

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕНЬ СУДНА

Нікольський В. В., *д.т.н., професор, професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, професор кафедри комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна, e-mail: vit_nik@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8123-4233;*

Малахов О. В., *д.фіз.-мат.н., професор, професор кафедри суднових допоміжних установок та холодильної техніки Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: a_malahov@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-5003-8715;*

Нікольський М. В., *к.т.н., старший механік, LSCgroup, м. Рига, Латвія, e-mail: markdezert@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3387-7402;*

Палагін О. М., *к.т.н., доцент, доцент кафедри суднових енергетичних установок і систем Дунайського інституту національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, Україна, e-mail: apalagin113@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6533-5894;*

Найдюнов А. І., *к.т.н., доцент, доцент кафедри суднових енергетичних установок і систем Дунайського інституту національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, Україна, e-mail: NayduonovAndrii@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3979-4923.*

В існуючих сучасних суднових системах моніторингу навколишнього середовища традиційні бездротові протоколи такі як Wi-Fi, Bluetooth та стільникові мережі, не відповідають вимогам щодо забезпечення необхідного балансу в ланцюзі енергоспоживання – радіус покриття – вартість розгортання мережі. В якості альтернативного рішення, яке описано в статті, необхідно використовувати такі новітні наукові технології, як модуляція великого радіуса дії та її локального мережевого рівня. Вони можуть розглядатися як ключові рішення, що дозволяють розгорнути на судні мережі з автономною роботою кінцевих пристроїв терміном до кількох років. Для процесу передачі даних у розподілених системах моніторингу параметрів навколишнього середовища в машинному відділенні судна було виконано моделювання пропускної здатності і проведена оцінка частоти роботи системи. Для активації всіх пристроїв суднової мережі запропоновано використання методу персоналізації. Експериментальним шляхом отримана оцінка параметрів, що описують якість старту мікроконтролера під час контрольних запусків, стабільність роботи АЦП, показників сенсорів температури, вологості і освітлення.

***Ключові слова:** суднова локальна мережа; моніторинг параметрів мікроклімату; архітектура системи; метод персоналізації.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.087-099

Вступ. Велика кількість промислових технологій напряму залежить від глобальних кліматичних змін. До таких технологій належать суднові системи забору повітря, яке йде на згоряння палива, на вентиляцію приміщень, на довільні суднові технологічні процеси і т. ін. [1]. Необхідність раціонального використання повітряних ресурсів потребують впровадження енергоефективних систем моніторингу параметрів навколишнього середовища, здатних працювати автономним чином протягом тривалого часу з урахуванням змін освітлення, температури, тиску або вологості. На теперішній час в існуючих суднових системах моніторингу традиційні бездротові протоколи такі як Wi-Fi, Bluetooth та стільникові мережі, не відповідають вимогам щодо забезпечення необхідного балансу в такому ланцюзі енергоспоживання, як: радіус покриття – вартість розгортання мережі [2].

В якості альтернативного рішення необхідно використовувати новітні наукові рішення, що базуються на технології фізичного рівня LoRa (Long Range – технологія модуляції великого радіуса дії) та її мережевого рівня LoRaWAN (Long Range Wide Area

Network – мережевий протокол для LoRa) [3]. Саме вони можуть розглядатися як ключові рішення, які дозволяють розгортати судові мережі з автономною роботою кінцевих пристроїв терміном до кількох років. Така автономність є критичним фактором для зниження експлуатаційних витрат та забезпечення безперервності моніторингу під час роботи судна [4].

У випадку, що розглядається, найбільш суттєва проблема полягає у низькій швидкості передачі даних з фізичного рівня архітектури стеку задіяних протоколів. Втрата пакетів даних через інтерференцію, колізії або затінення сигналу можуть порушувати цілісність часових рядків даних у таких сховищах даних як PostgreSQL або MS Excel. Низька швидкість також створює критичну проблему перевищення очікування на повідомлення таймером. В архітектурі LoRaWAN відсутні вбудовані механізми автоматичної компенсації таких втрат на рівні сервера [4].

На підставі вищезначеного, для дослідження, що описано в статті, було обрано процес передачі даних у розподілених судових системах моніторингу параметрів навколишнього середовища. Головна мета виконаних досліджень була призначена дослідженню методів та засобів забезпечення цілісності даних у мережах LoRaWAN.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Концепція «Інтернету речей» визначається як глобальна мережа фізичних об'єктів, оснащених сенсорами та комунікаціями, для їхньої взаємодії та обміну даними без безпосередньої участі людини. За оцінками аналітичних агенцій, до початку 2020 року глобально кількість підключених пристроїв вже перевищила кількість у 25 мільярдів одиниць [5, 6].

Базова технологія бездротової модуляції LoRa була розроблена французьким стартапом «Cycleo», а у 2012 році корпорація Semtech придбала його та запатентувала цю технологію, що обумовлює закритий технологічний стек рівня фізичного каналу.

Протокол LoRaWAN визначений та активно просувається неприбутковою організацією «LoRa Alliance», до складу якої входять понад 500 компаній-учасників, які мають безпосередній вплив на стандартизацію та масове розгортання LPWAN-технологій у світі [7, 8, 9].

Якщо брати масштабні IoT-системи, то класична клієнт-серверна модель (коли кожен клієнт напряму звертається на сервер) має помітні обмеження. Вона працює, але не завжди зручно і не завжди ефективно, особливо коли компонентів багато. У роботах [10, 11] показано, що логічніше дивитися в бік патерну «видавець-підписник» (Publish-Subscribe, або Pub/Sub). Це більш гнучкий підхід для асинхронної комунікації між великою кількістю розподілених елементів [12, 13, 14].

Під час розробки енергоефективної судової системи моніторингу параметрів навколишнього середовища на підставі технології фізичного рівня LoRa та її мережевого рівня LoRaWAN був обраний напрямок, важливість якого, детально розглянуто в роботах [3, 9, 15, 16]. Він пов'язаний з розробкою механізму компенсації втрат пакетів даних. Цей напрямок забезпечує цілісність часових рядків даних при постійному занесенні їх у сховище даних.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є розробка розподіленої системи моніторингу на базі технології LoRaWAN з реалізацією механізму компенсації втрат повідомлень та валідації даних для забезпечення записуваних до таблиці MS Excel часових рядків даних.

Для його подальшої практичної реалізації були сформульовані дослідницькі задачі щодо: обґрунтування вибору стеку LoRaWAN для побудови системи моніторингу та дослідження процесу поширення радіосигналу в діапазоні 868 МГц.

До головних задач досліджень відносяться:

- розробка математичної моделі бюджету лінії зв'язку (Link Budget);
- розрахунки таких характеристик радіоканалу як: чутливість приймача, SNR (Signal-to-Noise Ratio – співвідношення сигналу до наявного шуму) та ToA (Time on Air – час передачі сигналу в ефірі) для забезпечення відповідності регуляторним нормам;

– розробка архітектури розподіленої системи на базі мікро сервісів у Docker (платформа контейнеризації програмного забезпечення), яка включає шлюз, мережевий сервер ChirpStack (програмний комплекс із відкритим вихідним кодом, який використовується для розгортання приватних мереж LoRaWAN) та сервер додатків.

Результати та методи дослідження. Для вирішення сформульованих наукових задач були використані наступні методи дослідження:

- аналітичний метод персоналізації та аналіз нормативної бази протоколів;
- математичне моделювання радіоканалу та розрахунок бюджету ліній зв'язку;
- метод алгоритмічної обробки даних засобами візуального програмування з використанням скриптів;
- експериментальний метод налаштування обладнання з розгортанням серверного програмного забезпечення;
- аналітичний метод оцінювання отриманих даних через статистичне формування висновків та оцінку перспектив системи.

Сутність структури мережі LoRaWAN. Під час розробки мережу LoRaWAN необхідно розглядати як складну систему. Вона є сукупністю набору об'єктів (кінцеві пристрої, шлюзи, рівні серверів), які мають визначені властивості та фіксовані протоколи взаємодії. Центральною задачею під час розробки є визначення умов розповсюдження радіосигналу в складних умовах експлуатації судна та розробка механізмів компенсації втрат корисного навантаження повідомлень на рівні програмного стеку. Доцільність використання мережі LoRaWAN у порівнянні з іншими мережами дуже наявно демонструється порівняльним аналізом бездротових протоколів комунікації, що показаний у таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз бездротових протоколів комунікації

<i>Технологія</i>	<i>Спосіб комунікації</i>	<i>Дальність (м)</i>	<i>Потужність передачі (мВт)</i>
Bluetooth	Мала дальність	приблизно 10	приблизно 2,5
WiFi	Мала дальність	приблизно 50	приблизно 80
4G / 5G	Стільниковий зв'язок	приблизно 5 тисяч	приблизно 500
LoRa	LPWAN	2–5 тисяч (місто), 5–15 тисяч (сільська місцевість), більше 15 тисяч (пряма лінія видимості)	приблизно 20

Базова технологія бездротової модуляції LoRa обумовлює закритий технологічний стек рівня фізичного каналу в якому дальність зв'язку між передавачем та приймачем є величиною, що змінюється. Вона залежить від фактора розширення спектра (Spreading Factor) та характеристик середовища поширення сигналу – від 0,3 кбіт/с до 5,5 кбіт/с відповідно.

Архітектура суднової мережі LoRaWAN базується на зірковій топології в якій кінцевий пристрій є автономним модулем. Він складається з радіочастотного приймача-передавача з антеною та мікроконтролера, що відповідає за обробку даних з сенсорів. При інтеграції додаткових сенсорних елементів кінцевий пристрій набуває функціональності віддаленого датчика.

Шлюз є концентратором і виконує роль моста, який складається з радіо модуля та мікропроцесора для обробки пакетів даних IP. Він здатний одночасно прослуховувати кілька

частотних каналів та всі коефіцієнти розширення спектра на кожній частоті. У цьому випадку значно підвищується ймовірність прийому сигналів.

Мережевий судновий сервер приймає пакети даних від усіх шлюзів та виконує їх дедуплікацію/фільтрацію. Після обробки та дешифрування пакетів він маршрутизує їх індивідуально на коректний сервер додатків. На сервері відбувається кінцева обробка даних для користувача. При необхідності надсилання відповіді або команди на пристрій, судновий сервер додатків надсилає запит по низхідному з'єднанню. Мережевий судновий сервер визначає оптимальний шлюз для трансляції цього низхідного з'єднання.

Завдяки всім своїм властивостям базова технологія бездротової модуляції LoRa набуває широкого застосування на судах водного транспорту. Найвним прикладом є дистанційний моніторинг довільних параметрів навколишнього середовища: контроль рівня рідини у резервуарах та судових танках; моніторинг показників/стану засобів вимірювання; моніторинг параметрів тиску, вологості та температури у машинному відділенні судна та критичних середовищах всередині вантажних танків; запобігання процесам зневоднювання або висихання вантажу в трюмах; контроль умов транспортування на судах водного транспорту біологічно активних вантажів.

Моделювання пропускної здатності і частоти роботи системи. Моделювання пропускної здатності можливо виконувати за допомогою набору параметрів. Головним з них є FSL (Free Space Path Loss – втрати сигналу у вільному просторі) – зменшення інтенсивності сигналу внаслідок розширення фронту хвилі по мірі віддалення від джерела [7]. У просторі з лінією прямої видимості сила сигналу обернено пропорційна квадрату відстані. Кількісне значення втрат у вільному просторі є базовою складовою бюджету лінії і обчислюється за формулою Фрііса, модифікованою для зручності розрахунків у LoRaWAN-мережі:

$$L_{fs} = 20 \log_{10} \frac{4\pi df}{c}, \quad (1)$$

де L_{fs} – втрати у вільному просторі, Дб; d – дистанція між кінцевим пристроєм та шлюзом, км; f – робоча частота, МГц; c – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль, м/с.

Наступним параметром є Зона Френеля. Вона визначає якість та інтенсивність радіосигналу в умовах прямої видимості. Ця зона є еліпсоїдом, в об'ємі якого існує пряма лінія поширення сигналу між кінцевим пристроєм та шлюзом [8]. Не залежно від наявності прямої видимості, будь-яка перешкода, що потрапляє в зону Френеля (наприклад, рельєфні судові вантажні елементи, надстройка судна тощо), може спричинити ослаблення сигналу через інтерференцію прямого та відбитого сигналів. У цьому випадку максимальний радіус першої зони Френеля (r_{max}), що знаходиться посередині дистанції, розраховується за формулою [8]:

$$r = 8,657 \sqrt{\frac{D}{f}}, \quad (2)$$

де r – радіус зони, м; D – дистанція між передавачем та приймачем, км; f – робоча частота, ГГц.

У Європі, включаючи Україну, використовується частотний план EU863-870 МГц. Дотримання встановлених ETSI регуляторних норм є обов'язковим [1]. ETSI розподіляє смугу 863 МГц – 870 МГц на п'ять субліцензованих піддіапазонів, як зазначено в таблиці 2 [4]. Кожен піддіапазон має конкретні обмеження, яких кінцеві пристрої повинні дотримуватися.

Таблиця 2 – Піддіапазони ETSI [4]

Найменування	Діапазон, МГц	Обмеження
G	863–870	EIRP менше 25 мВт – робочий цикл менше 0,1 відсотка
G1	868–868,6	EIRP менше 25 мВт – робочий цикл менше 1 відсотка
G2	868,7–869,2	EIRP менше 25 мВт – робочий цикл менше 0,1 відсоток
G3	869,4–869,65	EIRP менше 500 мВт – робочий цикл менше 10 відсотків
G4	869,7–870	EIRP менше 25 мВт – робочий цикл менше 1 відсотка

Специфікація LoRaWAN використовує лише три діапазони смуг пропускання: 125 КГц, 250 КГц та 500 КГц. У європейському регіоні використовуються смуги пропускання 125 та 250 КГц відповідно.

Канал зв'язку визначається як узгоджений набір конкретних параметрів: несучої частоти CF (Carrier Frequency – несуча частота), смуги пропускання (BW) та фактору розширення спектра.

Зв'язок між несучою частотою та діапазоном каналу (нижча $f_{\text{ниж}}$ та вища $f_{\text{вищ}}$ частоти) визначається наступними формулами [9]:

$$f_{\text{ниж}} = f_{\text{несуча}} - \frac{BW}{2}, \quad (3)$$

$$f_{\text{вищ}} = f_{\text{несуча}} + \frac{BW}{2}. \quad (4)$$

При обробці низхідного зв'язку, для слотів очікування діють наступні правила:

- для RX1 (перше вікно прийому сигналу) використовуються ті ж частоти висхідного каналу, що й для передачі;
- для RX2 (друге вікно прийому сигналу) використовується фіксована додаткова частота.

Кінцевий пристрій змінює канал псевдовипадковим чином для кожної передачі, що значно підвищує стійкість системи до локальних інтерференцій.

Технологія LoRa ґрунтується на схемі модуляції з розширеним спектром, відомій як CSS (Chirp Spread Spectrum). Цей метод спектрального розширення використовує широкосмугові, лінійно-частотно-модульовані імпульси для кодування даних [3, 9]. CSS кодує інформацію за допомогою циклічного зсуву частоти несучої хвилі. CSS є сигналом, частота якого лінійно зростає або спадає. На рисунку 1 можна побачити, що у LoRa повідомлення кодується не зміною частоти, а зміною початкової фази (або точки початку) циклічно повторюваного CSS, що також називають LoRa-модуляцією.

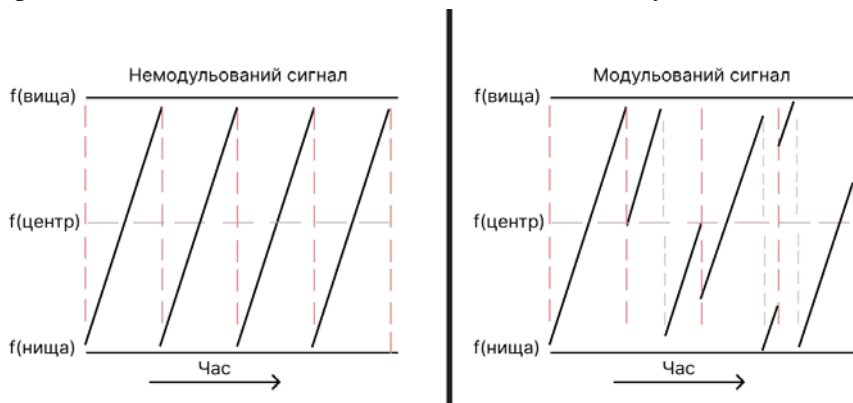


Рисунок 1 – Робота LoRa-модуляції

Метод активації пристроїв мережі. Для активації на судні всіх пристроїв мережі найбільш адекватним є використання методу персоналізації. Він передбачає попереднє конфігурування кінцевого пристрою та суднових серверів усіма необхідними сесійними ключами та адресами. У цьому механізмі відсутній обмін повідомленнями запиту на присудання, а також відповіді на цей запит. Кінцевий пристрій та судновий мережевий сервер не зберігають DevEUI (унікальний ідентифікатор пристрою), AppEUI (унікальний ідентифікатор додатка) та AppKey. Замість них пристрою попередньо присвоюються DevAddr, NwkSKey та AppSKey (ключ шифрування додатка). Пристрій ініціює обмін даними одразу, надсилаючи зашифровані та підписані пакети. Але цей метод вважається менш безпечним порівняно з ОТТА (Over-The-Air Activation – відкрита бездротова активація), оскільки ключі NwkSKey (мережевий сесійний ключ) та AppSKey (сесійний ключ додатка) є статичними і не оновлюються. Діаграма цього процесу представлена на рисунку 2.

Ключ NwkSKey використовується кінцевим пристроєм та судновим мережевим сервером для розрахунку та верифікації коду цілісності усіх пакетів даних. При цьому корисне навантаження шифрується від кінцевого пристрою до суднового мережевого сервера.

Ключ AppSKey використовується кінцевим пристроєм та судновим сервером додатків для наскрізного шифрування та дешифрування корисного навантаження. Попри це, цілісність на рівні додатків не гарантується, бо мережа може змінювати вміст повідомлення, але всі суднові мережеві сервери вважаються умовно довіреними вузлами.

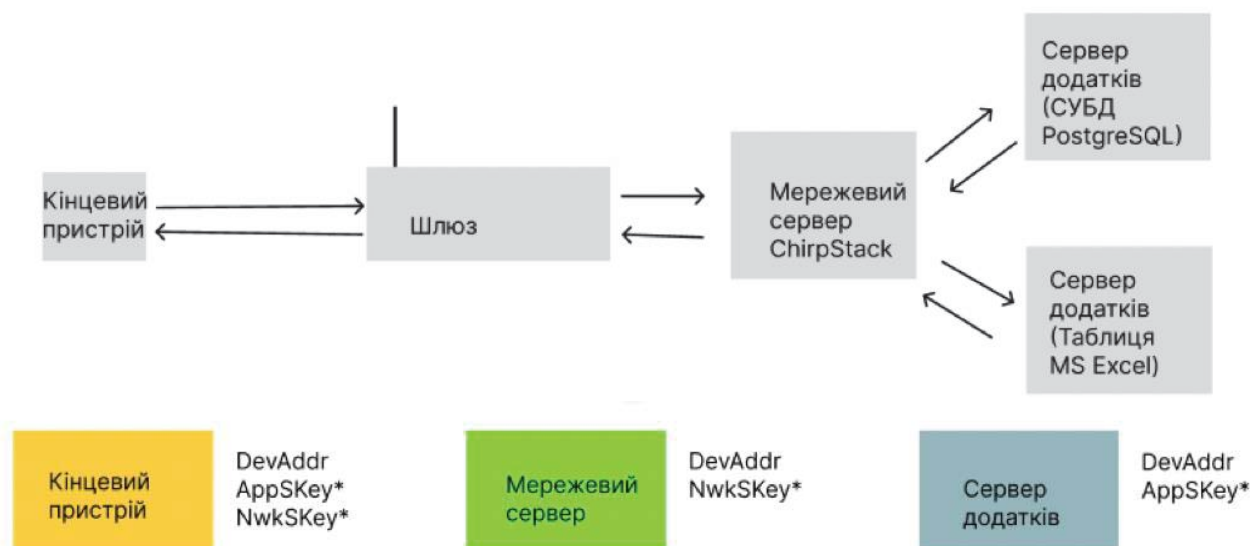


Рисунок 2 – Активація шляхом персоналізації

Візуалізація даних. Під час досліджень для виведення головних показників вимірювання показників мікроклімату в машинному відділенні судна був розроблений інтерфейс. Його ключовою частиною є графіки, які реалізовані через Chart.js. Бібліотека працює на HTML5 Canvas. Під час роботи рендеринг є високошвидкісним навіть у випадку, коли точок даних стає багато.

Оновлення даних зроблено без перезавантаження сторінки, тобто через AJAX. JavaScript на клієнті кожні кілька секунд відправляє асинхронні запити fetch() до REST API сервера (/api/data, /api/stats і подібні). Далі приходить JSON, і цей JSON використовується для оновлення значень у DOM та для перемальовування графіків.

Стилізація інтерфейсу була виконана на базі Bootstrap 5. Завдяки цьому був отриманий сучасний вигляд і нормальна адаптивність під різні екрани без зайвого ручного CSS. Для візуальної деталізованої підтримки та переходу від табличного інтерфейсу були додані іконки Lucide. Приклад інтерфейсу для вимірювання головних параметрів мікроклімату у навколишньому середовищі показаний на рисунку 3.

Для відображення частотного розподілу значень було використано гістограми, що допомагають оцінювати стабільність параметрів. Приклад такої візуалізації потокових даних всередині машинного відділення судна показаний на рисунку 4.

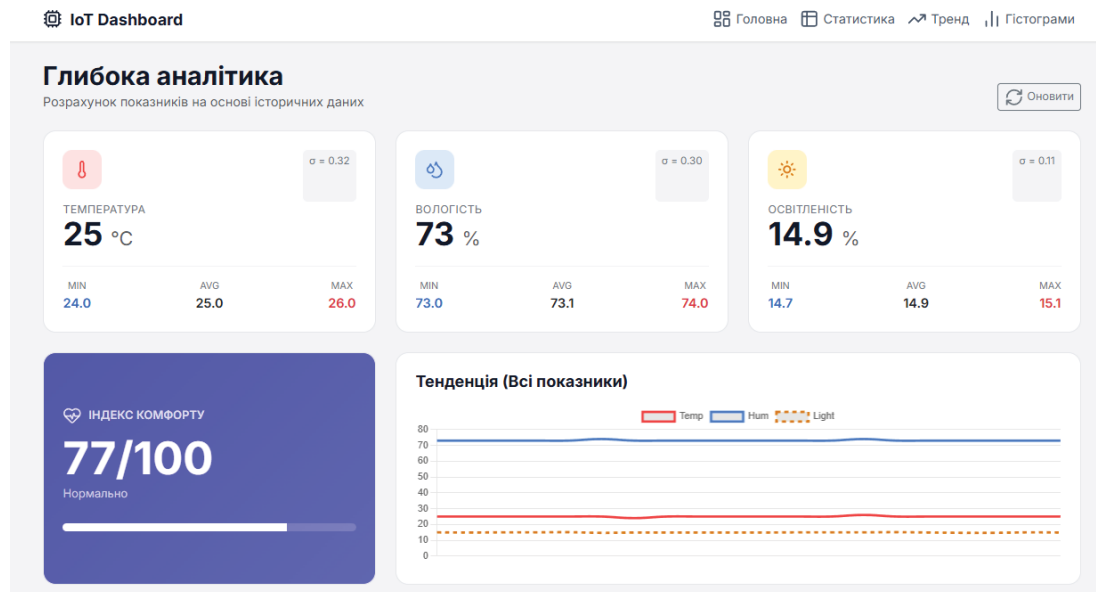


Рисунок 3 – Інтерфейс сторінки розширеної статистики

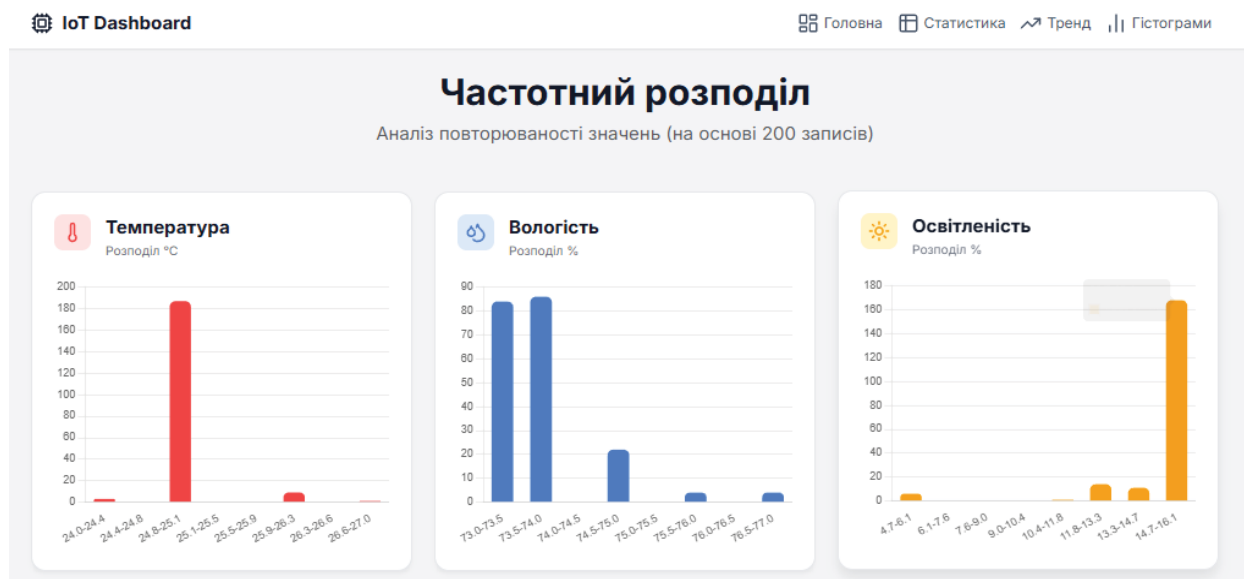


Рисунок 4 – Сторінка з гістограмами

Моніторинг змін мікроклімату. В якості наявного прикладу моніторингу змін мікроклімату всередині машинного відділення судна була проведена серія експериментів щодо вимірювання поточних значень температури і вологості повітря у навколишньому середовищі та рівня освітлення приміщення. У цих експериментах був задіяний серверний застосунок, логіка якого базувалася на асинхронній моделі бібліотеки Paho-MQTT.

Алгоритм обробки даних серверним застосунком показаний на рисунку 5. Під час його використання основний потік виглядав наступним чином: виконувалася ініціалізація клієнтів (для MQTT та SQLite), встановлювалось підключення до брокера, реалізовувалася підписка на агреговану тему `iot/devices/+/data`. Головна перевага алгоритму полягає в однорівневому wildcard-символі MQTT, який дозволяв приймати дані від усіх пристроїв.



Рисунок 5 – Алгоритм обробки даних судновим серверним застосунком

Судновий серверний застосунок, після прийому даних, заходив у нескінченний цикл очікування (`loop_forever()`), а саме: під час входу повідомлення, воно формувалося як байтовий масив (`msg.payload`), а потім реалізовувались наступні кроки: байти декодувалися в рядок (UTF-8) і парсинг цього рядка як JSON-об'єкта; паралельно аналізувалася тема повідомлення (`msg.topic`) і з неї витягувався ідентифікатор пристрою (`device_id`); формувалася об'єкт Point (точка даних) на основі даних з JSON (поля) та теми (теги); сформована точка даних записувалась у базу SQLite.

Такий алгоритм обробки даних у вигляді callback спрацьовував кожного разу, коли доставлялися нові повідомлення.

Для роботи суднової системи моніторингу змін мікроклімату всередині машинного

відділення судна були підібрані цифрові і аналогові сенсори. Вибір робився з огляду на доступність, простоту підключення і адекватну вірогідність для побутових задач.

Температура і відносна вологість вимірювалися за допомогою датчика DHT11, що містить резистивний елемент для вологості та NTC-термістор для температури. Його підключення до мікроконтролера відбувалося через власний однопровідний протокол Single Wire з використання лише одного цифрового піну. Діапазон обмежень DHT11 складає: вологість 20–90 %, температура 0–50°C. Сенсор DHT11 є стабільним і має заводське калібрування.

Контроль освітленості був реалізований з використанням модуля на базі фоторезистора (LDR) у якого принцип роботи базувався на зменшенні опору із зростанням світлового потоку. Був використаний модуль з вхідним діапазоном АЦП, що дорівнює 0–1,0 В і він мав дільник напруги, щоб сигнал був у допустимих межах.

Під час моніторингу даних використовувались статистична обробка та аналіз трендів.

Приклад статистичної обробки показаний на рисунках 3–4 де відображені більш розширені метрики для кожного параметру навколишнього середовища: мінімальні, максимальні, середні значення і стандартне відхилення.

Аналіз трендів, що показаний на рисунку 6, візуально відображав лінійну регресію та згладжені графіки ковзного середнього. Саме на підставі таких результатів можливо приблизно оцінювати і прогнозувати зміни мікроклімату всередині машинного відділення судна.

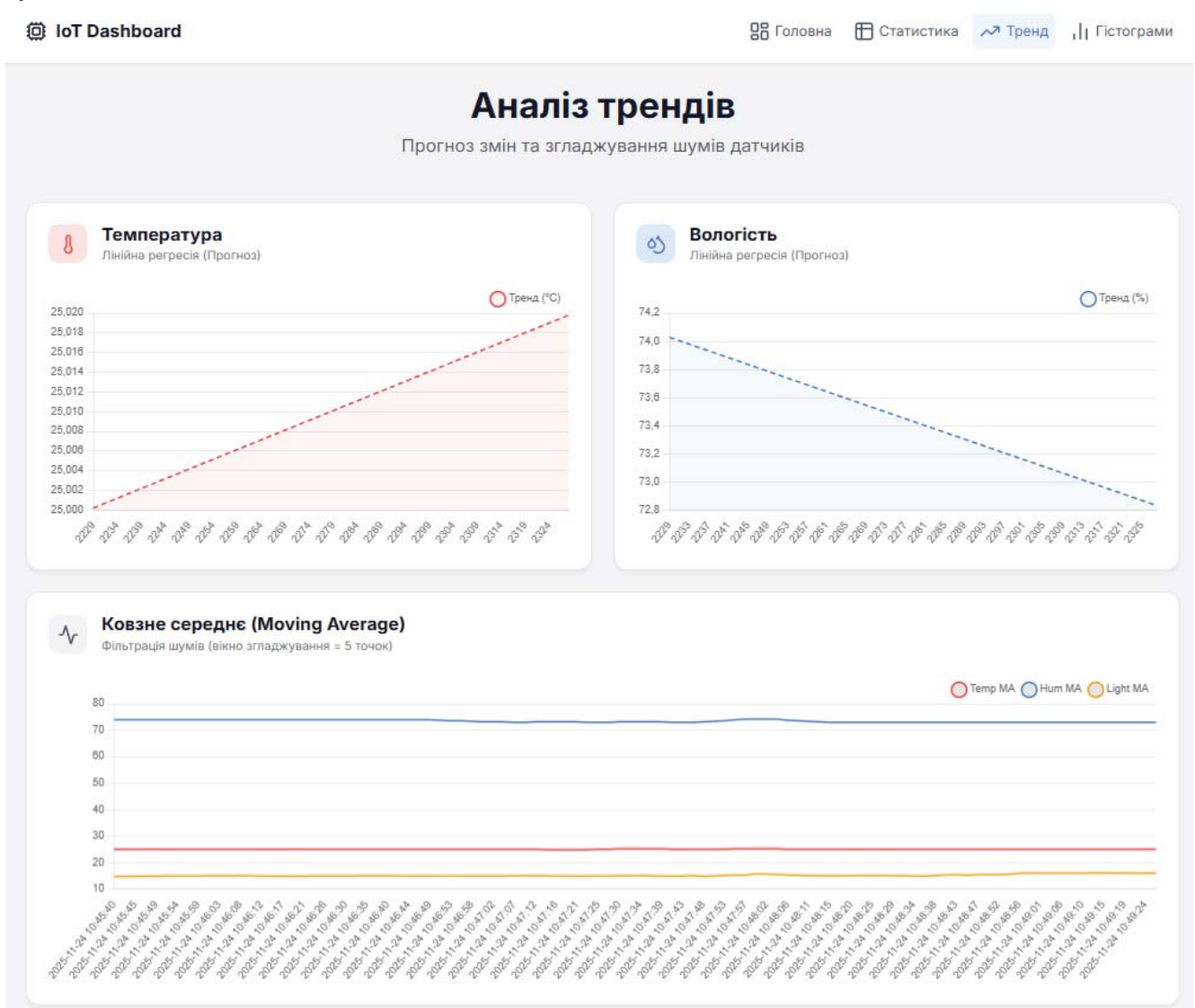


Рисунок 6 – Відображення трендів зміни мікроклімату в машинному відділенні судна

Для збереження історії вимірювань використовувалася реляційна система керування базами даних SQLite. Вона не вимагає встановлення окремого серверного ПЗ оскільки є одним файлом `iot_data.db`. Спроектвана схема бази даних складалася з таблиці з полями: `id`: унікальний ідентифікатор запису (первинний ключ); `timestamp`: мітка часу (проставляється автоматично сервером у момент отримання даних); `temperature`: значення температури (дійсне число); `humidity`: значення вологості (дійсне число); `light_level`: рівень освітленості (дійсне число).

Важливим питанням у розробленій системі моніторингу параметрів змін мікроклімату є перевірка старту мікроконтролера після подачі живлення. Коли живлення підключене, ESP8266 завантажує прошивку MicroPython і запускає файл `boot.py`. Під час тестування в умовах роботи судна, результати якого показані на рисунку 7, було виконано десять контрольних запусків пристрою. Середній час від моменту подачі напруги до повідомлення про готовність у консолі складав 1.5 секунди. У цей часовий проміжок входить і ініціалізація внутрішньої периферії, і налаштування портів вводу-виводу.

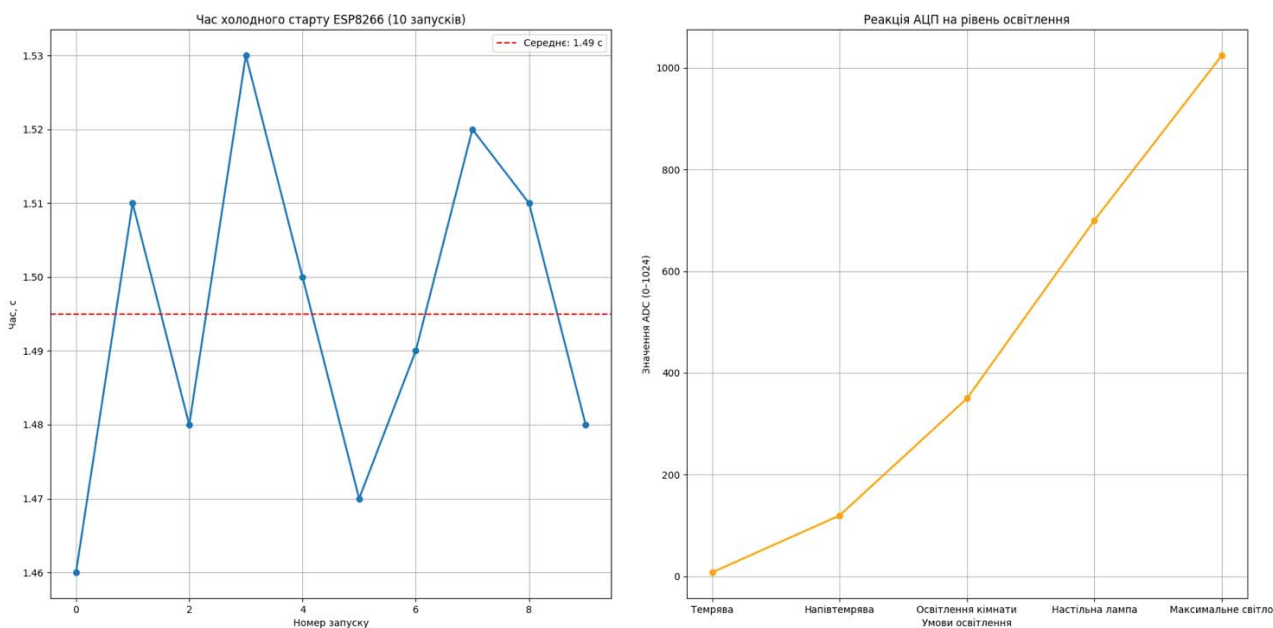


Рисунок 7 – Тестування живлення та стабільність роботи АЦП

Під час проведення суднових експериментів окремо перевірялася стабільність роботи АЦП при зчитуванні даних з фоторезистора оскільки вхід А0 на ESP8266 має вузький діапазон напруги 0–1.0 В, а сам модуль фоторезистора живиться від 3,3 В. Під час експериментальної перевірки коректності роботи дільника напруги на платі NodeMCU було зафіксовано, що при максимальному освітленні суднового машинного відділення значення АЦП доходило до 1024. При відсутності світлового потоку воно падало до 5–10 одиниць. Тобто узгодження рівнів напруги відпрацьовувало зміни якісно та адекватно.

Тестування адекватності показників сенсора DHT11 було проведено у порівнянні з побутовим термометром-гігмометром. Експеримент проводився під час експлуатації судна при температурі повітря 24°C. Різниця в показах температури між DHT11 та еталонним пристроєм становила 0,5–1,0 °C. Це вкладається у паспортну похибку датчика ($\pm 2^\circ\text{C}$) і вказує на якісну роботу сенсора. По вологості розбіжність була близько 4–5 %, що для бюджетного сенсора є також припустимим.

Сенсор DHT11 має певну інерційність. Його реакція на різку зміну температури (наприклад, при обдуві струменем теплого повітря) займає приблизно 10–15 секунд. Тому інтервал опитування у програмному коді (раз на 2 секунди) виглядає достатнім: зміни фіксуються, але процесор не буде навантажуватися зайвими запитами.

Висновки. У роботі була вирішена задача проектування суднової IoT-системи для моніторингу головних фізичних параметрів навколишнього середовища. В умовах роботи

судна система реалізує збір, передавання, збереження та візуалізацію даних датчиків на базі мікроконтролерів сімейства ESP і протоколу MQTT. Головними перевагами розробленої суднової системи є: енергоефективність, надійність, простота масштабування.

Розроблена програмно-апаратна архітектура включає сенсорний вузол (на ESP), брокер, серверний застосунок і веб-інтерфейс. Вибір апаратної частини дозволив зробити суднову систему дешевою з можливістю розширювання. Реалізовано повний цикл роботи – від моменту зчитування датчика до появи цифр у браузері.

Експериментальне оцінювання розробленої суднової системи моніторингу параметрів змін мікроклімату всередині машинного відділення показало високі якісні показники під час перевірки старту мікроконтролера після подачі живлення. Отримані чисельні параметри щодо вимірюваних значень температури, вологості та освітленості відповідають малим похибкам та вказують на високу якість розробленої суднової мережі за умови мінімальної кількості запитів.

Перспективи подальших досліджень. В якості головного напрямку подальших досліджень необхідно виділити додавання алгоритмів статистичного аналізу трендів і гістограм. Внаслідок їх впровадження можливо прогнозувати роботу усього обладнання машинного відділення судна з використанням регуляторів витрати головних робочих агентів, що йдуть на технологічні суднові процеси нагрівання або охолодження.

Розширення можливостей системи також можливо досягнути у разі проведення досліджень щодо часових характеристик передачі даних під час збільшення стабільності роботи каналу зв'язку MQTT. Головними результатами в цьому випадку мають бути дані про те як швидко сервер обробляє запити, і як система реагує на динамічні зміни параметрів навколишнього середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Choudhury S., Mandal B. IOT Based Weather Analysis System Using ESP8266. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2023. Vol. 11, no. 6. P. 3899–3903. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.54365> (Last accessed: 25.11.2025).
2. Das M. Home Automation Using ESP8266. *Transactions on Machine Design (TMD)*. 2018. Vol. 6, no. 2. P. 47. <https://doi.org/10.6025/tmd/2018/6/2/43-46> (Last accessed: 25.11.2025).
3. LoRaWAN® L2 1.0.4 Specification. TS001-1.0.4 [Електронний ресурс] // LoRa Alliance. – Режим доступу: <https://resources.lora-alliance.org/getting-started-with-lorawan/ts001-1-0-4-lorawan-l2-1-0-4-specification> (дата звернення: 20.10.2025).
4. Rappaport T. *Wireless Communications: Principles and Practice* / T. Rappaport. 2nd ed. – New Jersey : Prentice Hall, 2002. 640 p.
5. Sai Prasad D. S., Taluja A., Sharma V. Feedback System using ESP8266. *MR International Journal of Engineering and Technology*. 2023. Vol. 10, no. 1. P. 8–11. <https://doi.org/10.58864/mrijet.2023.10.1.2> (Last accessed: 25.11.2025).
6. Windesi P. K. A., Sampebua M. R., Kmurawak R. M. Iot-Based Home Automation Using Nodemcu Esp8266. *Jurnal Riset Informatika*. 2022. Vol. 4, no 4. P. 391–396. <https://doi.org/10.34288/jri.v4i4.431> (Last accessed: 25.11.2025).
7. Fresnel Zone: The Ultimate RF Engineering Guide [Електронний ресурс] // Number Analytics. – Режим доступу: <https://www.numberanalytics.com> (дата звернення: 26.10.2025).
8. Master the Bandwidth Formula: Essential Guide for Engineers [Електронний ресурс] // Keysight Tech Guides. – Режим доступу: <https://www.keysight.com/used/us/en/knowledge/formulas/bandwith-formula>.
9. LoRa Modulation Basics: application note AN1200.22. 2nd ed. [Електронний ресурс]. – Semtech Corporation, 2015. 25 p. Режим доступу: <https://www.semtech.com> (дата звернення: 28.10.2025).

10. Analisis Traffic Data ESP8266 pada Perangkat Middleware / Unang Achlison та ін. *Elkom : Jurnal Elektronika dan Komputer*. 2022. Vol. 15, no. 1. P. 223–227. <https://doi.org/51903/elkom.v15i1.818> (Last accessed: 25.11.2025).
11. Gupta S., Lekhi S. Home Automation Using Packet Tracer and ESP8266. *International Journal Of Computers & Technology*. 2021. Vol. 21. P. 84–96. <https://doi.org/24297/ijct.v21i.9061> (Last accessed: 25.11.2025).
12. Julianti M. R., Sofia D., Kusuma A. R. Application of IoT for Filling and Monitoring Water Tanks Using NodeMCU ESP8266 and MQTT Protocol. *Jurnal Sisfotek Global*. 2022. Vol. 12, no. 2. P. 108. <https://doi.org/10.38101/sisfotek.v12i2.554> (Last accessed: 25.11.2025).
13. Julianti M. R., Sofia D., Kusuma A. R. Application of IoT for Filling and Monitoring Water Tanks Using NodeMCU ESP8266 and MQTT Protocol. *Jurnal Sisfotek Global*. 2022. Vol. 12, no. 2. P. 108. <https://doi.org/10.38101/sisfotek.v12i2.554> (Last accessed: 25.11.2025).
14. K M. D. N. Smoke Detection Security Using ESP8266. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2025. Vol. 13, no. 9. P. 741–743. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.74112> (Last accessed: 25.11.2025).
15. Magtibay O. B. M. Applying MQTT Protocol and Node-Red Programming in Designing IoT based Home Automation. *IJASC*. 2019. Vol. 1, no. 3. P. 7–12. <https://doi.org/22662/ijasc.2019.1.3.007> (Last accessed: 25.11.2025).
16. Salama M., Raslen B. MQTT in Action: Building Reliable and Scalable Home Automation Systems. *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*. 2024. <https://doi.org/10.35377/saucis...1504759> (Last accessed: 25.11.2025).

REFERENCES

1. Choudhury S. (2023). Mandal B. IOT Based Weather Analysis System Using ESP8266. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. Vol. 11, no. 6. P. 3899–3903. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.54365> (Last accessed: 25.11.2025).
2. Das M. (2018). Home Automation Using ESP8266. *Transactions on Machine Design (TMD)*. Vol. 6, no. 2. P. 47. <https://doi.org/10.6025/tmd/2018/6/2/43-46> (Last accessed: 25.11.2025).
3. LoRaWAN® L2 1.0.4 Specification. TS001-1.0.4 [Електронний ресурс] // LoRa Alliance. – Режим доступу: <https://resources.lora-alliance.org/getting-started-with-lorawan/ts001-1-0-4-lorawan-l2-1-0-4-specification> (дата звернення: 20.10.2025).
4. Rappaport T. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice* / T. Rappaport. – 2nd ed. – New Jersey : Prentice Hall, 640 p.
5. Sai Prasad D. S., Taluja A., Sharma V. (2023). Feedback System using ESP8266. *MR International Journal of Engineering and Technology*. Vol. 10, no. 1. P. 8–11. <https://doi.org/10.58864/mrijet.2023.10.1.2> (Last accessed: 25.11.2025).
6. Windesi P. K. A., Sampebua M. R., Kmurawak R. M. (2022). Iot-Based Home Automation Using Nodemcu Esp8266. *Jurnal Riset Informatika*. Vol. 4, no 4. P. 391–396. <https://doi.org/10.34288/jri.v4i4.431> (Last accessed: 25.11.2025).
7. Fresnel Zone: The Ultimate RF Engineering Guide [Електронний ресурс] // Number Analytics. Режим доступу: <https://www.numberanalytics.com> (дата звернення: 26.10.2025).
8. Master the Bandwidth Formula: Essential Guide for Engineers [Електронний ресурс] // Keysight Tech Guides. Режим доступу: <https://www.keysight.com/used/us/en/knowledge/formulas/bandwith-formula>.
9. LoRa Modulation Basics: application note AN1200.22. (2015). 2nd ed. [Електронний ресурс]. Semtech Corporation, 25 p. Режим доступу: <https://www.semtech.com> (дата звернення: 28.10.2025).
10. Analisis Traffic Data ESP8266 pada Perangkat Middleware / Unang Achlison та ін. *Elkom : Jurnal Elektronika dan Komputer*. 2022. Vol. 15, no. 1. P. 223–227. <https://doi.org/10.51903/elkom.v15i1.818> (Last accessed: 25.11.2025).

11. Gupta S., Lekhi S. (2021). Home Automation Using Packet Tracer and ESP8266. *International Journal Of Computers & Technology*. Vol. 21. P. 84–96. <https://doi.org/24297/ijct.v21i.9061> (Last accessed: 25.11.2025).
12. Julianti M. R., Sofia D., Kusuma A. R. (2022). Application of IoT for Filling and Monitoring Water Tanks Using NodeMCU ESP8266 and MQTT Protocol. *Jurnal Sisfotek Global*. Vol. 12, no. 2. P. 108. <https://doi.org/10.38101/sisfotek.v12i2.554> (Last accessed: 25.11.2025).
13. Julianti M. R., Sofia D., Kusuma A. R. (2022). Application of IoT for Filling and Monitoring Water Tanks Using NodeMCU ESP8266 and MQTT Protocol. *Jurnal Sisfotek Global*. Vol. 12, no. 2. P. 108. <https://doi.org/10.38101/sisfotek.v12i2.554> (Last accessed: 25.11.2025).
14. K M. D. N. (2025). Smoke Detection Security Using ESP8266. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. Vol. 13, no. 9. P. 741–743. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.74112> (Last accessed: 25.11.2025).
15. Magtibay O. B. M. (20219). Applying MQTT Protocol and Node-Red Programming in Designing IoT based Home Automation. *IJASC*. Vol. 1, no. 3. P. 7–12. <https://doi.org/10.22662/ijasc.2019.1.3.007> (Last accessed: 25.11.2025).
16. Salama M., Raslen B. (2024). MQTT in Action: Building Reliable and Scalable Home Automation Systems. *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*. <https://doi.org/35377/saucis...1504759> (Last accessed: 25.11.2025).

Nikolskiy V. V., Malakhov O. V., Nikolskiy M. V., Palagin O. N., Naydyonov A. I. SYSTEM FOR MICROCLIMATE PARAMETERS MONITORING OF THE VESSEL'S HOUSING AREAS

In existing modern vessel environmental monitoring systems, traditional wireless protocols such as Wi-Fi, Bluetooth and cellular networks do not meet the requirements for ensuring the necessary balance in the chain of energy consumption - coverage radius - cost of network deployment. As an alternative solution, which is described in the article, it is necessary to use such new scientific technologies as long-range modulation and its local network layer. They can be considered as key solutions that allow deploying networks on vessels with autonomous operation of final devices for up to several years. For the data transmission process in distributed systems for monitoring environmental parameters in the vessel's engine room, bandwidth modeling was performed and the system operating frequency was estimated. To activate all devices of the vessel's network, the use of the personalization method was proposed. An experimental assessment of the parameters describing the quality of the microcontroller start during test runs, the stability of the ADC operation, and the indicators of temperature, humidity and lighting sensors was obtained.

Key words: vessel's local area network; monitoring of microclimate parameters; system architecture; personalization method.

© Нікольський В. В., Малахов О. В., Нікольський М. В., Палагін О. М., Найдѐонов А. І.

Статтю прийнято до редакції 26.03.2026