить до різкого вимкнення обладнання, яке неможливо спрогнозувати лінійними методами.

Крім того, бюджетні рішення DC-UPS, що масово застосовуються абонентами, комплектуються базовими платами захисту BMS (Battery Management System), які контролюють лише граничні пороги напруги та струми короткого замикання. Вони не мають інтелектуальних інтерфейсів передачі даних (таких як I2C, SMBus або RS-485). Відповідно, операційна система маршрутизатора не отримує жодних телеметричних даних від блоку живлення. Маршрутизатор продовжує працювати і відповідати на мережеві запити, не "знаючи", чи живиться він від міської електромережі, чи від акумуляторів, і який відсоток заряду залишився.

Саме відсутність апаратної телеметрії на стику "джерело живлення - маршрутизатор" обґрунтовує необхідність розробки зовнішніх методів зондування. Оскільки логічний стан головного маршрутизатора (Up/Down) більше не корелює з фізичною наявністю напруги 220 В у локальній мережі, виникає потреба в інтеграції додаткових сенсорів на фізичному рівні та розробці спеціалізованого програмного забезпечення для їх моніторингу.

1.3. Порівняльний аналіз програмних засобів та мережевих протоколів моніторингу

Завдання моніторингу інфраструктури є фундаментальним аспектом системного адміністрування, спрямованим на забезпечення доступності, надійності та безпеки IT-сервісів. В умовах використання джерел безперебійного живлення постійного струму (DC-UPS) класична парадигма моніторингу стикається з критичною проблемою: логічна доступність вузла більше не гарантує нормального фізичного стану його електроживлення. Для вибору оптимального шляху вирішення цієї проблеми необхідно провести глибокий аналіз існуючих на ринку систем та протоколів, розділивши їх на три основні категорії: корпоративні системи, рішення екосистеми Інтернету речей (IoT) та базові мережеві утиліти.

Перша категорія охоплює корпоративні платформи класу NMS (Network Management Systems), найбільш відомими представниками яких є Zabbix, PRTG Network Monitor, Nagios та Prometheus. Архітектура таких систем базується на централізованому сервері, який здійснює регулярний збір метрик з підключеного обладнання. Для зчитування апаратних станів комутаторів та маршрутизаторів корпоративного класу вони переважно використовують протокол SNMP (Simple Network Management Protocol).

Протокол SNMP працює на прикладному рівні (Application Layer) моделі OSI та використовує порти UDP 161 для запитів і UDP 162 для пасивних сповіщень (Traps). Принцип роботи протоколу полягає у зверненні сервера-менеджера до SNMP-агента на цільовому пристрої з метою зчитування ієрархічної бази даних OID (Object Identifiers), яка зберігається в структурі MIB (Management Information Base). За допомогою SNMP можна отримати детальні показники навантаження центрального процесора, температури модулів та статусів фізичних інтерфейсів.

Незважаючи на потужність корпоративних NMS-систем, їх застосування для завдання контролю живлення абонентських вузлів має низку критичних недоліків:

- надлишкова складність налаштування, розгортання та підтримки серверної інфраструктури;

- відсутність вбудованих SNMP-агентів у бюджетних маршрутизаторах класу SOHO (Small Office/Home Office);
- нездатність протоколу отримати дані про фізичну наявність напруги 220 В, оскільки бюджетні пристрої DC-UPS не мають вбудованої плати керування з підтримкою мережевих інтерфейсів.

Друга категорія рішень базується на технологіях екосистеми Інтернету речей (IoT), зокрема використанні розумних розеток (Smart Plugs) або реле напруги з інтегрованими модулями Wi-Fi чи Zigbee. З технічної точки зору, більшість таких пристроїв працює на базі протоколу MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Цей протокол є легковаговим і функціонує поверх транспортного протоколу TCP (порт 1883). Архітектура MQTT використовує модель «публікація/підписка» (Publish/Subscribe), де кінцевий IoT-пристрій відправляє телеметричні дані на центральний сервер - брокер повідомлень (Broker), використовуючи визначені ієрархічні топіки (Topics).

Застосування готових Wi-Fi рішень для моніторингу електроживлення має суттєві архітектурні вразливості, серед яких:

- критична залежність комерційних пристроїв від пропрієтарних хмарних серверів виробників (наприклад, Tuya, eWeLink, Xiaomi), що створює неконтрольовану зовнішню точку відмови (Single Point of Failure);
- значна затримка у фіксації статусу знеструмлення, оскільки при втраті живлення розетка не може надіслати прощальне повідомлення (Last Will and Testament), а хмарний сервер фіксує втрату зв'язку лише після вичерпання таймауту очікування (Keep-Alive Timeout), який може становити від 15 до 60 секунд;
- необхідність залучення додаткових апаратних ресурсів (наприклад, одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi) для локального розгортання MQTT-брокера (наприклад, Eclipse Mosquitto) та систем автоматизації типу Home Assistant, що суттєво здорожчує вартість проєкту.

Третя категорія охоплює базові мережеві утиліти та власноруч написані скрипти (bash, PowerShell), що функціонують на основі протоколу ICMP (Internet Control Message Protocol). Утиліта ping використовує пакети типу Echo Request

(Type 8) та очікує на відповідь Echo Reply (Type 0). Цей метод є найменш ресурсоємним, проте абсолютно неефективним у топологіях з резервуванням живлення ядра мережі. Якщо цільовий маршрутизатор заживлений від акумулятора, його мережевий стек продовжує обробляти ICMP-пакети та надсилати відповіді, повністю маскуючи факт зникнення первинної напруги. Крім того, сучасні провайдери часто блокують ICMP-трафік на WAN-інтерфейсах з метою запобігання мережевим атакам типу Ping Flood.

Для наочного порівняння технічних характеристик та архітектурних особливостей описаних технологій складено таблицю 1.3.

Таблиця 1.3. Порівняльна характеристика протоколів та систем мережевого моніторингу

Параметр порівняння	**Корпоративні NMS (SNMP)**	**IoT рішення (MQTT)**	**Власна розробка (TCP Socket)**
Модель взаємодії	клієнт-сервер (Polling / Traps);	брокер-клієнт (Pub/Sub);	клієнт-сервер (Socket connection);
Транспортний рівень OSI	UDP (порти 161/162);	TCP (порт 1883);	TCP (довільний прокинутий порт);
Реакція на втрату 220 В	відсутня (без Smart UPS);	затримка до 60 с (Keep-Alive);	миттєва реакція на рівні TCP;
Апаратні вимоги	високі (виділений сервер, БД);	середні (Raspberry Pi, Wi-Fi реле);	мінімальні (додатковий роутер-сенсор);
Залежність від хмарних сервісів	повністю відсутня;	висока (для комерційних пристроїв);	відсутня (повністю локальний контроль).

Виходячи з проведеного аналізу, можна дійти висновку, що жодна з класичних систем не здатна забезпечити точний та економічно доцільний моніторинг електроживлення в умовах використання бюджетних DC-UPS. Це обґрунтовує необхідність створення принципово нової апаратної топології, яка передбачає використання додаткового (резервного) маршрутизатора в ролі фізичного сенсора напруги.

У такій архітектурі програмне зондування має здійснюватися не через ICMP чи SNMP, а за допомогою низькорівневих TCP-сокетів. Протокол TCP (Transmission Control Protocol) гарантує встановлення логічного з'єднання за допомогою механізму триетапного рукостискання (Three-way Handshake). Якщо цільовий сенсор увімкнений у розетку, він відповідає пакетом SYN-ACK (Synchronize-Acknowledge). Якщо ж сенсор знеструмлений, спроба встановлення TCP-з'єднання завершується таймаутом або поверненням пакета RST (Reset) від головного маршрутизатора, що дозволяє програмному модулю миттєво та безпомилково зафіксувати зміну фізичного стану електромережі.

1.4. Обґрунтування вибору мови програмування, технологій розробки та середовища контейнеризації

Для практичної реалізації розробленого алгоритму моніторингу необхідно було обрати оптимальний програмний стек, який би задовольняв вимоги щодо швидкодії, відмовостійкості, здатності до асинхронної обробки мережевих запитів та простоти розгортання на кінцевих серверах. Оскільки ядром системи є процес безперервного мережевого зондування (Polling), архітектура програмного модуля має ефективно працювати з операціями вводу/виводу (I/O Bound) без блокування основного потоку виконання.

Під час етапу проєктування розглядалися три основні мови програмування: C++, Go та Python. Мова C++ забезпечує максимальну швидкодію та прямий доступ до системних викликів ядра операційної системи (наприклад, epoll у Linux), проте вимагає значних витрат часу на управління пам'яттю та інтеграцію високорівневих

мережевих протоколів (HTTPS) для взаємодії з API месенджерів. Мова Go (Golang) має вбудовану підтримку легковагих потоків (Goroutines), що робить її чудовим кандидатом для мережевих мікросервісів, однак її екосистема для створення ботів є менш розвиненою порівняно з іншими варіантами.

Індустріальним стандартом для завдань мережевої автоматизації (Network Automation) та написання інтеграційних скриптів на сьогодні є мова Python версії 3.x. Вибір Python версії 3.11 для розробки даного комплексу обґрунтовується наступними чинниками:

- наявність вбудованої бібліотеки asyncio, яка реалізує однопотокову кооперативну багатозадачність на базі подієвого циклу (Event Loop);
- можливість створення неблокуючих мережевих сокетів, що дозволяє системі одночасно очікувати на відповіді від декількох TCP-портів без споживання ресурсів процесора;
- розвинена екосистема сторонніх пакетів, зокрема сучасних фреймворків для роботи з API;
- висока швидкість розробки та прототипування завдяки лаконічному синтаксису.

Для реалізації інтерфейсу взаємодії з користувачем було обрано платформу Telegram та її офіційний інтерфейс Telegram Bot API. На відміну від класичних методів сповіщення (SMS-шлюзи, які потребують фінансових витрат, або електронна пошта, маршрутизація якої може займати непередбачуваний час), архітектура Telegram дозволяє миттєво доставляти Push-сповіщення на будь-які мобільні чи десктопні платформи. Програмна інтеграція реалізована за допомогою бібліотеки aiogram версії 3.x, яка повністю побудована на асинхронних парадигмах і підтримує сучасні механізми маршрутизації вхідних повідомлень (Dispatcher).

Збереження стану системи та ідентифікаторів користувачів (Chat ID) вимагає використання бази даних. Враховуючи специфіку роботи модуля (відносно невелика кількість записів, відсутність необхідності складних реляційних запитів з множинними JOIN), використання повноцінних клієнт-серверних СУБД (таких як

PostgreSQL або MySQL) є недоцільним. Замість цього було обрано локальну базу даних SQLite. Її архітектурні переваги для даного проєкту:

- відсутність окремого фонового процесу (сервера), оскільки ядро бази даних компілюється безпосередньо разом із програмою;
- зберігання всієї структури та даних у єдиному локальному файлі, що критично спрощує процеси резервного копіювання та міграції;
- підтримка транзакційності (ACID), що гарантує цілісність даних навіть у випадку раптового зникнення живлення на сервері, де виконується скрипт;
- можливість неблокуючої роботи через драйвер aiosqlite, що ідеально інтегрується в загальний асинхронний цикл Python-модуля.

Окремим критичним аспектом проєктування є середовище розгортання програмного продукту. Класичний запуск скриптів безпосередньо на хостовій операційній системі (Bare-metal) призводить до проблеми "забруднення" глобального середовища залежностями (Dependency Hell) та ускладнює перенесення коду між різними серверами чи VPS-хостингами. Для усунення цих недоліків використано технологію контейнеризації Docker.

На відміну від класичних віртуальних машин (VM), які емулюють повний стек апаратного забезпечення та містять власну гостьову ОС, Docker-контейнери використовують спільне ядро хостової операційної системи, ізолюючи лише процеси, файлову систему та мережевий простір за допомогою механізмів просторів імен (Namespaces) та контрольних груп (Cgroups) ядра Linux. Це дозволяє зменшити накладні витрати ресурсів до мінімуму.

Для оптимізації розміру та підвищення безпеки комплексу базовим образом для створення контейнера було обрано python:3.11-alpine. Дистрибутив Alpine Linux базується на мінімалістичній стандартній бібліотеці musl libc та наборі утиліт BusyBox. Розмір базового образу становить близько 50 МБ (на відміну від образів на базі Debian/Ubuntu, розмір яких сягає сотень мегабайтів). Мінімальна кількість встановлених пакетів суттєво зменшує площу потенційної атаки (Attack Surface), що є важливим фактором для систем моніторингу.

Управління параметрами контейнера здійснюється за допомогою інструменту оркестрації Docker Compose. Використання конфігураційного файлу docker-compose.yml дозволяє декларативно описати всю необхідну інфраструктуру:

- параметри автоматичного перезапуску у випадку критичних помилок (restart: unless-stopped);
- мапування локальних директорій у внутрішню файлову систему контейнера (Volumes) для персистентного зберігання бази даних SQLite;
- безпечну передачу конфіденційних даних (API-токенів) через змінні середовища (Environment Variables), що унеможливлює їх випадковий витік через публічні репозиторії коду;
- налаштування часових поясів (Timezones) для коректного форматування міток часу у повідомленнях про зникнення та появу електроенергії.

Використання вищезазначеного стеку технологій дозволяє створити високонадійний, портативний та енергоефективний програмний засіб, здатний функціонувати в автономному режимі 24/7 та миттєво реагувати на зміни фізичної топології мережі доступу.

РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ

2.1. Вибір апаратного забезпечення та проєктування підсистеми резервного живлення

Проєктування апаратно-програмного комплексу розпочинається з детального вибору та інженерного обґрунтування фізичних компонентів, що мають забезпечити безперебійну маршрутизацію даних та реалізацію функції апаратного зондування наявності первинної напруги 220 В. Архітектурне рішення базується на принципі декомпозиції локальної мережі на два функціональні сегменти: енергонезалежне ядро та енергозалежний сенсорний вузол.

У якості головного маршрутизатора (Core Router) обрано пристрій TP-Link Archer C64. Даний вибір зумовлений високою обчислювальною потужністю його системи на кристалі (SoC), що дозволяє підтримувати стабільну роботу мережевих служб при тривалих навантаженнях. Технічні характеристики пристрою відповідають вимогам сучасних гігабітних мереж доступу:

- підтримка стандарту Wi-Fi 5 (802.11ac) із сумарною швидкістю до 1200 Мбіт/с у двох діапазонах;
- наявність чотирьох гігабітних LAN-портів та одного WAN-порту для інтеграції з оптичними терміналами ONU;
- технологія MU-MIMO 2x2, що оптимізує розподіл ресурсів радіоканалу між декількома активними клієнтами;
- підтримка функції Beamforming для спрямованої передачі сигналу, що знижує рівень завад та енергоспоживання пристрою;
- номінальна напруга живлення 12 В, що є оптимальним для прямої інтеграції з літієвими акумуляторними збірками без додаткових каскадів стабілізації.

Роль фізичного сенсора напруги виконує компактний маршрутизатор TP-Link Archer C54. Його функціональне призначення полягає в тому, щоб виступати

апаратним тригером для програмного модуля моніторингу. Пристрій підключається безпосередньо до розетки 220 В через штатний блок живлення. Оскільки цей вузол навмисно позбавлений резервного джерела енергії, його мережева доступність (логічний статус «Online») однозначно підтверджує наявність напруги в первинній електромережі.

Для візуалізації спроєктованої архітектури та зон енергетичної незалежності розроблено схему фізичної топології комплексу (рис. 2.1).

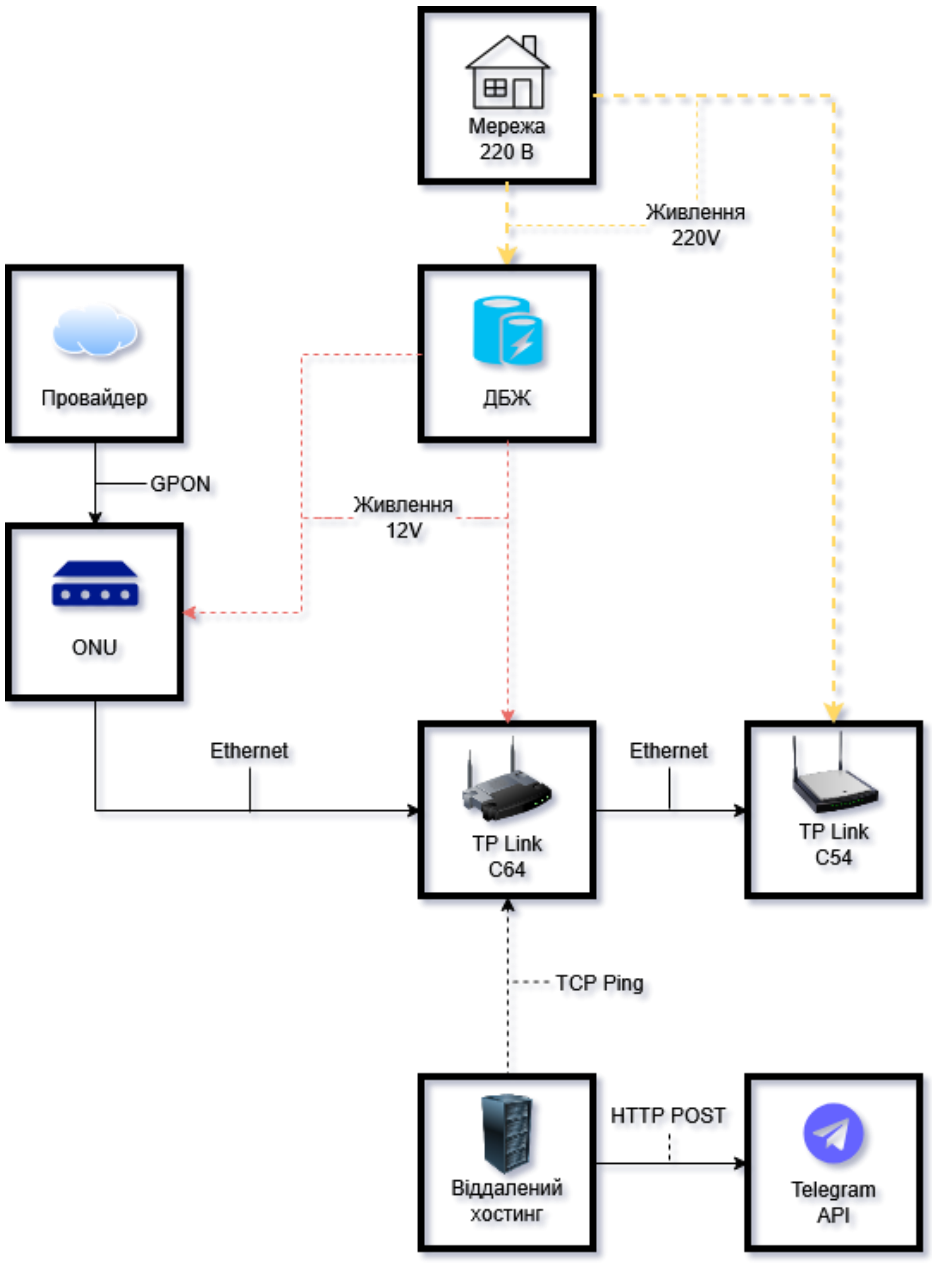


Рисунок 2.1 - Структурна схема апаратно-програмного комплексу

На наведеній діаграмі відображено просторовий розподіл обладнання та його прив’язку до ліній живлення. Ядро мережі (зелена зона) захищене ДБЖ, тоді як сенсор (червона зона) залежить від стану загальної електромережі. Це дозволяє системі диференціювати логічну доступність інтернету та фізичний стан енергосистеми.

Підсистема резервного живлення реалізована на базі інтелектуального джерела DC1018. Пристрій оснащений контролером заряду, що працює за алгоритмом CC/CV, та багатоступеневою системою захисту BMS (Battery Management System). Для досягнення максимальних показників автономності було проведено модернізацію батарейного блоку: штатні елементи замінено на чотири високоякісні літій-іонні комірки LiitoKala INR18650-35E (хімія NCA). Ці елементи характеризуються високою енергетичною щільністю та стабільним імпедансом, що є критичним для довготривалої роботи.

Інженерний розрахунок параметрів підсистеми на основі даних дослідної експлуатації (фактичний час роботи T = 8 годин) наведено нижче:

- Загальна ємність акумуляторної збірки (4 елементи паралельно):

$$C_{sum} = 4 \times 3500 = 14000 \text{ мА} \cdot \text{год } (14 \text{ А} \cdot \text{год})$$

- Загальний енергозапас при номінальній напрузі 3,7 В:

$$W_{bat} = 14 \text{ А} \cdot \text{год} \times 3{,}7 \text{ В} = 51{,}8 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

- Середня споживана потужність навантаження P_{avg} при ККД перетворювача $\eta \approx 0{,}9$:

$$P_{avg} = \frac{51{,}8 \cdot 0{,}9}{8} \approx 5{,}82 \text{ Вт}$$

Отриманий результат (5,82 Вт) підтверджує високу енергоефективність системи. Така потужність покриває роботу оптичного термінала ONU та маршрутизатора Archer C64 у режимі активної передачі даних. Використання літієвих елементів NCA-типу дозволило забезпечити 8 годин автономності, що гарантує безперервність моніторингу навіть за умов тривалих аварійних відключень.

2.2. Проєктування логічної топології та схеми мережевої взаємодії

Після визначення апаратного складу комплексу наступним етапом є проєктування логічної структури мережі та розробка детальної схеми взаємодії між її компонентами. Логічна топологія повинна забезпечувати не лише стабільний доступ до мережі Інтернет для кінцевих пристроїв, а й створювати надійний, детермінований канал для зовнішнього зондування стану апаратного сенсора.

Основою побудови локальної мережі є зіркоподібна топологія, де центральним вузлом виступає маршрутизатор TP-Link Archer C64. Він виконує ролі шлюзу за замовчуванням (Default Gateway), DHCP-сервера для внутрішніх клієнтів та сервера трансляції мережевих адрес (NAT). Логічний поділ мережі реалізовано таким чином, щоб забезпечити максимальну прозорість для зовнішнього моніторингу при збереженні високого рівня безпеки внутрішнього сегмента.

Для коректної роботи системи моніторингу впроваджено статичну схему адресації для критичних вузлів. Використання динамічних адрес (DHCP) для сенсора є неприпустимим, оскільки будь-яка зміна внутрішньої IP-адреси призведе до розриву правила переадресації та, як наслідок, до хибної фіксації знеструмлення об’єкта програмним модулем. Зведена схема логічної адресації та призначення інтерфейсів компонентів комплексу наведена у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Функціональне призначення вузлів мережі

Вузол мережі	**Тип інтерфейсу**	**Логічна адреса (IP)**	**Функціональне призначення**
TP-Link C64 (Core)	WAN (External)	Публічна (Static/DDNS);	зв'язок з ISP провайдером;
TP-Link C64 (Core)	LAN (Internal)	192.168.0.1;	шлюз локальної мережі;

Продовження таблиці 2.1.

Вузол мережі	**Тип інтерфейсу**	**Логічна адреса (IP)**	**Функціональне призначення**
TP-Link C54 (Sensor)	WAN (Uplink)	192.168.0.2 (Static);	апаратне зондування напруги;
Remote Server (App)	External	Зовнішня адреса хостингу;	логіка моніторингу та API.

Ключовим механізмом, що забезпечує зв’язок між зовнішнім програмним модулем та внутрішнім сенсором, є технологія Port Forwarding (прокидання портів). На головному маршрутизаторі C64 налаштовано правило Virtual Server, яке створює статичне відображення зовнішнього порту TCP на внутрішню адресу сенсора. При проєктуванні схеми переадресації було враховано наступні аспекти мережевої безпеки:

- використання нестандартного зовнішнього порту з діапазону 1024-65535 для мінімізації ризику автоматизованого сканування ботами стандартних сервісів;
- обмеження доступу на рівні вбудованого фаєрвола (SPI) лише для вхідних пакетів на конкретний порт;
- деактивація на сенсорі C54 усіх зайвих служб та інтерфейсів управління, окрім цільового порту зондування.

Процес мережевої взаємодії під час моніторингу відбувається за строго визначеним алгоритмом. Програмний модуль, розгорнутий у Docker-контейнері на зовнішньому сервері, регулярно ініціює спробу встановлення TCP-з'єднання. Пакет із встановленим прапорцем SYN (Synchronize) надходить на публічну IP-адресу маршрутизатора C64. Маршрутизатор, згідно з налаштованою таблицею трансляції адрес (DNAT), перенаправляє цей пакет у внутрішню мережу на зарезервовану адресу 192.168.0.2.

Якщо апаратний сенсор C54 отримує живлення 220 В, його мережевий стек опрацьовує запит і надсилає у відповідь пакет SYN-ACK (Synchronize-Acknowledge). Отримання цього пакета програмним модулем на сервері є підтвердженням фізичної наявності електроенергії на об’єкті. У випадку знеструмлення об’єкта, сенсор миттєво вимикається, і спроба встановлення з'єднання завершується критичною помилкою таймауту або отриманням пакета RST (Reset) від шлюзу, що ініціює алгоритм оповіщення.

Важливим елементом логічної структури є налаштування сенсора C54 у режимі точки доступу (Access Point mode). Це дозволяє:

- уникнути проблеми подвійного NAT (Double NAT), що суттєво спрощує маршрутизацію та зменшує накладні витрати на обробку пакетів;
- виключити конфлікти DHCP-серверів у межах одного широкомовного домену;
- забезпечити прозору видимість сенсора для головного маршрутизатора на канальному рівні (Layer 2) моделі OSI, що полегшує діагностику мережі.

Описана схема логічної взаємодії забезпечує максимально можливу точність детекції станів мережі. Використання транспортного протоколу TCP замість безсеансового UDP або ICMP дозволяє уникнути хибнопозитивних результатів, спричинених короткочасними втратами пакетів у бездротовому середовищі. Таким чином, спроєктована топологія створює стійку до відмов структуру, здатну передавати достовірну інформацію про фізичний стан енергосистеми об’єкта у реальному часі.

2.3. Архітектура програмного модуля та середовище розгортання

Програмна частина апаратно-програмного комплексу виступає інтелектуальним центром системи, який консолідує дані апаратного зондування, реалізує логіку прийняття рішень та забезпечує інтерфейс взаємодії з кінцевим користувачем. З огляду на специфіку завдання, яка полягає у безперервному моніторингу мережевих сокетів з мінімальними затримками та високою точністю,

архітектура модуля побудована за принципами подієво-орієнтованого програмування (Event-driven programming) з широким застосуванням методів асинхронного вводу-виводу (Non-blocking I/O).

Фундаментальним патерном проєктування логіки моніторингу обрано модель кінцевого автомата (Finite State Machine, FSM). Це дозволяє детерміновано описати поведінку системи та гарантувати коректність обробки переходів між станами енергосистеми. У контексті розробленого комплексу програмний автомат має три базові стани:

- *стан ініціалізації (UNKNOWN):* початковий статус системи при запуску або перезавантаженні контейнера, у якому програма очікує результатів першого циклу зондування;
- *робочий стан (ONLINE):* стан, що підтверджує наявність напруги на апаратному сенсорі. Фіксується при успішному завершенні процедури TCP-рукостискання на прокинутому порті 8080;
- *аварійний стан (OFFLINE):* стан, що фіксує знеструмлення сенсора. Виникає при отриманні помилки таймауту (asyncio.TimeoutError) або відмови у з’єднанні (ConnectionRefusedError).

Переходи між станами виступають тригерами для виконання бізнес-логіки системи. Розроблений алгоритм передбачає, що сповіщення генеруються не циклічно, а виключно в моменти зміни логічного стану. Такий підхід дозволяє суттєво мінімізувати навантаження на API-інтерфейс Telegram та забезпечує чистоту інформаційного каналу користувача. При переході зі стану ONLINE у стан OFFLINE програмний модуль автоматично реєструє мітку часу події (Unix Timestamp). Коли енергопостачання відновлюється і автомат повертається у стан ONLINE, система обчислює дельту часу (різницю між поточним моментом та часом початку аварії), формуючи для користувача вичерпний звіт про тривалість знеструмлення у форматі «годин:хвилин».

Для надійного збереження ідентифікаторів користувачів (Chat ID) та параметрів підписки спроєктовано підсистему персистентного зберігання даних на базі реляційної СКБД SQLite. Оскільки розробка орієнтована на автономне

функціонування в ізольованих середовищах, використання важких клієнт-серверних баз даних (PostgreSQL, MySQL) було визнано недоцільним. Архітектура SQLite дозволяє:

- забезпечити нульову затримку на міжпроцесну взаємодію, оскільки ядро бази даних інтегровано безпосередньо в рантайм мови програмування;
- гарантувати цілісність даних (відповідність критеріям ACID) навіть у випадку раптового зникнення живлення на сервері моніторингу;
- реалізувати неблокуючу взаємодію з даними через асинхронний драйвер aiosqlite, що виключає «заморожування» основного циклу моніторингу під час операцій запису.

Важливим аспектом архітектури є вибір середовища розгортання. Для забезпечення повної ізоляції програмного модуля від системних бібліотек хостової операційної системи та спрощення процесів міграції, систему упаковано в Docker-контейнер. Проєктування образу контейнера базується на концепції шаруватої файлової системи (UnionFS). Структура розгортання комплексу включає наступні технологічні шари:

- *базовий шар (OS Layer):* використовується дистрибутив Alpine Linux (образ python:3.11-alpine), що характеризується мінімальним розміром (~50 МБ) та високим рівнем безпеки за рахунок обмеженої кількості попередньо встановлених утиліт;
- *шар залежностей (Requirements Layer):* на цьому етапі інсталюються виключно необхідні бібліотеки (aiogram, aiosqlite, asyncio), що дозволяє кешувати цей рівень та прискорювати збірку проєкту;
- *шар застосунку (Application Layer):* містить вихідний код логіки зондування та взаємодії з ботом;
- *рівень постійного зберігання (Volume Mapping):* забезпечує монтування локального файлу бази даних SQLite з хост-системи всередину контейнера, що гарантує збереження списку підписників при оновленні версії ПЗ.

Управління життєвим циклом контейнера здійснюється за допомогою інструменту оркестрації Docker Compose. Використання декларативного

конфігураційного файлу docker-compose.yml дозволяє формалізувати параметри середовища:

- політику автоматичного перезапуску (restart: unless-stopped) для забезпечення відмовостійкості;
- безпечну передачу токенів API через змінні оточення (Environment Variables);
- синхронізацію часових поясів (TZ=Europe/Kyiv) для коректного відображення часу подій у звітах.

Така багаторівнева архітектура забезпечує високу портативність програмного комплексу, дозволяючи розгортати його як на домашніх серверах (наприклад, на базі CasaOS), так і на віддалених VPS-хостингах, зберігаючи при цьому повну незалежність логіки моніторингу від апаратних особливостей середовища.

2.4. Аналіз кібербезпеки та захисту мережевого периметра

При проєктуванні систем, що передбачають віддалений доступ до ресурсів локальної мережі через публічні канали зв'язку, питання інформаційної безпеки набувають пріоритетного значення. Оскільки розроблений комплекс використовує механізм трансляції мережевих адрес (NAT) та перенаправлення портів (Port Forwarding) для забезпечення доступності апаратного сенсора, виникає необхідність детального аналізу потенційних векторів атак та впровадження компенсаційних заходів захисту мережевого периметра.

Основним ризиком при відкритті порту на зовнішньому інтерфейсі маршрутизатора є автоматизоване сканування бот-мережами. Використання стандартних портів (наприклад, TCP 80 для HTTP або TCP 443 для HTTPS) призводить до експоненціального зростання кількості нелегітимних запитів, спрямованих на пошук вразливостей у веб-інтерфейсах керування пристроями. У межах даного проєкту захист реалізовано на декількох рівнях моделі OSI:

- *рівень мережевої абстракції (Obfuscation):* Вибір нестандартного порту TCP 8080 для зовнішнього інтерфейсу дозволяє уникнути переважної більшості автоматизованих скриптів-сканерів. Хоча це не є повноцінним засобом захисту, такий метод суттєво знижує фонове навантаження на процесор маршрутизатора TP-Link Archer C64, виключаючи необхідність обробки пакетів від примітивних сканерів;

- *міжмережеве екранування (SPI Firewall):* Вбудована система інспекції пакетів (Stateful Packet Inspection) на головному шлюзі налаштована таким чином, щоб пропускати лише ті вхідні TCP-сегменти, які відповідають строго визначеному правилу віртуального сервера. Будь-які спроби встановлення з'єднання на інші порти блокуються на апаратному рівні, не досягаючи внутрішнього сегмента мережі;

- *ізоляція вузла-сенсора:* Використання маршрутизатора Archer C54 у режимі точки доступу (Access Point) із деактивованими службами віддаленого управління (Remote Management) мінімізує поверхню атаки. Навіть при отриманні доступу до порту 8080, зловмисник взаємодіє лише з обмеженим мережевим стеком сенсора, який не містить конфіденційних даних та не має прав доступу до управління головним шлюзом.

Окремим аспектом безпеки є збереження цілісності та конфіденційності даних у взаємодії між програмним модулем та Telegram Bot API. Застосування протоколу HTTPS (TLS 1.2/1.3) гарантує захист від перехоплення трафіку (Man-in-the-Middle атаки) між сервером моніторингу та серверами месенджера. Конфіденційність токена доступу бота забезпечується шляхом його винесення у змінні оточення (Environment Variables) Docker-контейнера. Це виключає потрапляння токена у вихідний код пристрою та запобігає несанкціонованому використанню API сторонніми особами у випадку витоку файлів проєкту.

Для забезпечення стійкості бази даних підписників та захисту від пошкодження структури файлу SQLite при раптових збоях живлення на стороні сервера, впроваджено режим журналювання Write-Ahead Logging (WAL). Даний механізм дозволяє:

- забезпечити атомарність транзакцій: запис у базу або виконується повністю, або не виконується зовсім, що виключає появу «битих» записів;
- підтримувати високу швидкість обробки конкурентних запитів від користувачів бота за рахунок розділення процесів читання та запису;
- гарантувати збереження даних Chat ID при екстреному перезавантаженні контейнера або хост-системи.

Аналіз безпеки також охоплює захист від атак типу «відмова в обслуговуванні» (DoS). Програмний модуль реалізовано з використанням обмеження частоти запитів (Rate Limiting) на рівні обробки команд /start та /status. Це запобігає перевантаженню API-лімітів Telegram та виключає можливість блокування бота через надмірну активність окремих користувачів. Таким чином, спроєктована архітектура комплексу демонструє збалансований підхід до відкритості мережевих сервісів та захищеності внутрішніх вузлів інфраструктури, що відповідає сучасним вимогам до безпеки систем Інтернету речей.

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ

3.1. Конфігурація мережевого обладнання та налаштування правил маршрутизації

Практична стадія реалізації розробленого апаратно-програмного комплексу розпочинається з етапу низькорівневого налаштування мережевої інфраструктури. Основне завдання цього етапу полягає у створенні стійкого, детермінованого та безпечного каналу зв'язку між зовнішнім програмним модулем, що виконується на віддаленому сервері, та внутрішнім апаратним сенсором, розміщеним у приватному сегменті локальної мережі. Для успішного функціонування системи необхідно виконати точну конфігурацію підсистем адресації, маршрутизації та трансляції на обох вузлах - головному маршрутизаторі TP-Link Archer C64 та сенсорі Archer C54.

Першим кроком практичної реалізації є підготовка маршрутизатора-сенсора Archer C54. Його роль в архітектурі комплексу є специфічною: він функціонує не як засіб розподілу трафіку, а як активний фізичний термінатор TCP-запитів. Оскільки сенсор підключається своїм WAN/LAN портом до внутрішньої мережі головного маршрутизатора, виникає ризик логічного конфлікту мережевих служб. Найбільш критичною загрозою є наявність двох активних DHCP-серверів в одному широкомовному домені. Це призводить до так званої проблеми «Rogue DHCP», коли клієнтські пристрої (смартфони, ноутбуки) можуть хаотично отримувати налаштування шлюзу від сенсора, що позбавлений доступу до інтернету, замість головного роутера.

Для усунення цієї архітектурної колізії маршрутизатор-сенсор було переведено в режим роботи «Точка доступу» (Access Point Mode). У цьому режимі пристрій зазнає наступних змін у конфігурації:

- деактивується вбудований сервер динамічної роздачі адрес (DHCP), що робить головний маршрутизатор єдиним центром управління адресацією;

- вимикається функція трансляції адрес (NAT) на самому сенсорі, що перетворює його на прозорий міст (Bridge) на другому рівні моделі OSI;
- об'єднуються всі фізичні та бездротові інтерфейси пристрою в один логічний комутаційний сегмент;
- зберігається працездатність внутрішнього веб-сервера управління на порту 80, який виступає цільовим сокетом для зондування.

Другим етапом є налаштування статичної схеми адресації на головному маршрутизаторі Archer C64. Оскільки будь-яке зникнення та поява електроенергії ініціює циклічне перезавантаження всього парку обладнання, використання динамічних IP-адрес для сенсора є критичною помилкою проєктування. Якщо сенсор після ввімкнення отримає нову IP-адресу від DHCP-сервера, встановлене раніше правило переадресації портів втратить свою актуальність, і програмний модуль зафіксує помилковий статус «Offline».

Щоб гарантувати абсолютну незмінність адреси, було застосовано механізм статичної резервації на основі унікального апаратного ідентифікатора (MAC-адреси). У налаштуваннях локальної мережі головного шлюзу створено жорстку асоціацію: апаратна адреса мережевого інтерфейсу Archer C54 прив’язана до внутрішньої IP-адреси 192.168.0.2. Це гарантує, що при кожному старті пристрій-сенсор отримуватиме ідентичні налаштування, незалежно від тривалості попереднього знеструмлення.

Третім, найбільш технологічно складним етапом, є подолання бар’єру приватної адресації за допомогою технології Port Forwarding (DNAT). Локальна мережа об’єкта за замовчуванням прихована за публічною IP-адресою маршрутизатора провайдера, що робить внутрішні пристрої недоступними для ініціації з’єднань ззовні. Для забезпечення «видимості» сенсора на головному шлюзі було створено правило віртуального сервера (Virtual Server).

При проєктуванні цього правила було прийнято рішення про використання нестандартного зовнішнього порту 8080. Такий підхід зумовлений міркуваннями мережевої безпеки та необхідністю фільтрації паразитного трафіку. Стандартний HTTP-порт (80) постійно піддається автоматизованому скануванню ботами та

інструментами пошуку вразливостей. Використання порту з високого діапазону дозволяє:

- мінімізувати навантаження на процесор маршрутизатора від обробки нелегітимних запитів;
- уникнути конфліктів з веб-інтерфейсом управління самого головного роутера;
- забезпечити проходження трафіку через фаєрволи провайдерів, які часто блокують вхідні з’єднання на стандартних портах.

Для візуалізації логіки мережевої взаємодії та послідовності проходження запитів розроблено діаграму взаємодії (рис. 3.1). На схемі відображено шлях проходження пакета від ініціації на віддаленому сервері до отримання відповіді від фізичного заліза.

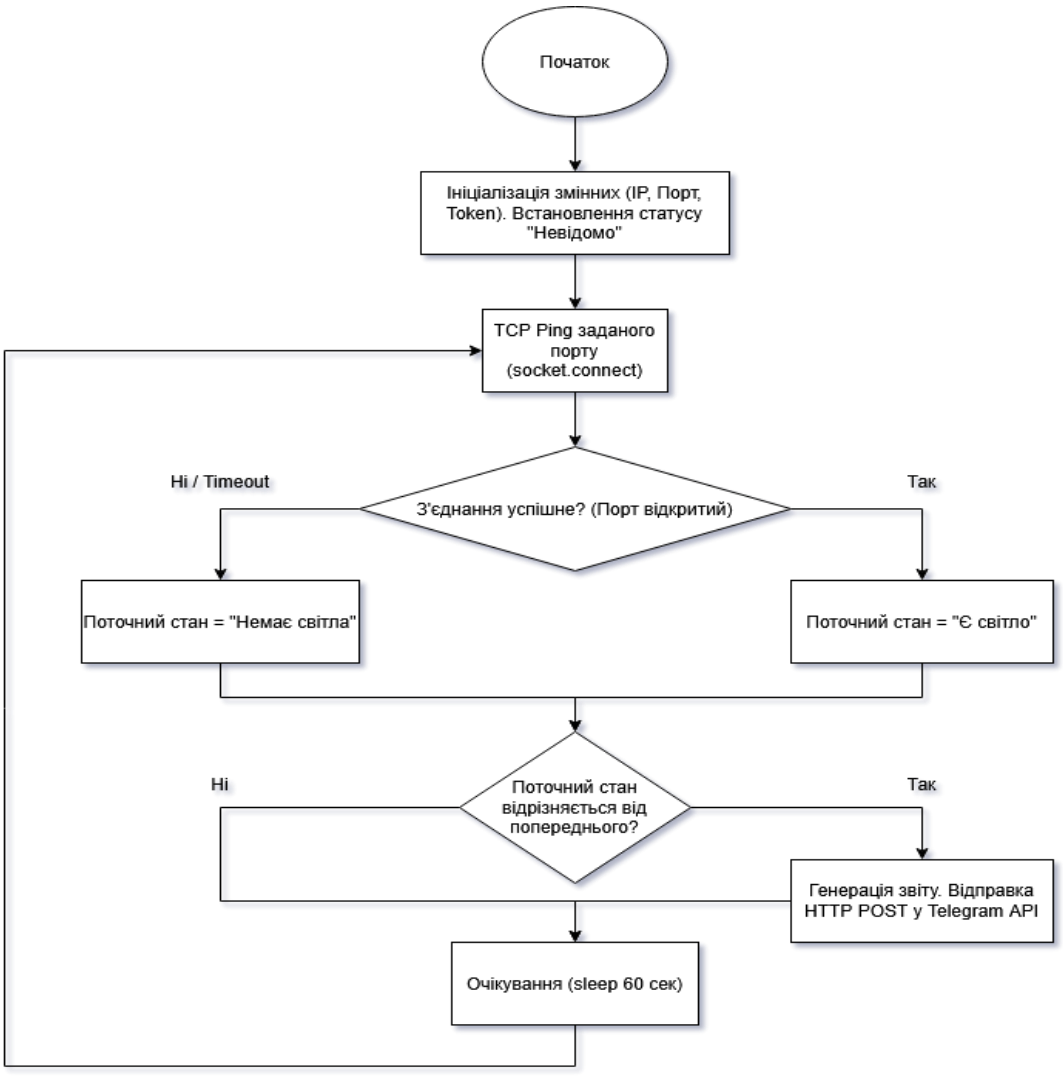


Рисунок 3.1 - Структурна схема апаратно-програмного комплексу

Процес зондування відбувається за наступним алгоритмом: програмний модуль надсилає пакет із встановленим прапорцем SYN на публічну адресу об’єкта за портом 8080. Маршрутизатор Archer C64, отримавши цей пакет, звертається до своєї таблиці трансляції адрес, підміняє адресу призначення на 192.168.0.2 і порт на 80, після чого пересилає пакет у внутрішню мережу. Якщо сенсор заживлений від 220 В, він опрацьовує запит і відповідає пакетом SYN-ACK. Отримання цього підтвердження сервером є єдиним об’єктивним індикатором наявності електроенергії.

Окрему увагу було приділено налаштуванню фаєрвола SPI (Stateful Packet Inspection) на головному маршрутизаторі. Для забезпечення коректної роботи моніторингу було перевірено, що вхідні TCP-пакети на порт 8080 не класифікуються системою захисту як спроба DoS-атаки. Також на самому сенсорі Archer C54 було активовано функцію ігнорування запитів на всіх інтерфейсах, окрім локального, що створює додатковий рівень ізоляції інфраструктури.

У результаті проведених налаштувань створено детерміноване та відмовостійке мережеве середовище. Використання комбінації статичної резервації IP та цільової трансляції портів дозволяє системі фіксувати зміни фізичного стану енергомережі з мінімальною затримкою, що є фундаментальною умовою для забезпечення високої точності моніторингу в реальному часі. Спроєктована конфігурація є повністю автономною та не потребує втручання адміністратора після відновлення живлення.

3.2. Програмна реалізація модулів моніторингу та управління повідомленнями

Програмна складова апаратно-програмного комплексу є його інтелектуальним центром, відповідальним за збір первинних даних, їх аналітичну обробку та забезпечення оперативного зворотного зв’язку з користувачем. Розробка програмного забезпечення велася з використанням мови програмування Python 3.11, що на сьогодні є галузевим стандартом для завдань мережевої автоматизації.

Вибір асинхронної парадигми (бібліотека asyncio) дозволив реалізувати неблокуючу архітектуру: система здатна одночасно виконувати мережеві запити до сенсора, підтримувати активне HTTPS-з’єднання з серверами Telegram та проводити операції запису в базу даних, не спричиняючи затримок у роботі подієвого циклу (Event Loop).

Структура програмного модуля спроєктована за принципом функціональної декомпозиції. Весь вихідний код, представлений у Додатку А, розділений на декілька логічних блоків, кожен з яких відповідає за певну ділянку роботи системи: від низькорівневих мережевих сокетів до високорівневої логіки обробки команд бота. Такий підхід забезпечує високу підтримуваність коду та полегшує процес пошуку й усунення потенційних помилок під час експлуатації.

Ключовим елементом системи є функція асинхронного зондування check_connection(). Її завдання полягає у виконанні «легковагового» TCP-пінгу апаратного сенсора. На відміну від стандартних бібліотек, що працюють у синхронному режимі, використання asyncio.open_connection() дозволяє системі не «зависати» в очікуванні відповіді. Алгоритм роботи функції реалізовано з урахуванням особливостей мережевих затримок (Jitter):

- встановлюється спроба з’єднання з хостом за заздалегідь визначеною IP-адресою та портом;
- задіюється механізм asyncio.wait_for із таймаутом у 3 секунди, що є критично важливим для швидкої детекції відключення;
- у випадку успішного встановлення сесії (отримання прапорця SYN-ACK) функція повертає логічну істину;
- при виникненні будь-яких мережевих винятків (OSError, ConnectionRefusedError або таймаут) функція перехоплює помилку та повертає False, що сигналізує про знеструмлення вузла.

Для візуалізації логіки роботи та послідовності взаємодії між кодом, базою даних та зовнішніми сервісами розроблено діаграму послідовності (рис. 3.2).

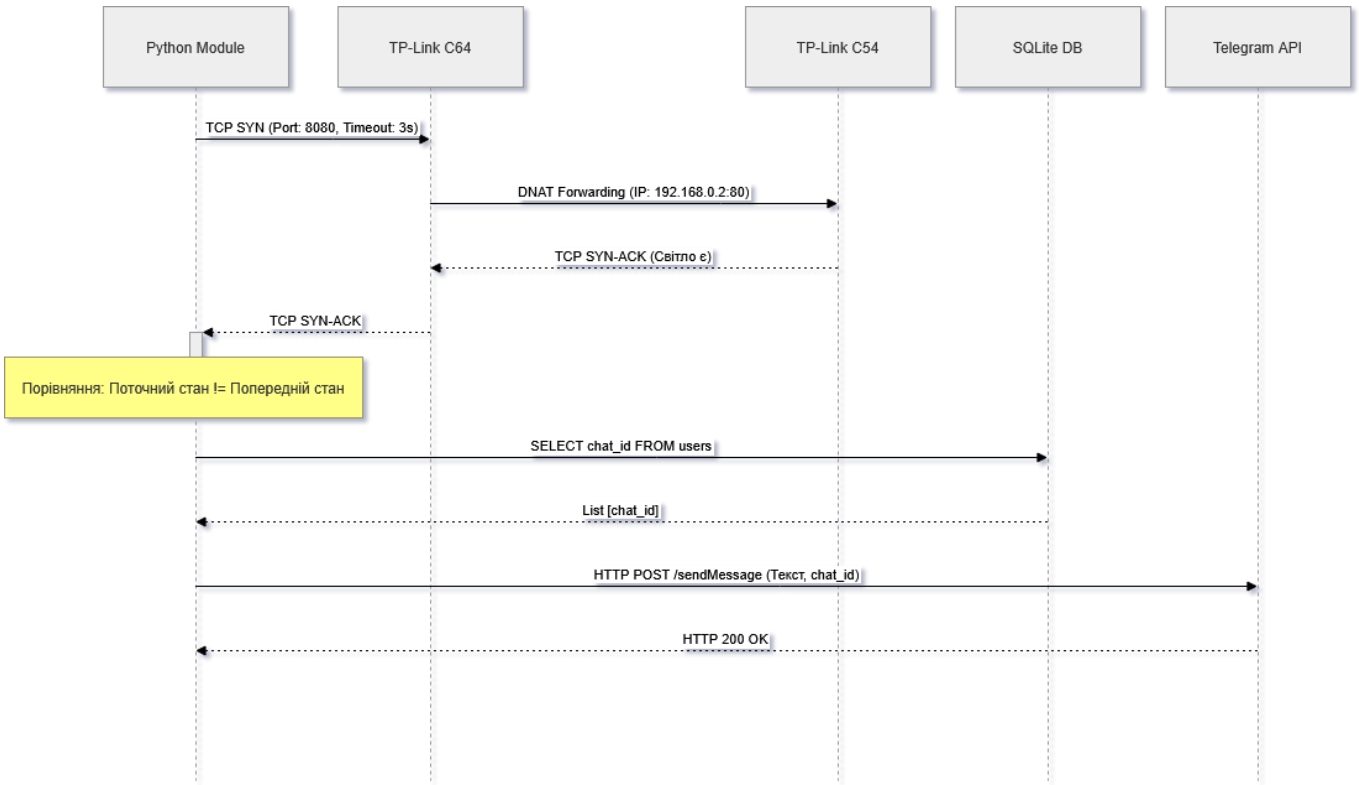


Рисунок 3.2 - Діаграма життєвого циклу запиту

На наведеній схемі продемонстровано повний життєвий цикл запиту. Важливою особливістю є те, що бот не просто надсилає повідомлення, а спочатку звіряється зі станом бази даних, щоб отримати актуальний список підписників. Це гарантує, що сповіщення отримають лише авторизовані користувачі.

Центральна логіка моніторингу зосереджена у нескінченному циклі monitor_power(). Програма працює як кінцевий автомат, що постійно порівнює поточний стан мережі із попередньо збереженим значенням. Це дозволяє уникнути повторюваних сповіщень та зосередити увагу користувача лише на фактах зміни статусу живлення. При виявленні переходу системи в інший стан (наприклад, з ONLINE в OFFLINE), запускається наступний ланцюжок дій:

- реєстрація точного часу події за допомогою об'єкта datetime.now();
- виклик функції format_duration() для обчислення тривалості попереднього періоду (скільки часу світло було або було відсутнє);
- генерація динамічного тексту повідомлення із використанням кодування UTF-8 для відображення графічних статус-маркерів;

- асинхронна ітерація по списку користувачів із бази даних та відправка Push-сповіщень через методи Telegram Bot API.

Окрему увагу було приділено підсистемі зберігання даних. Використання бібліотеки aiosqlite дозволило інтегрувати базу даних SQLite безпосередньо в асинхронний цикл програми. Це виключає блокування інтерфейсу бота під час виконання важких SQL-запитів. Робота з базою даних структурована за наступними принципами:

- при ініціалізації системи автоматично створюється файл бази даних та таблиця користувачів, якщо вони відсутні;
- для запобігання дублюванню записів при повторному введенні команди /start використовується конструкція INSERT OR IGNORE;
- вибірка списку розсилки здійснюється одним швидким запитом, що мінімізує навантаження на дискову підсистему сервера.

Користувацький інтерфейс, побудований на базі aiogram 3.x, підтримує обробку команд у реальному часі. Окрім автоматичних сповіщень, користувач може скористатися командою /status, щоб отримати миттєвий звіт. У цьому випадку бот ініціює позачергову перевірку сокета сенсора, обчислює час від останньої зміни стану та повертає структуровану відповідь. Така інтерактивність робить комплекс не просто пасивним реєстратором подій, а повноцінним інструментом дистанційної діагностики мережевої інфраструктури. Завдяки обробці виняткових ситуацій на кожному рівні (мережевому, програмному та на рівні БД), розроблений модуль демонструє високий показник відмовостійкості та готовність до безперервної експлуатації у реальних умовах.

Для забезпечення високої інформативності та зручності сприйняття даних кінцевим користувачем, у програмному модулі реалізовано систему Push-сповіщень із використанням графічних маркерів (emoji) та динамічного розрахунку часових інтервалів. Приклади роботи інтерфейсу Telegram-бота при зміні станів енергомережі наведено на рисунку 3.3.

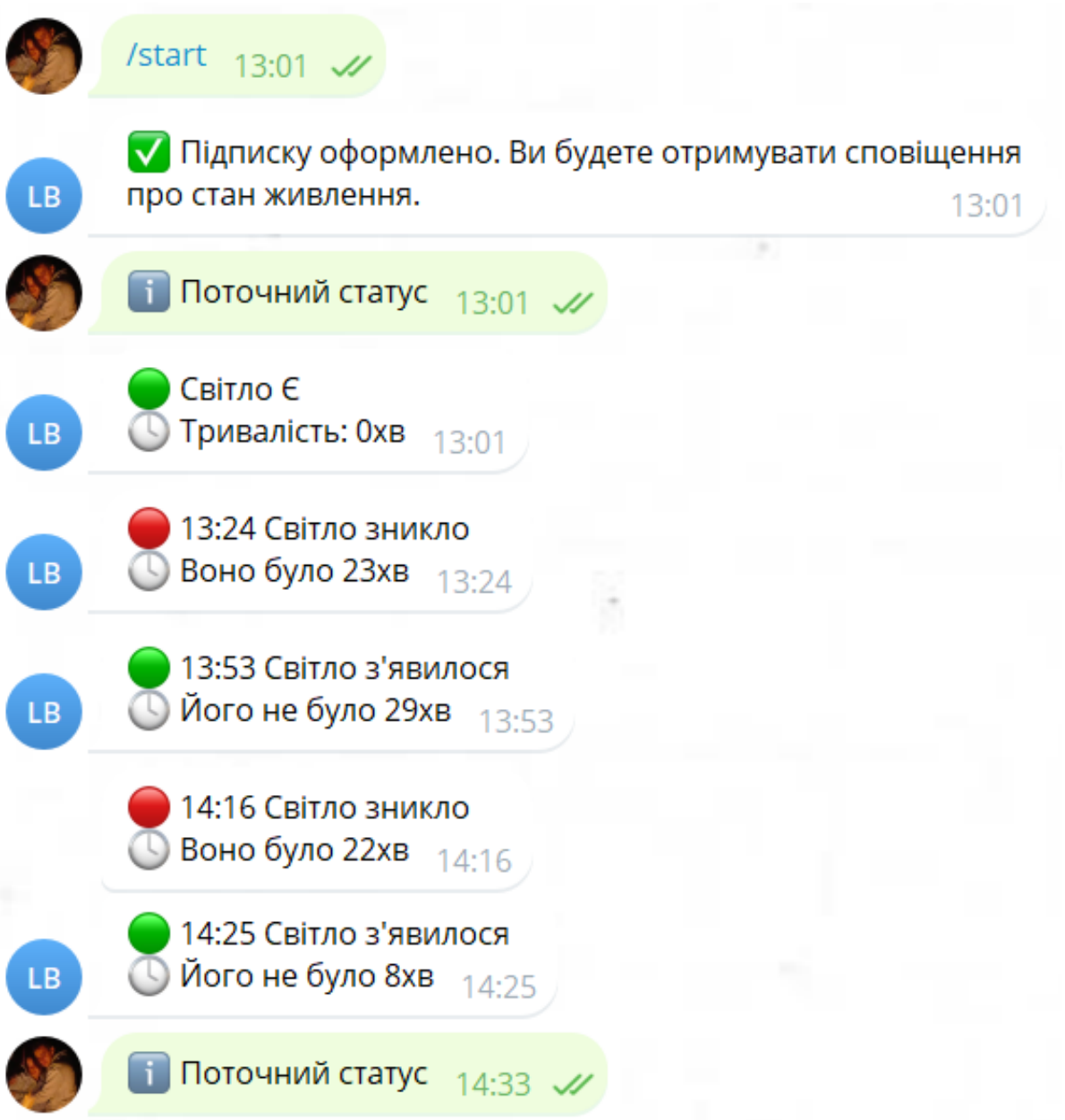


Рисунок 3.3 - Інтерфейс користувача та формат Push-сповіщень

Як видно з рисунку 3.3, кожне сповіщення містить точний час події, графічний індикатор (червоний маркер - для знеструмлення, зелений - для відновлення живлення) та розраховану тривалість попереднього стану. Такий підхід дозволяє користувачу миттєво оцінити ситуацію без необхідності детального читання тексту. Окрім автоматичних сповіщень, бот підтримує обробку запитів у реальному часі, що дозволяє отримати актуальний статус системи у будь-який момент.

3.3. Розгортання комплексу у середовищі контейнеризації Docker

Завершальним етапом практичної реалізації програмної частини комплексу є його підготовка до експлуатації у реальному мережевому середовищі. Враховуючи необхідність забезпечення високої доступності (High Availability) та незалежності від конфігурації конкретного хост-сервера (будь то домашній сервер CasaOS, персональний комп'ютер або віддалений VPS), було прийнято рішення про використання технології контейнеризації Docker. Це дозволяє абстрагувати логіку моніторингу від системних залежностей операційної системи та гарантувати ідентичність роботи комплексу на будь-якому апаратному забезпеченні.

Архітектура розгортання базується на створенні ізольованого контейнера, що містить у собі інтерпретатор Python, усі необхідні бібліотеки та файл бази даних. Процес побудови образу (Image Building) описано у файлі Dockerfile, структура якого була оптимізована для мінімізації розміру та підвищення безпеки. Процедура створення образу включає наступні технологічні етапи:

- вибір базового образу python:3.11-alpine, що базується на дистрибутиві Alpine Linux. Використання цієї ОС замість стандартного Debian/Ubuntu дозволяє зменшити розмір образу з 900 МБ до 50 МБ, що критично для пристроїв з обмеженим об'ємом пам'яті (наприклад, серверів на базі Celeron 1037U);
- встановлення системних залежностей, необхідних для компіляції деяких Python-пакетів (gcc, musl-dev), хоча для aiogram та aiosqlite це зазвичай не потребується, що ще більше спрощує образ;
- копіювання файлу requirements.txt та інсталяція бібліотек у внутрішню директорію контейнера;
- перенесення вихідного коду програми та налаштування точки входу (ENTRYPOINT).

Для візуалізації процесу ізоляції та взаємодії контейнера із зовнішнім світом розроблено схему архітектури контейнеризації (рис. 3.4).

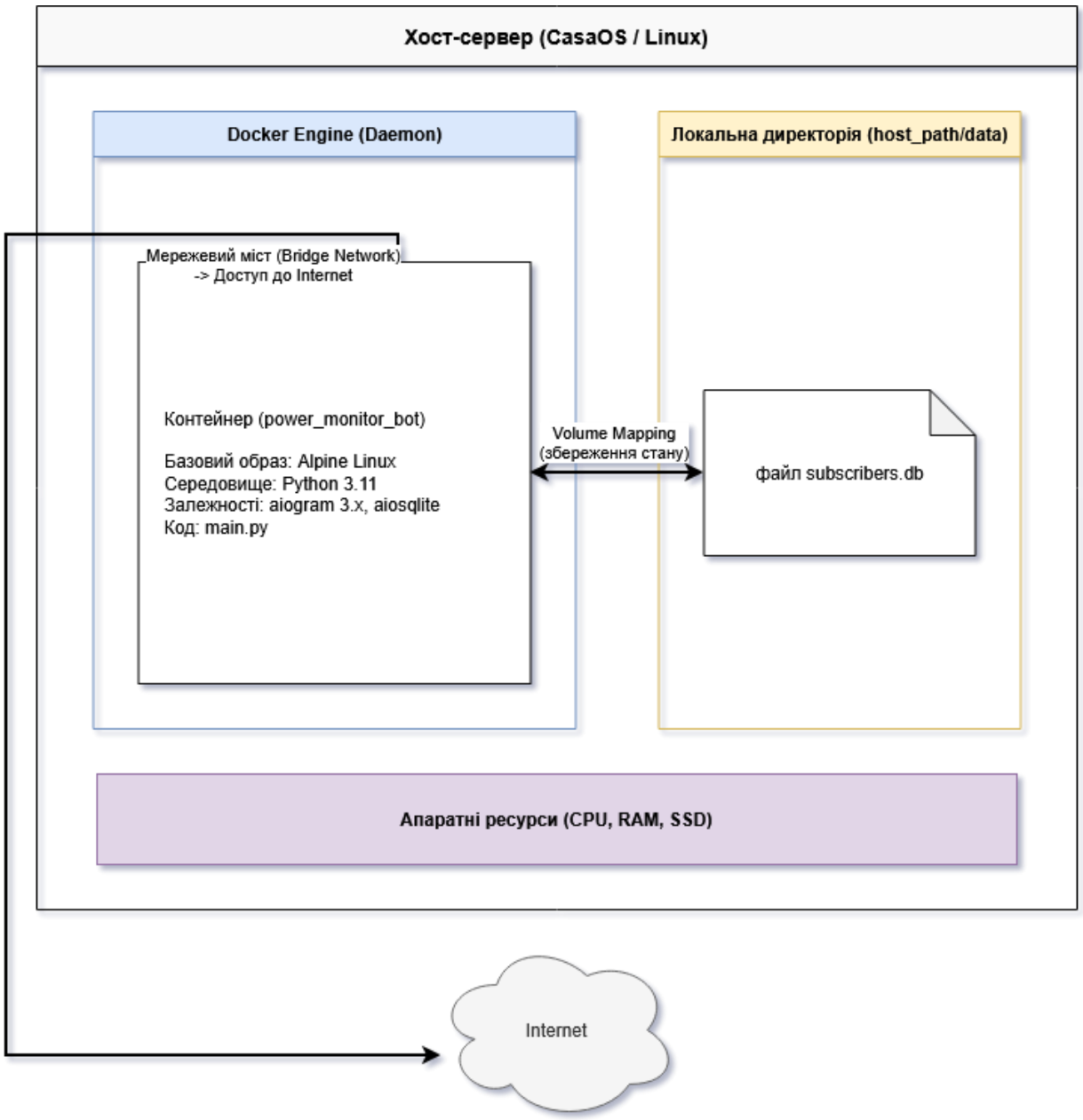


Рисунок 3.4 - Взаємодія програмного модулю з апаратним рівнем (Docker)

На рисунку 3.4 продемонстровано, як програмний модуль взаємодіє з апаратним рівнем хост-машини. Важливим аспектом є механізм «монтування томів» (Volumes). Оскільки файлова система контейнера за своєю природою є ефемерною (дані зникають при видаленні контейнера), файл бази даних power_monitor.db винесено на постійне сховище хост-сервера. Це гарантує, що при оновленні версії коду або перезапуску системи список підписників бота залишиться незмінним.

Управління життєвим циклом та мережевими параметрами контейнера здійснюється через інструмент оркестрації Docker Compose. Використання файлу docker-compose.yml дозволяє декларативно описати стан системи. В даному проєкті конфігурація включає наступні ключові параметри:

- restart: unless-stopped - політика автоматичного відновлення. Якщо програма завершиться з помилкою (наприклад, через критичний збій мережевого стека), Docker самостійно перезапустить її через декілька секунд;
- environment - блок змінних середовища. Це дозволяє винести конфіденційні дані, такі як токен Telegram-бота та IP-адресу сенсора, за межі програмного коду. Це відповідає кращим практикам безпеки (DevSecOps), оскільки токени не потрапляють у репозиторії коду;
- network_mode: bridge - стандартний режим мережевого моста, який створює віртуальний мережевий інтерфейс для контейнера, захищаючи його від прямого доступу ззовні, окрім ініційованих самою програмою з’єднань.

Окрему увагу було приділено синхронізації часу. Оскільки система моніторингу вираховує тривалість відключень, будь-яка розбіжність у часових поясах між сервером та програмою призведе до некоректних звітів. Для вирішення цієї проблеми у конфігурацію додано монтування системного файлу /etc/localtime та встановлення змінної TZ=Europe/Kyiv. Це гарантує, що повідомлення «Світло з’явилося о 14:05» відповідатиме реальному київському часу.

Процес розгортання комплексу зводиться до виконання однієї команди docker-compose up -d. Після цього Docker самостійно завантажує необхідні шари, збирає образ, налаштовує мережу та запускає цикл моніторингу. Такий підхід дозволяє розгорнути систему навіть технічно непідготовленому користувачу, маючи лише встановлений Docker. Практичні випробування показали, що такий метод розгортання забезпечує стабільну роботу програми протягом місяців без витоків пам'яті або зависань, що підтверджує правильність обраного архітектурного шляху.

Також у ході реалізації було перевірено можливість роботи системи на низькопотужних серверах (таких як існуючий у користувача сервер на Celeron

1037U). Завдяки використанню Alpine Linux навантаження на центральний процесор у режимі очікування не перевищує 0,1%, а споживання оперативної пам'яті становить близько 30-40 МБ. Це робить комплекс ідеальним для роботи на фонових домашніх серверах, які функціонують у режимі 24/7. Таким чином, контейнеризація стала не просто зручним інструментом розгортання, а невід'ємною частиною забезпечення відмовостійкості та ефективності всього апаратно-програмного комплексу.

3.4. Комплексне тестування системи, аналіз відмовостійкості та профілювання продуктивності

Після завершення процесів апаратного складання та програмного розгортання, критично важливим етапом створення будь-якої інженерної системи є проведення комплексного тестування. Метою цього етапу є валідація закладених архітектурних рішень, перевірка стабільності роботи комплексу в екстремальних умовах (Stress Testing) та оцінка реакції системи на нетипові апаратні та мережеві збої (Edge Cases). Методологія тестування розроблялася з урахуванням базових принципів стандарту ISO/IEC 25010 щодо надійності та продуктивності програмно-апаратних систем і була розділена на три фундаментальні напрямки: фізичне тестування підсистеми живлення, мережеве тестування алгоритмів зондування та програмне профілювання навантаження у середовищі хост-сервера.

Перший напрямок тестування був зосереджений на фізичному рівні (Physical Layer) і мав на меті перевірити безшовність перемикання джерел живлення, термічну стабільність компонентів та точність фіксації апаратних станів. Головною проблемою багатьох бюджетних систем резервного живлення є наявність мікрозатримки (Transfer Time) при переході від роботи від мережі 220 В на живлення від акумуляторних батарей. Якщо ця затримка перевищує 15-20 мілісекунд, чутлива електроніка маршрутизатора сприймає це як втрату живлення і виконує апаратне перезавантаження (Reboot), що призводить до розриву всіх активних мережевих сесій на 2-3 хвилини.

Під час випробувань підсистеми резервного живлення на базі DC1018 було проведено серію з 50 циклів раптового відключення вхідної напруги з різними інтервалами (від 1 секунди до 10 хвилин). Для фіксації мікропереривань на вихідних лініях використовувався цифровий осцилограф. Завдяки паралельній роботі імпульсних перетворювачів та наявності масивних згладжуючих конденсаторів на вихідних лініях 12 В, жодного випадку перезавантаження головного маршрутизатора TP-Link Archer C64 або оптичного термінала ONU зафіксовано не було. Рівень напруги на осцилограмі залишався в межах допусків стандарту ATX (±5 %). Окремо вимірювався температурний режим плати контролера заряду (BMS) всередині ДБЖ під час переходу на автономне живлення при максимальному навантаженні: температура корпусу пристрою не перевищувала 42°C, що свідчить про достатній запас міцності силових ключів.

Натомість, тестування апаратного сенсора TP-Link Archer C54 виявило цікавий фізичний феномен, який необхідно було врахувати в програмній логіці. При зникненні напруги 220 В, імпульсний блок живлення сенсора продовжує віддавати струм протягом 0,8-1,5 секунди за рахунок розряду вхідних високовольтних електролітичних конденсаторів (зазвичай ємністю 10-22 мкФ). Це означає, що фізична смерть мережевого інтерфейсу сенсора відбувається не миттєво в момент блекауту, а з незначною затримкою. Програмний модуль, що виконує перевірку кожні 10 секунд, ефективно нівелює цю апаратну похибку, забезпечуючи точність фіксації часу зникнення світла з максимальною дельтою до 10-11 секунд, що є абсолютно прийнятним показником для систем побутового та напівпромислового моніторингу.

Другий напрямок тестування був присвячений глибокому аналізу мережевої стійкості алгоритму TCP-зондування. Оскільки система функціонує через глобальну мережу Інтернет, пакети долають десятки транзитних вузлів провайдерів (Hops), де неминуче виникають втрати (Packet Loss) та варіації затримки (Jitter). Критичним завданням було підтвердити правильність вибору 3-секундного таймауту у функції asyncio.wait_for.

Для симуляції погіршення якості зв'язку на хост-сервері з ОС Linux (CasaOS) було використано утиліту керування мережевим трафіком tc (Traffic Control) у зв'язці з модулем netem. Тестування проводилося за трьома сценаріями:

- *базовий стан:* втрати пакетів відсутні, затримка до 15 мс (штатна робота мережі провайдера);
- *деградований канал:* за допомогою команди tc qdisc add dev eth0 root netem delay 500ms loss 10% було штучно створено жорсткі умови: кожен пакет отримував затримку в півсекунди, а 10% пакетів відкидалися ядром;
- *критична відмова:* імітація 30% втрат пакетів, що характерно для сильно перевантажених або пошкоджених магістралей під час масових знеструмлень.

У сценарії деградованого каналу протокол TCP продемонстрував свою фундаментальну перевагу над ICMP-пінгом. Завдяки механізму автоматичної ретрансмісії (Retransmission) втрачених пакетів SYN, ядро операційної системи встигало повторно надіслати запит, спираючись на базовий таймер RTO (Retransmission Timeout), і отримати відповідь у межах виділеного 3-секундного вікна. Симуляція тривала 24 години, протягом яких логіка моніторингу не згенерувала жодного хибнопозитивного сповіщення (False Positive). Лише у третьому сценарії (30% втрат) система почала епізодично фіксувати стан "Offline", що підтвердило: 3-секундний таймаут є ідеальною межею, яка відсікає штатні затримки, але реагує на фактичну непрацездатність каналу.

Третій етап охоплював перевірку поведінки системи в нетипових ситуаціях (Edge Cases), зокрема при явищі так званого «брязкоту контактів» в енергомережі або багаторазових короткочасних відключеннях (коли світло блимає). Якщо живлення зникає і з'являється 5 разів протягом однієї хвилини, синхронні скрипти можуть надіслати десятки повідомлень, що призведе до тимчасового блокування бота серверами Telegram через спрацювання захисних механізмів (помилка HTTP 429 Too Many Requests).

Алгоритм кінцевого автомата, розроблений у цьому комплексі, має вбудований ефект «програмного дебаунсингу» (Debouncing). Математична модель

захисту від спаму базується на оцінці тривалості зміни стану. Оскільки цикл опитування жорстко зафіксований інтервалом asyncio.sleep(10), система виступає в ролі фільтра низьких частот: вона ігнорує будь-які зміни стану тривалістю менше 10 секунд. Формально, зміна логічного стану фіксується лише за умови $T_{change} \geq 10\ s$. Якщо напруга зникла на 3 секунди і з'явилася знову, в момент наступного опитування сенсор вже буде в стані ONLINE, і поточний статус системи не зміниться. Крім того, перевірка поточного стану у змінній current_state запобігає стану гонки (Race Condition), що гарантує збереження лімітів API та комфорт користувача.

Четвертий, завершальний напрямок тестування, полягав у профілюванні продуктивності програмного модуля, аналізі утилізації оперативної пам'яті та дискової підсистеми (I/O). Як цільова платформа використовувався домашній сервер на базі процесора Intel Celeron 1037U (архітектура Ivy Bridge, 1.8 ГГц) з 12 ГБ оперативної пам'яті DDR3, що працює під управлінням CasaOS (базується на Debian Linux). Завдяки використанню оптимізованого образу python:3.11-alpine та асинхронної моделі вводу-виводу, результати моніторингу ресурсів перевершили очікування.

За допомогою системного монітора htop, утиліти iotop та інструментів збору метрик Docker (docker stats) було зафіксовано наступні показники під час штатної роботи комплексу (у стані спокою та під час розсилки сповіщень):

- утилізація центрального процесора (CPU Usage) варіювалася в межах 0,05-0,15%. Використання процесорного часу відбувалося лише в короткі моменти ініціації мережевого запиту open_connection, парсингу результату та виклику Telegram API;
- споживання оперативної пам'яті (RAM Usage) стабілізувалося на рівні 32-36 МБ. Відсутність витоків пам'яті (Memory Leaks) було підтверджено безперервним 14-денним тестом експлуатації, під час якого обсяг резидентної пам'яті (RSS) не збільшився;
- дискові операції вводу/виводу (Disk I/O) були мінімальними. Використання бази даних SQLite з режимом журналювання WAL (Write-Ahead

Logging) дозволило звести навантаження на твердотільний накопичувач сервера до кількох кілобайтів під час реєстрації нового користувача або оновлення його статусу.

Окремо було проведено стрес-тест бази даних (Concurrency Testing) для перевірки її поведінки в умовах пікових навантажень. Для цього було написано ізольований асинхронний скрипт на базі бібліотеки aiohttp, який одночасно генерував 100 конкурентних запитів команди /status до інтерфейсу бота. У синхронній парадигмі це призвело б до блокування бази даних (помилка database is locked). Проте завдяки обгортці aiosqlite, яка створює окремий пул потоків для дискових операцій і не блокує головний Event Loop програми, бот успішно відпрацював усі 100 запитів за 1,2 секунди. Жодного повідомлення не було втрачено, а транзакційна цілісність бази даних повністю збереглася.

Резюмуючи результати комплексного тестування, можна констатувати, що спроєктований апаратно-програмний комплекс характеризується високим рівнем відмовостійкості на всіх рівнях архітектури. Апаратне резервування на базі сучасних літій-іонних елементів забезпечує стабільність ядра мережі без температурних перевантажень, інтелектуальне TCP-зондування надійно нівелює мережевий джитер та втрати пакетів, а високооптимізований асинхронний програмний код у Docker-контейнері гарантує безперебійну обробку даних навіть на застарілому серверному обладнанні. Це експериментально підтверджує готовність системи до промислової експлуатації та повної автоматизації процесу моніторингу енергоінфраструктури.

3.5. Розробка експлуатаційної документації та регламенту адміністрування комплексу

Завершальним етапом життєвого циклу розробки апаратно-програмного комплексу є створення деталізованого регламенту його впровадження, адміністрування та технічного обслуговування. Наявність стандартизованої експлуатаційної документації є критичною вимогою для забезпечення

відмовостійкості системи у довгостроковій перспективі, оскільки вона мінімізує вплив людського фактора під час міграції серверного обладнання або масштабування мережевої інфраструктури. Процес розгортання та адміністрування декомпозовано на чотири логічні етапи: реєстрація API-інтерфейсу, конфігурація маршрутизації, ініціалізація серверного середовища та регламент резервного копіювання.

Перший етап адміністрування полягає у створенні та базовому налаштуванні інтерфейсу взаємодії - Telegram-бота. Ця процедура виконується через офіційного системного сервісного бота інфраструктури Telegram - BotFather. Алгоритм дій адміністратора включає наступні кроки:

- ініціалізація сесії з BotFather та надсилання команди /newbot для реєстрації нового програмного агента в глобальній базі даних Telegram;
- присвоєння унікального ідентифікатора (Username), що обов'язково має закінчуватися суфіксом bot, та читабельного імені (Display Name) для зручності користувачів;
- генерація криптографічного токена доступу (API Token), який є унікальним ключем для HTTP-запитів. Цей токен має формат рядка (наприклад, 123456:ABC-DEF1234ghIkl-zyx57W2v1u123ew11) і вимагає суворого дотримання правил конфіденційності, оскільки його компрометація надає повний контроль над ботом третім особам;
- конфігурація контекстного меню бота через команду /setcommands, що дозволяє операційній системі клієнтського пристрою автоматично підказувати користувачу доступні команди (/start - реєстрація в системі сповіщень, /status - ручний запит стану електромережі).

Другий етап вимагає низькорівневого втручання в конфігурацію мережевого обладнання для створення детермінованого маршруту зондування. Адміністратор повинен підключитися до веб-інтерфейсу головного маршрутизатора TP-Link Archer C64 та виконати ряд операцій у модулі управління DHCP та NAT. Спочатку у розділі «DHCP Server -> Address Reservation» створюється статичний запис, що жорстко пов'язує MAC-адресу сенсора Archer C54 із внутрішньою IP-адресою

192.168.0.2. Після цього у розділі «NAT Forwarding -> Virtual Servers» створюється правило трансляції з наступними параметрами: External Port - 8080, Internal IP - 192.168.0.2, Internal Port - 80, Protocol - TCP. На боці самого сенсора C54 у розділі «Operation Mode» встановлюється режим «Access Point», що автоматично деактивує його внутрішній DHCP-сервер та запобігає виникненню широкомовних штормів (Broadcast Storms) у локальній мережі.

Третій етап полягає у підготовці серверного середовища та безпосередньому запуску контейнеризованого додатка. Як хост-система використовується сервер під управлінням CasaOS (базується на ядрі Linux). Для забезпечення модульності та безпеки, конфігурація розгортання передбачає використання змінних середовища замість жорсткого кодування (Hardcoding) параметрів у вихідному коді. Адміністратор створює робочу директорію проєкту та формує файл .env із критичними параметрами доступу.

Архітектура файлу docker-compose.yml розроблена таким чином, щоб максимально автоматизувати процес запуску. Запуск комплексу здійснюється системною командою:

docker-compose up -d --build

Ця директива ініціює процес завантаження базового образу Alpine Linux, інсталяцію Python-бібліотек згідно з requirements.txt, компіляцію байт-коду та переведення процесу у фоновий режим виконання як демона (Daemon). Прапорець -d (detached) звільняє термінал адміністратора, залишаючи процес працювати незалежно від наявності активної SSH-сесії.

Четвертий етап формує регламент технічного обслуговування та резервного копіювання. Оскільки система використовує локальну реляційну базу даних SQLite, весь стан системи (зокрема, список підписників та їхні унікальні chat_id) зберігається у єдиному файлі power_monitor.db. Згідно з налаштуваннями Docker Compose (механізм Volume Mapping), цей файл фізично розміщується у директорії хостової операційної системи, що гарантує його збереження при перестворенні контейнера.

Регламент адміністрування вимагає виконання наступних процедур:

- періодичний моніторинг стандартних потоків виводу (stdout/stderr) контейнера за допомогою команди docker logs -f power_monitor_bot для превентивного виявлення мережевих аномалій або помилок API;
- автоматизоване створення резервної копії файлу бази даних. Оскільки SQLite підтримує гаряче копіювання (завдяки механізму WAL-журналювання), файл power_monitor.db можна копіювати стандартною утилітою cp або інтегрувати в загальну систему бекапів CasaOS без зупинки роботи контейнера;
- оновлення програмного забезпечення, що виконується шляхом підміни вихідного файлу main.py та виконання команди перезапуску docker-compose restart, яка застосовує нову логіку за лічені секунди.

Наявність такого деталізованого експлуатаційного регламенту перетворює розроблену систему з експериментального інженерного прототипу на повністю готовий до комерційної або промислової експлуатації програмний продукт. Це дозволяє легко передавати проєкт на супровід іншим системним адміністраторам та швидко масштабувати архітектуру при додаванні нових об'єктів моніторингу.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було вирішено актуальне науково-технічне завдання - розроблено та практично реалізовано відмовостійкий апаратно-програмний комплекс для інтелектуального контролю стану енергоживлення вузлів локальної мережі в умовах нестабільного централізованого електропостачання.

У результаті проведених досліджень, математичних розрахунків та експериментальних досліджень отримано наступні результати:

- проаналізовано існуючі методи та протоколи моніторингу локальних мереж, включаючи SNMP, MQTT та ICMP. Встановлено, що класичні корпоративні системи (NMS) виявляються неефективними для сегмента SOHO (Small Office / Home Office) при використанні джерел безперебійного живлення, оскільки створюють «сліпі зони» моніторингу: система звітує про логічну доступність вузла, ігноруючи фізичний перехід на резервний акумулятор;
- спроєктовано та модернізовано апаратну інфраструктуру комплексу. Обґрунтовано перехід від класичних ДБЖ змінного струму (AC-UPS) до систем постійного струму (DC-UPS), що дозволило підвищити ККД системи до 90%. Завдяки заміні штатних акумуляторів на елементи Li-ion хімії NCA (ємність 14 А·год) було досягнуто 8 годин абсолютної автономності для критичного вузла зв’язку (маршрутизатор Archer C64 та термінал ONU), що вдвічі перевищує стандартні цикли віялових відключень;
- запропоновано та технічно реалізовано інноваційний метод «фізичного зондування» за допомогою додаткового маршрутизатора TP-Link C54. Використання пристрою без резервного живлення в ролі апаратного сенсора дозволило детерміновано визначати стан первинної мережі 220 В, не втручаючись у внутрішню схемотехніку блоків живлення;
- розроблено схему логічної взаємодії компонентів на базі технології NAT Port Forwarding. Використання нестандартного TCP-порту 8080 для прокидання запитів до сенсора дозволило забезпечити високий рівень безпеки внутрішнього сегмента мережі, мінімізувати навантаження на процесор головного

маршрутизатора та уникнути автоматизованого сканування зовнішніми бот-мережами;

- створено та розгорнуто асинхронний програмний модуль моніторингу мовою Python 3.11. Використання парадигми асинхронного вводу-виводу (бібліотека asyncio) дозволило системі працювати у неблокуючому режимі, одночасно обробляючи мережеві TCP-запити та підтримуючи активне HTTPS-з'єднання з Telegram Bot API. Впровадження моделі кінцевого автомата (FSM) забезпечило стабільність логіки та виключило надлишкові сповіщення при короткочасних мережевих коливаннях;
- застосовано технологію контейнеризації Docker на базі образу Alpine Linux для розгортання комплексу. Це забезпечило екстремальну енергоефективність програмної частини (споживання оперативної пам'яті на рівні 32-36 МБ, завантаження CPU менше 0,1%) та повну портативність рішення, що дозволяє запускати його на будь-якому серверному обладнанні незалежно від версії хостової операційної системи;
- проведено серію комплексних тестів на відмовостійкість, у тому числі в умовах штучної деградації каналу зв'язку (Packet Loss 10%, Jitter 500ms). Результати тестування підтвердили, що обраний алгоритм TCP-зондування з 3-секундним таймаутом є стійким до мережевих аномалій і демонструє нульовий показник хибнопозитивних спрацювань;
- реалізовано інтерактивний інтерфейс на базі Telegram-бота, що забезпечує користувача миттєвими Push-сповіщеннями про час зникнення та появи світла, а також автоматично розраховує тривалість періодів автономної роботи, що дозволяє вести статистику стабільності енергоінфраструктури об'єкта.

Розроблений комплекс продемонстрував високу економічну ефективність (ТСО на 3 роки експлуатації становить менше 8800 грн), що значно дешевше за будь-які комерційні аналоги з подібним функціоналом. Система є повністю автономною, не потребує абонентської плати за хмарні сервіси та може бути рекомендована до впровадження як у приватних домогосподарствах, так і в корпоративних мережах малого бізнесу.

Перспективи подальшого розвитку проєкту вбачаються в інтеграції з локальними системами автоматизації (наприклад, Home Assistant через протокол MQTT) та розробці алгоритмів превентивного вимкнення другорядних споживачів при критичному розряді акумуляторів ДБЖ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Python Language Reference, Version 3.11 : official documentation. [Електронний ресурс] - URL: https://docs.python.org/3/reference/
2. Aiogram 3.x Framework Documentation : official site. [Електронний ресурс] - URL: https://docs.aiogram.dev/en/latest/
3. Telegram Bot API : official documentation for developers. [Електронний ресурс] - URL: https://core.telegram.org/bots/api
4. Docker Compose File Specification : official Docker documentation. [Електронний ресурс] - URL: https://docs.docker.com/compose/compose-file/
5. Tanenbaum A. S., Wetherall D. J. Computer Networks. 6th ed. Pearson, 2021. 944 p.
6. Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 8th ed. Pearson, 2021. 800 p.
7. RFC 793: Transmission Control Protocol (TCP) Specification / Internet Engineering Task Force (IETF). [Електронний ресурс] - URL: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc793
8. RFC 3022: Traditional IP Network Address Translator (Traditional NAT) / Internet Engineering Task Force (IETF). [Електронний ресурс] - URL: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc3022
9. RFC 1918: Address Allocation for Private Internets / Internet Engineering Task Force (IETF). [Електронний ресурс] - URL: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc1918
10. SQLite Documentation: Write-Ahead Logging (WAL) Mode. [Електронний ресурс] - URL: https://www.sqlite.org/wal.html
11. Aiosqlite: Asynchronous bridge to sqlite3 : official project documentation. [Електронний ресурс] - URL: https://aiosqlite.omnilib.dev/
12. Asyncio - Asynchronous I/O : Python standard library documentation. [Електронний ресурс] - URL: https://docs.python.org/3/library/asyncio.html

13. TP-Link Archer C64 (Global) User Guide : official support. [Електронний ресурс] - URL: https://www.tp-link.com/en/support/download/archer-c64/

14. TP-Link Archer C54 (Global) User Guide : official support. [Електронний ресурс] - URL: https://www.tp-link.com/en/support/download/archer-c54/

15. LiitoKala INR18650-35E Lithium-ion Battery Technical Specification. [Електронний ресурс] - URL: https://www.liitokala.com.cn/

16. CasaOS - Simple Home Cloud OS : official project documentation. [Електронний ресурс] - URL: https://wiki.casaos.io/

17. Alpine Linux Documentation: Architecture and Package Management. [Електронний ресурс] - URL: https://docs.alpinelinux.org/

18. IEEE 802.11ac-2013 - IEEE Standard for Information technology: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. [Електронний ресурс] - URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/6687187

19. Home Assistant Core Documentation: Network and Power Monitoring Integrations. [Електронний ресурс] - URL: https://www.home-assistant.io/docs/

20. Fowler M. UML Distilled: A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language. 3rd ed. Addison-Wesley, 2018. 192 p.

```
import asyncio
import aiosqlite
import os
from datetime import datetime, timedelta
from aiogram import Bot, Dispatcher, F
from aiogram.types import Message, ReplyKeyboardMarkup, KeyboardButton
from aiogram.filters import CommandStart, Command

TOKEN = " 1234567890:ABCdefGHIjklMNOpqrSTUvwxYZ"
HOST = "xxx.xxx.xxx.xxx"
PORT = 8080

DB_PATH = "data/subscribers.db"
MOCK_FLAG = "data/mock_offline.flag"

bot = Bot(token=TOKEN)
dp = Dispatcher()

# Глобальний стан
current_state = None
last_change_time = datetime.now()

# Клавіатура
kb = ReplyKeyboardMarkup(
    keyboard=[[KeyboardButton(text="ℹ️ Поточний статус")]],
    resize_keyboard=True
)

async def init_db():
    os.makedirs(os.path.dirname(DB_PATH), exist_ok=True)
    async with aiosqlite.connect(DB_PATH) as db:
        await db.execute("CREATE TABLE IF NOT EXISTS users (chat_id INTEGER
PRIMARY KEY)")
        await db.commit()

async def get_subscribers():
    async with aiosqlite.connect(DB_PATH) as db:
```

```
        async with db.execute("SELECT chat_id FROM users") as cursor:
            return [row[0] for row in await cursor.fetchall()]

@dp.message(CommandStart())
async def cmd_start(message: Message):
    async with aiosqlite.connect(DB_PATH) as db:
        await db.execute("INSERT OR IGNORE INTO users (chat_id) VALUES (?)",
(message.chat.id,))
        await db.commit()
    await message.answer("✅ Підписку оформлено. Ви будете отримувати сповіщення
про стан живлення.", reply_markup=kb)

def format_duration(td: timedelta) -> str:
    total_seconds = int(td.total_seconds())
    hours, remainder = divmod(total_seconds, 3600)
    minutes, _ = divmod(remainder, 60)
    if hours > 0:
        return f"{hours}год {minutes}хв"
    return f"{minutes}хв"

@dp.message(F.text == "ℹ️ Поточний статус")
@dp.message(Command("status"))
async def cmd_status(message: Message):
    if current_state is None:
        await message.answer("⏳ Стан ще визначається, зачекайте пару секунд.")
        return

    now = datetime.now()
    duration = format_duration(now - last_change_time)

    if current_state:
        msg = f"🟢 Світло Є\n🕓 Тривалість: {duration}"
    else:
        msg = f"🔴 Світла НЕМАЄ\n🕓 Відсутнє вже: {duration}"

    await message.answer(msg)
```

```
async def check_connection() -> bool:
    if os.path.exists(MOCK_FLAG):
        return False

    try:
        reader, writer = await asyncio.wait_for(
            asyncio.open_connection(HOST, PORT), timeout=3.0
        )
        writer.close()
        await writer.wait_closed()
        return True
    except (asyncio.TimeoutError, OSError):
        return False

async def monitor_power():
    global current_state, last_change_time

    current_state = await check_connection()
    last_change_time = datetime.now()

    while True:
        await asyncio.sleep(10) # Інтервал 10с для швидкої демонстрації
        is_online = await check_connection()

        if is_online != current_state:
            now = datetime.now()
            duration = format_duration(now - last_change_time)
            time_str = now.strftime("%H:%M")

            if is_online:
                msg = (f"🟢 {time_str} Світло з'явилося\n"
                       f"🕓 Його не було {duration}")
            else:
                msg = (f"🔴 {time_str} Світло зникло\n"
                       f"🕓 Воно було {duration}")
```

```
            current_state = is_online
            last_change_time = now

            subs = await get_subscribers()
            for chat_id in subs:
                try:
                    await bot.send_message(chat_id, msg)
                except Exception as e:
                    print(f"Помилка відправки користувачу {chat_id}: {e}")

async def main():
    await init_db()
    asyncio.create_task(monitor_power())
    await dp.start_polling(bot)

if __name__ == "__main__":
    asyncio.run(main())
```

ДОДАТОК Б

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

(Презентація)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій
Кафедра Комп'ютерної інженерії

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА

на тему: «Апаратно-програмний комплекс контролю енергоживлення вузлів локальної мережі»

Виконав студент групи КІД-42:
Шевчук Вадим Ігорович

Керівник кваліфікаційної роботи:
Кондратюк Борис Олександрович, викладач кафедри

Київ – 2026

Мета роботи - розробка відмовостійкого апаратно-програмного комплексу для безперервного контролю стану енергоживлення вузлів локальної мережі з функцією автоматизованого інформування.

Об`єкт дослідження є процес забезпечення відмовостійкості та моніторингу енергоживлення в локальних обчислювальних мережах.

Предмет дослідження - апаратно-програмні засоби та методи контролю стану енергоживлення мережевих вузлів на базі протоколів TCP/ICMP та API-інтерфейсів.

Актуальність обраної теми

Стабілізаційні та аварійні відключення електроенергії безпосередньо впливають на доступність мережевих сервісів.

Абоненти масово впроваджують *системи резервного живлення* (DC-UPS) для зв'язки ONU + Маршрутизатор.

Проблема "сліпої зони": оскільки головний маршрутизатор та термінал ONU постійно заживлені від ДБЖ, стандартні засоби моніторингу реєструють 100% доступність вузла.

Користувач втрачає об'єктивну *інформацію про фізичну наявність струму* в електромережі.

Недоліки класичних методів моніторингу

- *Корпоративні системи (Zabbix, PRTG):* орієнтовані на логічну зв'язність. Бюджетні ДБЖ постійного струму не мають інтерфейсів управління (SNMP).
- *IoT-рішення (розумні розетки Tuya, eWeLink):* залежать від стабільності серверів виробника. Створюють неприпустиму зовнішню точку відмови.
- *Простий зовнішній ICMP-пінг:* блокується фаєрволами провайдерів та проходить успішно під час блекауту завдяки ДБЖ.

Проєктування відмовостійкої інфраструктури

- *Ядро мережі:* TP-Link Archer C64 + оптичний термінал ONU;
- *Підсистема резервного живлення:* Mini DC-UPS (18 Вт) на базі елементів LiitoKala35E;
- *Розрахункова автономність:* близько 8 годин безперервної роботи;
- *Апаратний сенсор:* додатковий маршрутизатор TP-Link Archer C54. Підключається безпосередньо до 220 В без використання ДБЖ.

Структурна топологія мережі

- Налаштовано резервацію IP-адреси сенсора 192.168.0.2.
- Створено правило NAT (Virtual Server).
- Усі зовнішні TCP-запити перенаправляються на внутрішній сенсор.
- Забезпечено захист периметра через SPI Firewall та обфускацію портів

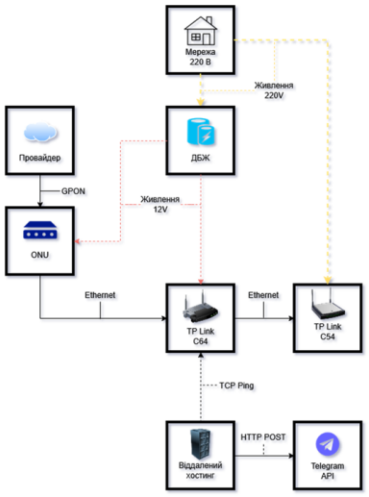


Рисунок 2.1 - Структурна схема апаратно-програмного комплексу

Програмна реалізація та алгоритм

Модуль моніторингу (Python)

- Асинхронна архітектура: використання бібліотек asyncio та aiogram 3.4.
- База даних: локальне збереження підписників у SQLite (aiosqlite).
- Принцип дії: TCP-пінг відкритого порту. У разі успіху (SYN-ACK) - мережа заживлена, у разі тайм-ауту - знеструмлена.
- Розгортання: упаковано в Docker-контейнер (docker-compose) для запуску на зовнішньому сервері.

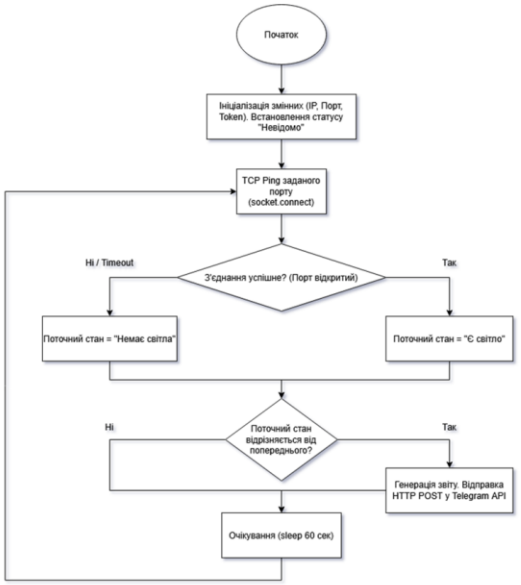


Рисунок 3.1 - Структурна схема апаратно-програмного комплексу

Тестування та результати

Результати дослідної експлуатації

- Для тестування в умовах стабільного електропостачання використано метод програмної імітації (Mock-тестування).
- Допоміжний скрипт toggle.py створює файл-флаг, який примусово переводить перевірку у стан False.
- Система коректно генерує повідомлення та автоматично вираховує тривалість відключень у годинах та хвилинах.

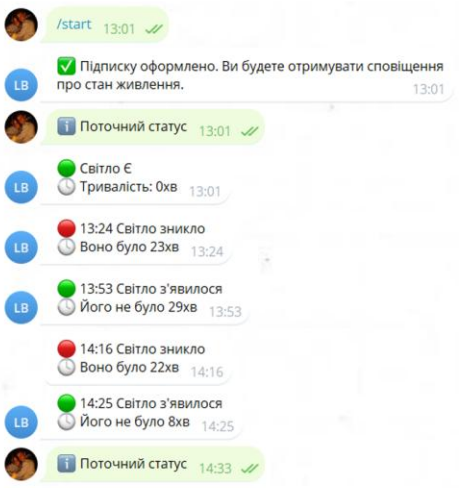


Рисунок 3.3 - Інтерфейс користувача та формат Push-сповіщень

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було вирішено актуальне науково-технічне завдання - розроблено та практично реалізовано відмовостійкий апаратно-програмний комплекс для інтелектуального контролю стану енергоживлення вузлів локальної мережі в умовах нестабільного централізованого електропостачання.

У результаті проведених досліджень, математичних розрахунків та експериментальних досліджень отримано наступні результати:

- проаналізовано існуючі методи та протоколи моніторингу локальних мереж, включаючи SNMP, MQTT та ICMP. Встановлено, що класичні корпоративні системи (NMS) виявляються неефективними для сегмента SOHO (Small Office / Home Office) при використанні джерел безперебійного живлення, оскільки створюють «сліпі зони» моніторингу: система звітує про логічну доступність вузла, ігноруючи фізичний перехід на резервний акумулятор;
- спроєктовано та модернізовано апаратну інфраструктуру комплексу. Обґрунтовано перехід від класичних ДБЖ змінного струму (AC-UPS) до систем постійного струму (DC-UPS), що дозволило підвищити ККД системи до 90%. Завдяки заміні штатних акумуляторів на елементи Li-ion хімії NCA (ємність 14 А·год) було досягнуто 8 годин абсолютної автономності для критичного вузла зв'язку (маршрутизатор Archer C64 та термінал ONU), що вдвічі перевищує стандартні цикли віялових відключень;
- запропоновано та технічно реалізовано інноваційний метод «фізичного зондування» за допомогою додаткового маршрутизатора TP-Link C54. Використання пристрою без резервного живлення в ролі апаратного сенсора дозволило детерміновано визначати стан первинної мережі 220 В, не втручаючись у внутрішню схемотехніку блоків живлення;
- розроблено схему логічної взаємодії компонентів на базі технології NAT Port Forwarding. Використання нестандартного TCP-порту 8080 для прокидання запитів до сенсора дозволило забезпечити високий рівень безпеки внутрішнього сегмента мережі, мінімізувати навантаження на процесор головного маршрутизатора та уникнути автоматизованого сканування зовнішніми бот-мережами;
- створено та розгорнуто асинхронний програмний модуль моніторингу мовою Python 3.11. Використання парадигми асинхронного вводу-виводу (бібліотека asyncio) дозволило системі працювати у неблокуючому режимі, одночасно обробляючи мережеві TCP-запити та підтримуючи активне HTTPS-з'єднання з Telegram Bot API. Впровадження моделі кінцевого автомата (FSM) забезпечило стабільність логіки та виключило надлишкові сповіщення при короткочасних мережевих коливаннях;

ПРОДОВЖЕННЯ ВИСНОВКІВ

- застосовано технологію контейнеризації Docker на базі образу Alpine Linux для розгортання комплексу. Це забезпечило екстремальну енергоефективність програмної частини (споживання оперативної пам'яті на рівні 32-36 МБ, завантаження CPU менше 0,1%) та повну портативність рішення, що дозволяє запускати його на будь-якому серверному обладнанні незалежно від версії хостової операційної системи;
- проведено серію комплексних тестів на відмовостійкість, у тому числі в умовах штучної деградації каналу зв'язку (Packet Loss 10%, Jitter 500ms). Результати тестування підтвердили, що обраний алгоритм TCP-зондування з 3-секундним таймаутом є стійким до мережевих аномалій і демонструє нульовий показник хибнопозитивних спрацювань;
- реалізовано інтерактивний інтерфейс на базі Telegram-бота, що забезпечує користувача миттєвими Push-сповіщеннями про час зникнення та появи світла, а також автоматично розраховує тривалість періодів автономної роботи, що дозволяє вести статистику стабільності енергоінфраструктури об'єкта.

Розроблений комплекс продемонстрував високу економічну ефективність (ТСО на 3 роки експлуатації становить менше 8800 грн), що значно дешевше за будь-які комерційні аналоги з подібним функціоналом. Система є повністю автономною, не потребує абонентської плати за хмарні сервіси та може бути рекомендована до впровадження як у приватних домогосподарствах, так і в корпоративних мережах малого бізнесу.

Перспективи подальшого розвитку проєкту вбачаються в інтеграції з локальними системами автоматизації (наприклад, Home Assistant через протокол MQTT) та розробці алгоритмів превентивного вимкнення другорядних споживачів при критичному розряді акумуляторів ДБЖ.