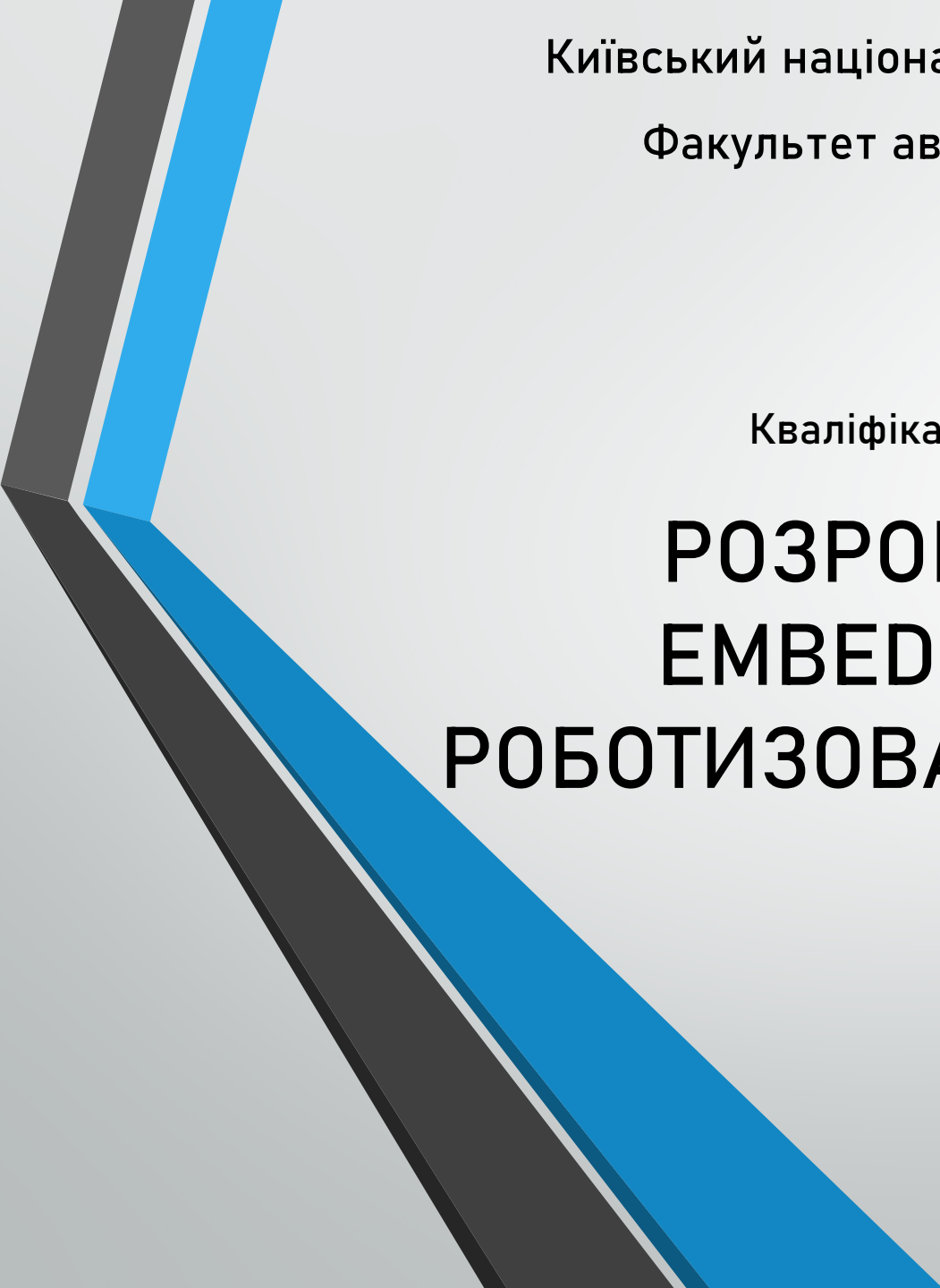




Київський національний університет будівництва і архітектури
Факультет автоматизації та інформаційних технологій

Кваліфікаційна випускна робота бакалавра на тему:

РОЗРОБКА ВІДМОВОСТІЙКОГО EMBEDDED-КОНТРОЛЕРА ДЛЯ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ (C/C++ + RTOS)

Виконавець: Корнійчук Леонід КСМс-23

Керівник: к.т.н., доцент Гуменний Д.О.

Вступ

- Актуальність теми:

Сучасні роботизовані системи працюють в доволі складних умовах та виконують відповідальні задачі. Потреба в передбачуваності та здатності системи відновлювати працездатність.

- Об'єкт дослідження:

Виявлення, діагностика та відновлення після відмов у вбудованих системах керування роботизованими платформами на базі мікроконтролерів загального призначення.

- Предмет дослідження

Архітектурні рішення та алгоритми забезпечення відмовостійкості вбудованих контролерів із резервним каналом передачі телеметрії на основі технології LoRa.

Мета і задачі

- Мета:

Розробити та верифікувати відмовостійкий вбудований контролер для роботизованих систем, у якому використовуються механізми виявлення відмов, градуйованої реакції та автономного відновлення

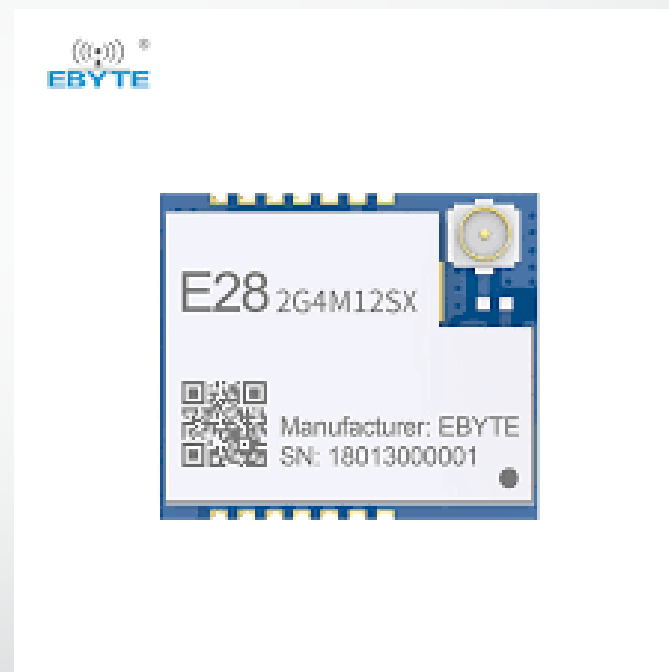
- Задачі:

- (1) аналіз та вибір апаратної платформи;
- (2) розробка архітектури Master-Slave;
- (3) реалізація ешелонованої системи захисту від відмов;
- (4) організація резервного LoRa-каналу;
- (5) верифікація механізмів в режимі імітації відмов.

Аналіз і вибір апаратної платформи



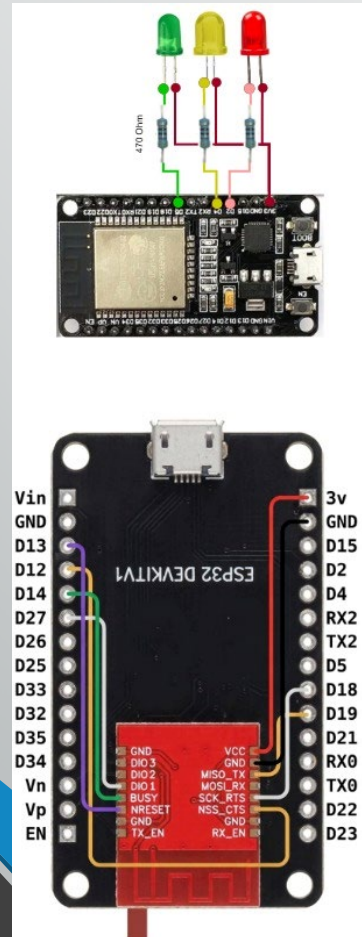
DOIT ESP32 DEVKIT



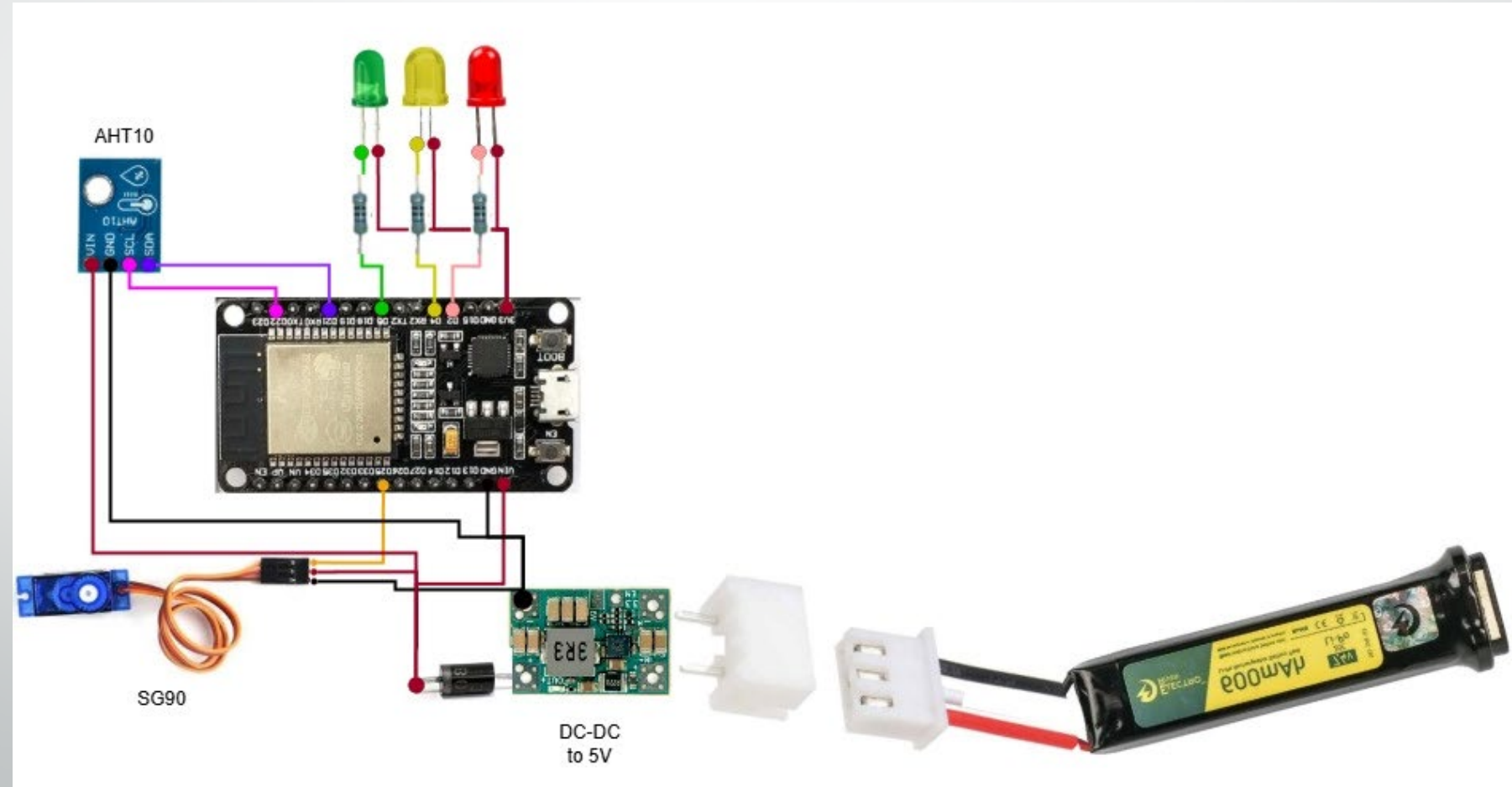
LoRa SX1280

Архітектура системи

Slave



Master



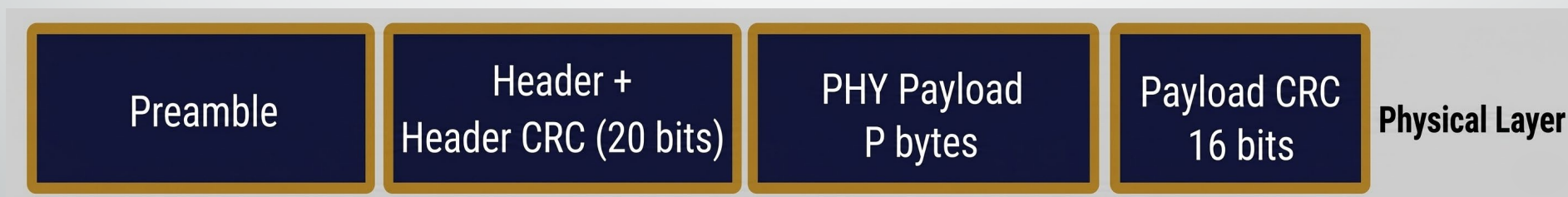
Механізми відмовостійкості



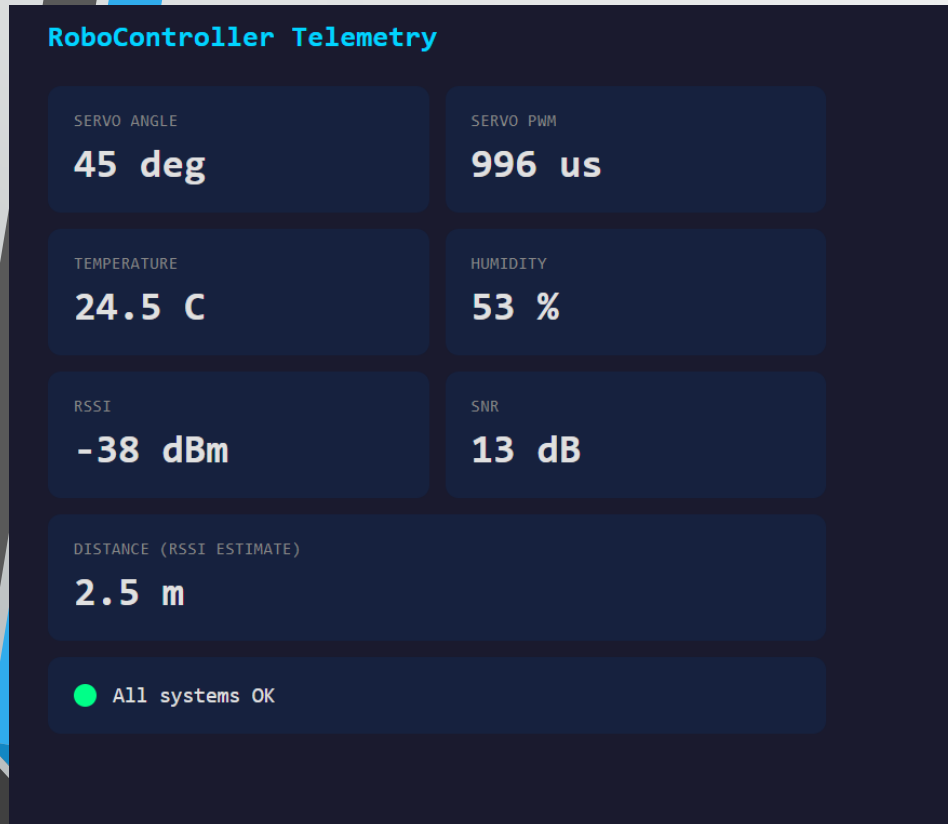
Протокол і канал зв'язку

Параметри передачі даних:
SF7, BW 800

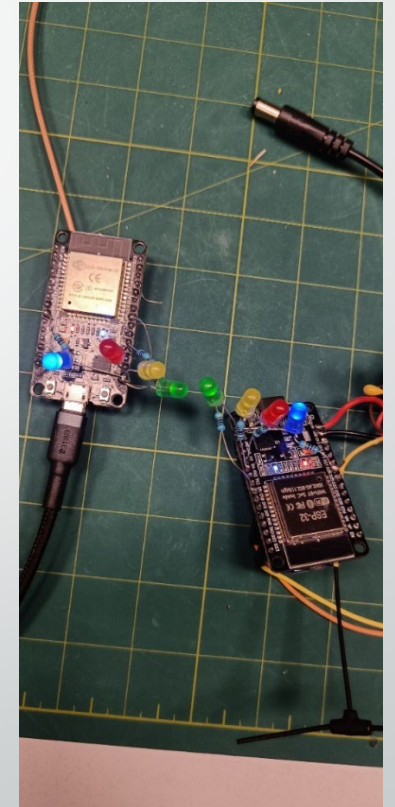
Теоретичний час передачі ≈ 5.3 мс



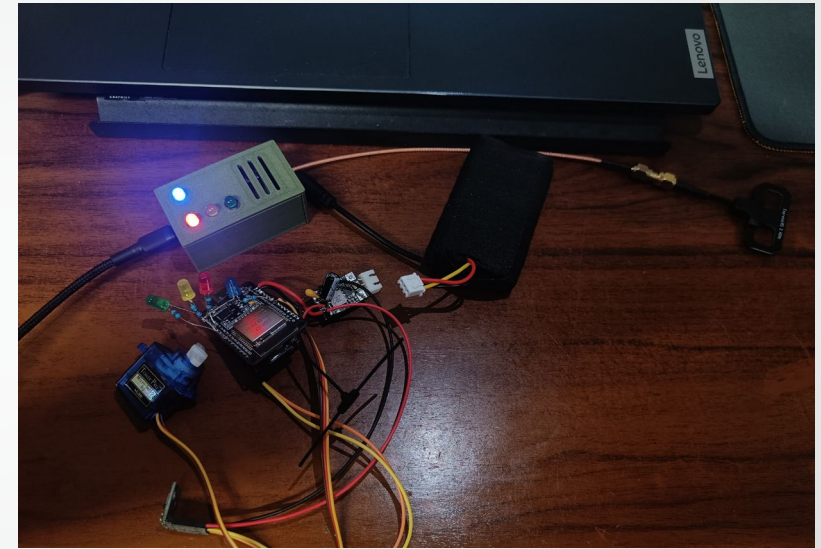
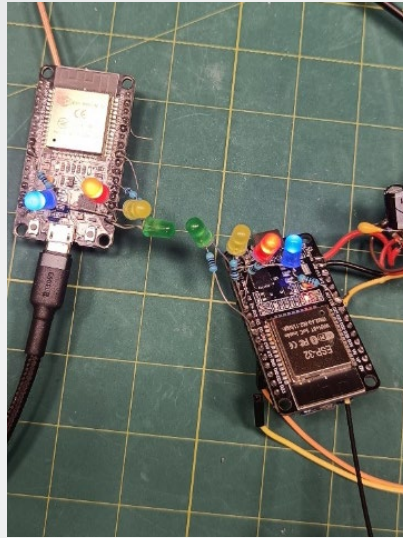
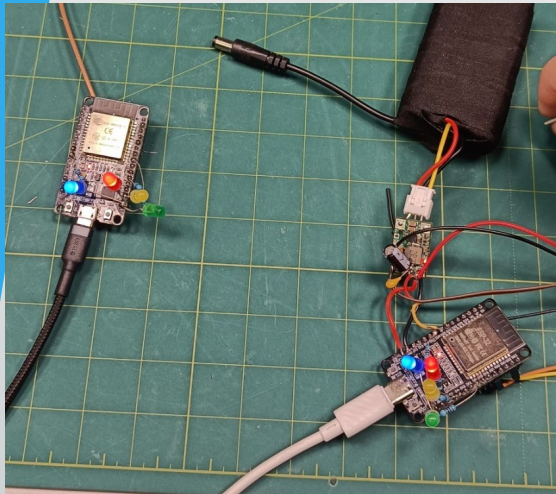
Веб-інтерфейс і індикація



```
[SLAVE] Booting...
[WiFi] AP SSID: RoboController IP: 192.168.4.1
[HTTP] Ready
[LORA] Ready
[STATE] link_age=1943ms master_code=0
[STATE] link_age=3943ms master_code=0
[LORA] RX deg= 0 us= 527 25.8C 56.6% RSSI=-22 dBm SNR=14 dB dist~0.4 m
[LORA] RX deg= 0 us= 527 25.8C 56.6% RSSI=-23 dBm SNR=14 dB dist~0.4 m
[STATE] link_age=4ms master_code=0
[LORA] RX deg= 45 us= 996 25.8C 56.7% RSSI=-24 dBm SNR=13 dB dist~0.5 m
[LORA] RX deg= 45 us= 996 25.8C 56.9% RSSI=-24 dBm SNR=13 dB dist~0.5 m
[STATE] link_age=4ms master_code=0
[LORA] RX deg= 0 us= 527 25.8C 56.9% RSSI=-24 dBm SNR=13 dB dist~0.5 m
[LORA] RX deg= 0 us= 527 25.8C 56.9% RSSI=-24 dBm SNR=13 dB dist~0.5 m
[STATE] link_age=4ms master_code=0
[LORA] RX deg= 0 us= 527 25.8C 57.0% RSSI=-23 dBm SNR=13 dB dist~0.4 m
[LORA] RX deg= 45 us= 996 25.8C 57.1% RSSI=-22 dBm SNR=14 dB dist~0.4 m
[STATE] link_age=4ms master_code=0
```



Верифікація механізмів



Температура

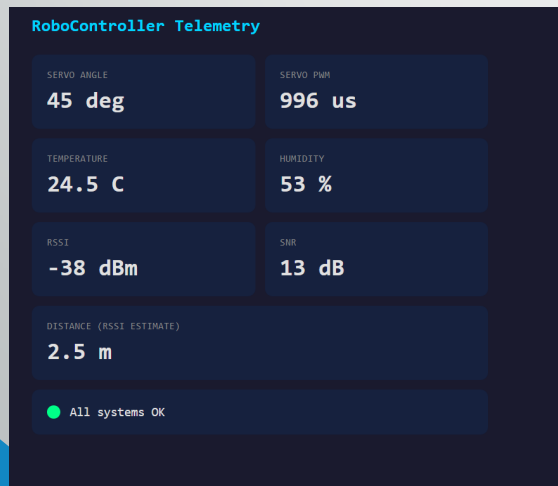
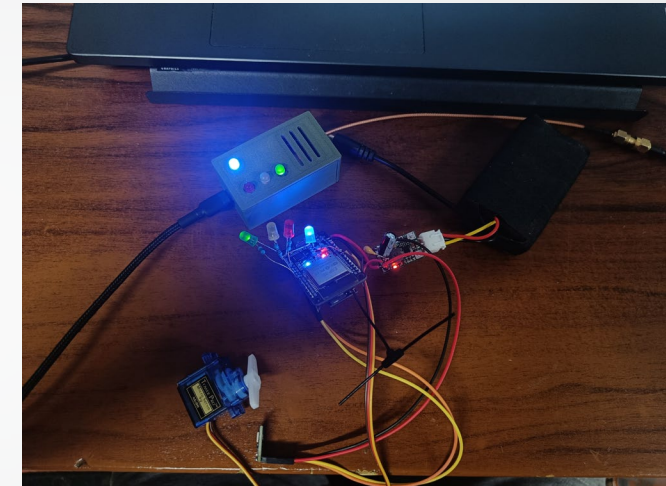
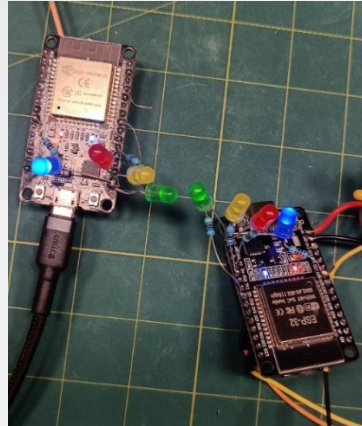


Відсутність сенсора



Втрата зв'язку

Верифікація механізмів



Стабілізація
Температури



Відновлення сенсора



Відновлення зв'язку

Технічна та наукова новизна

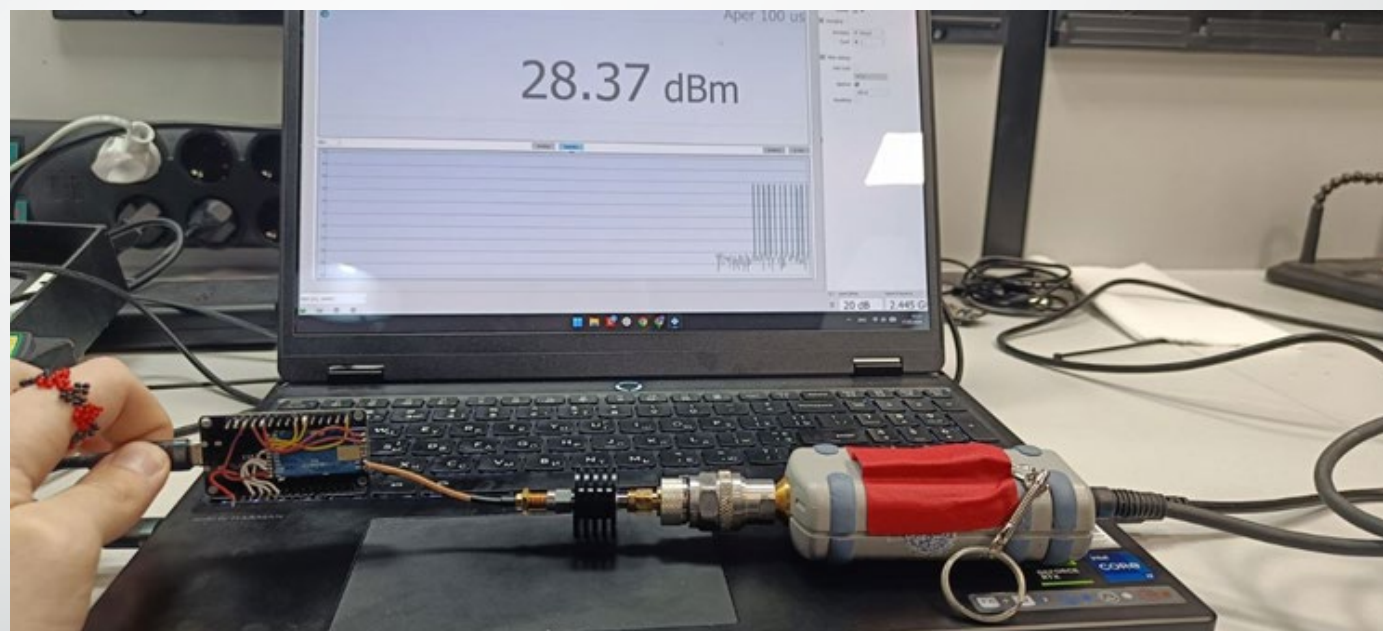
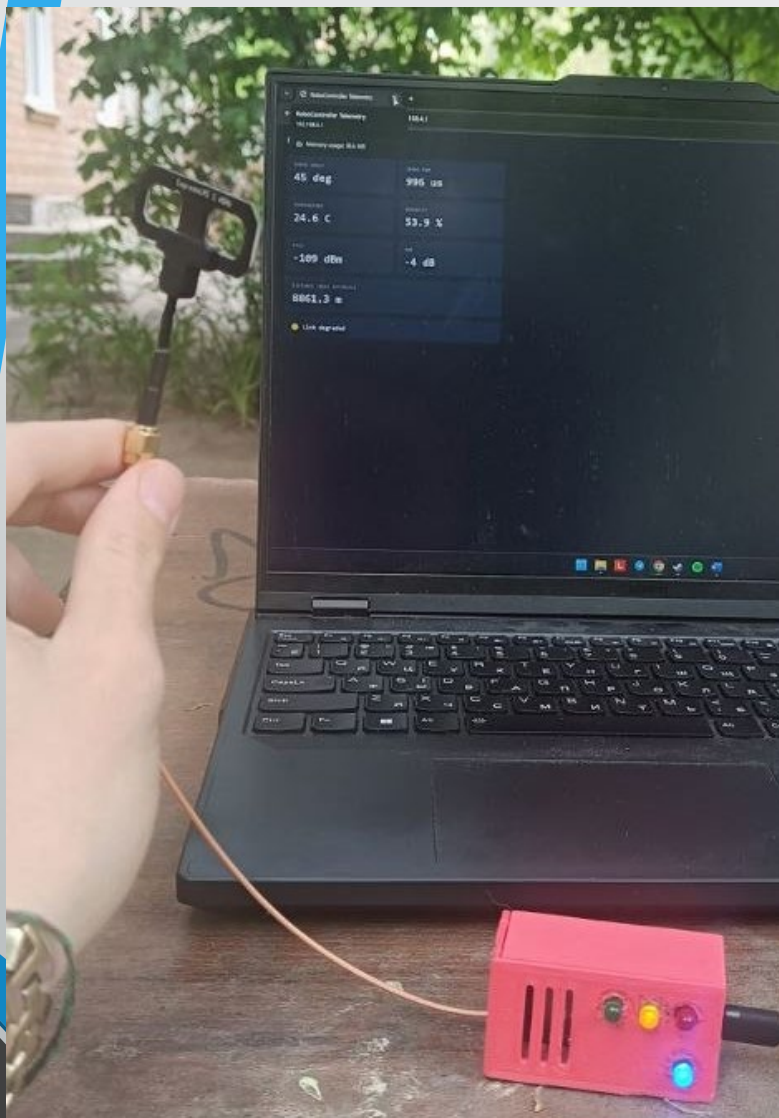
Технічна новизна:

Реалізація ешелонованої системи захисту від відмов із механізмом автономного відновлення tryRecovery, що виконує переініціалізацію несправної підсистеми без перезавантаження контролера, та архітектурна ізоляція рівня керування від рівня моніторингу через фізично незалежні вузли.

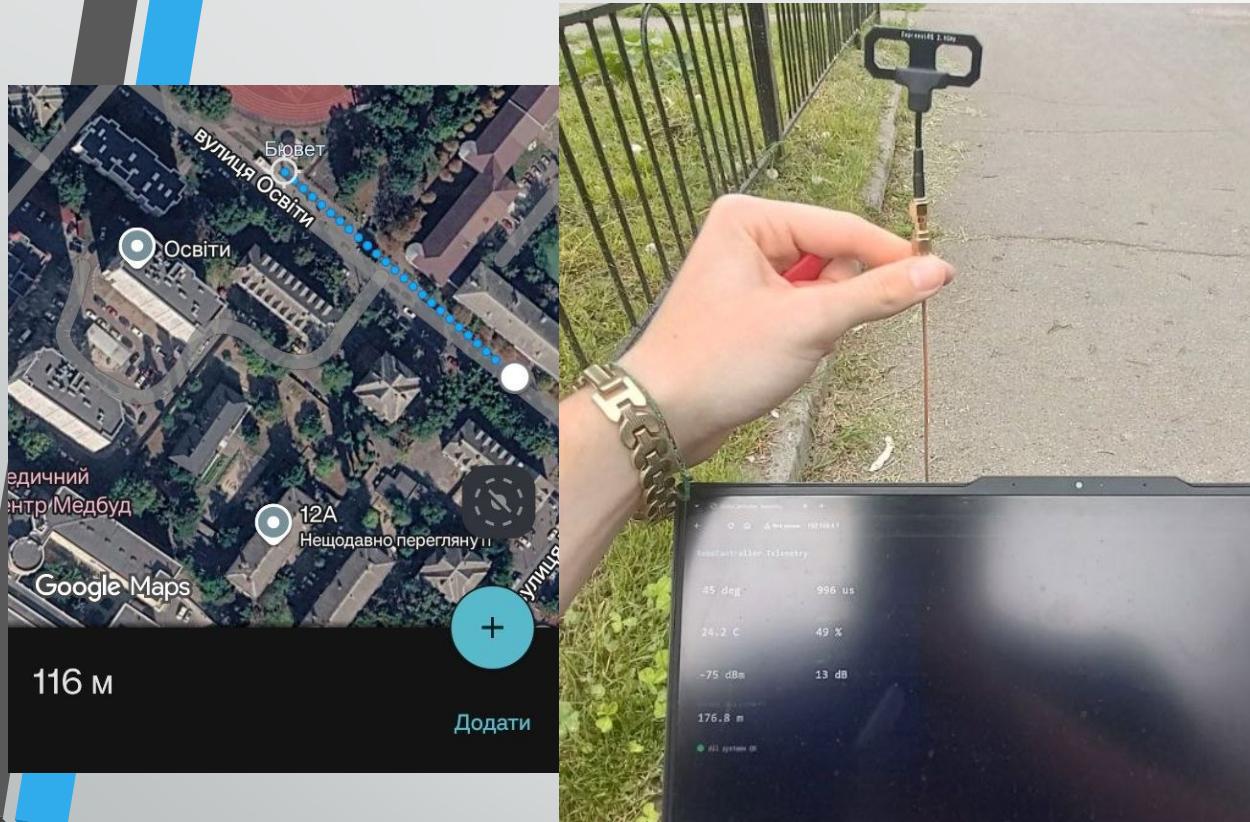
Практична новизна:

Перенесення промислових принципів відмовостійкості на доступну елементну базу (ESP32 + LoRa SX1280) з верифікацією реальними інструментальними вимірюваннями.

Вимірювання та польові тести



Вимірювання та польові тести



Обрив або зависання лінії I2C

FSM: YELLOW -> RED (sensorFails >= 5)
tryRecovery() кожні 10 секунд, відновлено автономно

Перегрів (temp >= 32)

FSM: RED, серво = 0 , зупинка руху
Повернення до GREEN після охолодження

Повна втрата зв'язку

FSM: YELLOW -> RED, signal lost
Повернення до GREEN після відновлення зв'язку

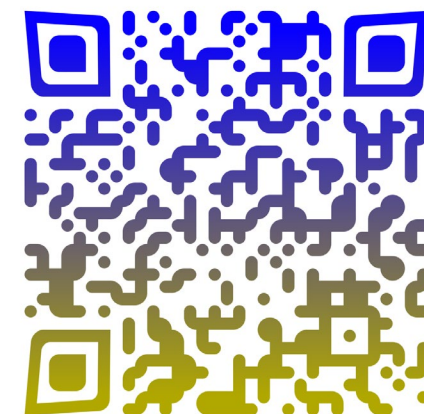
Відключення датчика під час роботи

FSM: RED, no sensor
Повторна ініціалізація, повернення до GREEN при успіху

Споживання: 52/76 мА, автономність 37–40 год від 18650 2S 1P.

Висновки

1. Розроблено та практично реалізовано відмовостійкий вбудований контролер на базі ESP32 з резервним каналом телеметрії LoRa, у якому відмовостійкість реалізована як наскрізний архітектурний принцип через ізоляцію Master-Slave, ешелоновану систему захисту та механізм автономного відновлення.
2. Працездатність системи та коректність реалізованих механізмів підтверджено експериментально: верифікацією у режимі імітації відмов, та польовими тестами зв'язку на дистанції понад 100 метрів.
3. Розраховано та підтверджено енергетичні характеристики системи: автономність 37–40 годин від акумулятора 2S 1P на елементах 18650





Дякую за увагу.