



РОЗРОБКА МОБІЛЬНОЇ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ КЛІМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Ю. Шкоропад, М. Бешлей, Г. Бешлей, В. Голубець

Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Відповідальний за рукопис: М. Бешлей (e-mail: mykola.i.beshlei@lpnu.ua)

(Подано 15 березня 2023)

Розвиток мобільних кіберфізичних систем (МКФС) є перспективним напрямом досліджень і розробок для багатьох галузей, таких як промисловість, охорона здоров'я, домашня автоматизація та багато інших. Саме тому в роботі створено прототип МКФС на базі смартфона, що дає змогу збирати, обробляти і передавати дані з різних пристроїв і сенсорів у режимі реального часу в будь-якому місці. Спроектовано архітектуру мобільної кіберфізичної системи моніторингу кліматичних параметрів з можливістю оповіщення у Telegram-каналі. Запропоновано алгоритм інтелектуального аналізу та оптимізації процесів передавання даних для розробленого прототипу МКФС. Перевага розробленої системи – можливість визначити пріоритетність моніторингових параметрів, що дає змогу швидко реагувати на критичні зміни температури на об'єкті, де виконують вимірювання. Крім того, реалізовано унікальний метод вимірювання наскрізної затримки передавання даних із використанням часової мітки в мета-даних заголовка пакета. Метод дає змогу визначати час обробки пакетів кожного компонента МКФС та в умовах перевищення норм автоматично сповіщати про прийняття необхідних керуючих рішень. Підтримка такого методу в МКФС є особливо ефективним рішенням для моніторингу якості надання сервісу в режимі реального часу на об'єктах критичної інфраструктури. На основі досліджень встановлено, що запропонований алгоритм інтелектуального аналізу та оптимізації даних дав змогу зменшити кількість повідомлень у три рази та обсяг переданої інформації у 2,3 разу. В майбутньому розроблена система у поєднанні зі штучним інтелектом забезпечить надійне та якісне передавання даних навіть у непередбачуваних ситуаціях, що робить її перспективним рішенням для поліпшення якості життя людей та підвищення ефективності функціонування розумних інфраструктур у різних сферах.

Ключові слова: *мобільна кіберфізична система; сенсори; смартфон; IoT шлюз; Telegram; штучний інтелект; кліматичні параметри.*

УДК 621.391

1. Вступ

Кіберфізичні системи (КФС), які поєднують фізичний світ з кіберкомпонентами, є ключовим напрямом досліджень у галузі інформаційно-комунікаційних технологій [1]. КФС визначається як система, яка поєднує в собі обчислювальні та комунікаційні можливості з об'єктами моніторингу та/або управління у фізичному середовищі. Це визначення показує, наскільки важливе використання сенсорів і виконавчих механізмів, оскільки вони є мостом між кібернетичним і фізичним світом. Традиційні КФС беруть участь у багатьох інженерних проєктах, таких як розумні електромережі (Smart Grid), виробничі системи (Industrial system), аерокосмічні та оборонні системи. Сьогодні, з

розвитком повсюдного поширення мобільних пристроїв та технології Інтернету речей (IoT), мобільні кіберфізичні системи (МКФС) привертають все більше уваги [2]. Порівняно з КФС, які покладаються на стаціонарні та величезні обчислювальні машини, МКФС зосереджуються на своїй мобільності, яка може безперешкодно і повсюдно сприймати дані в повсякденному житті людей. Отже, МКФС можуть легше використовуватися в повсякденному житті кожної людини і ширше застосовуватися у фізичному світі.

Сьогодні МКФС є доволі перспективним напрямом досліджень та розроблення. Для багатьох галузей, таких як промисловість, енергетика, здоров'я, домашня автоматизація та багато інших, важливо мати можливість збирати та аналізувати дані в реальному часі [3]. Для прикладу розглянемо актуальність розроблення МКФС контролю клімату, яка може бути використана для моніторингу і керування умовами повітря, температури, вологості, освітлення та інших параметрів у різних приміщеннях, таких як офіси, аптеки, житлові приміщення, торгові центри, котельні системи, дата-центри тощо. Такі системи можуть містити сенсори, що зчитують дані про показники клімату, та програмне забезпечення для аналізу цих даних і прийняття рішень щодо регулювання умов у приміщенні. Завдяки мобільності такі системи можна переносити з одного місця в інше, щоб забезпечити оптимальні умови для людей та обладнання. Однією із переваг мобільних кіберфізичних систем контролю клімату є зменшення витрат на енергоспоживання. Наприклад, якщо система виявляє, що у приміщенні занадто висока температура, вона може автоматично знизити температуру кондиціонера, щоб зменшити витрати енергії та забезпечити комфортні умови для людей. Крім того, мобільні кіберфізичні системи контролю клімату можуть бути корисні для покращення якості повітря в приміщенні [4]. Наприклад, вони можуть автоматично ввімкнути вентиляцію, якщо рівень вуглекислого газу в повітрі перевищує норму, щоб забезпечити свіже повітря та зменшити ризик захворювання на дихальні шляхи.

З іншого боку, МКФС можна використовувати для критично важливих інфраструктур, таких як розумні електромережі та розумне промислове виробництво. Уявімо собі повністю автоматизовану фабрику Індустрії 5.0, оснащену численними сенсорами (руху, температури, вологості тощо), парком автоматизованих роботів і різноманітними пристроями [5]. Припустимо, роботи зайняті своїми повсякденними завданнями на заводі, а сенсори стежать за ситуацією загалом. Раптом один з сенсорів на основі моніторингу та інтелектуального аналізу температури сигналізує, що двигун на певній конвеєрній стрічці чомусь перегрівся. Локальний периферійний вузол отримує сигнал, і алгоритм AI/ML реалізує один зі сценаріїв реагування. Сценарій може зупинити двигун, подати охолоджувальну рідину, від'єднати двигун від транспортної смуги або запустити резервні двигуни. Така кіберфізична взаємодія мінімізує виробничі втрати і перенаправляє роботу на інші конвеєри. Усе це повинно відбуватися за частки секунди, щоб запобігти пожежі та багатомільйонним збиткам для виробника.

У цій роботі вважаємо, що МКФС, розгорнуті на смартфонах, можуть допомогти збирати, обробляти та передавати дані з різних пристроїв та давачів у режимі реального часу, виконуючи функції IoT шлюза та периферійної інтелектуальної аналітики одночасно. Цей вибір пов'язаний насамперед із такими функціональними можливостями сучасних смартфонів:

- Достатня обчислювальна потужність і великий обсяг пам'яті для локального зберігання інформації, оброблення та аналізу певних завдань.
- Різноманітні способи отримання та відображення різної інформації, зокрема сенсорні екрани, камери, GPS-чипи, динаміки, мікрофони.
- Підтримання різноманітних безпроводних каналів зв'язку – Wi-Fi, 2G/3G/4G/5G, NFC, Bluetooth тощо.
- Можливість підтримки та запуску власних програмних продуктів із використанням мов програмування високого рівня, необхідних для формування своєї логіки управління процесом збирання, оброблення та аналізу даних.
- Наявність каналів поширення додатків (Google Play Store та Apple App Store).
- Простий у використанні та зрозумілий інтерфейс для користувачів.

- Доступність на ринку з різними специфікаціями, що уможливило розгортання МКФС різного призначення, із урахуванням таких аспектів, як ціна пристрою та якість проєктованої системи.

- Для завдань, які потребують більше локальних обчислювальних ресурсів, ніж має смартфон, можна додатково використовувати підключення до хмарних сервісів із достатньою обчислювальною потужністю.

Зважаючи на цей контекст, пропонуємо інноваційне рішення щодо розгортання МКФС для моніторингу кліматичних параметрів, таких як температура та відносна вологість повітря, з використанням смартфона як IoT шлюза з підтримкою інтелектуального аналізу зібраних даних та оптимізації процесів їх передавання.

2. Розроблення архітектури мобільної кіберфізичної системи моніторингу кліматичних параметрів з оповіщенням в Telegram-каналі

Для виконання поставленого завдання щодо розгортання базової МКФС необхідні насамперед сенсор температури та вологості для моніторингу кліматичних умов, окремий або вбудований IoT шлюз для збирання даних, попередньої обробки, інтелектуального аналізу та передавання даних до хмарного сервера. Сервер зберігатиме дані у базі даних та використовуватиме Telegram бота для повідомлення користувачеві або групі користувачів у Telegram канал з актуальними значеннями кліматичних параметрів. Базову МКФС схему подано на рис. 1.

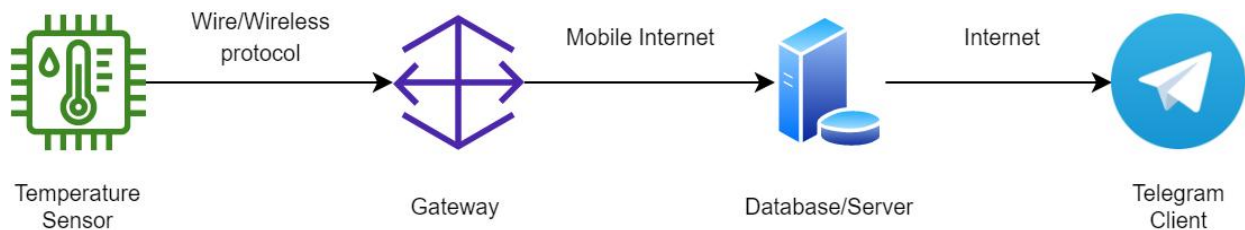


Рис. 1. Базова архітектура МКФС для моніторингу кліматичних параметрів

Сьогодні існує безліч готових рішень для IoT ринку. Проаналізувавши наявні рішення, ми дійшли висновку про деякі недоліки цих систем, такі як висока вартість, недостатня мобільність, відсутність передавання даних про вимірювання на відстань. Розроблена система не повинна мати цих недоліків. Одним із основних недоліків цих рішень є те, що ці системи зазвичай мають пропрієтарне програмне забезпечення із комерційних цілей, тобто рішення із власними протоколами та додатками, котрі практично неможливо змінити чи розширити без втручання самих розробників системи. Звичайно, що перевагою використання комерційних систем є готові додатки та програми, що робить їх привабливими для кінцевих користувачів, проте не завжди ці рішення підходять для всіх завдань, а тим більше коли від системи вимагається швидке і недороге розгортання із власною логікою управління процесом збирання, оброблення, аналізу та передавання даних. Серед варіантів, котрими можна скористатись, – варіант з одноплатними комп'ютерами, такими як Arduino чи Raspberry Pi, котрі чудово можуть впоратись з поставленим завданням щодо розгортання МКФС [6–8]. Проте ці рішення не завжди дешеві, не завжди наявні, також потребують часто додаткового налаштування із залученням кваліфікованого спеціаліста.

Щоб уникнути цих недоліків, пропонуємо використати звичайний смартфон як IoT шлюз, який стане універсальним інтерфейсом між інтернетом та сенсором та попередньо оброблятиме зібрані дані для інтелектуального аналізу та передавання моніторингових даних. Отже, МКФС на базі смартфона можуть забезпечити зручну та економічну платформу, яка полегшує складні та повсюдні сервіси між людиною та навколишнім фізичним світом у будь-який час і в будь-якому місці. Переваги використання смартфона як IoT шлюза для МКФС відображено на рис. 2.

На ринку є безліч різноманітних сенсорів температури та вологості. Вибір зупинили на сенсорі від компанії Xiaomi модель LYWSD03MMC як оптимальному рішенні. Цей сенсор підходить під задані вимоги, оскільки вимірює температуру, працює за Bluetooth протоколом, у нього малі розміри та невисока ціна (200 гривень), працює тривалий час автономно (пів року).

Для збереження даних із сенсора, а також оброблення запитів від Telegram клієнта за допомогою Telegram бота необхідні база даних і сервер. Для цієї задачі вибрано хмарну платформу Firebase, котра підтримується і розвивається Google. Firebase містить різні сервіси, такі як хмарні обчислення, база даних, аналітика, штучний інтелект, хостинг, авторизація, віддалене налаштування та багато інших сервісів. Істотною перевагою є також те, що сервіс пропонує безкоштовні тарифи, а це дає чудові можливості для виконання цього завдання. Firebase пропонує дві бази даних на вибір: Firestore та Realtime Database. Firestore – новіший сервіс, котрий пропонує більше функцій і переваг, тому для збереження вимірів температури та вологості ми вибрали саме цю базу даних.



Рис. 2. Переваги використання смартфона як IoT шлюза для МКФС

Для розроблення Telegram бота Telegram пропонує розробникам два методи, а саме `getUpdates` та `webhooks`. Спосіб `getUpdates` працює за технікою `long polling`, котрий здійснює запит до сервера, і не закриває з'єднання доти, доки не буде оновлення від сервера. Спосіб `webhooks` на противагу не робить запитів, а їх отримує від Telegram сервера і відповідає на них. Цей спосіб ефективніший, оскільки для отримання оновлень не потрібно тримати відкритим з'єднанням тоді, коли немає ніяких оновлень. Також перевагою цього методу є те, що він підходить під безсерверну модель обчислення (`serverless`). Ця модель обчислення на хмарних сервісах набагато дешевша та набагато краще масштабується, завдяки тому, що сервер запускається тільки за необхідності, й може запускатись паралельно, якщо потрібно обробляти паралельні запити. Firebase пропонує сервіс хмарні функції (`Cloud Functions`), котрий підійде для розміщення Telegram бота з методом `webhooks` для оновлень.

Для того, щоб смартфон у ролі IoT шлюза міг отримувати і передавати дані з сенсора на базу даних і робив це, коли пристрій працює у фоновому режимі (з вимкненим екраном), найкраще зробити андроїд-додаток. Для легшого і швидшого розроблення вибрано фреймворк `React Native`, котрий чудово працює із BLE та з `background mode` (фоновий режим).

Базовий процес роботи МКФС на основі смартфона можна описати так: сенсор LYWSD03MMC надсилає через Bluetooth дані про температуру та вологість на андроїд-додаток, котрий працює у фоновому режимі. Цей додаток через `websockets` надсилає дані на базу даних `Firestore`. Користувач за допомогою Telegram бота запитує дані, а `Cloud Function` надсилає оновлені дані з бази даних. Пропоновану архітектурну схему МКФС, розгорнуту на базі смартфона, подано на рис. 3.

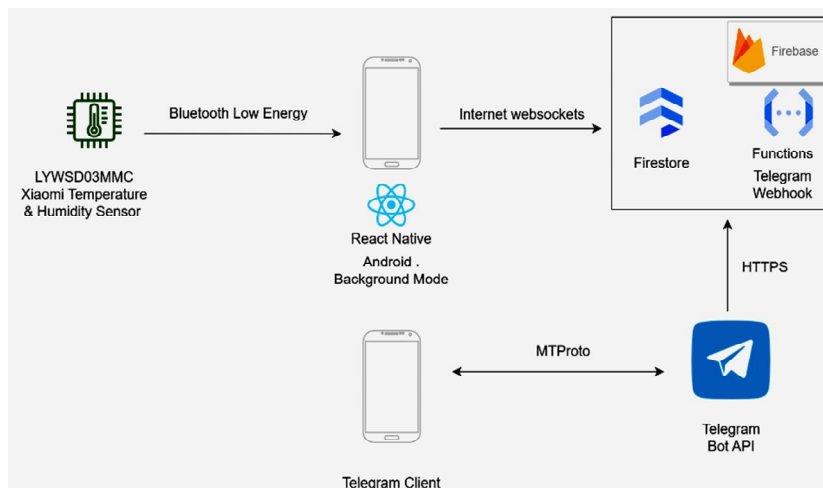


Рис. 3. Архітектурна схема пропонованої МКФС для моніторингу кліматичних параметрів

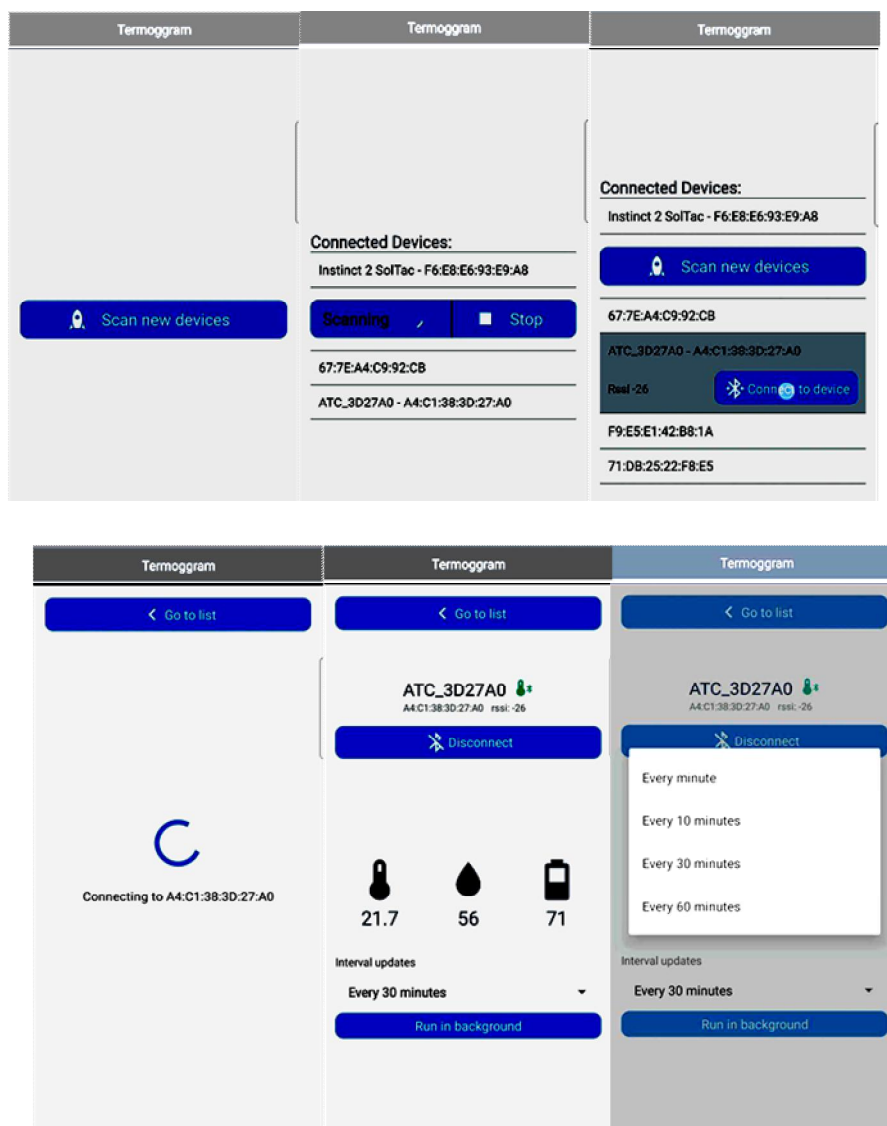


Рис. 4. Конфігурація та підключення сенсора моніторингу кліматичних параметрів до ілюза, розгорнутого на базі смартфона

Користувачу необхідно надати дозвіл на те, щоб додаток міг працювати у фоновому режимі для передавання даних із використанням Bluetooth. Користуватись додатком просто, спочатку він намагається знайти необхідний сенсор, після чого користувачу потрібно підключитись до нього. Після успішного з'єднання із сенсором додаток покаже актуальні значення із сенсора. На цій сторінці можна також налаштувати, як часто додаток отримуватиме і надсилатиме значення до бази даних. У такому випадку, чим частіше буде оновлюватись значення переданих даних, тим швидше розрядиться автономний акумулятор сенсора та шлюза, тому необхідно забезпечити інтелектуальне передавання даних для оптимізації кількості передавань. Далі користувач може перейти у Background Mode (фоновий режим) і додаток працюватиме у фоновому режимі. У цьому режимі телефон буде повільніше розряджатись. Після того як налаштовано шлюз разом із сенсором, будь-який користувач з доступом до інтернету може підписатись на оновлення показників сенсора за допомогою Telegram бота. Знімки екрана смартфона із підключенням та базовими налаштуваннями показано на рис. 4.

На рис. 5 наведено результати моніторингу кліматичних параметрів та рівня заряду шлюза, сповіщені через Telegram-канал.

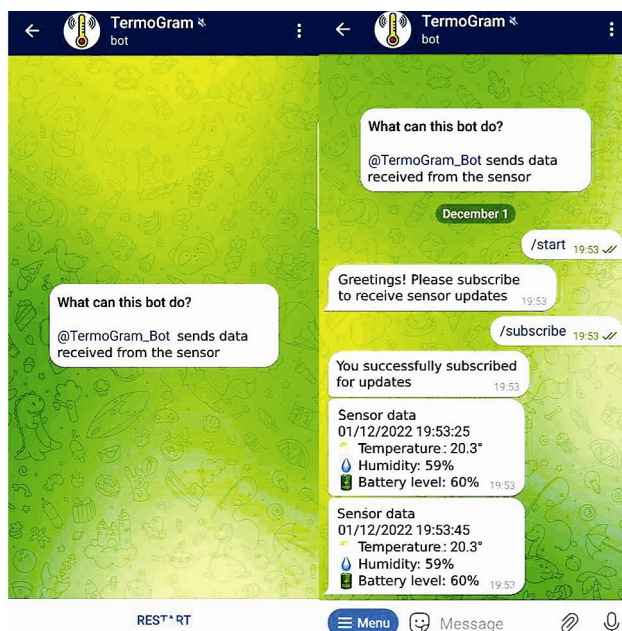


Рис. 5. Результати моніторингу параметрів від МКФС, повідомлені в телеграм-каналі

3. Розроблення алгоритму інтелектуального аналізу та оптимізації процесів передавання даних для запропонованого прототипу мобільної кіберфізичної системи

Оскільки час автономної роботи цієї системи залежить від акумулятора смартфона, а продуктивність – від трафіку, що передається мережею, доцільно оптимізувати процеси збирання та передавання даних для економії ресурсів. У традиційних системах дані надсилають із певним фіксованим інтервалом, який встановлює виробник. На відміну від відомих, у запропонованій нашій МКФС інтервал можна вибирати довільний. Проте пропонуємо для нашої системи реалізувати частково інтелектуальний процес передавання даних, зокрема припускаємо, що якщо впродовж доби не відбувались значні зміни коливання температури, то дані не будуть передаватись. Краще їх надсилати тільки тоді, коли дані змінюються не менш ніж на критичний поріг, наприклад 0,1 градус. У цьому випадку користувач у Telegram боті не отримуватиме сповіщень, якщо температура не змінилась, а система за рахунок меншої кількості надісланих повідомлень буде довше працювати автономно.

Також для розробленої МКФС можна налаштувати оптимальний процес передавання моніторингових даних. Таке рішення доцільне, оскільки один пакет даних містить інформацію для одного вимірювання, тому варто припустити, що дані не слід надсилати окремо, а єдиним пакетом, скажімо для п'яти вимірювань, які надалі можна згрупувати в межах одного агрегованого пакета. У цьому випадку саме повідомлення стає меншим, оскільки більше не дублюються заголовки пакетів, зменшується мережевий трафік, а отже, підвищуються продуктивність і автономність системи.

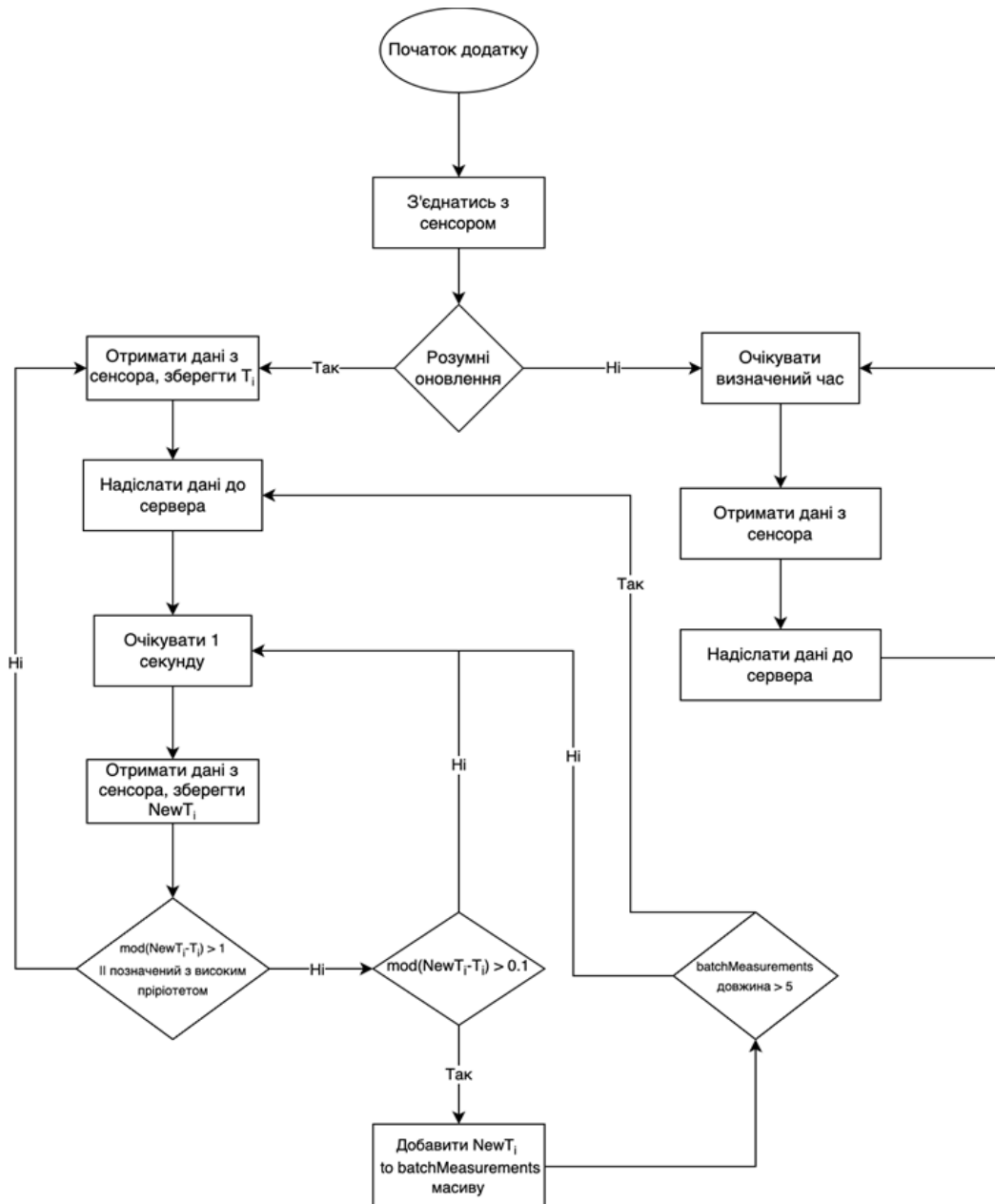


Рис. 6. Алгоритм інтелектуального аналізу та оптимізації процесів передавання даних для МКФС

Оскільки система призначена для роботи з декількома сенсорами одночасно, деякі з них моніторять температуру на критичніших і важливіших об'єктах, відповідно вимірювання з цих сенсорів потрібно здійснювати частіше та з вищим пріоритетом. За допомогою додатка користувач може визначити пріоритетність цих сенсорів, що дасть змогу шлюзу враховувати їх під час оброблення вимірювань і надсилання пакетів. Для такого випадку ми розробили власну логіку передавання даних для шлюзу, яка, на відміну від відомих, може визначити пріоритетність вимірювань. Як

вже зазначалося, в системі зберігаються лише ті вимірювання, різниця між якими перевищує 0,1 градуса. Проте, якщо різниця становить більше від 1 градуса, то вимірювання вважається критично важливим та відповідно пріоритетним і буде надіслане відразу, поза чергою. Це дасть змогу оператору системи швидко реагувати на критичні зміни температури на об'єкті, де виконують вимірювання. Отже, система буде готова ефективно працювати в будь-якому стані, навіть за непередбачуваних ситуацій, забезпечуючи надійне та точне передавання даних.

Узагальнений алгоритм інтелектуального аналізу зібраних даних та оптимізації процесів передавання даних, який програмно реалізується на смартфоні, що виконує роль шлюзу для сенсорів МКФС, наведено на рис. 6. Для того, щоб користувач міг налаштувати у разі потреби інтелектуальне оновлення або чи є цей давач пріоритетним, він повинен попередньо виконати налаштування в додатку на сторінці сенсорів (див. рис. 6).

Після програмної реалізації згаданого вище алгоритму в додатку для конфігурації МКФС передбачено можливість встановлювати пріоритетність повідомлення (рис. 7, а), а також доступні три типи повідомлень: звичайне (рис. 7, б), пріоритетне (рис. 7, в) і групове (рис. 7, г).

На рис. 8 подано розроблений прототип МКФС моніторингу кліматичних параметрів, де на ноутбучі – код програми, що реалізує запропонований вище алгоритм, та монітор, на якому відображається Telegram чат із ботом та база даних Firebase, у якій зберігаються всі вимірювання.

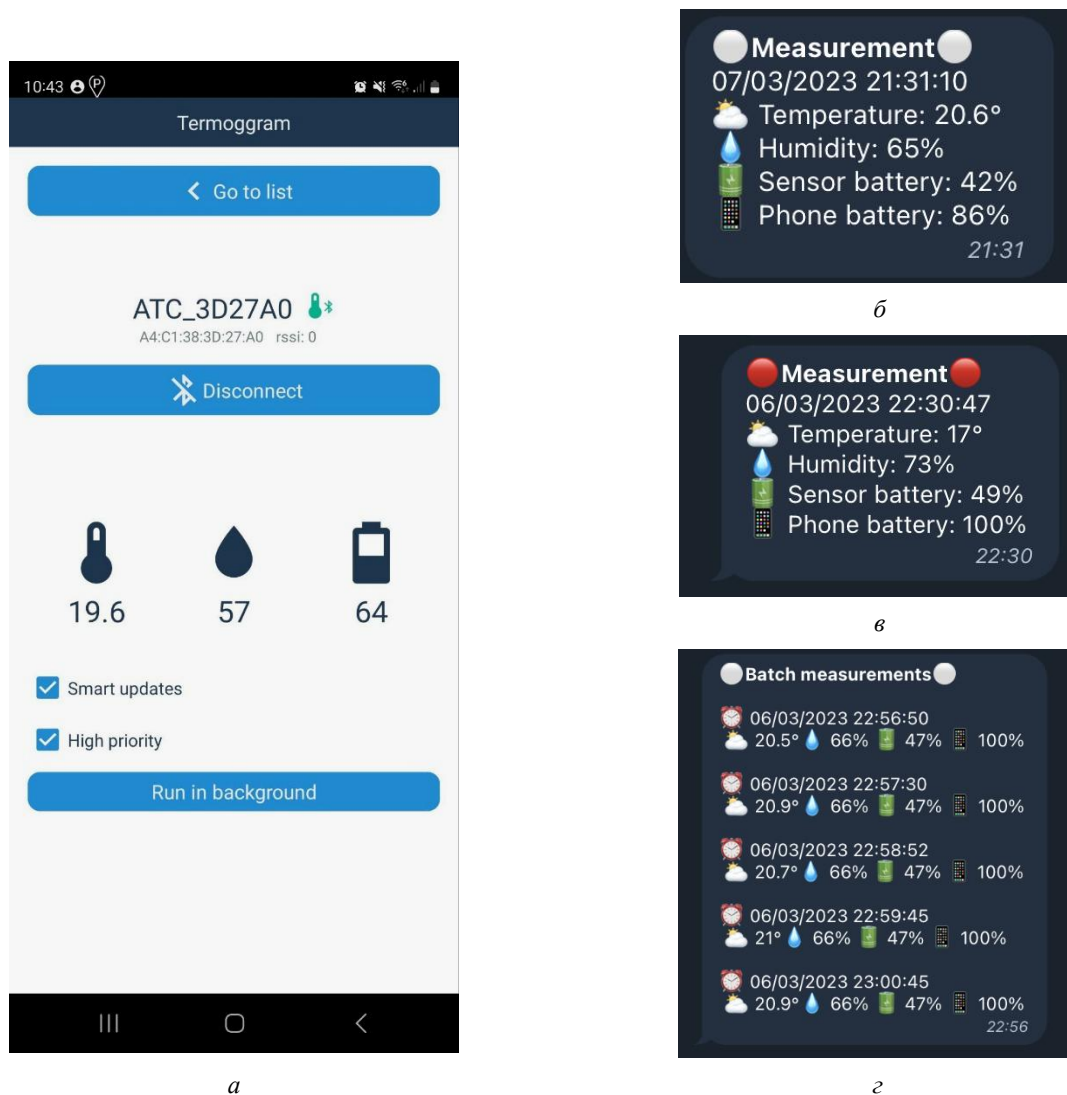


Рис. 7. Результати моніторингу кліматичних параметрів в умовах реалізації інтелектуального алгоритму в МКФС

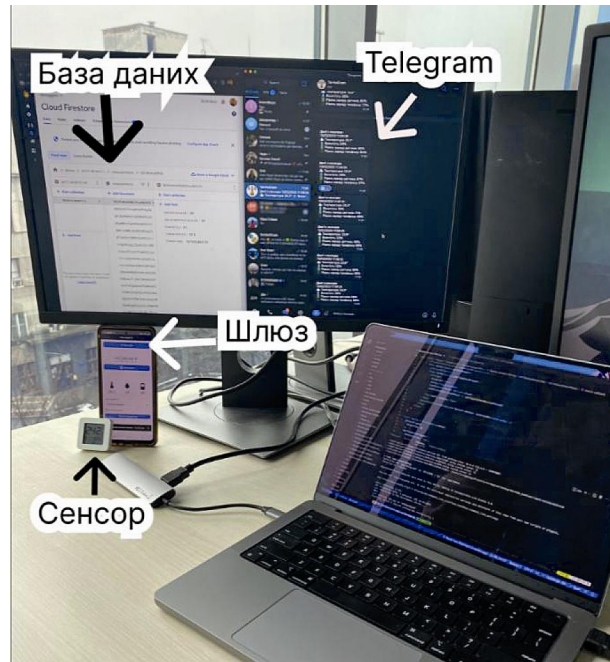


Рис. 8. Прототип розробленої мобільної кіберфізичної системи моніторингу кліматичних параметрів

4. Дослідження ефективності функціонування розробленої МКФС з інтелектуальним моніторингом кліматичних параметрів

Розроблено метод оцінювання ефективності функціонування реалізованого прототипу мобільної кіберфізичної системи за критерієм наскрізної затримки передавання даних, що є одним із ключових параметрів моніторингу якості надання сервісів реального часу критично важливої інфраструктури. Характерною особливістю пропонованої МКФС системи є використання розробленого унікального методу вимірювання наскрізної затримки передавання даних із додаванням часової мітки до метаданих заголовка пакета (рис. 9), що дає змогу визначати час обробки пакетів кожного компонента мережі та в умовах перевищення норм автоматично сповіщати про прийняття необхідних керуючих рішень, які для різного призначення систем можуть відрізнятися [10]. Для інтелектуального прийняття керуючих відповідних рішень у подальшій роботі ми плануємо використати на шлюзі обробки модуль на основі штучного інтелекту.

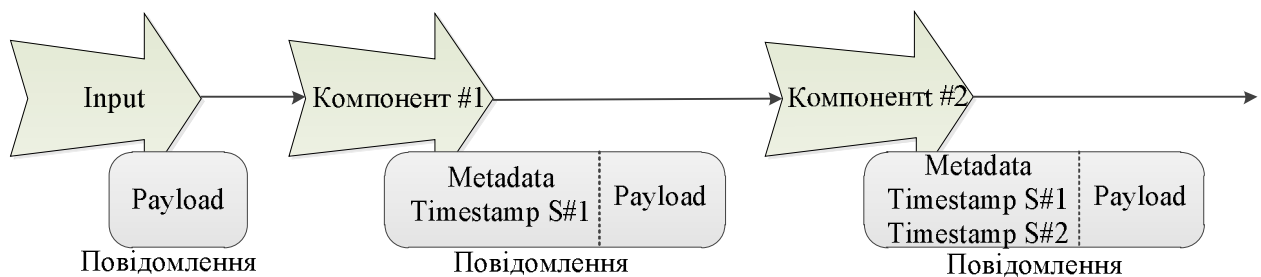


Рис. 9. Принцип методу вимірювання затримки в МКФС

Запишемо формулу для визначення наскрізної затримки повідомлення між всіма компонентами:

$$delay_{m2-m1} = timestamp_{m2} - timestamp_{m1}, \quad (1)$$

де змінною $timestamp$ відображають позначку часу; m – компонент прототипу МКФС.

Щоб продемонструвати роботу запропонованого методу, ми оцінили, наскільки швидко вимірювання формуються у повідомлення до моменту, як користувач його отримає у Telegram месенджері. Для цього увімкнули часову мітку (timestamp), встановлену в момент вимірювання температури з сенсора. Після відправки цього вимірювання у повідомленні часову мітку ввели у метадані повідомлення. Після того, як повідомлення отримає користувач, можна дізнатись час його одержання. Відповідно різниця цих двох часових міток вказуватиме на час, необхідний для того, щоб користувач отримав значення з сенсора. Середній час затримки під час проведення експерименту становив 3,7 с. Проте оцінювання за середнім значенням ще не дає змоги зрозуміти, де саме в системі повідомлення затримується найдовше. Тому для цього необхідно ввести ще додаткові проміжні часові мітки у системі. Відповідно ми встановили такі мітки:

- на сенсорі під час вимірювання температури;
- на Android шлюзі під час формування повідомлення (Gateway);
- у базі даних Firebase після збереження повідомлення (Firebase);
- на Cloud функції перед відправленням до Telegram бота (Cloud);
- після відправлення у Telegram бот, час отримання повідомлення (Telegram);

Максимальна загальна затримка в системі під час дослідження становила 10 с, що є дуже добрим результатом. Графік абсолютних затримок подано на рис. 10.

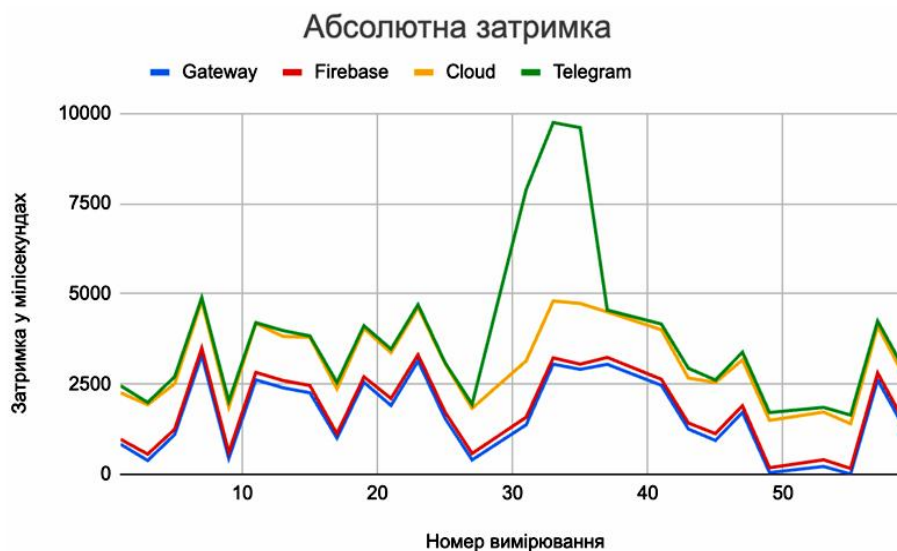


Рис. 10. Моніторинг затримок повідомлень на кожному внесеному компоненті розробленої МКФС

Також, щоб краще зрозуміти співвідношення затримок, ми побудували відносний графік затримок на рис. 11. З цього графіка видно, що більша частина затримки – це час від моменту збереження запису в базі даних до моменту, коли користувач отримає його в Telegram месенджері. Значна частка у кінцеву затримку повідомлення вноситься під час передавання від сенсора до шлюза, оскільки дані передаються через Bluetooth канал зв'язку, який під час дослідження зазнавав впливу певних зовнішніх завад, через зміну положення сенсора. Мета цього дослідження – оцінити стабільність функціонування системи за критерієм затримки повідомлень у різних сценаріях розгортання. Зокрема, на рис. 11 бачимо, що вимірювання повідомлення під номером 55 зазнає мінімальної затримки повідомлення під час передавання від сенсора до шлюза через Bluetooth канал зв'язку, що пояснюється хорошим рівнем сигналу та розташування сенсора до шлюза. Зокрема така конфігурація система повинна бути властива об'єктам критичної інфраструктури, яким необхідно забезпечити мінімальні затримки повідомлень. Також, оскільки експерименти здійснювались в умовах різної мобільності системи (зміна локації МКФС), усі отримані значення затримок повідомлень забезпечено у межах допустимих норм, що характерно для більшості випадків використання системи людьми у повсякденному житті.

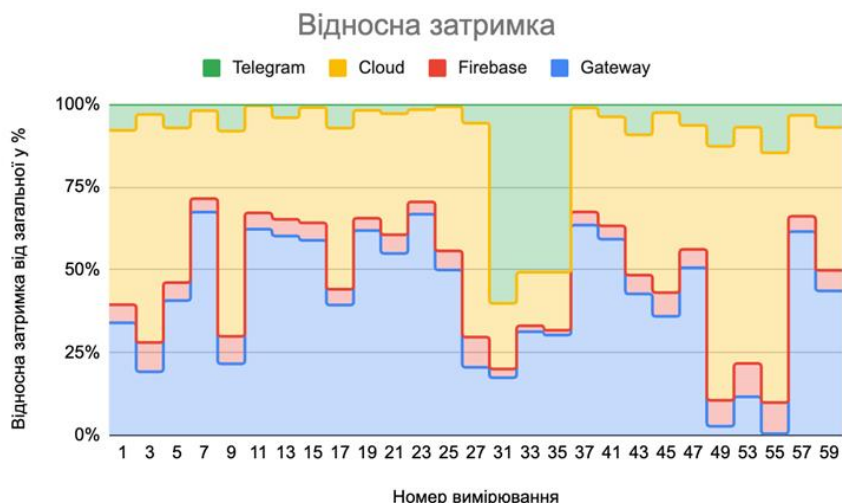


Рис. 11. Моніторинг відносних затримок повідомлень між компонентами розробленої МКФС

Середні затримки на всіх рівнях наведено в таблиці.

Середні значення затримок, мілісекунд

Шлюз	База даних	Бекенд Сервер	Telegram
1792	1965	3358	3790

Загалом із рис. 11 можна зробити висновок, для кожного компонента системи є певна варіація внесеної затримки, пов'язаної із випадковими зовнішніми та внутрішніми факторами їх функціонування. У майбутньому заплановано використати бібліотеку штучного інтелекту TensorFlow Lite [9] для навчання системи стосовно її поведінки у різні моменти часу за критерієм затримки передавання повідомлень. Це дасть змогу на основі прогнозованих значень затримок, внесених у повідомлення певним компонентом системи, інтелектуально приймати керуючі рішення. Зокрема, така інтеграція штучного інтелекту в розроблену МКФС дасть змогу саму її зробити ефективною, самооптимізованою та самоадаптивною в умовах різних зовнішніх та внутрішніх факторів впливу.

Ми також дослідили ефективність роботи режиму інтелектуального аналізу даних, маючи на меті зменшити кількість однотипних повідомлень і знизити навантаження на систему. Під час експерименту було виявлено, що у випадку інтелектуальних оновлень кількість відправлених повідомлень була втричі меншою – 18 проти 6 повідомлень на годину (рис. 12). Оскільки інтелектуальні оновлення поділяють на пріоритетні, які містять одне повідомлення, та групові, то кількість відправлених повідомлень у середньому становила 11 повідомлень за годину (рис. 13).

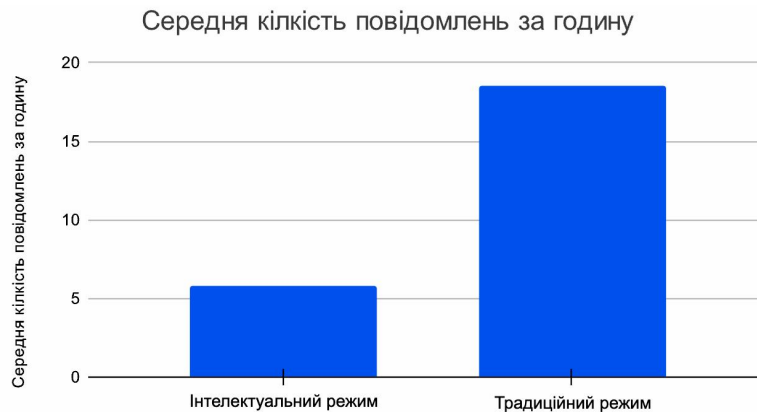


Рис. 12. Порівняння середньої кількості переданих повідомлень за годину в традиційному та інтелектуальному режимах роботи МКФС

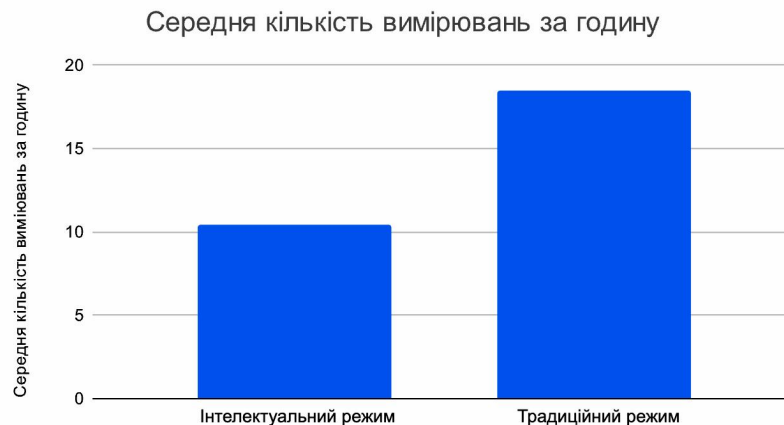


Рис. 13. Порівняння кількості вимірювань за годину в традиційному та інтелектуальному режимах роботи МКФС

Також, крім затримок, важливим показником є кількість переданого через мережу трафіку. Середній розмір одного повідомлення в інтервальному режимі – 134 байта. Нагадаємо, що в цьому режимі одне повідомлення містить одне вимірювання. Згідно із рис. 13, за годину в середньому надсилається 18 повідомлень, що означає $18 \times 134 = 2412$ байта. У інтелектуальному режимі було надіслано три повідомлення, два звичайні та одне пріоритетне. Відповідно два звичайні містять по п'ять вимірювань кожне, і розмір одного такого пакета 446 байта. Тому отримуємо $446 \times 2 + 1 \times 134 = 1026$ байт, тобто у 2,3 рази менше обсягу переданої інформації, ніж у інтервальному режимі.

Висновки

Останніми роками можливості сучасних мобільних пристроїв істотно зросли. Ці можливості, такі як значні обчислювальні ресурси, декілька технологій зв'язку, різноманітні сенсорні модулі та підтримка мов програмування високого рівня, дають змогу на базі смартфонів розгорнути мобільні кіберфізичні системи (КФС) у нашому повсякденному житті. Саме тому в роботі ми запропонували унікальне рішення щодо розгортання МКФС для моніторингу кліматичних параметрів, таких як температура та відносна вологість повітря, із використанням смартфона як IoT шлюза, що підтримує інтелектуальний аналіз та оптимізацію процесів передавання даних. Для цього реалізовано архітектуру мобільної кіберфізичної системи моніторингу кліматичних параметрів з Telegram оповіщеннями. Запропоновано алгоритм інтелектуального аналізу та оптимізації процесів передавання даних для розробленого прототипу мобільної кіберфізичної системи. На основі цього алгоритму ми реалізували інтелектуальну логіку передавання даних для МКФС, яка, на відміну від відомих, дає можливість визначати пріоритетність вимірювань, щоб швидко реагувати на критичні зміни температури на об'єкті, де відбуваються вимірювання. Характерною особливістю запропонованої МКФС системи є використання унікального методу вимірювання наскрізної затримки передавання даних із додаванням часової мітки до метаданих заголовка пакета, що є одним із ключових параметрів моніторингу якості надання сервісів реального часу критично важливої інфраструктури. Ми також дослідили ефективність роботи алгоритму інтелектуального аналізу та оптимізації даних, що має на меті зменшити кількість однотипних повідомлень і знизити навантаження на систему. За результатами виконаного експерименту виявлено, що за використання запропонованого інтелектуального алгоритму кількість відправлених повідомлень зменшується в три рази та у 2,3 рази обсяг переданої інформації.

Список використаних джерел

- [1] Y. Guo, X. Hu, B. Hu, J. Cheng, M. Zhou and R. Y. K. Kwok, "Mobile Cyber Physical Systems: Current Challenges and Future Networking Applications", in *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 12360–12368, 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2782881.

- [2] Y. Zhou, F. R. Yu, J. Chen and Y. Kuo, "Cyber-Physical-Social Systems: A State-of-the-Art Survey, Challenges and Opportunities", in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 22, No. 1, pp. 389–425, Firstquarter, 2020. DOI: 10.1109/COMST.2019.2959013.
- [3] E. Pop, D. Gifu and M. A. Moisescu, "Cyber-Physical Systems Based Business Models", 2022 *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)*, Cluj-Napoca, Romania, 2022, pp. 1–6. DOI: 10.1109/AQTR55203.2022.9802061.
- [4] S. Suganyadevi, S. S. Priya, R. Menaha, S. Sathiya, P. Jha and S. B. S, "Smart Healthcare in IoT using Convolutional Based Cyber Physical System", 2022 *IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon)*, Mysuru, India, 2022, pp. 1–6. DOI: 10.1109/MysuruCon55714.2022.9972679.
- [5] H.-C. Huang, C.-H. Tsai, and H.-C. Lin, "Development of 5G cyber-physical production system", *Int. J. Networked Distrib. Comput.*, 2022.
- [6] H. Varshney, A. S. Allahloh and M. Sarfraz, "IoT Based eHealth Management System Using Arduino and Google Cloud Firestore", 2019 *International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, Aligarh, India, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/UPCON47278.2019.8980238.
- [7] C. Xie, "Building a cyber-physical system for developing IoT apps", *Medium*, 21-Feb-2019 [Online]. Available: <https://charlesxie.medium.com/building-a-cyber-physical-system-to-simplify-iot-app-development-f3579b7916dc>. [Accessed: 15-Mar-2023].
- [8] Z.-Y. Bai and X.-Y. Huang, "Design and implementation of a cyber physical system for building smart living spaces", *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, Vol. 8, No. 5, p. 764186, 2012.
- [9] TensorFlow lite for android", *TensorFlow*. [Online]. Available: <https://www.tensorflow.org/lite/android>. [Accessed: 15-Mar-2023].
- [10] M. Beshley, N. Kryvinska, H. Beshley, O. Kochan, and L. Barolli, "Measuring End-to-End Delay in Low Energy SDN IoT Platform", *Computers, Materials & Continua*, Vol. 70, No. 1, pp. 19–41, 2021.

DEVELOPMENT OF A MOBILE CYBER-PHYSICAL SYSTEM FOR INTELLIGENT MONITORING OF CLIMATIC PARAMETERS

Yuriy Shkoropad, Mykola Beshley, Halyna Beshley, Volodymyr Holubets

Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine

The development of Mobile Cyber-Physical Systems (MCPS) is a promising research and development direction for many industries, such as manufacturing, healthcare, home automation, and many others. That is why a prototype MCPS based on a smartphone has been developed to collect, process, and transmit data from various devices and sensors in real-time, anywhere. The architecture of a mobile cyber-physical system for monitoring climatic parameters with telegram notifications has been designed. An algorithm for intelligent analysis and optimization of data transmission processes has been proposed for the developed MCPS prototype. The advantage of the developed system is the ability to determine the priority of monitoring parameters, which allows for a quick response to critical temperature changes at the object where the measurements are taken. Additionally, a unique method for measuring end-to-end data transmission delay using a timestamp in the packet header metadata has been implemented. This method enables the determination of the processing time of each component of the MCPS and, in case of exceeding the norms, automatically notifies about the necessary control decisions. Supporting such a method in MCPS is a particularly effective solution for monitoring the quality of real-time service delivery in critical infrastructure objects. Based on the conducted research, it has been established that the proposed algorithm for intelligent data analysis and optimization has reduced the number of messages by 3 times and the amount of transmitted information by 2.3 times. In the future, the developed system, in combination with artificial intelligence, will ensure reliable and high-quality data transmission even in unpredictable situations, making it a promising solution for improving the quality of life and the efficiency of smart infrastructures in various fields.

Key words: mobile cyber-physical system; sensors; smartphone; IoT gateway; Telegram; artificial intelligence; climate parameters.