Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Розроблення підсистеми автоматизованого контролю та моніторингу параметрів рефрижераторного контейнеру
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТАКІТ-22-1
Костянтин МАНДРИКОВ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва освітньої програми)
Керівник доц. Софія ХРУСТАЛЬОВА
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри КІТАРБІ _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Я, Мандриков Костянтин Едуардович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«07» липня 2026 р.  Костянтин Мандриков

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет АКІТС
Кафедра КІТАРБІ
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)
«____»_____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Мандрикову Костянтину Едуардовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розроблення підсистеми автоматизованого контролю та моніторингу параметрів рефрижераторного контейнеру»
затверджена наказом університету від «04» червня 2026 р. № 472 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 17.07 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Контролер Micro-Link 3 рефрижераторної установки Carrier серії 69NT40-541; 3.2 Технічні специфікації мікроконтролерів; 3.3 Вимоги до систем автоматичного контролю на судні, параметри вібрацій, температур та живлення; 3.4 Стандарти та технології побудови бездротових радіомереж із топологією Mesh; 3.5 Середовище розробки C++ з використанням фреймворка Qt 6 та СКБД SQLite.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 4.1 Аналіз існуючих методів, засобів та автоматизованих систем моніторингу; 4.2 Розробка структурної схеми підсистеми автоматизованого дистанційного моніторингу; 4.3 Комп'ютерне моделювання системи автоматичного управління температурою рефрижераторного контейнера; 4.4 Вибір та обґрунтування компонентів підсистеми (мікроконтролерів, контролерів інтерфейсу); 4.5 Розробка програмного забезпечення, протоколу обміну даними та алгоритму роботи підсистеми; 4.6 Аналіз шляхів практичної реалізації проєкту, економічних аспектів впровадження та питань охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри):

Графічний матеріал у вигляді презентації – 18 арк. ф. А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання	Примітка
1	Аналіз існуючих систем моніторингу	01.04.2026	виконано
2	Розроблення структурної схеми підсистеми.	16.04.2026	виконано
3	Розроблення програмного засобу RCMS.	06.05.2026	виконано
4	Опрацювання питань охорони праці під час впровадження та експлуатації системи.	18.06.2026	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	25.06.2026	виконано
6	Подання роботи на нормоконтроль	14.07.2026	виконано
7	Подання роботи для перевірки роботи на академічну доброчесність	15.07.2026	виконано
8	Подання роботи на рецензію	15.07.2026	виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	16.07.2026	виконано
10	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	16.07.2026	виконано

Дата видачі завдання 01 березня 2026 р.

Здобувач _____ (підпис) _____ Костянтин МАНДРИКОВ

Керівник роботи _____ (підпис) доц. Софія ХРУСТАЛЬОВА

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 89 с., 7 табл., 31 рис., 3 дод., 22 джерела.

РЕФРИЖЕРАТОРНИЙ КОНТЕЙНЕР, ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ, MESH-МЕРЕЖА, ПРОТОКОЛ ОБМІНУ ДАНИМИ, ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ, АВАРІЙНА СИГНАЛІЗАЦІЯ.

Об'єкт розробки – процес моніторингу параметрів рефрижераторного контейнера.

Предмет розробки – підсистема автоматизованого дистанційного моніторингу параметрів рефрижераторного контейнера, реалізована у вигляді програмного засобу.

Мета роботи – забезпечення безперервного дистанційного моніторингу параметрів рефрижераторного контейнера на базі бездротової радіомережі з топологією Mesh.

У першому розділі проаналізовано існуючі методи, засоби та системи моніторингу параметрів рефконтейнерів, системи зв'язку і вимоги до систем автоматичного контролю. У другому розділі розроблено структурну схему на основі інтеграції зі штатним контролером через бездротову Mesh-мережу та виконано комп'ютерне моделювання контуру регулювання температури. Обрано компоненти підсистеми. У третьому розділі розроблено програмний засіб RCMS: протокол обміну із захистом CRC-16, спостереження за флотом до 500 контейнерів, архів на 30 діб, аварійні коди за документацією Carrier T-363, експорт звітів. Визначено шляхи реалізації проєкту, економічні аспекти, напрями розвитку та питання охорони праці.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 89 pages, 7 tables, 31 figures, 3 appendices, 22 sources.

REFRIGERATED CONTAINER, REMOTE MONITORING, MESH NETWORK, MICROCONTROLLER, DATA EXCHANGE PROTOCOL, SOFTWARE TOOL, DATABASE, ALARM SIGNALING.

The object of development is the process of monitoring the parameters of a refrigerated container. The subject of development is a subsystem of automated remote monitoring of refrigerated container parameters implemented as a software tool. The aim of the work is to provide continuous remote monitoring of refrigerated container parameters based on a wireless radio network with Mesh topology.

The work analyzes existing monitoring methods and systems, develops the structural scheme of the subsystem based on direct integration with the memory of the standard refrigeration unit controller via a wireless Mesh network, performs computer modeling of the temperature control loop, selects the hardware components (nRF52840, WIZnet W5500, CP2102N) and implements the RCMS operator software in C++ using the Qt 6 framework: a CRC-16 protected framed exchange protocol, real-time supervision of up to 500 containers, a 30-day SQLite archive, Carrier Micro-Link 3 alarm code interpretation according to the T-363 manual, and daily report export to PDF and CSV. The implementation prospects, economic aspects, labor protection issues and development directions, including dangerous goods monitoring according to IMDG classes, are considered.

ЗМІСТ

Перелік скорочень 9
Вступ 10
1 Аналіз існуючих методів, засобів та автоматизованих систем моніторингу та контролю параметрів рефрижераторного контейнера 12
1.1 Локальні інтерфейси керування (панелі оператора) 13
1.2 Інтерфейси дистанційного моніторингу та централізації 16
1.3 Аналіз існуючих систем зв'язку та методів обміну даними 17
1.4 Аналіз вимог щодо систем автоматичного контролю на судні 20
2 Розробка структурної схеми та алгоритму роботи підсистеми автоматизованого дистанційного моніторингу параметрів рефрижераторного контейнера 22
2.1 Обґрунтування вибору архітектури системи. Розробка структурної схеми 22
2.2 Вибір компонентів автоматизованої підсистеми дистаційного моніторигну параметрів рефрижераторного контейнера 25
2.3 Структура апаратно-програмного модуля. Алгоритм роботи підсистеми ... 34
2.4 Комп'ютерне моделювання системи автоматичного управління температурою рефрижераторного контейнера 38
3 Реалізація підсистеми дистанційного моніторингу у вигляді програмного засобу 43
3.1 Вибір середовища програмування 43
3.2 Протокол обміну даними 44
3.3 Архітектура програми та етапи розробки 45
3.4 Тестування працездатності програмного засобу та візуалізація даних 48
3.5 Реалізація підсистеми дистанційного моніторингу 53
3.6 Охорона праці під час впровадження та експлуатації системи 58
Висновки 62

Перелік джерел посилання 66
Додаток А Апробація результатів 69
Додаток Б Код програми 79
Додаток В Демонстраційний матеріал 88

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АКІТ – автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології;

БІ – кафедра безпекової інженерії;

КІТАР – кафедра комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки;

КІТАРБІ – кафедра комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії;

РК – рефрижераторний контейнер;

ХНУРЕ – Харківський національний університет радіоелектроніки;

PCMCIA – Personal Computer Memory Card International Association.

ВСТУП

У сучасних умовах глобальної логістики та морських вантажоперевезень надійність транспортування продукції залежить від суворого дотримання температурних норм. Незважаючи на те, що сучасні рефрижераторні контейнери штатно оснащені локальними системами клімат-контролю, процес їх моніторингу на суднах часто вимагає значних часових та людських ресурсів для регулярних ручних перевірок кожного окремого агрегату. У зв'язку з цим актуальним завданням є не створення нових систем керування з нуля, а модернізація існуючих комплексів шляхом впровадження підсистем моніторингу та централізованого збору даних, з подальшим їх використанням для контролю параметрів контейнера.

Автоматизація процесу моніторингу та подальшого збору інформації дозволяє об'єднати велику кількість незалежних контролерів у єдину інформаційну мережу з виведенням показників на одне робоче місце – комп'ютер електромеханіка. Такий підхід забезпечує отримання оперативних звітів щодо кожного контейнера. Важливою перевагою модернізованої системи є впровадження автоматичної фіксації кодів помилок із прив'язкою до ідентифікаційного номера конкретного контейнера. Це дозволяє технічному персоналу судна миттєво знаходити проблемний об'єкт, точно локалізувати несправність та завчасно визначати контейнер, який підлягає тестуванню або ремонту. Це суттєво економить робочий час екіпажу, знижує фінансові витрати та мінімізує ризики псування вантажу. Крім того, створення безперервного цифрового архіву параметрів набуває значення в юридичній площині. Об'єктивні дані постійного моніторингу слугують беззаперечним доказом дотримання умов договору перевезення.

Мета роботи – забезпечення безперервного дистанційного моніторингу параметрів рефрижераторного контейнеру на базі бездротової радіомережі з топологією Mesh.

Об’єкт розробки – процес моніторингу параметрів рефрижераторного контейнеру.

Предмет розробки – підсистема автоматизованого дистанційного моніторингу параметрів рефрижераторного контейнеру, реалізована у вигляді програмного засобу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– проаналізувати сучасні методи, засоби та автоматизовані системи дистанційного моніторингу параметрів рефрижераторного контейнеру, визначити переваги та недоліки існуючих рішень;

– розробити структурну схему підсистеми автоматизованого дистанційного моніторингу параметрів рефрижераторного контейнеру;

– провести вибір компонентів підсистеми автоматизованого дистанційного моніторингу параметрів рефрижераторного контейнеру;

– розробити алгоритм роботи підсистеми автоматизованого дистанційного моніторингу параметрів рефрижераторного контейнеру;

– реалізувати підсистему автоматизованого дистанційного моніторингу параметрів рефрижераторного контейнеру у вигляді програмного засобу;

– оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [1], а також з методичними вказівками з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» [2–3].

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ, ЗАСОБІВ ТА АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РЕФРИЖЕРАТОРНОГО КОНТЕЙНЕРА

Сучасний рефрижераторний контейнер являє собою складну термодинамічну систему, управління якою здійснюється спеціалізованими мікропроцесорними контролерами, що все частіше інтегруються в загальні IoT-мережі для дистанційного керування [4]. Як типовий приклад таких установок на рисунку 1.1 зображений контейнер серії 69NT40-541 фірми Carrier [5].



Рисунок 1.1 – Сучасний 40-ка футовий контейнер фірми Carrier [5]

РК фірми Carrier вважаються найпоширенішими в світі та зустрічаються частіше всього, тому в рамках кваліфікаційної роботи розглядаються існуючі рішення саме на його прикладі. Схема контролю температури такого юніта зображена на рисунку 1.2, аркуш 13.

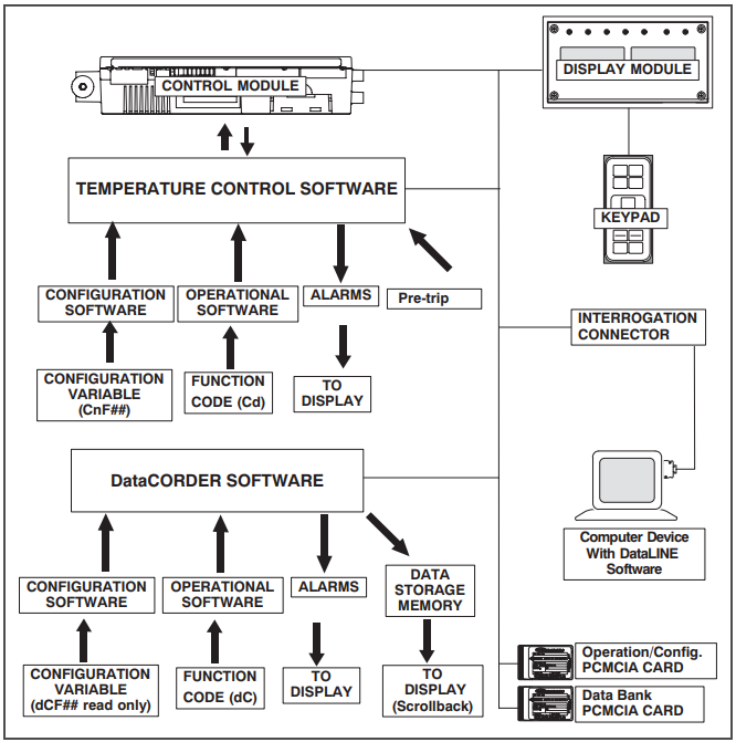


Рисунок 1.2 – Структурна схема контролю температури контейнера фірми Carrier

Інтерфейси моніторингу та контролю в цій галузі, можна розділити на дві основні категорії: локальні (панелі керування безпосередньо на агрегаті) та дистанційні (диспетчерські системи збору даних).

1.1 Локальні інтерфейси керування

Більшість провідних виробників рефрижераторних агрегатів (Carrier Transicold, Thermo King, Star Cool, Daikin) оснащують своє обладнання жорстко захищеними мікропроцесорними панелями керування, що монтуються на передній стінці контейнера. Основна вимога до таких інтерфейсів – інтуїтивна зрозумілість, стійкість до агресивного морського середовища та вібрацій.

Як типовий приклад, локальний інтерфейс системи Carrier Micro-Link 3 складається з двох основних елементів: клавіатури та модуля індикації [5].

Модуль індикації зазвичай містить цифрові дисплеї (LCD або LED) для паралельного відображення заданої (Setpoint) та фактичної (Supply/Return) температур повітря. Зовнішній вигляд дисплею РК фірми Carrier зображено на рисунку 1.3.

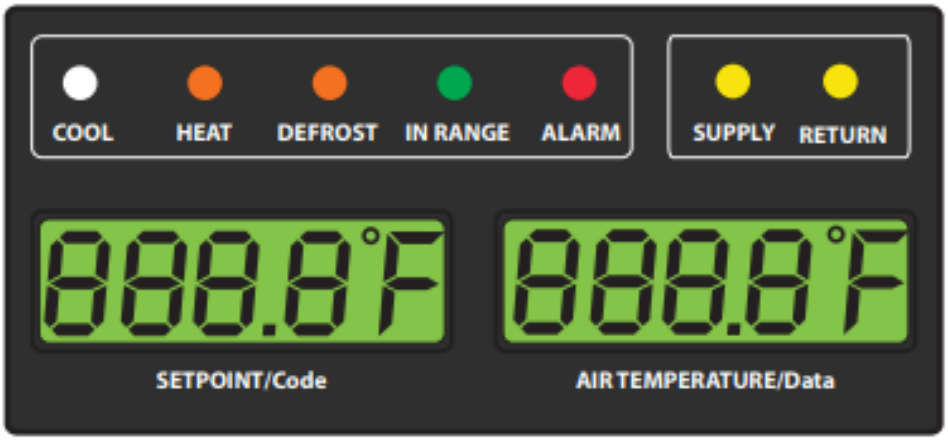


Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд дисплей модуля

Важливою складовою інтерфейсу є система світлодіодних індикаторів, яка повідомляє оператора про поточний робочий режим агрегату: охолодження (COOL), нагрів (HEAT), розморожування (DEFROST), знаходження температури у допустимих межах (IN RANGE) та наявність критичних несправностей (ALARM).

Клавіатура зазвичай мембранного типу (11 клавіш), вона дозволяє технічному персоналу змінювати температурний режим, ініціювати ручне розморожування (MANUAL DEFROST), переглядати список активних або архівних помилок (ALARM LIST), а також запускати програму автоматичної попередньої перевірки (Pre-Trip Inspection – PTI) перед рейсом. Клавіатура зображена на рисунку 1.4, аркуш 15.

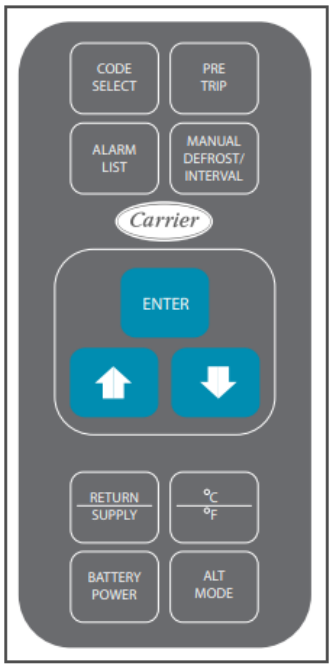


Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд клавіатури

1.1.1 Вбудовані системи реєстрації та архівації даних (Data Loggers)

Для забезпечення юридичної достовірності умов перевезення температурно-залежних вантажів сучасні інтерфейси не лише відображають, але й безперервно реєструють параметри. Наприклад, програмно-апаратний комплекс DataCORDER від Carrier фіксує температуру, вологість, події (зміна налаштувань, зникнення живлення) та помилки у незалежну енергонезалежну пам'ять.

Однак локальний інтерфейс зчитування цих даних зазвичай вимагає фізичного підключення зовнішнього пристрою ноутбука або спеціальної картки пам'яті PCMCIA через діагностичний порт. Флеш-карти PCMCIA ATA від APRO поєднують у собі передову технологію флеш-контролера 3S та флеш-пам'ять типу NAND SLC [6]. У масштабах судна такий підхід вимагає значних трудовитрат екіпажу на щоденний обхід два рази на день та ручне зчитування показників з кожного окремого агрегату.

1.2 Інтерфейси дистанційного моніторингу та централізації

Оскільки на борту сучасного судна або в портовому терміналі можуть знаходитися сотні рефрижераторних контейнерів, виникає потреба в системах дистанційного централізованого моніторингу. Основні існуючі методи передачі даних.

Диспетчерські системи, наприклад, REFCON 6 який автоматично контролює стан усього судна або контейнерного терміналу. Двосторонній зв'язок між оператором та кожним окремим рефрижераторним контейнером може здійснюватися цілодобово, а всі дані реєструються для ведення історії подій та документування [7] – виступають у ролі головного програмного інтерфейсу оператора на судні. Вони збирають інформацію з усіх підключених через модеми PLC контролерів (незалежно від їхнього виробника) і виводять її на один центральний комп'ютер. Інтерфейс таких систем дозволяє електромеханіку в режимі 24/7 відстежувати статуси, ідентифікувати конкретний контейнер за його ID, фіксувати коди помилок та автоматично формувати звіти (Data Log) без виходу на палубу. Недоліки: остання розробка такого інтерфейсу була в 2006 році, залежність від центрального сервера.

Бездротова телематика (GSM/LTE/Bluetooth): сучасні модернізації інтерфейсів (Thermo King RMM+ або Star Cool Connect) додатково впроваджують бездротові модулі. Вони дозволяють дублювати інформацію в хмарні веб-інтерфейси для логістичних компаній, забезпечуючи глобальний контроль вантажу під час мультимодальних перевезень. Недоліки: відсутність покриття у морі.

1.3 Аналіз існуючих систем зв'язку та методів обміну даними

Для реалізації підсистеми дистанційного моніторингу та централізації диспетчерського управління критично важливо організувати надійний канал передачі даних від локальних контролерів до центрального комп'ютера. Аналіз існуючих методів обміну даними базується на розгляді як дистанційних каналів зв'язку, так і методів фізичного перенесення інформації, що використовуються для діагностики та архівації.

Більшість штатних мікропроцесорів рефрижераторних установок на базовому рівні підтримують стандартні промислові послідовні інтерфейси. Наприклад, інтерфейс RS-232 застосовується виключно для локального підключення діагностичного обладнання безпосередньо біля агрегату на коротких відстанях і не підходить для розбудови загальної мережі. Натомість інтерфейс RS-485 є класичним рішенням для побудови надійних систем автоматизації. Використання диференціального сигналу забезпечує йому високу стійкість до електромагнітних завад, що дозволяє фізично об'єднати велику кількість рефрижераторних контейнерів на одній двопровідній шині зв'язку.

Альтернативним і широко розповсюдженим у морській практиці методом є технологія лінії електропередач (PLC). Вони пропонують економічно ефективне рішення для спільної комунікації та датчиків для інтелектуальних мереж. Це пояснюється тим, що високочастотні сигнали PLC, що використовуються для передачі даних, також розкривають детальну інформацію про стан ліній електропередач, якими вони проходять. Традиційні рішення для діагностики ліній електропередач або кабелів на основі PLC залежать від попередніх знань про тип кабелю, топологію мережі та/або характеристики аномалій [8].

Wi-Fi Mesh – це розширення класичної специфікації бездротових локальних мереж (WLAN), яке дозволяє пристроям взаємодіяти між собою в комірчастій

топології без необхідності підключення кожного вузла до дротової магістралі. Стандарт визначає архітектуру та спеціалізовані протоколи на рівні керування доступом до середовища для створення мереж, що самоорганізовуються. Мережа 802.11s будується на базі спеціальних вузлів, які одночасно виконують функції відправника, одержувача та транзитного ретранслятора даних. Для інтеграції з іншими мережами (наприклад, дротовим Ethernet або традиційним Wi-Fi) використовуються вузли-шлюзи та портали. Головним стримуючим фактором є високе енергоспоживання.

Zigbee – це відкритий стандарт бездротового зв'язку, оптимізований для створення масштабованих мереж з низьким енергоспоживанням. Фізичний рівень PHY та рівень керування доступом до середовища MAC регламентуються стандартом IEEE 802.15.4, тоді як сама специфікація Zigbee визначає мережевий NWK та прикладний APL рівні.

Bluetooth Mesh – це стандарт мережевої архітектури, розроблений для створення масштабних комірчастих мереж зв'язку «багато-до-багатьох» (m:m). На відміну від класичних протоколів Bluetooth, що працюють за топологією «зірка», Mesh-специфікація дозволяє об'єднувати вузли у єдину відмовостійку систему. Докладний порівняльний аналіз бездротових технологій з топологією Mesh за критеріями енергоефективності, дальності та пропускної здатності виконано у публікації [18].

Організація обміну даними за допомогою бездротових технологій у морських умовах має суттєві фізичні обмеження через масивні металеві конструкції судна, які екранують радіосигнал. Більш доцільним для таких умов є використання промислових радіомереж з топологією Mesh. Порівняння бездротових Mesh-технологій зображено на рисунку 1.5.

На логічному рівні для уніфікації збору даних використовується протокол Modbus (RTU або TCP).

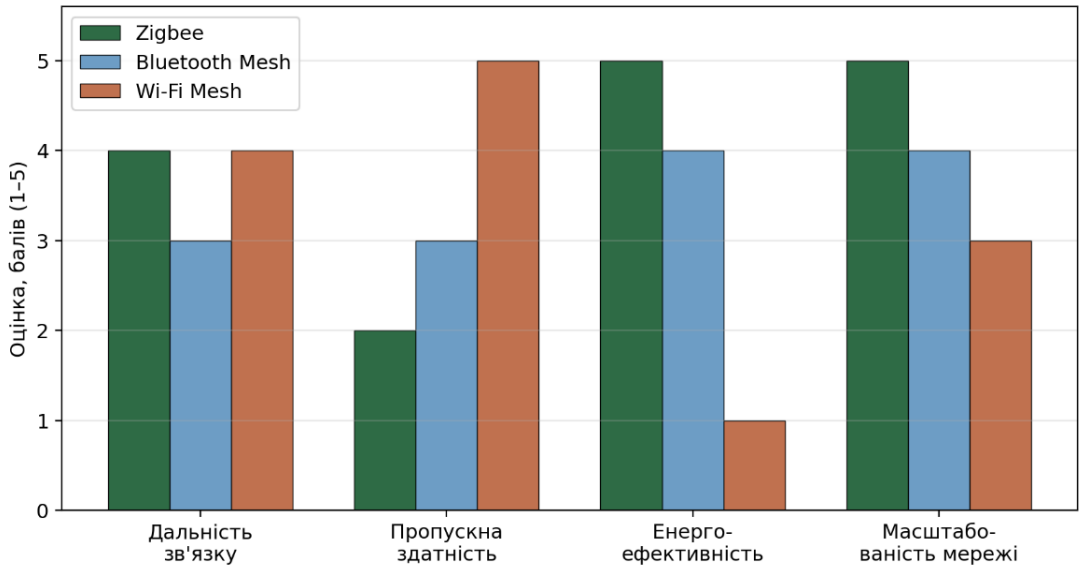


Рисунок 1.5 – Порівняння бездротових Mesh-технологій (експертні оцінки за 5-бальною шкалою на основі [18])

Modbus TCP [19] є адаптацією класичного послідовного протоколу Modbus для роботи в мережах Ethernet (стек TCP/IP). Він залишається стандартом у промисловій автоматизації завдяки своїй відкритості та простоті реалізації. Ця архітектура працює за схемою «Клієнт-Сервер», яка раніше була відома як «Майстер-Підпорядкований». У ній клієнт, наприклад система SCADA або головний ПЛК, ініціює запит, на який сервер у вигляді датчика або модуля вводу/виводу надсилає відповідь. Модель даних передбачає зберігання інформації в чотирьох таблицях: Discrete Inputs – дискретні входи, тільки для читання; Coils – дискретні виходи, для читання/запису; Input Registers – вхідні регістри, 16-бітні, тільки для читання; Holding Registers – регістри зберігання, 16-бітні, для читання/запису.

Порівняльний аналіз промислових протоколів передавання даних (Modbus TCP, OPC UA, MQTT) з погляду ефективності, безпеки та складності реалізації, виконаний у публікації [19], показав, що готові промислові протоколи є надлишковими для вузького каналу «координатор – комп'ютер оператора», що

додатково обґрунтовує розробку власного компактного кадрового протоколу в цій роботі.

1.4 Аналіз вимог щодо систем автоматичного контролю на судні

Відповідно до Регістру судноплавста україни (правила класифікації та побудови морських суден) [9] системи автоматизації, їх елементи і пристрої повинні надійно працювати при температурі від –25 °С до +45 °С на відкритій палубі.

Системи автоматизації повинні надійно працювати при відносній вологості повітря (75 ± 3)% і температурі (45 ± 2)°С або при відносній вологості повітря (80 ± 3)% і температурі (40 ± 2)°С, а також при відносній вологості повітря (95 ± 3)% і температурі (25 ± 2)°С.

Системи автоматизації повинні надійно працювати при вібраціях з частотами від 2 Гц до 100 Гц: при частотах від 2 Гц до 13,2 Гц – із амплітудою переміщень ±1 мм; при частотах від 13,2 Гц до 100 Гц – із прискоренням ±0,7g.

Системи автоматизації повинні надійно працювати при тривалих кренах до 22,5° і при хитавиці 22,5° із періодом хитавиці (8 ± 1)с.

Обладнання автоматизації, що одержує живлення від акумуляторних батарей, повинне надійно працювати при відхиленнях напруги від номінального значення: від +30% до –25% – для обладнання, що не відключається від батареї під час зарядження; від +20% до –25% – для обладнання, що відключається від батареї під час зарядження. Триразове зникнення живлення протягом 5 хв тривалістю по 30 с не повинне впливати на працездатність систем автоматизації.

Електричні елементи і пристрої повинні надійно працювати при відхиленнях від номінальних значень параметрів живлення. Відхилення від номінальних значень параметрів живлення наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Відхилення від номінальних значень параметрів живлення

Параметр живлення	Відхилення від номінальних значень		
	тривале	короткочасне	
	%	%	Час, с
Змінний струм: напруга частота	+6....–10	±20	1,5
	±5	±10	5
Постійний струм: напруга	±10	5 10	циклічні відхилення пульсації

Ступінь захисту систем автоматизації, їх елементів і пристроїв повинна бути обрана відповідно до місця установлення згідно із частини XI «Електричне обладнання». Мінімальні ступені захисту електричного обладнання, встановленого на відкритій палубі повинно бути щонайменше IP 56.

Обладнання автоматизації повинне виготовлятися із матеріалів, стійких до впливу морської атмосфери, або повинне бути надійно захищене від її шкідливого впливу.

У системах автоматизації повинні бути вжиті заходи проти хибних спрацьовувань, що викликаються короткочасними змінами контрольованих параметрів, зв'язаних із хитавицею судна, включенням і відключенням механізмів тощо.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТА АЛГОРИТМУ РОБОТИ ПІДСИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ РЕФРИЖЕРАТОРНОГО КОНТЕЙНЕРА

Для того щоб розробити структурну схему, спочатку необхідно з’ясувати яких саме умов треба дотримуватися. На основі проведених аналізів в розділі 1, можемо зробити висновок, що за метою система повинна працювати дистанційно, повинна бути захищена від завад високої напруги та сурових умов на судні, а також працювати багато часу безперервно – економічно.

На основі цих умов створюємо ескіз нашого проєкту, а саме обґрунтовуємо вибір тих чи інших способів реалізації такої структури системи.

2.1 Обґрунтування вибору архітектури системи. Розробка структурної схеми

Безпечність вимірювань (Використання Data Corder): замість того щоб встановлювати власні дублюючі датчики усередині контейнера, будемо інтегрувати систему безпосередньо в базу даних установки через кабель RJ-45. Це дозволить нам не тільки отримувати температуру, а й відкриє доступ до інших параметрів таких як коди помилок, тиск фреону, статус циклів відтаювання, напругу на фазах та інші. Також з таким рішенням нам вдасться спростити систему, що в подальшому поліпшить швидкість ремонту якщо такий потрібен.

Чіткий поділ на Client та Coordinator: контролер рефрижератора не розрахований на роботу з сучасними бездротовими протоколами. Нам потрібно щоб передатчик, який ми інтегруємо(Client Node) виступав необхідним мостом-перекладачем, який апаратно ізолює чутливу електроніку холодильної установки від радіотракту. В свою чергу, виділення Coordinator Node дозволяє зняти завдання

з обробки радіочастотних колізій (MAC-рівень Mesh-мережі) з Головного комп'ютера, залишаючи йому виключно аналітику.

Бездротовий сегмент замість магістралі: застосування радіоканалу між вузлами є нашою головною метою, оскільки рефрижераторні контейнери постійно переміщуються під час завантаження та розвантаження. Прокладання дротових інформаційних магістралей між десятками контейнерів є фізично неможливим і вкрай ненадійним, а також економічно не ефективним у морських умовах.

Буферизація на проміжних етапах: схема передбачає поетапне зберігання даних (спочатку в Data Corder, потім у пам'яті Client Node). Це дозволить зробити систему стійкою до розривів зв'язку. Наприклад, якщо бездротова мережа тимчасово недоступна через роботу суднових радарів або кранів, дані не втрачаються, а накопичуються і передаються після відновлення каналу.

На основі обґрунтувань будуємо структурну схему системи – рисунок 2.1.

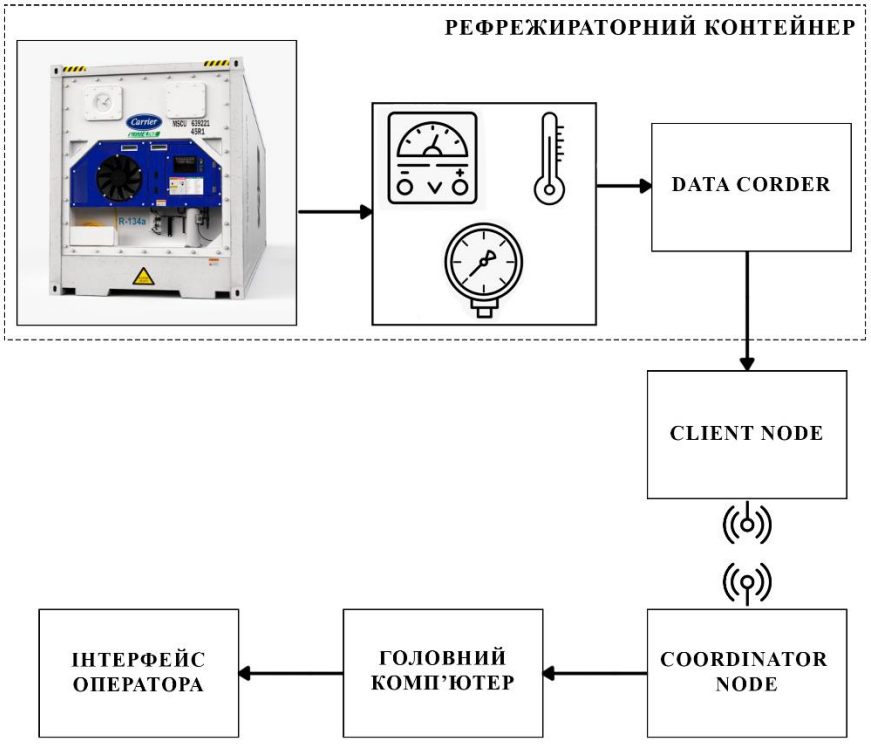


Рисунок 2.1 – Структурна схема підсистеми дистанційного моніторингу РК

Запропонована структурна схема відображає логічний та фізичний шлях проходження інформації від об'єкта контролю до кінцевого користувача. Опис взаємодії блоків та алгоритм їх роботи.

1. Рефрижераторний контейнер та датчики: початковою ланкою системи є сам контейнер, внутрішнє середовище та агрегати якого генерують фізичні показники. Ці показники (температура, тиск холодоагенту, електричні параметри компресора тощо) безперервно фіксуються групою первинних перетворювачів (датчиків) холодильної установки. Усі сигнали з датчиків надходять до вбудованого контролера рефрижератора і записуються в його енергонезалежну пам'ять. Цей блок формує та зберігає структуровані журнали подій пов’язаних з самою системою та масиви даних, інформацію про стан об’єкту який перевозиться. Ця система є окремою і вже вбудована в рефрижираторний контейнер.

2. Client Node: через діагностичний порт до реєстратора даних дротовим шляхом підключається комунікаційний вузол-шлюз. Такий пристрій ініціює запити до пам'яті установки, зчитує необхідні масиви інформації, здійснює їхню буферизацію та інкапсулює у пакети для бездротової передачі.

3. Бездротовий канал зв'язку: сформовані пакети випромінюються в радіоефір. Завдяки комірчастій топології (Mesh) сигнал може ретранслюватися через сусідні клієнтські вузли, оминаючи фізичні перешкоди, завади.

4. Coordinator Node (Вузол-координатор): приймальною стороною виступає головний радіовузол мережі. Його функція полягає в агрегації потоків даних від усіх клієнтських вузлів (усіх контейнерів на палубі) та підтримці цілісності бездротової інфраструктури та мережі.

5. Головний комп'ютер: координатор по дротовому послідовному інтерфейсу передає зібраний і впорядкований масив даних на сервер або головний комп'ютер судна.

6. Інтерфейс оператора: на комп'ютері спеціалізоване програмне забезпечення здійснює остаточну дешифровку пакетів, аналіз на наявність критичних помилок та графічну візуалізацію телеметрії для обслуговуючого персоналу.

Отже, запропонована архітектура та структурна схема підсистеми моніторингу рефрижераторних контейнерів повністю відповідають вимогам. Пряма інтеграція через діагностичний інтерфейс RJ-45 дозволяє нам отримати вичерпну телеметрію без втручання в конструкцію установки, а використання бездротової Mesh-мережі з поетапним буферизуванням даних гарантує стабільний зв’язок у динамічному середовищі. Розроблений поділ на клієнтські та координаційні вузли забезпечує нашій системі ефективний розподіл обчислювальних ресурсів, створюючи гнучку систему, здатну безперервно функціонувати навіть за наявності інтенсивних радіозавад.

2.2 Вибір компонентів автоматизованої підсистеми дистаційного моніторигну параметрів рефрижераторного контейнера

Для побудови надійного комунікаційного вузла (клієнтського шлюзу), який відповідатиме за зчитування даних з пам'яті рефрижератора та їхню ретрансляцію, необхідно обрати систему на кристалі (SoC). Впродовж пошуку було проаналізовано технічні специфікації багатьох систем, та обрано три, які найбільше відповідають заданим вимогам.

Мікроконтролер ESP32-S3[11] має базу на високопродуктивному двоядерному мікропроцесорі архітектури Xtensa 32-bit LX7. Ця система на кристалі інтегрує бездротові інтерфейси 2,4 ГГц Wi-Fi (стандарти IEEE 802.11b/g/n) та Bluetooth 5 (Low Energy). Зовнішній вигляд контролера зображено на рисунку 2.2, аркуш 26.



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд мікроконтролера ESP32-S3

Переваги: висока обчислювальна потужність, за рахунок двох ядер, дозволяє швидко обробляти мережеві протоколи. Архітектура передбачає можливість використання додаткової пам'яті (опціональні модулі Flash та PSRAM об'ємом 1,8 В або 3,3 В у корпусі чіпа), що в свою чергу теоретично вирішує проблему буферизації будь-яких обсягів телеметрії.

Недоліки: чіп має надлишкову для нашого завдання потужність і, як наслідок, вище енергоспоживання. Крім того, у специфікації відсутня апаратна підтримка стандарту IEEE 802.15.4 (Zigbee/Thread), що робить його менш придатним для розгортання енергоефективних комірчастих мереж.

Модель CC2652R[12] побудована на базі 32-бітного процесора Arm Cortex-M4F із тактовою частотою 48 МГц. Чіп оптимізовано для роботи з бездротовими протоколами: контролер Bluetooth 5.2 та MAC-рівень IEEE 802.15.4 інтегровані безпосередньо у ROM-пам'ять пристрою для економії місця. Зовнішній вигляд цієї моделі зображено на рисунку 2.3, аркуш 27.

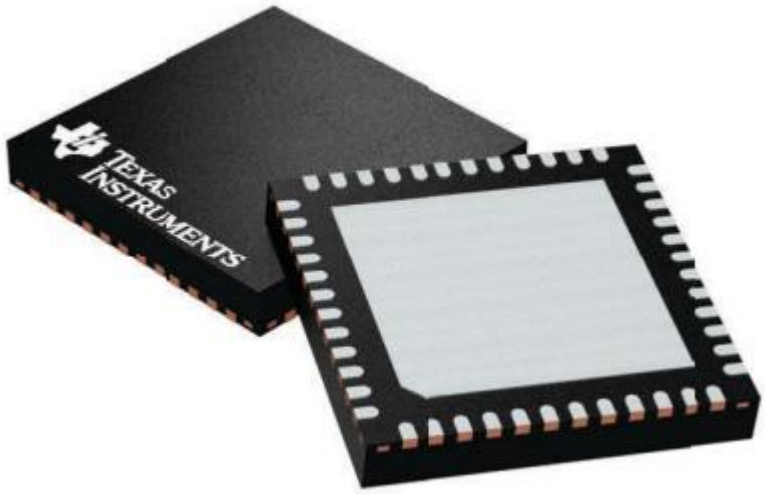


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд моделі CC2652R

Переваги: мікроконтролер має унікальну архітектуру зі співпроцесором датчиків (ultra-low power sensor controller), який має власні 4 КБ пам'яті SRAM. Це дозволяє виконувати певні операції незалежно від центрального процесора.

Недоліки: загальний обсяг оперативної пам'яті (ultra-low leakage SRAM) становить лише 80 КБ. Враховуючи необхідність взаємодії з Ethernet-контролером по шині SPI та фрагментації дампів пам'яті рефрижераторного контейнера, 80 КБ може бути недостатньо для стабільної буферизації пакетів без ризику переповнення пам'яті.

Система nRF52840[13] працює на базі процесора Arm Cortex-M4 з модулем обчислень з плаваючою комою (FPU) та тактовою частотою 64 МГц. Радіотракт підтримує стандарти Bluetooth 5, власні пропрієтарні протоколи 2,4 ГГц та необхідний нам IEEE 802.15.4-2006. Зовнішній вигляд системи зображено на рисунку 2.4, аркуш 28.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд модуля nRF52840

Головною перевагою для морських умов є наявність вбудованого 128-бітного криптографічного співпроцесора (AES/ECB/CCM/AAR), який дозволяє забезпечити апаратне шифрування пакетів даних без навантаження на основне ядро. Мікроконтролер має вкрай низьке енергоспоживання: піковий струм становить лише 4,8 мА у режимі передачі та 4,6 мА у режимі прийому.

Недоліки: вимагає ретельного налаштування програмного стека для одночасної роботи кількох бездротових протоколів. Для наочного зіставлення апаратних характеристик результати аналізу зведено у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз технічних характеристик мікроконтролерів

Параметр / Модель	ESP32-S3	CC2652R	nRF52840
Архітектура ядра	Xtensa 32-bit LX7 (Dual-core)	Arm Cortex-M4F, 48 МГц	Arm Cortex-M4 (FPU), 64 МГц
Апаратні протоколи	Wi-Fi (802.11b/g/n), Bluetooth 5 LE	Bluetooth 5.2, IEEE 802.15.4 (у ROM)	Bluetooth 5, IEEE 802.15.4
Апаратне шифрування	Інтегровано	Інтегровано	128-bit AES/ECB/CCM/AAR "on-the-fly"
Пам'ять (SRAM)	512 КБ вбудовано (+ PSRAM)	80 КБ	256 КБ

2.2.1 Вибір контролерів дротового інтерфейсу

Для того щоб забезпечити надійне підключення клієнтського вузла до діагностичного порту рефрижератора (RJ-45) та зняття обчислювального навантаження з основного мікроконтролера nRF52840 [13], необхідно застосувати апаратний Ethernet-контролер. Ця мікросхема повинна самостійно обробляти мережеві протоколи, щоб передавати на центральний процесор вже «чисті» дані без необхідності програмної реалізації TCP/IP стеку. Для порівняльного аналізу було відібрано три мікросхеми з вбудованим апаратним стеком TCP/IP.

Мікросхема WIZnet W5500[14] є Ethernet-контролером із повністю апаратним стеком TCP/IP (Hardwired TCP/IP), що включає інтегровані MAC та PHY рівні (10/100 Ethernet). Контролер на апаратному рівні підтримує протоколи TCP, UDP, ICMP, IPv4, ARP, IGMP та PPPoE. Зовнішній вигляд мікросхеми зображено на рисунку 2.5.

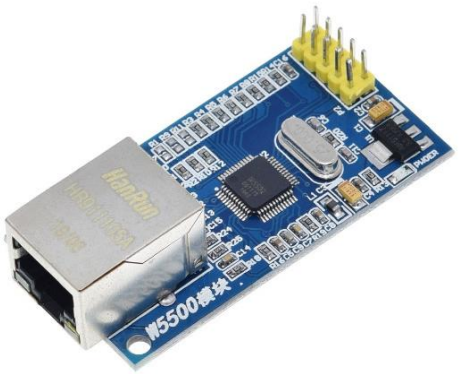


Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд мікросхеми WIZnet W5500

Переваги: використання апаратного стека дозволяє реалізувати мережевий обмін без залучення ресурсів основного мікроконтролера, що є критично важливим для нашої системи. Має 32 КБ внутрішньої пам'яті (SRAM), яка використовується

виключно для буферизації пакетів RX/TX. Інтерфейс підключення до головного SoC здійснюється по шині SPI, яка підтримує швидкість до 80 МГц.

Недоліки: чіп має апаратну підтримку виключно стандарту адресації IPv4, але це й не важливо.

Модель WIZnet W6100[15] є еволюційним розвитком попередньої лінійки і позиціонується як Ethernet-контролер з підтримкою подвійного стека протоколів (Dual TCP/IP Stack Controller). Чіп підтримує як класичний IPv4, так і сучасний IPv6 на апаратному рівні (включаючи ICMPv6). Зовнішній вигляд модуля зображено на рисунку 2.6.

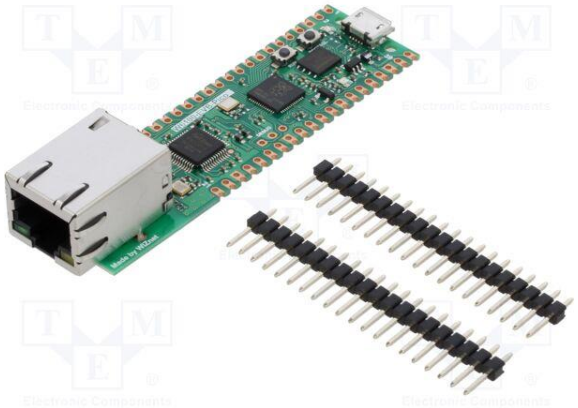


Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд модуля WIZnet W6100

Переваги: як і попередник, W6100 містить 32 КБ пам'яті та підтримує 8 незалежних апаратних сокетів. Окрім шини SPI, цей контролер додатково підтримує паралельну системну шину (parallel system BUS), що може бути корисним при використанні специфічних промислових процесорів.

Недоліки: зайва архітектурна складність через підтримку IPv6. Оскільки локальні мережі суднових рефрижераторних установок (наприклад, Carrier) працюють виключно у закритому сегменті IPv4, функціонал IPv6 у межах нашого проєкту є надлишковим.

WCH CH395[16] позиціонується як мікросхема управління стеком протоколів Ethernet (Ethernet Protocol Stack Chip) з повною сумісністю зі стандартом IEEE802.3. Контролер має вбудовану прошивку для обробки IP, ARP, ICMP, UDP. Зовнішній вигляд компоненту зображено на рисунку 2.7.

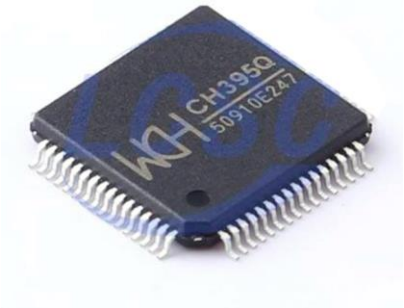


Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд компоненту WCH CH395(Q)

Головною відмінністю CH395 є його комунікаційна гнучкість. Мікросхема підтримує одразу три типи інтерфейсів для зв'язку з головним контролером: 8-бітний паралельний порт, інтерфейс SPI та асинхронний послідовний порт UART. Наявність UART значно спрощує розведення друкованої плати.

Недоліки: підтримка нового протоколу IPv6 доступна лише у специфічній модифікації чіпа. Крім того, послідовний порт UART має нижчу пропускну здатність порівняно з високошвидкісним SPI (80 МГц) у W5500, що може стати "вузьким місцем" при зчитуванні об'ємних журналів подій. Для наочного зіставлення апаратних характеристик результати аналізу зведено у таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняльний аналіз Ethernet-контролерів з апаратним стеком TCP/IP

Параметр / Модель	WIZnet W5500	WIZnet W6100	WCH CH395
Підтримка IP протоколів	TCP, UDP, IPv4	TCP, UDP, IPv4, IPv6	TCP, UDP, IPv4 (IPv6 у CH395X)
Інтерфейси зв'язку з SoC	SPI (до 80 МГц)	SPI, Паралельна шина	8-bit паралельний, SPI, UART

Продовження таблиці 2.2

Параметр / Модель	WIZnet W5500	WIZnet W6100	WCH CH395
Кількість апаратних сокетів	8	8	Залежить від режиму роботи
Внутрішня пам'ять буфера	32 КБ	32 КБ	Інтегрований буфер

Для реалізації головного вузла-координатора мережі прийнято рішення використовувати той самий мікроконтролер, що і для клієнтських вузлів – nRF52840. Такий підхід є технічно доцільним та базується на декількох ключових інженерних аспектіх.

По-перше, використання ідентичної апаратної бази для всієї Mesh-мережі дозволяє нам забезпечити повну програмну сумісність і стабільність стека протоколів. Оскільки клієнтські вузли та координатор функціонують у межах єдиної бездротової інфраструктури, застосування однакових чіпів мінімізує ризики виникнення помилок при інкапсуляції та дешифруванні пакетів даних. Це спрощує для нас процес розробки та налагодження програмного забезпечення, тому що дозволяє використовувати уніфіковані бібліотеки для керування радіотрактом.

По-друге, обчислювальні можливості nRF52840 цілком покривають потреби головного вузла. Обсяг оперативної пам'яті (256 КБ RAM) та флеш-пам'яті (1 МБ). За допомогою такої кількості пам'яті нам вдасться уникнути затримок при агрегації асинхронних потоків даних від великої кількості об'єктів моніторингу одночасно.

По-третє, уніфікація компонентів є економічно вигідною та практичною для експлуатації в морських умовах. Нам вдасться спростити логістику запасних частин та технічне обслуговування системи на судні. Крім того, наявність апаратного співпроцесора CryptoCell-310 у кожному вузлі дозволяє реалізувати наскрізне шифрування даних на рівні всієї мережі без втрати швидкодії.

Головний вузол-координатор повинен передавати зібрані з радіомережі пакети даних на головний сервер або комп'ютер оператора. Оскільки

мікроконтролер оперує послідовним інтерфейсом UART, для підключення до ПК необхідно використовувати контролер-міст USB-to-UART. З цією метою проаналізовано технічну специфікацію контролера Silicon Labs CP2102N.

Мікросхема Silicon Labs CP2102N[17] входить до сімейства USBXpress і є контролером інтерфейсу, що підтримує специфікацію USB 2.0 full-speed. Чіп має повністю інтегрований USB трансивер та вбудований тактовий генератор (oscillator), тому він не вимагає встановлення зовнішніх резисторів чи кварцового резонатора. Це дозволяє нам значно спростити принципову електричну схему головного вузла, зменшити габарити друкованої плати та підвищити стійкість пристрою до механічних вібрацій на судні. Зовнішній вигляд компоненту зображено на рисунку 2.8.

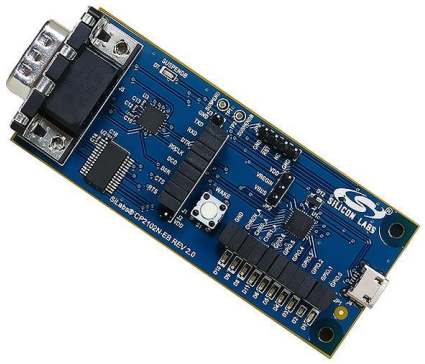


Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд мікросхеми Silicon Labs CP2102N.

Швидкість передачі даних (Baud rate) через міст CP2102N може сягати 3 Мбод (3 Mbaud). За допомогою цього нам вдасться гарантовано та без затримок передавати великі масиви буферизованої інформації (дампи пам'яті РК) на головний комп'ютер навіть при максимальному навантаженні на Mesh-мережу. Мікросхема є надзвичайно енергоефективною: її робочий струм споживання становить лише 9,5 мА.

2.3 Структура апаратно-програмного модуля. Алгоритм роботи підсистеми

За результатами порівняльного аналізу, проведеного у підрозділі 2.2, для побудови апаратної частини підсистеми обрано такі компоненти: систему на кристалі nRF52840 у ролі обчислювального ядра як клієнтських вузлів, так і вузла-координатора, Ethernet-контролер WIZnet W5500 для дротового підключення до реєстратора даних холодильної установки та міст USB-to-UART Silicon Labs CP2102N для зв'язку координатора з головним комп'ютером судна. Схему підключення обраних компонентів і зв'язки між ними наведено на рисунку 2.9.

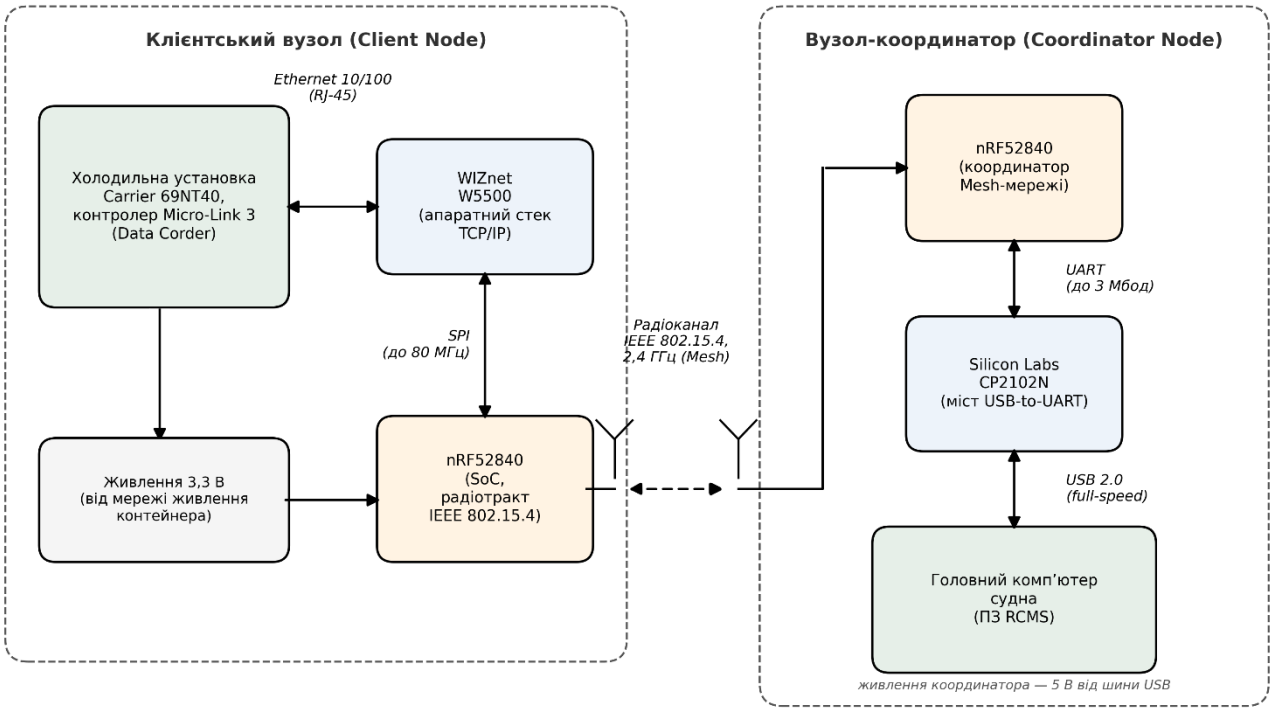


Рисунок 2.9 – Схема підключення компонентів підсистеми дистанційного моніторингу

Розглянемо зв'язки клієнтського вузла. Початковою ланкою є контролер Micro-Link 3 холодильної установки Carrier 69NT40, який через свій діагностичний порт надає доступ до вмісту реєстратора даних (Data Corder). Фізичне підключення

виконується стандартним кабелем «вита пара» з роз’ємом RJ-45, який з’єднує діагностичний порт установки з Ethernet-контролером W5500. Контролер W5500 містить інтегровані рівні MAC та PHY стандарту 10/100 Ethernet і самостійно, на апаратному рівні, обробляє протоколи TCP/IP. Завдяки цьому головний мікроконтролер вузла звільняється від програмної реалізації мережевого стека та отримує вже чисті масиви даних, що особливо важливо під час зчитування об’ємних журналів подій з пам’яті рефрижератора.

Зв’язок між W5500 та системою на кристалі nRF52840 організовано по шині SPI (сигнали SCK, MOSI, MISO, CS), яка підтримує тактову частоту до 80 МГц. Додатково задіяно лінію апаратного переривання INT, за допомогою якої Ethernet-контролер сповіщає мікроконтролер про надходження нових даних без постійного програмного опитування, та лінію RST для апаратного скидання. Оскільки обидві мікросхеми мають однакову напругу живлення 3,3 В, узгодження логічних рівнів між ними не потрібне: вони живляться від спільної шини 3,3 В, сформованої перетворювачем напруги, підключеним до мережі живлення рефрижераторного контейнера. Такий спосіб живлення позбавляє клієнтський вузол потреби в акумуляторах та їхньому обслуговуванні, адже вузол працює рівно тоді, коли працює сама установка, що і є об’єктом моніторингу.

Бездротовий сегмент клієнтського вузла утворює інтегрований радіотракт nRF52840, що працює за стандартом IEEE 802.15.4 у діапазоні 2,4 ГГц та підтримує комірчасту (Mesh) топологію. Перед передачею кожен пакет шифрується апаратним співпроцесором CryptoCell-310, тому захист даних не створює навантаження на основне ядро. Зовнішніх компонентів радіоканал не потребує, за винятком антени, узгодженої з виходом мікросхеми.

Вузол-координатор побудовано на тій самій системі на кристалі nRF52840, радіотракт якої приймає пакети від усіх клієнтських вузлів мережі. Зв’язок координатора з мостом CP2102N виконано по асинхронному послідовному

інтерфейсу UART: лінія TXD мікроконтролера з’єднується з входом RXD моста і навпаки, додатково задіяно сигнали RTS/CTS для апаратного керування потоком, що унеможливлює втрату байтів під час передачі великих масивів буферизованої телеметрії на швидкостях до 3 Мбод. Міст CP2102N підключається до головного комп’ютера судна кабелем USB і завдяки повністю інтегрованому трансиверу та вбудованому тактовому генератору не потребує зовнішнього кварцового резонатора, що зменшує кількість елементів на платі та підвищує стійкість вузла до суднових вібрацій. Живлення координатора здійснюється напругою 5 В безпосередньо від шини USB через лінійний стабілізатор на 3,3 В, тож окремого блока живлення цей вузол не потребує.

На основі описаної схеми підключення та функцій кожного компонента складено блок-схему алгоритму роботи системи, наведену на рисунку 2.10.

Робота системи розпочинається з ініціалізації: після подання живлення nRF52840 налаштовує периферійні інтерфейси SPI та UART і запускає радіотракт IEEE 802.15.4. Далі клієнтський вузол через контролер W5500 встановлює TCP-з’єднання з реєстратором даних установки. Якщо з’єднання встановити не вдалося (наприклад, кабель від’єднано або установка знеструмлена), вузол повторює спробу після витримки часу, не переходячи до наступних етапів.

Після успішного встановлення з’єднання виконується основний робочий цикл. Спочатку вузол зчитує масив телеметрії з пам’яті Data Corder та буферизує його у власній оперативній пам’яті: обсягу SRAM 256 КБ достатньо для накопичення даних навіть за тривалої відсутності радіозв’язку. Із зчитаних даних формується пакет: корисне навантаження шифрується співпроцесором CryptoCell-310 та доповнюється контрольною сумою для виявлення помилок передачі. Перед відправленням перевіряється доступність Mesh-мережі. Якщо радіоканал тимчасово недоступний, скажімо, через завади від роботи суднових радарів або перевантажувальних кранів, сформовані пакети накопичуються в буфері та

передаються після відновлення каналу, тому дані не втрачаються. За доступної мережі пакет передається радіоканалом 2,4 ГГц до вузла-координатора, за потреби ретранслюючись через сусідні клієнтські вузли.

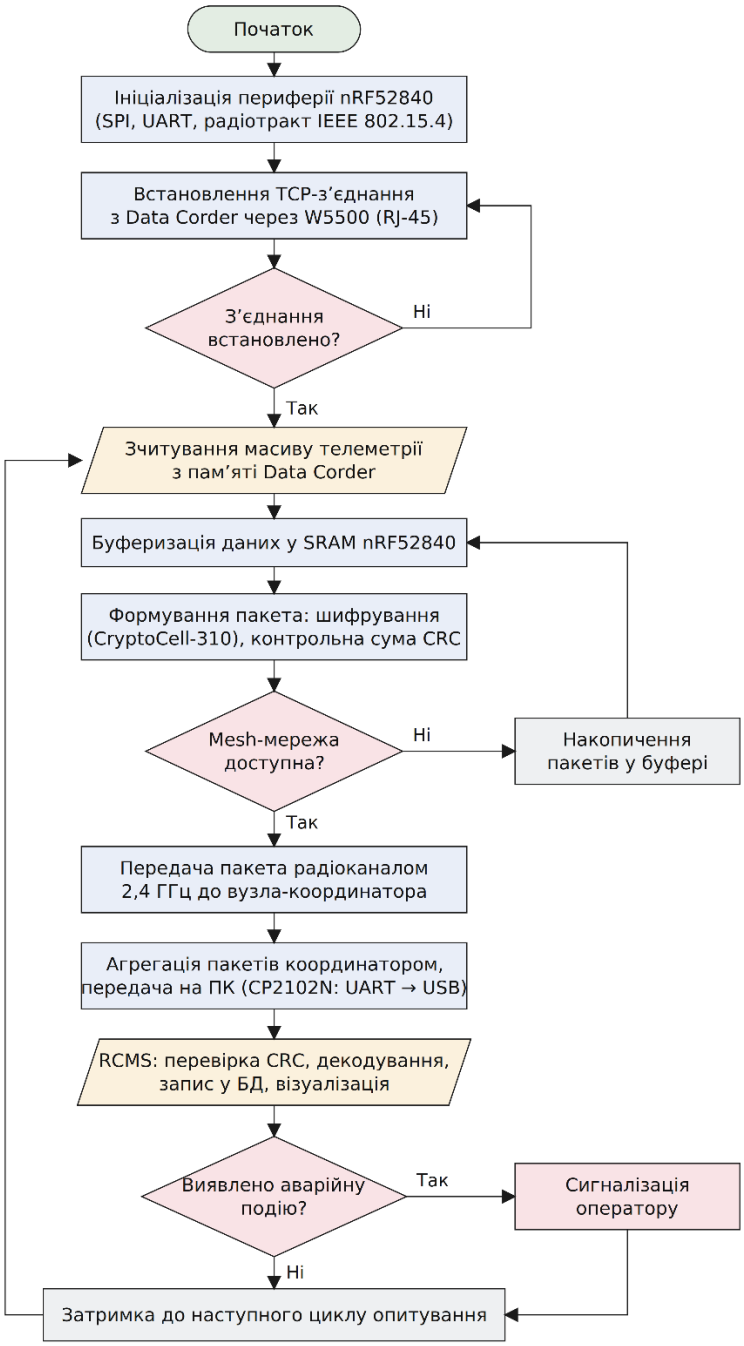


Рисунок 2.10 – Блок-схема алгоритму роботи підсистеми дистанційного моніторингу

Координатор агрегує потоки від усіх контейнерів на палубі та через міст CP2102N (перетворення UART у USB) передає впорядкований потік на головний комп’ютер судна. Програмний засіб RCMS перевіряє контрольну суму кожного кадру, декодує його, записує показання до бази даних та відображає стан флоту оператору. Якщо серед прийнятих даних виявлено аварійну подію (код тривоги контролера, вихід температури за допуск, проблему живлення), система негайно сигналізує про це оператору. Після завершення обробки витримується пауза до наступного циклу опитування, і послідовність повторюється, забезпечуючи безперервний моніторинг у цілодобовому режимі.

Отже, схема підключення обраних компонентів утворює замкнений тракт проходження інформації: від пам’яті реєстратора даних холодильної установки через дротовий інтерфейс Ethernet і шину SPI до радіоканалу Mesh-мережі та далі через послідовний інтерфейс UART і шину USB до програмного засобу на комп’ютері оператора. Кожен зв’язок реалізовано стандартними промисловими інтерфейсами без узгоджувальних схем, а розроблений алгоритм роботи передбачає буферизацію даних на проміжних етапах, що робить систему стійкою до розривів зв’язку в умовах судна.

2.4 Комп'ютерне моделювання системи автоматичного управління температурою рефрижераторного контейнера

Розроблювана підсистема спостерігає за роботою штатних контурів автоматичного регулювання температури рефрижераторних контейнерів, тому налаштування її сигналізації (допуски In Range, часові уставки реєстрації подій) мають узгоджуватися з динамікою цих контурів. Постановка задачі дослідження: скласти математичну модель контуру автоматичного регулювання температури, дослідити стійкість замкненої системи за алгебраїчним критерієм Гурвіца,

побудувати область стійкості за параметром інтегральної складової регулятора та оцінити якість перехідного процесу [21].

Об'єкт управління за каналом «керуючий вплив холодильної установки → температура повітря у вантажному об'ємі» подано послідовним з'єднанням двох аперіодичних ланок першого порядку: холодильної установки з випарником, що має малу сталу часу, та вантажного об'єму контейнера з великою тепловою інерцією:

$$Wоб(s) = K0 / ((T0\,s + 1)(T1\,s + 1)), \quad (2.1)$$

де K0 = 2 °C/в.о. – коефіцієнт передачі об'єкта;

T0 = 1200 с – стала часу вантажного об'єму;

T1 = 60 с – стала часу повітряного тракту установки.

Значення відповідають типовій тепловій інерції сорокафутового рефрижераторного контейнера; для конкретного вантажу вони уточнюються експериментально. Регулятор прийнято пропорційно-інтегральним (ПІ), що відповідає практиці суднових систем регулювання температури:

$$Wр(s) = Kp + Ki / s. \quad (2.2)$$

Структурну схему контуру регулювання наведено на рисунку 2.2.

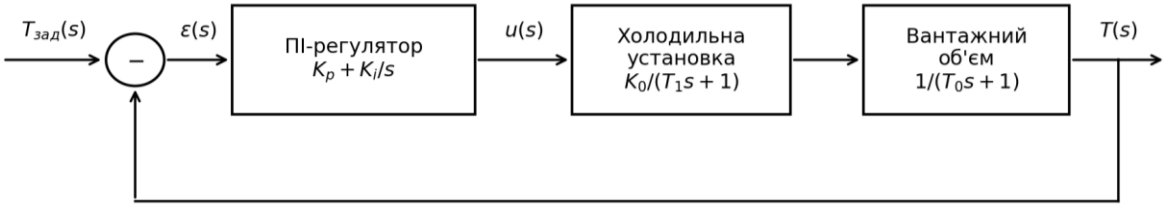


Рисунок 2.11 – Структурна схема контуру автоматичного регулювання температури рефрижераторного контейнера

Характеристичне рівняння замкненої системи має третій порядок:

$$T0\,T1\,s^3 + (T0 + T1)\,s^2 + (1 + K0\,Kp)\,s + K0\,Ki = 0. \qquad (2.3)$$

За критерієм Гурвіца система третього порядку стійка, якщо всі коефіцієнти характеристичного рівняння додатні та добуток середніх коефіцієнтів перевищує добуток крайніх. Перша умова виконується за будь-яких додатних налаштувань регулятора, а друга дає межу стійкості за інтегральною складовою:

$$Ki < (T0 + T1)(1 + K0\,Kp) / (T0\,T1\,K0). \qquad (2.4)$$

За виразом (2.4) побудовано область стійкості системи в площині параметрів регулятора (рисунок 2.12): для кожного значення Kp існує критичне значення Ki, перевищення якого призводить до втрати стійкості. Для прийнятого Kp = 3 критичне значення становить Ki кр = 0,0612 с$^{-1}$. Робочі параметри регулятора обрано з приблизно десятикратним запасом за інтегральною складовою: Kp = 3; Ki = 0,006 с$^{-1}$.

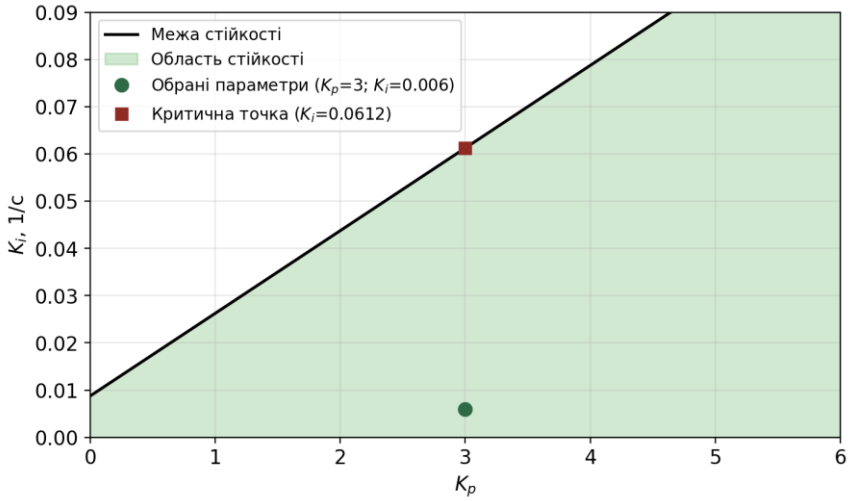


Рисунок 2.12 – Область стійкості контуру регулювання в площині параметрів ПІ-регулятора

Комп'ютерне моделювання перехідних характеристик замкненої системи виконано мовою Python з використанням бібліотеки наукових обчислень SciPy (середовище моделювання погоджено з керівником роботи). Результати наведено на рисунку 2.13: за обраних параметрів перехідний процес монотонно згасає з перерегулюванням σ = 13,6 % і часом регулювання (за 5-відсотковою зоною) tp ≈ 1116 с ≈ 18,6 хв; стала похибка дорівнює нулю завдяки інтегральній складовій регулятора. Для перевірки розрахунку за Гурвіцем додатково змодельовано систему на межі стійкості (Ki = Ki кр): у ній виникають незгасні коливання, що підтверджує коректність визначеної межі.

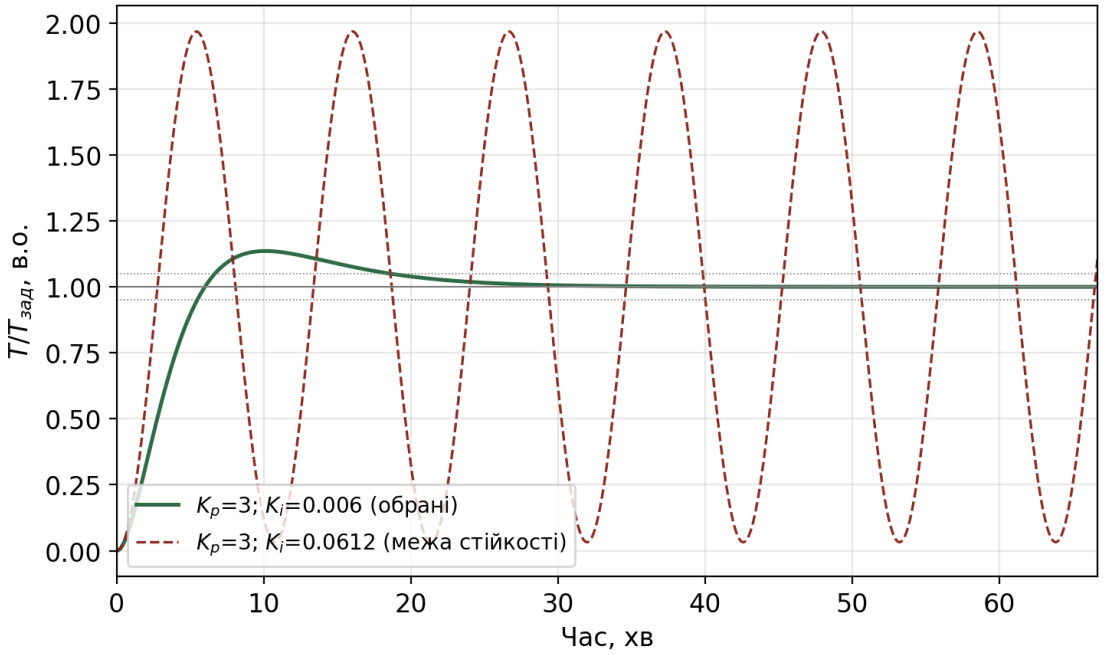


Рисунок 2.13 – Перехідні характеристики замкненої системи за обраних параметрів регулятора та на межі стійкості

Отже, контур автоматичного регулювання температури рефрижераторного контейнера є стійким із суттєвим запасом, а тривалість його перехідних процесів становить десятки хвилин, що зумовлено великою тепловою інерцією вантажу. Отримані показники якості використано під час налаштування підсистеми

моніторингу: допуск індикації In Range прийнято ±1,5 °C від уставки, а період реєстрації показань до архіву (одна хвилина) є достатнім для відтворення перехідних процесів такої тривалості без втрати інформації.

Для практичної реалізації розробленої структурної схеми необхідно здійснити обґрунтований вибір електронної компонентної бази [13]. Враховуючи специфіку об'єкта управління, апаратні модулі повинні забезпечувати безперебійне зчитування даних по кабелю RJ-45, гарантувати стійку роботу радіотракту в умовах сильних електромагнітних завад від суднового обладнання та підтримувати децентралізовані протоколи Mesh-маршрутизації. На основі цих жорстких критеріїв проведемо детальний аналіз сучасних мікроелектронних рішень та обґрунтуємо вибір ключових компонентів для побудови нашого комунікаційного шлюзу.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ ПІДСИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ У ВИГЛЯДІ ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ

Завершальним елементом схеми є інтерфейс оператора – програмний засіб, що приймає потік телеметрії від вузла-координатора через міст USB-to-UART, декодує його, накопичує в базі даних та подає оператору в зрозумілому вигляді. У цьому розділі описано розробку такого програмного засобу, який відповідає вимогам, зазначених в попередніх розділах, та отримав назву RCMS (Refrigerated Container Monitoring System).

3.1 Вибір середовища програмування

Мовою реалізації обрано C++. Це компільована мова з детермінованим керуванням пам'яттю, вона забезпечує стабільну роботу програми у цілодобовому режимі без пауз збирача сміття, прямий доступ до системних інтерфейсів (зокрема послідовних портів) та низьке споживання ресурсів, на мою думку це суттєва перевага для суднового комп'ютера, який виконує й інші задачі.

Як каркас графічного інтерфейсу обрано бібліотеку Qt 6. Перед вибором рішення було розглянуто альтернативи. Розробка на чистому WinAPI/MFC потребує значно більшого обсягу коду та прив'язує програму виключно до Windows. Платформа .NET (C#, WPF/WinForms) залежить від середовища виконання .NET і має обмежену переносимість на Linux, що звужує вибір суднового обладнання. Рішення на базі Electron (JavaScript) споживають сотні мегабайтів оперативної пам'яті та несуть із собою повноцінний браузер заради простого інтерфейсу. Бібліотека wxWidgets переносима, проте не має у стандартному складі модулів для роботи з послідовним портом та побудови графіків, тому їх довелося б інтегрувати з окремих сторонніх проєктів.

Вибір на користь Qt 6 зумовлений тим, що всі необхідні підсистеми входять до самого фреймворку і мають єдиний стиль програмування: Qt SerialPort – робота з COM-портами, Qt Charts – побудова графіків температур, Qt SQL із вбудованим драйвером SQLite – база даних без окремого сервера, механізм «сигналів і слотів» – асинхронна обробка подій без ручного керування потоками, а таблиці стилів QSS – реалізація фірмового оформлення без малювання елементів вручну. Крім того, Qt є кросплатформовим, розповсюджується за ліцензією LGPL, що дозволяє безкоштовне використання (в рамках проекту), та має докладну документацію і велику спільноту. Система збирання проєкту – CMake.

3.2 Протокол обміну даними

Оскільки канал між вузлом-координатором і комп'ютером є потоком байтів без вбудованого поділу на повідомлення, було розроблено власний кадровий протокол. Кожен кадр починається з синхромаркера 0xAA 0x55, містить довжину корисного навантаження, саме навантаження та контрольну суму CRC-16-CCITT (поліном 0x1021). Приймач, що виявив пошкодження кадру, відкидає його та повторно синхронізується за наступним маркером, тому одиничні завади в лінії не порушують роботу системи. Структуру корисного навантаження кадру телеметрії наведено в таблиці 3.1. Структуру кадру телеметрії протоколу RCMS зображено на рисунку 3.1.

Таблиця 3.1 – Структура кадру телеметрії протоколу RCMS

Зміщення	Розмір, байт	Поле	Призначення
0	1	TYPE	Тип пакета (0x01 – телеметрія)
1	11	SERIAL	Серійний номер контейнера, ASCII

Продовження таблиці 3.1

Зміщення	Розмір, байт	Поле	Призначення
12	1	FLAGS	Біти стану: живлення, аварія, відтавання, режим COOL/HEAT, IN RANGE
13	2	SUPPLY	Температура припливного повітря, крок 0,1 °C
15	2	RETURN	Температура зворотного повітря, крок 0,1 °C
17	2	SETPOINT	Задана температура (уставка), крок 0,1 °C
19	2	VOLTAGE	Напруга живлення, крок 0,1 В
21	2	CURRENT	Струм споживання, крок 0,1 А
23	1	ALARM	Код аварії контролера (0 – відсутня)



Рисунок 3.1 – Структура кадру телеметрії протоколу RCMS

Один кадр займає 30 байтів, тому навіть флот із 500 контейнерів, кожен з яких звітує раз на 5 секунд, створює потік близько 24 кбіт/с – значно менше пропускної здатності лінії 115200 бод. Байт TYPE резервує можливість додавання нових типів пакетів (діагностика мережі, вивантаження журналу реєстратора) без порушення сумісності.

3.3 Архітектура програми та етапи розробки

Програму побудовано за модульним принципом: кожен модуль вирішує одну задачу та взаємодіє з іншими через сигнали Qt. Модуль Protocol реалізує кодування

і потоковий розбір кадрів із перевіркою CRC; SerialLink обгортає роботу з COM-портом; ContainerRegistry веде оперативний стан флоту в пам'яті та класифікує статус кожного контейнера (норма, аварія, проблема живлення, відсутність зв'язку понад 30 с); Database відповідає за архів SQLite; модулі CargoTab, ParametersTab і DataTab реалізують три вкладки інтерфейсу; Simulator генерує тестовий потік даних; MainWindow пов'язує все в єдиний конвеєр. Структуру програмного засобу зображено на рисунку 3.2.

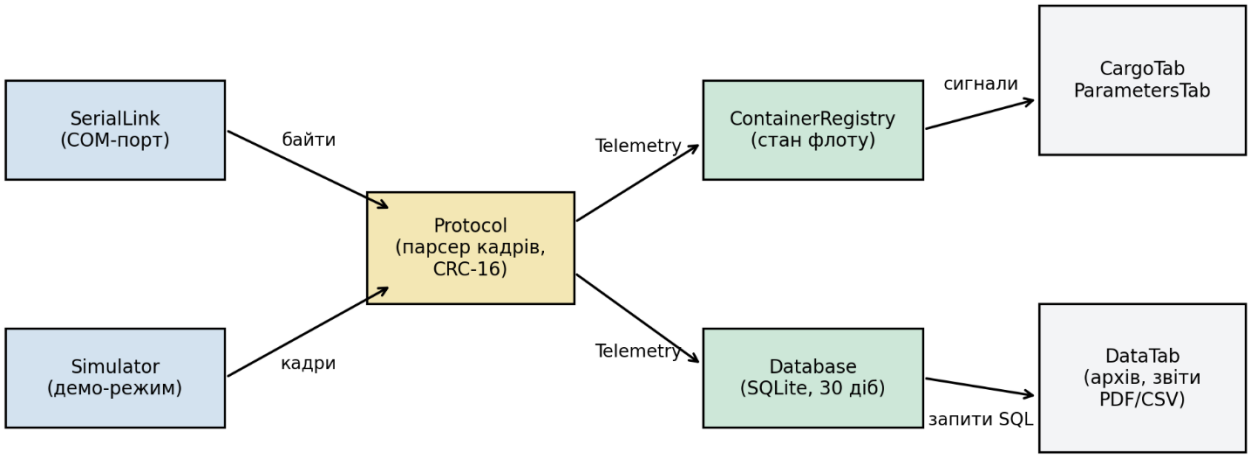


Рисунок 3.2 – Структура програмного засобу RCMS та потоки даних між модулями

Алгоритм потокового розбору кадрів зображено у вигляді блок схеми на рисунку 3.3.

Розробка велася поетапно. Спочатку було спроєктовано та реалізовано протокол обміну разом з автоматичним тестом, який кодує 200 кадрів, навмисно пошкоджує один із них, додає завади між кадрами та подає потік на розбір частинами випадкової довжини по 1–13 байтів; тест підтвердив побітово точне декодування усіх непошкоджених кадрів та відбракування пошкодженого за контрольною сумою. Далі було створено реєстр стану флоту з логікою класифікації статусів і фонового виявлення втрати зв'язку. Потім наступним етапом стала база

даних: схема з двох таблиць (періодичні показання та журнал аварійних подій), індексація за серійним номером і часом, автоматичне очищення записів, старших за 30 діб. Наприкінці додано оформлення і прогнано наскрізний тест. Сітка карток контейнерів з власним відмальовуванням (делегат Qt), таблична модель поточних параметрів, вкладка архіву з графіком на основі Qt Charts. Реалізовано симулятор флоту, який формує ті самі двійкові кадри, що й реальний координатор, завдяки чому наскрізь перевіряється весь ланцюжок: кадрування, CRC, декодування, база даних та інтерфейс.

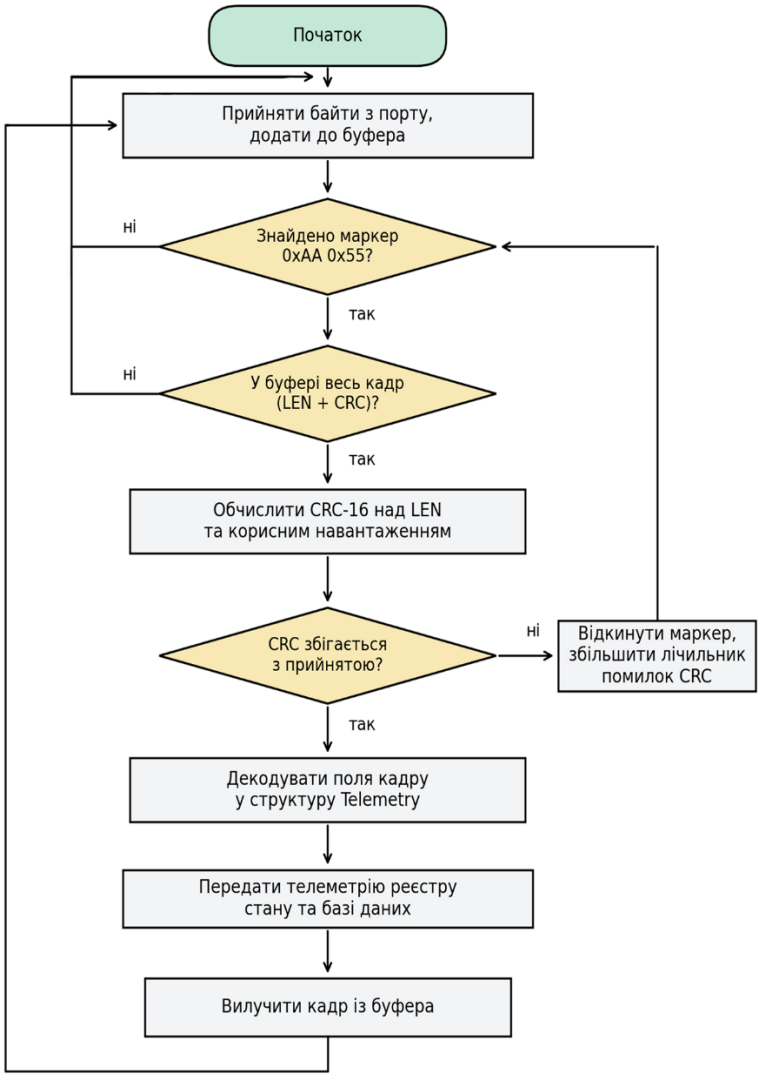


Рисунок 3.3 – Блок-схема алгоритму потокового розбору кадрів

Перша версія парсера губила кадри, коли маркер 0xAA 0x55 розрізався між двома порціями даних з порту – саме цей випадок і виявив тест із випадковим розбиттям потоку, після чого в буфері почав зберігатися останній байт.

Для запобігання переповненню архіву показання записуються не частіше одного разу на хвилину для кожного контейнера, тоді як аварійні події фіксуються негайно в момент появи та зняття. Такий підхід утримує розмір бази в розумних межах навіть для 500 контейнерів упродовж 30 діб.

3.4 Тестування працездатності програмного засобу та візуалізація даних

Так як, сучасного рефрижераторного контейнера немає, а отримати його дуже складно, стає питання працездатності програмного засобу. Для вирішення цієї задачі, проводится розроблення спеціалізованого режиму роботи програми – симуляції потоку даних (Simulation).

За основу об'єкта моніторингу взято рефрижераторну установку Carrier серії 69NT40-541 з мікропроцесорним контролером Micro-Link 3, описану в експлуатаційній документації T-363 [5]. Завдяки мануалу можна дізнатися про алгоритм роботи контейнера, параметри які надають датчики при тих або інших режимах роботи контейнера, значення помилок та їх опис, значення температури при штатній роботі, тиску тощо. Особливу увагу треба приділити базі можливих помилок ([5] – розділ 4.11 «Controller Alarm Indications») у системі та їхній спеціальний код. Наше завдання – розібратися, які помилки бувають, і які особливості впливу на параметри вони несуть. Найтиповіші аварії, їх причини та способи усунення наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Типові аварійні коди Micro-Link 3 та способи їх усунення [5]

Код	Опис	Причина	Спосіб усунення
AL07	Fresh Air Vent Open – відчинена заслінка припливу свіжого повітря	Датчик положення заслінки (VPS) показує ненульовий приплив у режимі заморожування	Вручну закрити заслінку та перевірити показання; якщо нуль не досягається – замінити несправний VPS
AL15	Loss of Cooling – втрата холодопродуктивності	Через 30 хв після перевірочного відтавання температура припливу перевищує уставку більш ніж на 0,25 °C	Перевірити рівень холодоагенту, виконати перезапуск установки живленням
AL20	Control Contactor Fuse – перегорів запобіжник кіл керування (F3)	Коротке замикання котушок контакторів (PA, PB, CH, CF, ES, EF, HR) на корпус	Знайти та замінити несправну котушку, замінити запобіжник; за наявності напруги на QC1 – несправний мікропроцесор
AL23	Loss of Phase B – втрата фази B живлення	Контролер не виявляє струм у фазі	Перевірити джерело живлення та підвідні кола, усунути обрив фази
AL54 / AL56	Відмова основного датчика температури припливу (STS) / звороту (RTS)	Недостовірні показання датчика	Виконати передрейсовий тест P5; за негативного результату замінити визначений тестом датчик
AL58	Compressor High Pressure Safety – спрацювало реле високого тиску	Реле HPS розімкнене понад одну хвилину; забруднення конденсатора, обмеження потоку повітря	Перевірити реле HPS і замінити за несправності; очистити теплообмінники від забруднень
AL59	Heater Termination Thermostat – розімкнений термостат нагрівачів	Відсутність 24 В у контрольній точці TP10 після виходу на уставку	Перевірити термостат HTT, замінити за несправності

Продовження таблиці 3.2

Код	Опис	Причина	Спосіб усунення
AL61	Heater Current Draw Fault – неправильний струм нагрівачів	Невідповідний струм у режимі нагрівання чи відтавання	Виміряти струм на контакторах нагрівачів, замінити несправні нагрівачі або контактор
AL63	Current Limit – перевищення межі струму	Робота установки зі струмом вище допустимого; обмеження повітряного потоку	Очистити теплообмінники, перевірити роботу установки та параметри живлення

Типовими режимами роботи контейнера є cooling, heating та defrost, при цьому температура всередині контейнера змінюється в залежності від setpoit – заданої температури. Приймаємо температуру -25,0, -18,0, -18,0, -18,0, 2,0, 4,0, 4,0, 13,3 – як типову для штатного перевезання обєктів які потребують охолодження, перемикання режимів роботи або підтримання клімату всередині.

Результатом є симуляція 20-ти контейнерів. В такому режимі програма імітує можливі параметри та помилки для ілюстраці працездатності програмного засобу.

Програмний засіб RCMS призначено для безперервного спостереження за станом рефрижераторних контейнерів на судні у реальному часі. Він виконує чотири основні функції: приймання та перевірку цілісності пакетів даних із послідовного порту; відображення поточного стану флоту; ведення архіву температур та аварійних подій.

Інтерфейс програми виконано англійською мовою у мінімалістичному стилі: світло-сірі поверхні, скруглені кути елементів, відсутність різких меж. Стан кожного контейнера ілюструються кольорами: зелений – нормальна робота, червоний – активна аварія, жовтий – проблеми з електроживленням(24 В), сірий – відсутність зв'язку. Головне вікно містить три вкладки: Cargo (загальний огляд флоту), Parameters (поточні параметри контейнерів у роботі), Data (архів і звіти) та

Other (підключення інших датчиків). Головне вікно програми RCMS, в кладці «груз» та вкладці «параметри» , наведено на рисунках 3.4 та 3.5 відповідно.

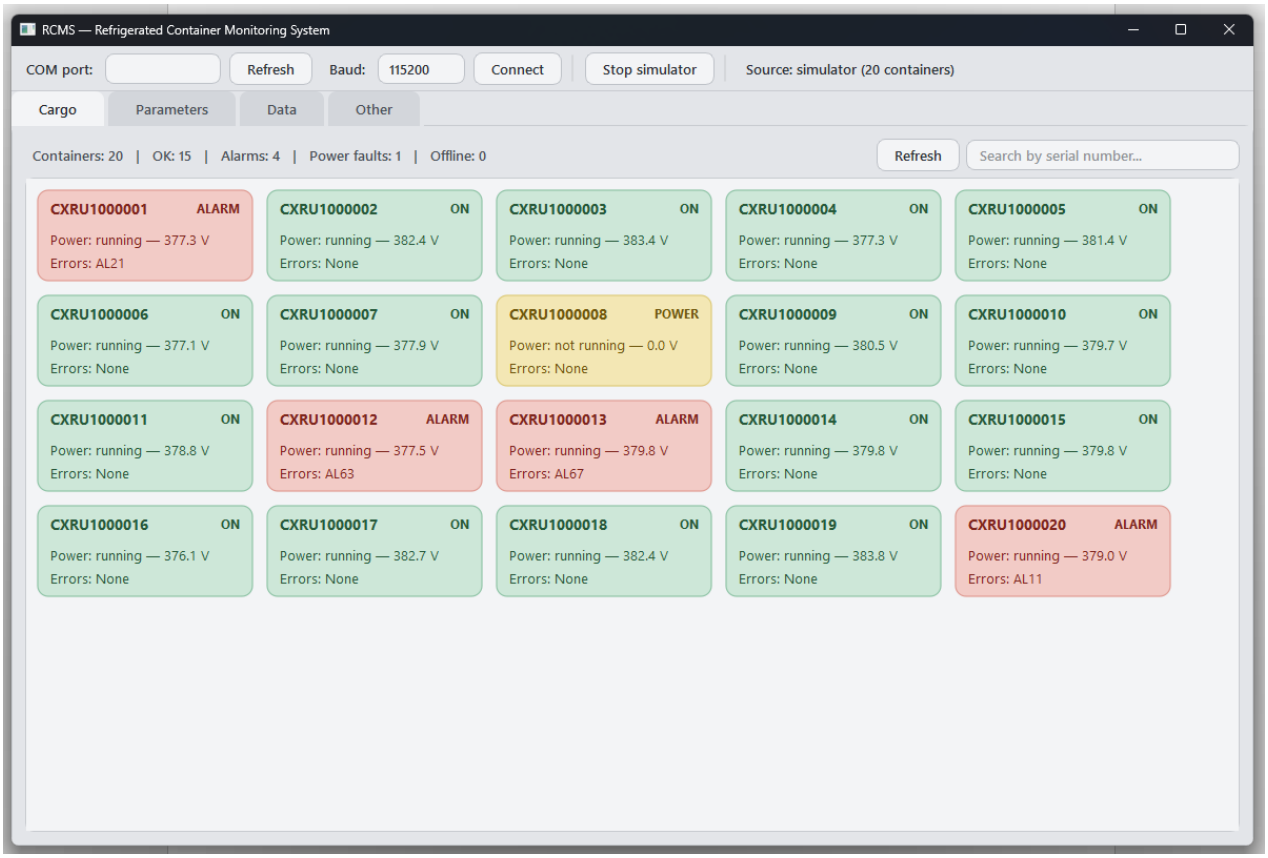


Рисунок 3.4 – Головне вікно програми RCMS, вкладка Cargo

У програмі RCMS активна аварія підсвічує картку контейнера червоним кольором, а її код і розшифрування заносяться до журналу подій із позначками RAISED (виникнення) та CLEARED (зняття). Це дає операторові змогу не лише вчасно помітити проблему, а й відновити повну хронологію інциденту за архівом.

Вкладка «Дата» – саме тут ведеться журнал подій та ілюструється графік температури для подальшого аналізу. За допомогою кнопок, зі списку можна обрати серійний номер контейнера і завантажити його журнал подій для перегляду. Зовнішній вигляд вкладки дата зображено на рисунку 3.6.

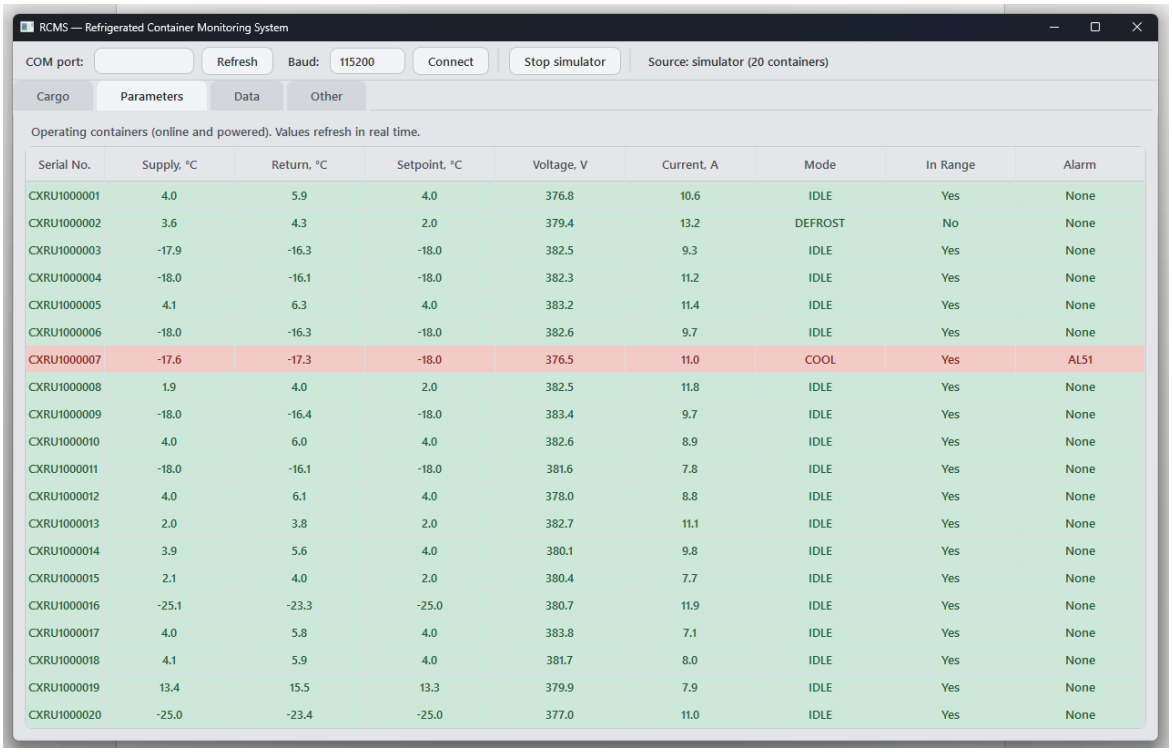


Рисунок 3.5 – Вкладка Parameters: поточні параметри контейнерів у роботі

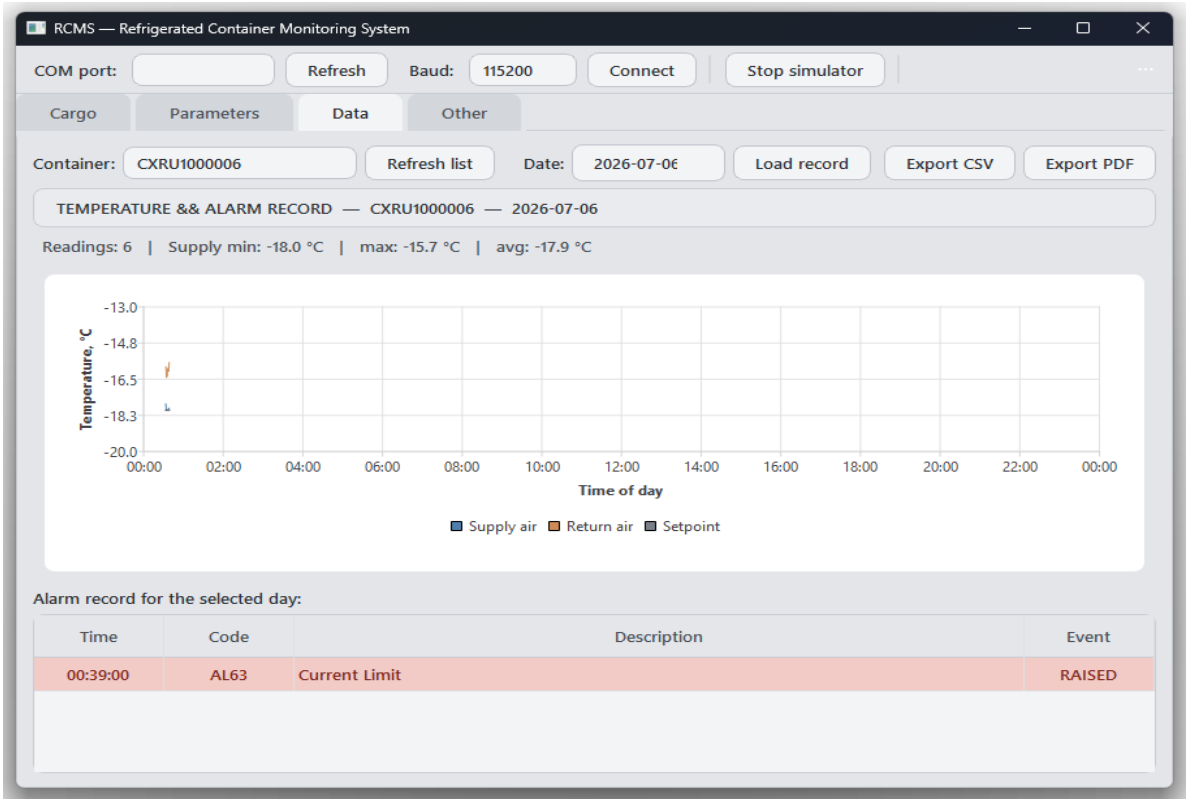
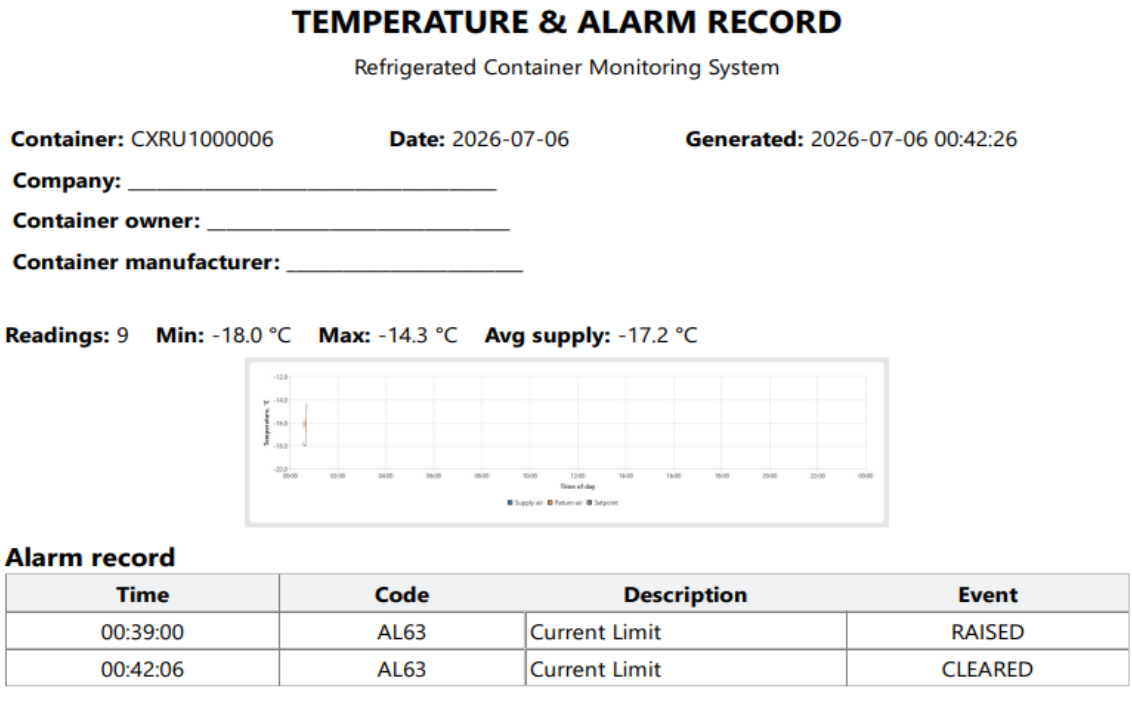


Рисунок 3.6 – Вкладка Data: добовий графік температур і журнал аварій

Результатом роботи оператора з архівом є офіційний добовий звіт. Після завантаження запису на вкладці Data стають доступними кнопки Export CSV та Export PDF. Файл CSV зберігається в кодуванні UTF-8 із позначкою BOM, завдяки чому коректно відкривається в Microsoft Excel; він містить реквізити звіту, таблицю показань (час, температури припливу і звороту, уставка, напруга, струм, код аварії, режим роботи) та журнал аварійних подій.

Звіт PDF формується у форматі A4 і має друкарський вигляд: заголовок Temperature & Alarm Record, підзаголовок Refrigerated Container Monitoring System, реквізити (контейнер, дата, час формування), порожні графи для заповнення від руки – Company, Container owner, Container manufacturer, зведення за добу, вбудований графік температур і таблицю аварійних подій з розшифруванням кодів.

Шрифт документа збільшено для комфортного читання роздрукованого примірника. Ім'я файлу формується автоматично із серійного номера контейнера та дати. Зразок такого документа зображено на рисунку 3.7.



TEMPERATURE & ALARM RECORD

Refrigerated Container Monitoring System

Container: CXRU1000006 **Date:** 2026-07-06 **Generated:** 2026-07-06 00:42:26

Company: _____

Container owner: _____

Container manufacturer: _____

Readings: 9 **Min:** -18.0 °C **Max:** -14.3 °C **Avg supply:** -17.2 °C

Alarm record

Time	Code	Description	Event
00:39:00	AL63	Current Limit	RAISED
00:42:06	AL63	Current Limit	CLEARED

Рисунок 3.7 – Добовий звіт RCMS у форматі PDF

3.5 Реалізація підсистеми дистанційного моніторингу

Первинною сферою застосування є морські контейнерні перевезення. Сучасний контейнеровоз середнього класу має від кількох сотень до кількох тисяч сокетів для рефрижераторних контейнерів, і за правилами перевезення охолоджених вантажів екіпаж зобов'язаний регулярно контролювати стан кожного з них. На накопичувальних майданчиках терміналів рефрижераторні контейнери можуть очікувати на завантаження або митне оформлення від кількох годин до кількох тижнів, увесь цей час перебуваючи під напругою. Термінал несе відповідальність за збереження вантажу, тому змушений утримувати штат тальманів, які обходять ряди контейнерів із планшетами. Розгортання радіомережі клієнтських вузлів на майданчику та встановлення RCMS дозволяє одному операторові контролювати сотні контейнерів у реальному часі, а журнал подій із позначками часу стає доказом під час розгляду претензій вантажовласників.

Найбільшим потенційним споживачем подібних систем є світові контейнерні лінії, що оперують власними парками рефрижераторних контейнерів у сотні тисяч одиниць. Розглянемо провідних гравців ринку та їхнє ставлення до дистанційного моніторингу.

A.P. Moller – Maersk (Данія) – одна з найбільших контейнерних ліній світу, Maersk першою серед ліній масово впровадила дистанційний моніторинг рефконтейнерів (програма Remote Container Management) і надає клієнтам сервіс спостереження за вантажем у рейсі. Досвід Maersk важливий для цього проєкту як підтвердження життєздатності самої концепції.

Mediterranean Shipping Company, MSC (Швейцарія/Італія) – лінія з найбільшим у світі флотом контейнеровозів та розгалуженою мережею сервісів для перевезення швидкопсувних вантажів. Для компанії такого масштабу цінність

становлять рішення, які не прив'язані до конкретного виробника холодильної установки.

CMA CGM (Франція) – третя за розміром контейнерна лінія світу, що приділяє значну увагу цифровізації перевезень: у складі групи працює власний технологічний підрозділ, а клієнтські сервіси включають моніторинг рефвантажів.

Усі перелічені компанії або вже інвестували в дистанційний моніторинг, або декларують такий намір.

Економічний ефект системи складається з трьох частин. Перша – запобігання втратам вантажу. Друга частина – скорочення ручної праці. Третя частина – доказова база у претензійній роботі.

Масштаб проблеми підтверджує галузева статистика. За оцінками страхових експертів і клубів взаємного страхування, на рефрижераторні вантажі припадає понад третина всіх претензій за вантажами, а температурні відхилення входять до найпоширеніших причин збитків у сегменті чутливих до температури товарів. При цьому більшість відмов холодового ланцюга галузеві огляди пов'язують не з технікою, а з людським фактором: неправильно введена уставка, непомічене спрацювання захисту, пропущений обхід.

Окремий економічний вимір має розширення на небезпечні вантажі. Пожежа на контейнеровозі належить до найдорожчих страхових подій морської галузі – збитки від великих інцидентів вимірюються сотнями мільйонів доларів, включно з втратою судна, вантажу інших відправників, витратами на рятувальну операцію та загальну аварію. Раннє виявлення тління чи витоку зміщує подію з категорії катастрофи в категорію локального інциденту, тому судновласник, який документально підтверджує безперервний інструментальний контроль небезпечних вантажів, отримує аргументи в перемовинах зі страховиками щодо умов покриття, зменшує ризик затримань судна інспекціями державного портового контролю та простоїв, пов'язаних з розслідуваннями.

Витратна частина проєкту складається з клієнтських вузлів (їх собівартість визначається обраними в розділі 2 масовими компонентами і є на порядок нижчою за вартість комерційних телематичних блоків), одного координатора на судно чи майданчик та звичайного комп'ютера, який зазвичай уже наявний. Програмне забезпечення побудоване на бібліотеках з відкритими ліцензіями, тож ліцензійні відрахування відсутні.

3.5.1 Напрями подальшого розвитку системи

Створена система – це прототипом, який доводить працездатність концепції на реальних даних і протоколах, але не є кінцевим виробом. У наступній версії проєкту планується перехід від програми на ПК до окремого апаратного блока на базі мікропроцесора, який встановлюватиметься безпосередньо на ходовому містку судна як штатний прилад: у промисловому корпусі щитового монтажу, з власним дисплеєм, енергонезалежною пам'яттю архіву та живленням від суднової мережі з резервуванням. Перспективним шляхом реалізації цього етапу є співпраця з виробниками юнітів суднової автоматизації.

Іншим ключовим і найважливішим елементом другої версії схеми стане світлова та звукова сигналізація. У прототипі повідомлення про аварію є пасивним: оператор має дивитися на екран. Додавання до апаратного блока сигнальної колони і звукового сповіщувача з квитуванням перетворює систему на повноцінний засіб автоматизованого контролю.

Виконання алгоритму в детермінованому робочому циклі ПЛК з апаратним сторожовим таймером дає рівень надійності, недосяжний для програми під операційною системою загального призначення: контролер не має фонових процесів і оновлень, стартує за секунди після подання живлення та відновлює роботу автоматично після збою.

На рівні каналів даних розвиток передбачає двосторонній обмін: чинна версія лише читає телеметрію, тоді як контролер Micro-Link 3 підтримує і дистанційне керування.

Також є можливість контролювати контейнери з небезпечними вантажами. Сьогодні такі контейнери після завантаження на судно контролюються переважно візуальними обходами. Оснащення вузлів системи додатковими датчиками перетворює її на засіб раннього виявлення інцидентів. Відповідність класів небезпеки за IMDG та типів датчиків наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Датчики для моніторингу небезпечних вантажів за класами IMDG

Клас IMDG	Вид небезпеки	Датчики для підключення до системи
Клас 2	Гази (стиснені, зріджені, розчинені під тиском)	Інфрачервоні та каталітичні детектори горючих газів, електрохімічні сенсори витоку; зростання концентрації в об'ємі контейнера сигналізує про розгерметизацію балонів чи тари
Клас 4.2	Речовини, здатні до самозаймання	Багатоточкові датчики температури всередині штабеля вантажу та детектори чадного газу (CO) – зростання температури і поява CO є ранніми ознаками тління задовго до відкритого полум'я
Клас 4.3	Речовини, що виділяють займисті гази у разі контакту з водою	Датчики вологості й протікання в піддоні контейнера у поєднанні з детекторами водню та інших займистих газів; спрацювання будь-якого з них вказує на потрапляння води до вантажу
Клас 6.1	Токсичні речовини	Електрохімічні газоаналізатори на специфічні пари (аміак, хлор тощо – залежно від декларації вантажу); контроль герметичності упаковки для захисту екіпажу під час оглядів
Клас 7	Радіоактивні матеріали	Дозиметри гамма-випромінювання (за потреби – нейтронні) поблизу контейнера; безперервний контроль потужності дози замість періодичних вимірювань ручним приладом

Технічно розширення не потребує змін архітектури: резервний байт типу пакета в протоколі RCMS дозволяє визначити нові формати телеметрії для газоаналізаторів, дозиметрів і датчиків протікання, клієнтський вузол має вільні аналогові та цифрові входи для їх підключення, а програма і майбутній ПЛК-юніт записуватимуть ці дані до того самого архіву з тими самими механізмами порогів, утримуваних аварій, квитування та звітності.

3.6 Охорона праці під час впровадження та експлуатації системи

Впровадження й експлуатація системи моніторингу пов'язані з трьома групами робіт, кожна з яких має власні вимоги охорони праці [22]: монтаж клієнтських вузлів на рефрижераторні контейнери, обслуговування радіомережі та постійна робота оператора за комп'ютером.

Найбільшу небезпеку становлять роботи з монтажу вузлів, оскільки рефрижераторна установка живиться трифазною напругою 380/440 В. До таких робіт допускаються лише особи з відповідною групою з електробезпеки, а підключення вузла до діагностичного порту контролера виконується виключно після знеструмлення установки: вимкнення автоматичного вимикача, від'єднання живильного кабелю від розетки та вивішування попереджувальної таблички. Експлуатаційна документація установки [5] окремо застерігає, що обладнання може запуститися автоматично в будь-який момент і що навіть після вимкнення в колах перетворювача та конденсаторах може зберігатися небезпечний заряд, тому перед роботою слід витримати паузу та переконатися у відсутності напруги. Додатковим чинником є холодоагент: у разі розгерметизації контуру він витісняє повітря в замкнених об'ємах, створюючи небезпеку задухи, спричиняє обмороження під час контакту з рідкою фазою, а в разі контакту з відкритим полум'ям утворює токсичні продукти розкладання, тому роботи всередині

контейнера проводяться після провітрювання і без застосування відкритого вогню. Під час монтажу на штабельованих контейнерах терміналу роботи на висоті виконуються з використанням засобів індивідуального захисту від падіння та лише за сприятливих погодних умов; на судні додатково діють вимоги суднових розкладів і дозвільна система робіт.

Радіообладнання системи працює в неліцензованому діапазоні 2,4 ГГц з малою вихідною потужністю, що на порядки нижча за гранично допустимі рівні електромагнітного випромінювання для населення, тому спеціальних заходів захисту не потребує; достатньо розміщувати антени координатора поза зонами постійного перебування людей.

Робоче місце оператора RCMS належить до робочих місць із візуальними дисплейними терміналами, вимоги до яких встановлюють ДСанПіН 3.3.2.007-98[20]. Основні з них: площа на одне робоче місце не менше 6 м², відстань від очей до екрана 600–700 мм, верхній край екрана на рівні очей, освітленість робочої зони 300–500 лк без відблисків на екрані, регламентовані перерви 10–15 хвилин щогодини під час безперервної роботи за екраном, температура повітря 22–24 °C та відносна вологість 40–60 % у холодний період року. Оскільки спостереження ведеться цілодобово, графік вахт має відповідати вимогам законодавства про тривалість змін та відпочинок між ними.

Сама система, до речі, теж є заходом з поліпшення умов праці. Вона усуває регулярні обходи вантажних палуб і рядів терміналу – тобто скорочує час перебування персоналу в зонах підвищеної небезпеки: серед високих штабелів, на відкритій палубі в негоду та вночі, поблизу обладнання під напругою і рухомої перевантажувальної техніки. Заміна фізичних обходів спостереженням з диспетчерської зменшує ризики травматизму, а автоматична фіксація аварій знімає з людини монотонну функцію контролю, в якій найчастіше і трапляються помилки через втому.

У розділі визначено шляхи практичної реалізації проєкту. Показано, що система застосовна на чотирьох типах об'єктів: контейнеровозах, портових терміналах, рефрижераторних складах та суднах річкового і фідерного флоту. Окреслено коло потенційних споживачів – від світових судноплавних ліній (Maersk, MSC, CMA CGM, Hapag-Lloyd, ZIM), досвід яких підтверджує затребуваність дистанційного моніторингу, до українських терміналів (КТО групи HHLA, TIC) і Дунайського пароплавства, де рішення може бути впроваджене без адаптації. Проведене порівняння з комерційними системами (Reefer Runner, ORBCOMM, Globe Tracker) виявило нішу розробки: локальний автономний моніторинг без абонентської плати й залежності від зовнішніх мереж. Розглянуто економічні складові ефекту – збереження вантажу завдяки швидкому реагуванню, скорочення ручної праці та доказову базу для претензійної роботи. Запропоновано триетапний план впровадження (пілот, дослідна та промислова експлуатація) з аналізом технічних, організаційних і регуляторних ризиків. Визначено статус розробки як прототипу та окреслено шлях до другої версії: окремий апаратний юніт на базі мікропроцесора для встановлення на ходовому містку у формфакторі суднових контролерів автоматизації (подібних до пристроїв DEIF) зі світловою та звуковою аварійною сигналізацією і квитуванням, реалізація програми також у вигляді алгоритму роботи ПЛК за стандартом IEC 61131-3, а також можливість співпраці з виробниками суднових юнітів автоматизації. Обґрунтовано розширення системи на моніторинг небезпечних вантажів за класами IMDG (гази, самозаймисті речовини, речовини, що виділяють займисті гази у контакті з водою, токсичні та радіоактивні матеріали) з підключенням відповідних датчиків до тієї самої мережі й архіву, що підвищує безпеку екіпажу та судна, і показано системні переваги зростання: масштабованість мережі, платформовий ефект, накопичення даних для аналітики та конкурентну позицію перевізника. Сформульовано напрями розвитку програмної частини: активні сповіщення, вебінтерфейс, двостороннє керування з

розмежуванням прав, ретрансляція даних на берег, підтримка стандарту DCSA та попереджувальне обслуговування на основі аналізу архіву[10]. Розглянуто питання охорони праці під час монтажу, обслуговування та експлуатації системи, зокрема вимоги електробезпеки за документацією [5], безпечного поводження з холодоагентом, роботи на висоті й організації робочого місця оператора згідно з ДСанПіН 3.3.2.007-98 і НПАОП 0.00-7.15-18, та показано, що впровадження системи саме по собі зменшує виробничі ризики, скорочуючи перебування персоналу в небезпечних зонах.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розв'язано актуальну задачу автоматизації контролю параметрів рефрижераторних контейнерів на судні: розроблено підсистему автоматизованого дистанційного моніторингу на базі бездротової радіомережі з топологією Mesh та реалізовано її програмний засіб RCMS (Refrigerated Container Monitoring System). Усі завдання, поставлені у вступі, виконано в повному обсязі.

У межах першого завдання проаналізовано сучасні методи, засоби та автоматизовані системи дистанційного моніторингу параметрів рефрижераторних контейнерів: локальні панелі оператора, вбудовані реєстратори даних (Data Loggers), системи централізованого дистанційного контролю та методи обміну даними між ними. Аналіз показав, що штатні засоби контейнера забезпечують лише локальний контроль і потребують регулярних ручних обходів, комерційні системи дистанційного моніторингу є закритими та витратними через абонентську плату й залежність від стільникових чи супутникових мереж, а вимоги до систем автоматичного контролю на судні визначають необхідність автономного, стійкого до завад рішення. Це дозволило сформулювати нішу розробки – локальний автономний моніторинг у межах судна чи терміналу без періодичних платежів.

У межах другого завдання розроблено структурну схему підсистеми, побудовану на принципі безпечного збору даних: замість встановлення сторонніх датчиків обґрунтовано пряму інтеграцію з пам'яттю штатного контролера установки (Data Corder) через діагностичний інтерфейс, що надає доступ до розширеної телеметрії – температур припливного і зворотного повітря, уставки, тисків холодоагенту, статусів відтаювання та сервісних кодів помилок. Сформовано логіку взаємодії клієнтських вузлів з координатором у межах самоорганізовної Mesh-мережі, яка забезпечує ретрансляцію пакетів у складному для радіохвиль

середовищі штабельованих металевих контейнерів, та підключення координатора до комп'ютера оператора через міст USB-to-UART.

У межах третього завдання на основі порівняльного аналізу офіційних технічних специфікацій обрано компонентну базу підсистеми: багатопротокольний мікроконтролер nRF52840 як обчислювальне ядро комунікаційного вузла з достатнім обсягом пам'яті для буферизації даних та апаратним шифруванням трафіку, контролер WIZnet W5500 з апаратним стеком TCP/IP для дротового інтерфейсу, що розвантажує основний процесор, і міст CP2102N для надійної трансляції даних на головний комп'ютер судна. Для кожного компонента визначено переваги та недоліки альтернатив.

У межах четвертого та п'ятого завдань розроблено алгоритм роботи підсистеми та реалізовано його у вигляді програмного засобу RCMS мовою C++ з використанням фреймворка Qt 6. Спроєктовано власний кадровий протокол обміну із синхромаркером, контрольною сумою CRC-16-CCITT та резервом типів пакетів для майбутніх розширень; приймач автоматично відновлює синхронізацію після пошкодженого кадру, що підтверджено автоматичним тестом на потоці з навмисними завадами. Програма забезпечує спостереження за флотом до 500 контейнерів у реальному часі з колірним кодуванням станів (норма, аварія, проблема живлення, втрата зв'язку), утримання аварій до квитування оператором, ведення локального архіву SQLite глибиною 30 діб із записом показань щохвилини та фіксацією аварійних подій у момент виникнення і зняття, а також формування офіційних добових звітів у форматах PDF та CSV з графіком температур і журналом аварій. Розшифрування аварійних кодів реалізовано за офіційною сервісною документацією контролера Micro-Link 3 установки Carrier 69NT40 (T-363), що забезпечує застосовність засобу на діючому обладнанні. Працездатність рішення підтверджено трьома автоматичними тестами – протоколу, наскрізного конвеєра даних та експорту звітів – і вбудованим симулятором флоту, який генерує ті самі

двійкові кадри, що й реальний координатор, і дозволяє демонструвати систему без апаратної частини.

Додатково визначено шляхи практичної реалізації проєкту: окреслено сфери застосування (контейнеровози, портові термінали, рефрижераторні склади, річковий і фідерний флот) та коло потенційних споживачів – від світових судноплавних ліній до українських терміналів і Дунайського пароплавства; проведено порівняння з комерційними системами та орієнтовну оцінку економічного ефекту; запропоновано триетапний план впровадження з аналізом ризиків. Визначено статус розробки як прототипу та напрями другої версії: окремий апаратний юніт на базі мікропроцесора для встановлення на ходовому містку з реалізацією алгоритму у вигляді програми ПЛК за стандартом IEC 61131-3, світлова та звукова аварійна сигналізація з квитуванням, розширення на моніторинг небезпечних вантажів за класами IMDG з підключенням газоаналізаторів, датчиків самонагрівання, вологості та дозиметрів до тієї самої мережі й архіву. Розглянуто питання охорони праці під час монтажу та експлуатації системи і показано, що впровадження підсистеми саме по собі поліпшує умови праці, скорочуючи перебування екіпажу в небезпечних зонах.

Кваліфікаційну роботу оформлено відповідно до вимог ДСТУ 3008:2015 та методичних вказівок з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра. Таким чином, мету роботи – забезпечення безперервного дистанційного моніторингу параметрів рефрижераторного контейнера на базі бездротової радіомережі з топологією Mesh – досягнуто: ручні обходи замінено автоматичним спостереженням з одного робочого місця, аварії фіксуються з прив'язкою до ідентифікатора контейнера в момент виникнення, а безперервний цифровий архів слугує об'єктивною доказовою базою дотримання умов перевезення. Отримані результати мають практичну цінність для судноплавних компаній і терміналів та

створюють основу для подальшого розвитку підсистеми до рівня промислового виробу.

Також отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме п. 9.3 «Забезпечити доступність дорожньо-транспортної інфраструктури, яка базується на використанні інноваційних технологій, зокрема через розширення форм участі держави у різних інфраструктурних проектах», оскільки розроблена підсистема є прикладом впровадження інноваційних технологій у транспортну інфраструктуру морських перевезень, а також до Цілі сталого розвитку 12 «Відповідальне споживання та виробництво» в частині скорочення втрат харчової продукції у ланцюгах постачання завдяки безперервному контролю температурного режиму перевезення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. - 29 с.

2. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» : Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, В.А. Андрусевич, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2022. 151 с.

3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології 32 освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»/ Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипенко, О.В. Токарєва, С.П. Новоселов, О.В. Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2022. 66 с.

4. Maged Mohammed, Khaled Riad, Nashi Alqahtani (2022). Design of a Smart IoT-Based Control System for Remotely Managing Cold Storage Facilities Sensors, 22(13), 4680. https://doi.org/10.3390/s22134680. (дата звернення – 01.04.2026)

5. Operations and service manual For 69NT40-541-500 to 599; Container Refrigeration Units; - https://www.shareddocs.com/hvac/docs/2000/Public/09/T-363.pdf. (дата звернення – 01.04.2026)

5. PCMCIA ATA Flash Card - https://apro-tw.com/Databank/Spec.Sheets/45X-PCMCIA%20ATA%20Flash%20Card.pdf. (дата звернення – 01.04.2026)

7. REFCON Vessel and Terminal Monitoring; REFCON 6 automatically monitors an entire vessel or container terminal. - https://www.copeland.com/en-us/products

/controls-monitoring-systems/proact-transport-monitoring/refcon. (дата звернення – 01.04.2026)

8. Yinjia Huo, Gautham Prasad, Lutz Lampe, Victor Leung (2022). Power Line Communication and Sensing Using Time Series Forecasting. Sensors, 22(14), 5320. https://doi.org/10.3390/s22145320. (дата звернення – 01.04.2026)

9. Регістр Судноплавства України; Правила Класифікації Та Побудови Морських Суден; Том 4; Київ 2020.

10. Marko Vukšić, Jasmin Ćelić, Dario Ogrizović, Ana Perić Hadžić (2026)Early Anomaly Detection in Maritime Refrigerated Containers Using a Hybrid Digital Twin and Deep Learning Framework. Appl. Sci. 2026, 16(4), 1887. https://doi.org/10.3390/app16041887. (дата звернення – 01.04.2026)

11. ESP32-S3 Series Datasheet / Специфікація мікроконтролера / Espressif Systems. - URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf. (дата звернення – 16.04.2026)

12. CC2652R SimpleLink™ Multiprotocol 2.4-GHz Wireless MCU / Технічна документація/ Texas Instruments.

13. nRF52840 Product Specification v1.11 / Специфікація системи на кристалі / Nordic Semiconductor. - URL: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52840_PS_v1.11.pdf. (дата звернення – 16.04.2026)

14. W5500 Datasheet Version 1.1.0 / Технічна специфікація контролера Ethernet / WIZnet Co., Ltd. - URL: https://docs.wiznet.io/img/products/w5500/W5500_ds_v110e.pdf. (дата звернення – 16.04.2026)

15. W6100 Datasheet Version 1.0.5 / Технічна специфікація контролера Ethernet / WIZnet Co., Ltd. - URL: https://docs.wiznet.io/img/products/w6100/w6100_ds_v105e.pdf. (дата звернення – 16.04.2026)

16. CH395 Datasheet: Management Ethernet protocol stack chip / Технічна специфікація / Nanjing Qinheng Microelectronics. - URL: https://www.wch-ic.com/downloads/CH395DS1_PDF.html. (дата звернення – 16.04.2026)

17. CP2102N DataSheet: USB to UART Bridge / Специфікація моста-перехідника / Silicon Laboratories.

18. Mandrykov K. Comparative analysis of wireless mesh network technologies for industrial monitoring systems / K. Mandrykov // Збірник студентських наукових статей «Автоматизація та приладобудування», Харків. – 2026. – С. 237.

19. Mandrykov K. Comparative analysis of industrial data transmission protocols (IIoT) in automation systems / K. Mandrykov, S. Sotnik // Конференція «Інтелектуальні технології цивільної безпеки та робототехнічні системи аварійно-рятувальних робіт» Харків, лютий 12-13. – 2026. – С. 13.

20. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин: ДСанПіН 3.3.2.007-98 / МОЗ України. – Київ, 1998. – URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0007282-98 (дата звернення: 13.06.2026).

22. Невлюдов, І.Ш. Теорія автоматичного управління (збірник задач) [Текст]: навчальний посібник / І.Ш.Невлюдов,О.В.Токарєва. – Харків: ХНУРЕ,2020. – 240 с.

21. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Безпека праці в індустрії ІТ-технологій» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 122 с.