

А. О. Мельник, Д. В. Лихотоп, А. В. Гребеняк  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електронних обчислювальних машин

## ВБУДОВАНА ЛОКАЛЬНА КОМП'ЮТЕРНА WI-FI МЕРЕЖА З КОНФІГУРУВАННЯМ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЇ BLUETOOTH

© Мельник А. О., Лихотоп Д. В., Гребеняк А. В., 2017

Розроблено та досліджено принципи побудови мобільної локальної мережі для кіберфізичних систем на базі мікропроцесорів з безкабельним інтерфейсом WI-FI, яка націлена на високу швидкість приймання–передавання даних між клієнтами, а також на кількість клієнтів до 16 на одну точку доступу, які є одночасно під'єднаними і мають можливість передавати дані.

Зокрема, досліджено проблему організації комутації клієнтів мережі між собою. Запропоновано формати пакетів даних для пересилання від клієнта до клієнта за ідентифікатором, від клієнта до групи клієнтів одного типу, ідентифікації клієнта – для внесення повної інформації про пристрій, та налаштувань клієнта – для надсилання налаштувань конфігураційного файлу клієнтові за ідентифікатором.

Реалізовано функції для розділення “склеєних” пакетів під час пересилання, всіляких перевірок на цілісність пакета даних та правильність його формування.

Запропоновано використовувати технологію Bluetooth Low Energy (BLE) як додатковий канал для конфігурації мережі, а саме: налаштування назви безкабельної мережі, паролю доступу, режимів функціонування модуля (автовизначення, точка доступу, станція), режимів шифрування, обмеження доступу з інших пристроїв, незалежно від налаштувань режиму роботи модуля в цей час. Розглянуто верхні рівні стека протоколів Bluetooth (GAP, GATT), специфікацію та основні аспекти для побудови пристрою на BLE.

Розроблено додаток для ОС Android, який спрощує роботу з мережею та разом з нею утворює систему керування та моніторингу. Наведено приклад додатка, який є користувацьким інтерфейсом для конфігурування основних налаштувань мережі.

Ключові слова: вбудована локальна комп'ютерна Wi-Fi мережа, кіберфізична система, технологія Bluetooth Low Energy.

A. O. Melnyk, D. V. Lykhotop, A. V. Grebeniak  
Lviv Polytechnic National University,  
Computer Engineering Department

## EMBEDDED LOCAL WI-FI COMPUTER NETWORK WITH CONFIGURATION USING BLUETOOTH TECHNOLOGY

© Melnyk A., Lykhotop D., Grebeniak A., 2017

The design principles of a mobile LAN for cyber-physical systems based on microprocessors with a WI-FI wireless interface, aimed at high speed data receiving and transmission between customers, as well as the number of clients up to 16 per access point that are simultaneously connected and have the ability to transmit data are developed and investigated.

**In particular, the problem of switching network clients among themselves is investigated. The offered formats of data packets for forwarding from customer to customer by identifier, from client to client group of one type, client identification – for complete information about the device, and client settings – for sending client configuration file settings by ID.**

**Functions to separate “packaged” packages when forwarding, all possible checks on the integrity of the data packet and the correctness of its formation are implemented.**

**The Bluetooth Low Energy (BLE) technology as an additional channel for network configuration is proposed to use, namely: configuring the name of a non-cable network, access password, module operation modes (autodetection, access point, station), encryption modes, restrictions on access from other devices, regardless of module mode settings in current time. The upper levels of the Bluetooth protocol stack (GAP, GATT), the specification, and the main aspects to blend the device into BLE are considered.**

**An Android application that simplifies the work of the network and, together with it, creates a management and monitoring system is developed. An example application, which is a user interface for the basic network settings configuring is provided.**

**Key words: embedded local wi-fi computer network, cyber-physical system, Bluetooth Low Energy technology**

### **Вступ**

Кіберфізичні системи (КФС) як інтеграція процесів фізичного світу та кібернетичних засобів, які організують виконання вимірювань чи спостереження за цими процесами, збирання та передавання даних, опрацювання даних, їх захищене зберігання та обмін, організацію та здійснення впливів на ці процеси, сьогодні стрімко набувають популярності [1–3]. Об'єднання компонентів кібернетичних засобів у межах однієї системи дає змогу отримувати якісно нові результати, які можна використовувати для створення широкого спектра принципово нових наукових, технічних та сервісних засобів.

КФС мають широкий і далекосяжний спектр сфер застосування, до яких належать аерокосмічне обладнання, надійні медичні пристрої та системи, виробництво, контроль руху, екологічний контроль, контроль над критичною інфраструктурою, автоматизація збирання даних промислового виробництва, автоматизоване управління процесами, споживання та відновлення енергії, енергосистеми наступного покоління, системи захисту, розподілена робототехніка, цивільна інфраструктура тощо. В майбутньому вони допоможуть людству автоматизувати багато аспектів життя, спростити рутинні операції та й просто зробити життя комфортнішим і приємнішим.

Сучасна елементна база тільки сприяє цьому. Якщо іще декілька років тому завдання управління пристроєм з мережі породжувало необхідність використання високопродуктивних процесорів, що збільшувало вартість кінцевого виконавчого пристрою в рази, то тепер є можливість використовувати дешеві, прості й ефективні вбудовані засоби, ринок яких постійно зростає.

Всі пристрої КФС, незалежно від платформи, повинні мати можливість взаємодіяти з іншими пристроями і сервісами. Саме ця передумова є однією з основних причин трансформації ринку вбудованих систем. Сьогодні він рухається у напрямі створення інтелектуальних систем: давачів, машин, механізмів, приладів тощо, об'єднаних у безкабельні локальні комп'ютерні мережі, конфігурування яких здійснюють також за допомогою безкабельних технологій.

### **Огляд літературних джерел**

КФС повинні мати можливість об'єднуватися в локальну безкабельну мережу, яка може працювати за відсутності глобальної мережі Інтернет, для розв'язання та перерозподілу спільних задач, обміну інформацією між собою тощо [1–3].

Безкабельні мережі з кожним днем стають все популярнішими, і цей факт незаперечний. Зростання популярності безкабельного обладнання для кінцевих користувачів можна порівнювати із підвищенням рівня життя.

Передусім порівняно з традиційними кабельними мережами, у них є низка серйозних переваг, головною з яких, звичайно ж, є простота розгортання. Безкабельна мережа не потребує прокладання кабелю, також важко заперечити такі переваги, як мобільність користувачів в зоні її дії та простоту під'єднання до неї нових користувачів, у цьому випадку і мобільність самої мережі, яка може розгортатись та самоорганізовуватись без прив'язки до місцезнаходження (бути переносною) [4–5].

### Постановка задачі

Під час проектування та створення мобільних систем, які складаються з декількох залежних функціонально пристроїв, за відсутності можливості доступу до глобальної мережі, постає проблема їхньої комунікації для обміну між собою потрібною для роботи інформацією. Просте оснащення цих пристроїв системи безкабельним Wi-Fi модулем не вирішує проблеми, оскільки, для прикладу, смартфони, планшети тощо, можуть бути під'єднані в один момент часу лише до однієї точки доступу Wi-Fi. Тобто, за потреби дистанційного налаштування чи керування, буде встановлено доступ лише до одного пристрою, а для керування іншим пристроєм потрібно буде під'єднатися до іншої точки доступу.

Для забезпечення повноцінного функціонування системи потрібно побудувати мобільну локальну Wi-Fi мережу, в якій один з пристроїв виконуватиме функції точки доступу з сервером, а інші будуть станціями-клієнтами, зокрема мобільні пристрої, з яких відбувається керування, налаштування та моніторинг. Водночас мережа повинна бути простою в під'єднанні до довільної системи, малоенергозатратною, а також з низькою ціною комплектуючих.

Актуальною концептуальною проблемою також є зміна основних налаштувань та режимів роботи мережі незалежно від встановленого режиму роботи модуля. Проблема полягає у тому, що для конфігурування мобільної локальної Wi-Fi мережі немає іншого каналу передавання даних, окрім того ж Wi-Fi, що обмежує функціональність і гнучкість системи.

У роботі буде розглянуто основні особливості функціонування технології Bluetooth Low Energy (BLE), наведено приклади формування основних сервісів та характеристик для конфігурування мобільної локальної мережі за допомогою BLE, та подано приклад додатка, який є користувацьким інтерфейсом.

### Основні результати досліджень

Технологія Bluetooth Low Energy (BLE) з низьким енергоспоживанням – це версія специфікації ядра безкабельної технології Bluetooth, найістотнішою перевагою якої є мале енергоспоживання (пікове, середнє та в режимі простою). Пристрої, що використовують BLE, споживають менше енергії, ніж інші Bluetooth-пристрої попередніх поколінь.

Ця версія специфікації Bluetooth уможливило підтримання широкого діапазону додатків і зменшує розмір кінцевого пристрою для зручного використання у галузях охорони здоров'я, фізкультури і спорту, охоронних систем і домашніх розваг.

Реалізація Bluetooth Low Energy є одним із найкращих рішень для пристроїв кіберфізичних систем. Специфікація Bluetooth 4.0 (і пізніші) фактично визначає дві безкабельні технології: BR / EDR (класичний Bluetooth, що розвивається, починаючи з першої версії стандарту) і Bluetooth Low Energy. Пристрої, в яких застосований BLE, можуть бути як дворежимними BR / EDR / BLE (називаються Bluetooth Smart Ready), сумісними з класичними Bluetooth-пристроями, так і однорежимними BLE (Bluetooth Smart).

Всі відмінності версії 4.2 від попередньої стосуються саме поліпшень у частині BLE: збільшення швидкості, можливість передавання IP протоколу і HTTP трафіку, посилення криптографічного захисту.

**Стек протоколів BLE** складається з двох програмних частин: Host і Controller. Програмна частина Host займається високорівневими функціями організації та управління даними, під'єднаннями, а програмна частина Controller керує фізичною периферією, працює із секретними ключами і займається іншими низькорівневими функціями. Названі частини з'єднані програмним

інтерфейсом HCI (Host Controller Interface). У реалізації для мікроконтролера обидві частини працюють на одному чипі, а інтерфейс HCI перетворюється просто на пряме передавання даних.

По суті програміст бачить кілька наборів API, які працюють на рівні Host, які названі GATT, GAP, L2CA, SMP, HCI. За допомогою GAP API встановлюється режим роботи пристрою – Central, Peripheral, Observer, Broadcaster і з'єднання, коли потрібно. А за допомогою GATT API виконується безпосереднє передавання і приймання корисних даних та їх розбирання.

Основними блоками Bluetooth-пристроїв є:

1. Додаток, який реалізує корисну для кінцевого користувача логіку роботи.

2. Головний пристрій, хост, який надає верхні рівні стека протоколів Bluetooth. Він містить такі протоколи:

- GAP (Generic Access Profile) – профіль загального доступу;
- GATT (Generic Attribute Profile) – профіль загальних атрибутів;
- L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol) – протокол логічного з'єднання та адаптації;

• ATT (Attribute Protocol) – протокол атрибутів;

• SM (Security Manager) – менеджер безпеки;

• HCI (Host Controller Interface) – інтерфейс хост-контролер, частина на боці хоста.

3. Контролер займається нижніми рівнями Bluetooth. Він містить такі протоколи:

• HCI – інтерфейс хост-контролер з боку контролера;

• LL (Link Layer) – рівень з'єднання;

• PHY – фізичний рівень.

**Протокол атрибутів (ATT)** є основою для обміну даними між пристроями BLE. Він визначає загальні елементи, що використовуються як основа для GATT під назвою *Атрибути*. Як і будь-який інший протокол або профіль у специфікації Bluetooth, GATT починається з визначення ролей, які пристрої, що взаємодіють, можуть прийняти. ATT визначає дві ролі: *сервер* та *клієнт*.

*Сервер* приймає дані, організовані в елементи, які називають атрибутами. Сервер GATT відповідає серверу ATT. Він отримує запити від клієнта та надсилає відповідь, зберігає та надає користувачеві доступні клієнту дані, які організовано в атрибути. Він також може надсилати оновлені за допомогою сервера дані за необхідності. Кожен пристрій BLE має містити принаймні базовий GATT-сервер, який може відповідати на запити клієнта, навіть якщо він тільки повертає відповідь про помилку.

*Клієнт* запитує читання, запис повідомлень та значень різних атрибутів. Клієнт GATT відповідає клієнту ATT. Він надсилає запити на сервер і отримує від нього відповіді (із ініціативи сервера). Клієнт GATT нічого не знає заздалегідь про атрибути сервера, тому він спочатку повинен запитати про наявність і характер цих атрибутів, виконавши пошук сервісу. Після завершення відкриття сервісу може почати читання та записування атрибутів, знайдених на сервері, а також отримувати оновлення, ініційовані сервером.

Атрибути є адресними частинами інформації, яка може містити відповідні дані користувачів (або метадані) щодо структури та групування різних атрибутів, що містяться на сервері. Як GATT, так і ATT можуть працювати тільки з атрибутами, так що для взаємодії клієнтів та серверів вся інформація повинна бути організована у цій формі.

Концептуально атрибути завжди розташовані на сервері й доступні (і потенційно модифіковані) клієнтом. Специфікація визначає атрибути лише концептуально, і це не змушує реалізації ATT і GATT використовувати певний формат або механізм внутрішньої пам'яті. Оскільки атрибути містять як статичні незмінні визначення, так і фактичні дані користувачів, їх, як правило, зберігають у енергонезалежній та оперативній пам'яті.

**Bluetooth GATT (Generic Attribute Profile)** є основою для розроблення будь-якої системи BLE та визначає спосіб взаємодії смартфона (або Central Device) з кінцевим пристроєм (Peripheral Device). Потрібно пам'ятати, що GATT використовується лише після встановлення з'єднання між двома пристроями.

Профіль (GATT) встановлює правила обміну профільними та користувацькими даними через BLE-з'єднання. На відміну від GAP, який визначає взаємодію низького рівня з пристроями, GATT займається лише фактичними процедурами та форматами передавання даних.

GATT також надає еталонні рамки для всіх профілів на його основі, які охоплюють чіткі випадки використання та забезпечують сумісність між пристроями різних постачальників. Тому всі стандартні профілі BLE ґрунтуються на GATT і повинні відповідати вимогам правильного функціонування. Це робить GATT ключовим розділом специфікації BLE, тому що кожен окремий елемент даних, що стосується програм і користувачів, повинен бути відформатований, упакований і відправлений відповідно до його правил.

GATT використовує протокол атрибута (ATT) як транспортний протокол для обміну даними між пристроями. Ці дані організовано ієрархічно в секції, які називають *сервісами та* групують в концептуально пов'язані фрагменти даних користувача, які називають *характеристиками*. Складові профілю GATT наведено на рис. 1.

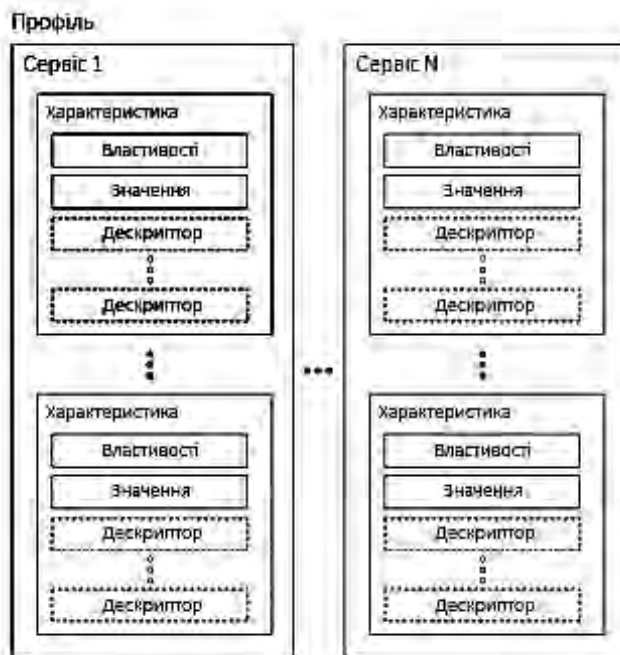


Рис. 1. Схематичне зображення профілю GATT

Офіційні сервіси, прийняті Bluetooth, мають 16-бітні UUID, тоді як для користувацькі визначаються 128-бітними UUID. Наприклад, сервіс серцевої швидкості має UUID 180D, тоді як приклад користувацької служби матиме UUID 195AE58A-437A-489B-B0CD-B7C9C394BAE4 .

- **Характеристика:**

Містить значення та необов'язкову інформацію про значення. Приклади необов'язкової інформації містять відомості про конфігурацію та інформацію про те, як відображається значення (наприклад, одиниці, діапазони тощо). Характеристика також містить властивості, що визначають, які операції доступу можна налаштувати для значення.

Найпоширенішими є:

- *Read*: дозвіл клієнту прочитати значення.
- *Write*: дозвіл клієнту змінити значення.
- *Indicate*: сповіщення про зміну значення, очікується підтвердження від клієнта.
- *Notify*: сповіщення про зміну значення без підтвердження від клієнта.

Показники та сповіщення забезпечують клієнту ефективний спосіб дізнатися, що значення змінилось, без потреби читати його вручну, коли воно фактично змінилось.

Важливою концепцією для розуміння GATT є відносини між сервером та клієнтом. Периферія відома як GATT Server, у якому зберігаються дані пошуку ATT, та визначені послуги і характеристики, а також GATT Client (смартфон / планшет), який надсилає запити на цей сервер.

Складові GATT:

- **Профіль:**

Визначає конкретний випадок використання і складається із групи сервісів, які задовольняють випадок використання.

Профіль насправді є "віртуальним" групуванням одного або більше сервісів. Профілі не відображаються клієнтам під час відкриття GATT сервера, а також не існують на фактичному сервері. Стандартні профілі (прийняті Bluetooth SIG) визначаються для забезпечення сумісності між програмами різних пристроїв.

- **Сервіс:**

Збірник даних та пов'язаних з ними способів поведінки для виконання певних функцій. Містить сукупність характеристик (принаймні однієї) та їх (необов'язкових) дескрипторів.

Сервісам призначаються унікальні ідентифікатори, що називаються UUID.

Усі транзакції запускає головний пристрій, клієнт GATT, який отримує відповідь від підлеглих пристроїв – GATT Server.

Під час налаштування з'єднання периферійний пристрій встановлює інтервал з'єднання, а центральний пристрій під'єднується, щоб побачити наявність нових даних. Центральний пристрій може не мати змоги виконати запит, оскільки він може бути зайнятий іншим периферійним пристроєм або потрібні системні ресурси просто недоступні.

Діаграма на рис. 2 ілюструє обмін даними між периферійним (GATT-сервером) та центральним пристроєм (GATT-клієнтом), причому основний пристрій ініціює кожну транзакцію.



Рис. 2. Схема процесу обміну даними між периферійним та центральним пристроями

Розглянемо **основи організації** локальної комп'ютерної мережі безкабельних Wi-Fi модулів з конфігуруванням за допомогою технології bluetooth. Є два режими інфраструктури мережі – основний режим BSS (Basic Service Set) і розширений режим ESS (Extended Service Set).

У режимі BSS всі вузли мережі зв'язуються між собою тільки через одну точку доступу, яка може виконувати також роль моста до зовнішньої мережі. У розширеному режимі ESS існує інфраструктура декількох мереж BSS, причому самі точки доступу взаємодіють кожна з кожною, що дає змогу передавати трафік від однієї BSS до іншої. Між собою точки доступу з'єднують за допомогою сегментів кабельної мережі або радіомостів.

У нашому випадку мережа побудована за принципом BSS. Точка доступу також є сервером, який слугує для перенаправлення повідомлень від клієнта до клієнта.

Мобільна локальна Wi-Fi мережа побудована так, що один з пристроїв виконує роль точки доступу з сервером, а інші є станціями-клієнтами, зокрема мобільні пристрої (смартфони тощо) з яких здійснюється керування, налаштування та моніторинг.

Кожен WI-FI модуль містить як клієнтську, так і серверну програми. Реалізовано автовизначення режиму роботи Wi-Fi модуля під час ввімкнення, розгортання точки доступу Wi-Fi та TCP/IP сервера на першому з ввімкнених пристроїв, під'єднання на інших пристроях як клієнтах. На сервері зберігається таблиця з'єднань з іменами та типами під'єднаних пристроїв, IP та MAC адресами, сокетом та кількістю від'єднань протягом сесії (рис. 3). Також сервер комутує з'єднання між клієнтами, перенаправляючи повідомлення від одного клієнта до іншого.

```
Client connection!
num: "1", type: "gimbal", name: "My gimbal", mac: "5e:cf:7f:18:82:c2", ip: "192.168.4.1", socket: "", disc: "0"
num: "2", type: "smartphone", name: "sony", mac: "40:b8:37:bd:b7:60", ip: "192.168.4.2", socket: "3fff8e0", disc: "0"
```

Рис. 3. Таблиця з'єднань (на сервері)

Реалізовано можливість надсилання повідомлення за ідентифікатором або групі клієнтів одного типу.

Водночас мережа проста у під'єднанні до будь-якої системи, малоенергозатратна, а також має низьку ціну комплектуючих. У ній виконавчим пристроєм слугує продуктивний Wi-Fi модуль ESP32 на базі двоядерного 32-бітового мікропроцесора Xtensa. Модуль містить вбудовану пам'ять достатньо великої ємності, як ОЗП, так і ПЗП. В ньому імплементовано безкабельну технологію Bluetooth 4.2 з низьким енергоспоживанням та збільшеною швидкістю приймання–передавання даних, а також поліпшено конфіденційність та безпеку.

Перераховані характеристики уможливають досягнення високої швидкості приймання–передавання даних між клієнтами мережі, спрощення процесу конфігурування мережі за допомогою Bluetooth, а також досягнення значної кількості клієнтів (до 16 на одну точку доступу), які є одночасно під'єднаними і мають можливість передавати дані.

У програмі не використовують сторонні прошивки та оболонки, які є інтерпретаторами інших мов програмування. Програмне забезпечення написано мовою C з використанням API функцій, які надає виробник, та з багатозадачною операційною системою реального часу для розпаралелення задач у вбудованих системах – FreeRTOS. Ці рішення дають змогу підвищити швидкість реагування мережі та зменшити ємність використовуваної пам'яті.

Програмний код написано так, що пам'ять надається динамічно. Це дає можливість надавати пам'ять ефективніше без потреби попереднього вказування розміру того чи іншого масиву тощо, тим більше, що не завжди відомий об'єм пам'яті, який буде потрібно (наприклад, для приймання пакетів різного типу або повідомлень різної довжини).

Реалізовано функції для розділення склеєних пакетів під час пересилання та різноманітних перевірок на цілісність пакета і правильність формування. Пакети, які не проходять перевірку на цілісність або є некоректними, не беруться до уваги, тобто ніяк не впливатимуть на роботу та стабільність мережі.

Модуль ESP32 містить Bluetooth версії 4.2, тобто BLE, який можна використовувати як додатковий канал для конфігурації мережі, а саме для налаштування назви безкабельної мережі, паролю доступу, режимів функціонування модуля (станція, точка доступу, авто), режимів шифрування, обмеження доступу з інших пристроїв тощо.

Важливою особливістю BLE порівняно з Wi-Fi є специфікація не тільки каналу зв'язку, а й прикладних програм. Профілі з сервісами описують ролі пристроїв, призначення, склад, формат і захист даних, порядок, типи і події обміну, а не тільки те, як дані передаються. Це усуває потребу розроблення протоколів. Залишається на боці пристрою тільки заповнити потрібні поля для відправлення результатів вимірювань. Клієнти таких пристроїв у вигляді смартфонів, планшетів, ПК розпізнають ці дані автоматично і відобразять їх або використають відповідно. Це відбувається завдяки тому, що всі виробники керуються тими самими специфікаціями BLE щодо подання даних, проте залишається місце і для фантазії розробника, оскільки профілі мають механізми для розширень функціональності.

**Типи пакетів даних** та їх призначення такі. В мережі реалізовано чотири типи пакетів даних. Пакет є рядком у форматі JSON – набір пар *key* : *value*, який формує клієнт-відправник, надсилається клієнту-отримувачу через сервер, після одержання розпаковують та отримують повідомлення.

JSON – текстовий формат, який дає змогу легко формувати рядок з набору даних, так само легко отримати дані з рядка. У різних мовах це реалізовано як об'єкт, структура, хеш-таблиця, список з ключем або асоціативний масив. Пакет починається з символу "{", та закінчується символом - "}", що дозволяє перед розпакуванням перевірити пакет на цілісність.

Пакети та призначення:

- Пакет ідентифікації клієнта (*int*) – потрібний для того, щоб сервер міг доповнити дані про клієнта в таблиці з'єднань. Клієнт відсилає пакет після під'єднання до сервера по TCP протоколу.

```
{ind="int", type="[тип пристрою]", name="[ім'я (ідентифікатор) пристрою]", mac="[MAC адреса пристрою]}
```

- Пакет повідомлення клієнту (*mfc*) – потрібний для надсилання повідомлення одному клієнту за ідентифікатором пристрою.

```
{ind="mfc", client="[ідентифікатор пристрою]", msg="[повідомлення]}
```

- Пакет повідомлення групі клієнтів (*mfg*) – потрібний для надсилання повідомлення групі клієнтів одного типу.

```
{ind="mfg", type="[тип пристрою]", msg="[повідомлення]}
```

- Пакет налаштувань клієнта (*sfc*) – потрібний для надсилання повідомлення з налаштуваннями конфігураційного файлу клієнту за ідентифікатором пристрою.

{ind="sfc", client="[ідентифікатор пристрою]", settings="[налаштування конф. файла]".

Етапи використання протоколу Bluetooth GATT такі.

### *1. Розроблення системи на високому рівні.*

На цьому кроці потрібно обдумати систему високого рівня з погляду елементів даних, які повинні відображатися на серверному пристрої.

Потрібно зосередитися на такому:

- визначити елементи даних, які сервер повинен показати клієнту;
- визначити права доступу до цих елементів;
- вилучити будь-які надлишкові елементи даних. Це важливо з двох причин:
- це зменшує обсяг переданих даних, що, своєю чергою, зменшує споживання енергії;
- це робить стиль написання програми простішим для розуміння та оновлення пізніше;
- згрупувати елементи даних у певну кількість груп на основі відповідної функціональності. Це сприяє чіткості стилю, а також допомагає іншим зрозуміти його та полегшити оновлення у майбутньому.

### *2. Зіставлення елементів даних у стандартні послуги та характеристики (за можливості).*

Розглянувши крок 1 та виділивши групи даних, потрібно звернутися до стандартних сервісів і характеристик, за можливості підібрати ті, які підходять для нашого випадку. Це не є обов'язковим для специфікації Bluetooth, оскільки користувачі мають право створювати власні сервіси та характеристики. Однак цей підхід має дві переваги:

- пристрій буде сумісним з іншими пристроями;
- зазвичай постачальники надають багато прикладів, які використовують стандартні сервіси та характеристики, що полегшує роботу з розробкою.

### *3. Призначення індивідуальних UUID для спеціальних сервісів та характеристик.*

Для створення спеціальних UUID нестандартних сервісів та характеристик у GATT потрібно скористатись онлайн-генератором наприклад GUID Generator.

### *4. Використання API, наданих постачальником BLE.*

Рішення, які надали різні постачальники, істотно відрізняються, тому цей крок буде специфічним для модуля BLE та структури розробки під нього.

**Формування основних сервісів та характеристик** для конфігурування мережі за допомогою BLE має такі особливості. Тепер мережа може працювати в трьох режимах, а саме:

- Station – режим станції (клієнта TCP/IP), в цьому режимі модуль буде постійно під'єднуватись до точки доступу за заданими ssid, password та під'єднуватись як клієнт через TCP/IP за заданим ip, port.

- Softap – режим точки доступу (сервер TCP/IP), у цьому режимі модуль буде постійно запускатись в ролі точки доступу за заданими ssid, password, channel, authmode, max\_connection, та розгортати TCP/IP сервер за заданим ip, port.

- Auto – режим автоматичного визначення режиму роботи Wi-Fi модуля під час ввімкнення, розгортання точки доступу Wi-Fi та TCP/IP сервера на першому з ввімкнених пристроїв, під'єднання інших пристроїв як клієнтів за заданими даними, аналогічних режиму Softap.

Відповідно до специфікації BLE для опису даних режимів роботи модуля, призначення, складу, формату та захисту даних потрібно створити профіль та сервіси, які міститимуть в собі групи характеристик. Кожна характеристика – це значення одного з полів, необхідних для роботи одного з наведених режимів роботи, які сервер повинен показувати клієнту.

Сервіс конфігурації модуля містить інформацію, необхідну для налаштування вузла, щоб його можна було додати до мережі. Цей сервіс не є визначеним Bluetooth SIG, тому потрібно генерувати власні UUID.

Приклад основних сервісів та характеристик наведено у табл. 1, використовувати UUID сформовано на основі базового UUID.



## UUID сервісів та характеристик для конфігурування мережі

Сервіс/характеристика	UUID	Тип	Дозволи	Значення
Generic Access	0x1800	UUID 16bit		
Generic Attribute	0x1801			
Сервіс вибору режиму роботи	0000ffc0-0000-1000-8000-00805f9b34fb	UUID 128bit		
Характеристика вибору режиму	0000ffc1-0000-1000-8000-00805f9b34fb		Читання / запис, потрібна авторизація	число
Сервіс режиму Station	0000ffd0-0000-1000-8000-00805f9b34fb			
Характеристика ssid (Station)	0000ffd1-0000-1000-8000-00805f9b34fb		Читання / запис, потрібна авторизація	рядок UTF-8
Характеристика password (Station)	0000ffd2-0000-1000-8000-00805f9b34fb		Читання / запис, потрібна авторизація	рядок UTF-8
Сервіс режиму Softap	0000ffe0-0000-1000-8000-00805f9b34fb			
Характеристика ssid (Softap)	0000ffe1-0000-1000-8000-00805f9b34fb		Читання / запис, потрібна авторизація	рядок UTF-8
Характеристика password (Softap)	0000ffe2-0000-1000-8000-00805f9b34fb		Читання / запис, потрібна авторизація	рядок UTF-8
Характеристика channel (Softap)	0000ffe3-0000-1000-8000-00805f9b34fb		Читання / запис, потрібна авторизація	число
Характеристика authmode (Softap)	0000ffe4-0000-1000-8000-00805f9b34fb		Читання / запис, потрібна авторизація	число
Характеристика max_conn (Softap)	0000ffe5-0000-1000-8000-00805f9b34fb		Читання / запис, потрібна авторизація	число
Сервіс режиму Auto	0000fff0-0000-1000-8000-00805f9b34fb			
Характеристика ssid (Auto)	0000fff1-0000-1000-8000-00805f9b34fb		Читання / запис, потрібна авторизація	рядок UTF-8
Характеристика password (Auto)	0000fff2-0000-1000-8000-00805f9b34fb		Читання / запис, потрібна авторизація	рядок UTF-8
Характеристика channel (Auto)	0000fff3-0000-1000-8000-00805f9b34fb		Читання / запис, потрібна авторизація	число
Характеристика authmode (Auto)	0000fff4-0000-1000-8000-00805f9b34fb		Читання / запис, потрібна авторизація	число
Характеристика max_conn (Auto)	0000fff5-0000-1000-8000-00805f9b34fb	Читання / запис, потрібна авторизація	число	

Отже, всі налаштування мережі є у згрупованому вигляді – у вигляді сервісів, які містять в собі характеристики зі значеннями. Ці дані у вигляді таблиці зберігаються в енергонезалежній пам'яті модуля, що дає змогу конфігурувати мережу лише за необхідності, а не під час кожного увімкнення. Модуль під час запуску читатиме дані про режим роботи з пам'яті та запускатиметься в цьому режимі для подальшої роботи.

Під'єднуючись через Bluetooth, мобільний пристрій (смартфон, планшет тощо) виступатиме в ролі клієнта та звертатиметься до модуля (сервера), запитуючи дані на читання та запис змін.

В результаті забезпечимо більшу гнучкість та зручність у роботі з мережею, змогу конфігурування та переконфігурування основних налаштувань мережі.

**Програмне забезпечення** (додаток) є реалізацією клієнта для пристроїв з ОС Android, що дає змогу здійснювати з'єднання, налаштування та керування пристроями, які під'єднані до мережі. Інтерфейс додатка зображено на рис. 4 та 5.



Рис. 4. Інтерфейс програмного додатка під ОС Android (функціональна частина роботи з мережами)

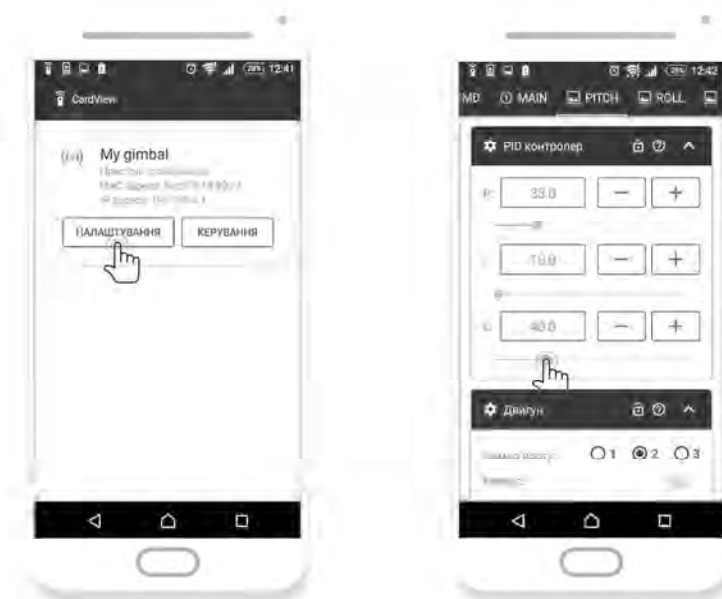


Рис. 5. Інтерфейс програмного додатка під ОС Android (функціональна частина роботи безпосередньо з пристроєм)

Додаток можна функціонально поділити на дві частини:

- Робота з мережами (пошук мереж, під'єднання до точки доступу та сервера за протоколом TCP, конфігурування мереж).
- Робота безпосередньо з пристроєм, під'єднаним до мережі (налаштування, керування тощо).

Перша частина є незмінною для будь-яких пристроїв, які використовують ці мережі. Друга частина є інтерфейсом керування, який є індивідуальним для кожного пристрою, оскільки вони відрізняються призначенням, можливостями та функціонуванням.

Основні можливості першої частини:

- Ввімкнення/вимкнення безкабельного інтерфейсу WI-FI на пристрої з додатка.
- Пошук та виведення на екран списку точок доступу в радіусі дії WI-FI (додаткової інформації про стан мережі).
- Під'єднання до точки доступу, вибраної зі списку.
- Зберігання паролів від точок доступу, з якими було здійснено з'єднання.
- Можливість з'єднання по TCP із сервером мережі.
- Якщо дані правильно введено, виконується під'єднання до мережі та перехід на вікно програми з списком під'єднання до мережі пристроїв, запускається паралельний потік, який відповідає за з'єднання, та дозволяє не переривати його навіть після повного закриття додатка. Повторно запустивши його, можна продовжувати роботу, не встановлюючи з'єднання повторно. Після вибору одного з пристроїв зі списку відбувається перехід на вікно керування та налаштування.

### Приклад інтерфейсу користувача для конфігурування мережі через Bluetooth

Інтерфейсом для конфігурування мережі слугуватиме додаток для ОС Android, в якому під час встановлення з'єднання буде виводитись інформація налаштувань мережі, яка міститься на модулі у зручному для користувача вигляді з можливістю змін. Для цього використовуються права доступу клієнта до характеристик, а саме:

- *Read*: дозвіл клієнту прочитати значення.
- *Write*: дозвіл клієнту змінити значення.

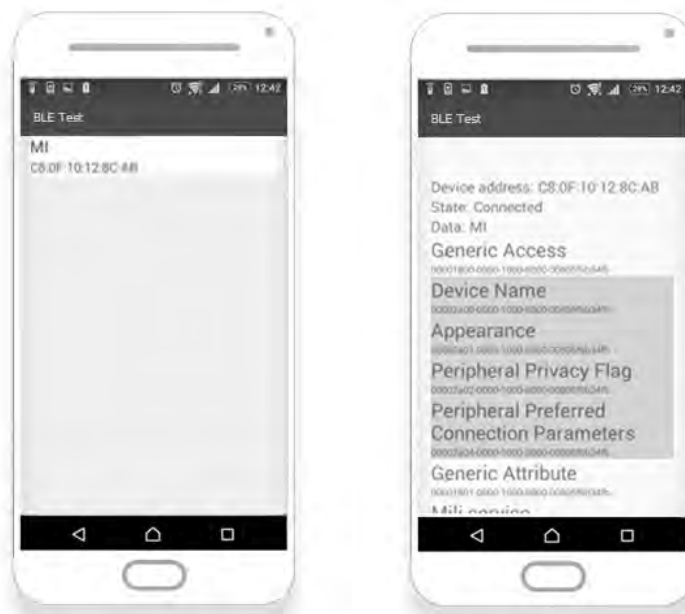


Рис. 6. Інтерфейс додатка пошуку BLE пристроїв

Activity зліва на рис. 6 демонструє інформацію, яка доступна під час пошуку пристрою – назву та фізичну адресу. Справа – стан з'єднання і дані, які можна отримати, встановивши зв'язок між пристроями. Наприклад, стандартна характеристика з номером 00002a00-0000-1000-8000-00850f9b34fb, розміщена в Generic access, призначена для збереження значення Device Name. Вона містить значення MI – скорочену назву пристрою.

Для полегшення роботи з цими засобами використовують сторонні бібліотеки, що дають змогу значно спростити упровадження підтримки BLE у додаток. Крім своєї основної функції (економія часу), сторонні бібліотеки надають інтерфейс для роботи з усіма реалізаціями Bluetooth low energy – від стандарту Google до різноманітних специфічних варіантів для окремих пристроїв.

Користувацький інтерфейс додатка для конфігурування мережі за допомогою Bluetooth Low Energy зображено на рис. 7.



Рис. 7. Інтерфейс додатка для конфігурування мережі за допомогою BLE

**Апробацію мережі в системі тривимірної стабілізації відеокамери виконано так.** Гіростабілізована платформа – гіроскопічний пристрій для просторової стабілізації об'єктів та приладів (у цьому випадку відеокамери). Побудована на безколекторних двигунах, здатна забезпечувати компенсацію кутових зміщень по трьох осях (так, що лінія візування залишається нерухомою у просторі щодо інерціальної системи координат), а також швидку реакцію, плавність і точність позиціонування.

У разі зміни приладів на гіростабілізованій платформі виникає потреба у зміні налаштувань системи (потужності двигунів, швидкості реакції, кутів зміщень тощо). Для зручного користування у систему було інтегровано розроблену локальну Wi-Fi мережу з конфігуруванням за допомогою bluetooth. Використовуючи її, можливо відмовитись від програмного забезпечення для налагодження на комп'ютері, що додає мобільності та функціональності системі. Мобільний пристрій (смартфон, планшет), під'єднаний до однієї точки доступу Wi-Fi, дає змогу налаштувати систему та дистанційно керувати нею, а також допоміжними пристроями, які використовують цю мережу (освітленням, дистанційним керуванням фокусом та зумом тощо). На рис. 8 зображено структурну схему системи, на якій виділено напрями з'єднань, основні функціональні блоки мобільного пристрою та системи стабілізації. На рис. 9 наведено топологію мережі цієї системи.

**Представлено програмно-апаратний комплекс** мобільної локальної мережі, який може бути вбудований у пристрої та системи як мобільного, так і стаціонарного призначення, а також працювати без використання додаткових мікроконтролерів, оскільки містить двоядерний 32-бітний

мікропроцесор з достатньою обчислювальною потужністю для організації систем збирання інформації, дистанційного керування та налаштування сторонніх пристроїв.

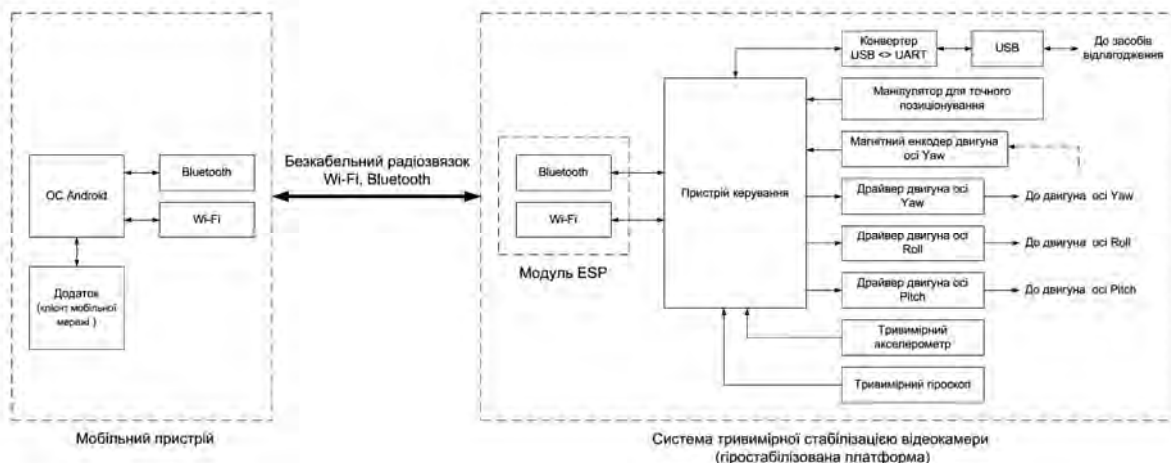


Рис. 8. Структурна схема системи тривимірної стабілізації з використанням вбудованої локальної мережі

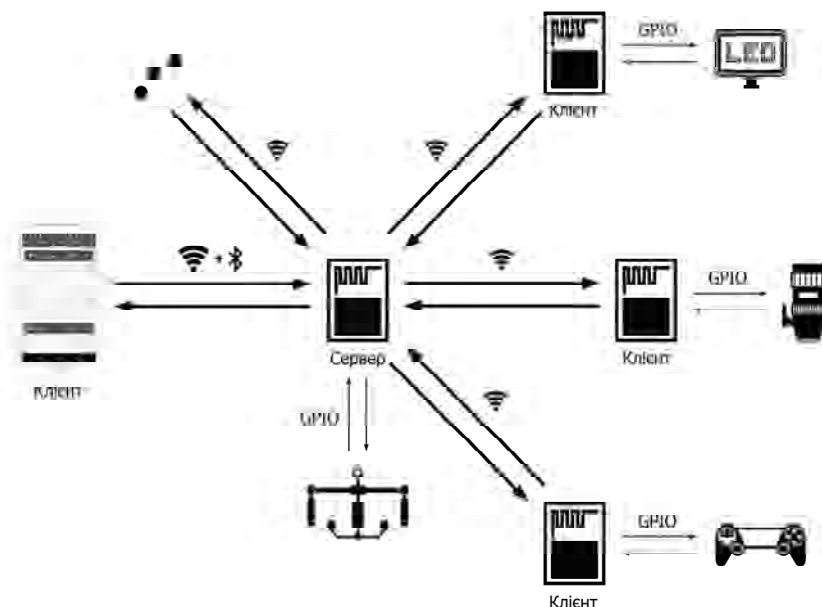


Рис. 9. Топологія мережі

Програмна частина – це інтерфейс користувача (додаток для мобільних пристроїв), який в ролі клієнта під'єднується до мережі.

Інтерфейс користувача дає змогу зручно взаємодіяти з:

- мережевими налаштуваннями для організації пристроїв системи у спільну мережу, призначивши центральні пристрої та пристрої-клієнти, режими роботи мережі, потужності передавачів та частотні канали, обмеження за доступом тощо;
- безкабельною інформаційною системою (системою моніторингу), відображаючи дані, розподілені за певними критеріями, параметри стану системи, усереднені та статистичні дані у вигляді графіків тощо, які приймають за допомогою давачів із зовнішнього світу. Містить інструменти для налаштувань циклу опитування джерел початкової інформації;
- системою віддаленого налаштування, відображаючи встановлені параметри та засоби для їхньої зміни, які впливають на режими та можливості роботи системи або пристрою;

- системою дистанційного керування, відображаючи інструменти для доступу до функцій системи, які потребують керування ззовні, або керування у ручному режимі роботи (коригуючи автоматичні дії системи).

Програмна частина працює з двома безкабельними інтерфейсами: Wi-Fi та Bluetooth Low Energy. Схему дальності дії цих інтерфейсів із залежністю потужності передавачів наведено на рис. 10.

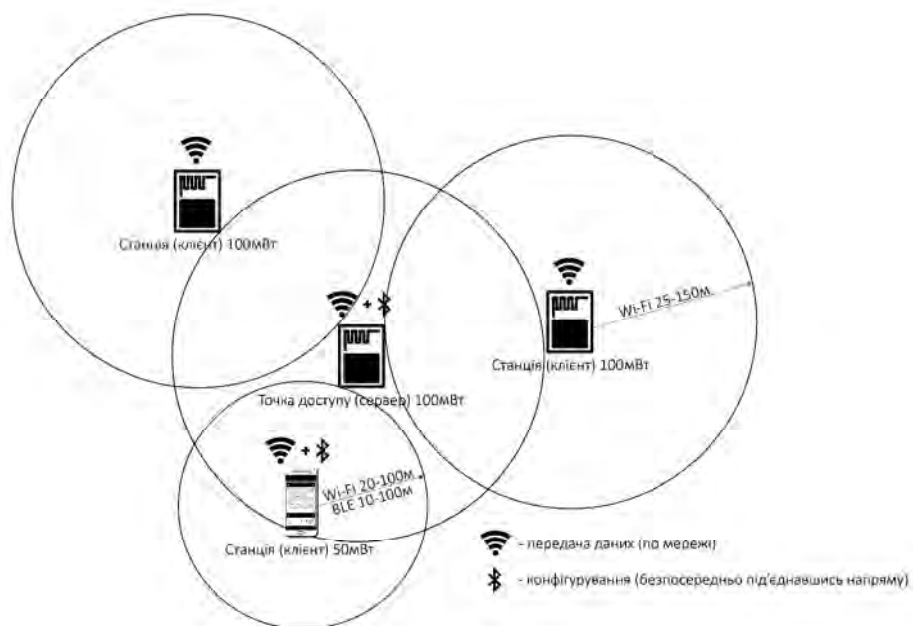


Рис. 10. Схема дальності дії безкабельних інтерфейсів (залежність від потужності передавачів)

Інтерфейсом Wi-Fi надсилаються дані між пристроями та смартфоном через центральний пристрій, який комутує та перенаправляє повідомлення у мережі потрібному адресату. Радіус дії мережі від центрального пристрою наведено у табл. 2.

Обґрунтування та розрахунок відстані в особливих умовах описано далі.

Таблиця 2

### Радіуси дії мережі Wi-Fi

	Пристрій–пристрій	Смартфон–пристрій
Пряма видимість без завад	100–150 м	до 100 м
Пряма видимість у місті	75–100 м	50–100 м
У приміщенні	25–75 м	20–50 м

Через інтерфейс Bluetooth Low Energy відбувається конфігурування режимів роботи мережі кожного із пристроїв окремо. Цей інтерфейс використовується лише між налаштовуваним пристроєм та смартфоном. Другий канал зв'язку дає змогу незалежно від вже заданої конфігурації зв'язатися з пристроєм для переконфігурування, а саме: режиму роботи модуля Wi-Fi (точка доступу, станція, авто), назви та паролю доступу, адреси та порту для TCP/IP, обмежень для доступу іншим клієнтам тощо.

Конфігурування потрібно здійснювати, безпосередньо під'єднуючись до налаштованого модуля в радіусі, вказаному в табл. 3.

Таблиця 3

### Радіуси дії Bluetooth Low Energy

Пряма видимість без завад	до 100 м
Пряма видимість у місті	25–50 м
У приміщенні	10–20 м

На основі створеного програмного забезпечення є можливість легко додати потрібні функції як роботи з Wi-Fi, так і Bluetooth, використовуючи формат наведених пакетів даних. Потрібно реалізувати лише інтерфейс під певний пристрій. Частина додатка, яка працює з мережею, під'єднанням, виведенням клієнтів тощо, залишається без змін для всіх пристроїв, у які вбудована мережа.

Мережу можна використати в таких галузях: транспорт, розумний будинок, охорона, сільське господарство, торгівля, реклама та логістика, обслуговування тощо.

Приклади систем з можливим використанням поданої мережі наведено на рис. 11. Це:

- системи моніторингу (температури, вологості, освітленості, задимленості, газів у повітрі, параметрів живлення);
- безкабельні системи контролю доступу до приміщень та території (автоматичні шлагбауми і бар'єри, автоматика для воріт);
- системи обліку робочого часу;
- системи управління освітленням (дистанційне ввімкнення, вимкнення, зміна яскравості, зміна кольору у разі використання RGB, налаштування автоматичного ввімкнення/вимкнення в заданий час тощо);
- системи управління пристроями з двигунами (дистанційне ввімкнення, вимкнення, регулювання обертів, автоматичне ввімкнення–вимкнення за заданих умов);
- автономні охоронні системи (виявлення руху, задимленості, протікання газу, води, відмикання вікон, дверей, імітація присутності тощо);
- мобільні комплекси для відеознімання (налаштування та керування стабілізаторами камер, дистанційне керування фокусом/зумом, керування інтенсивністю та кольором студійного світла, дистанційне керування помічником оператора за допомогою смартфона або пульта тощо);
- автомобільна електроніка (системи паркування, охоронні системи на основі датчиків руху, нахилу, удару, системи дистанційного ввімкнення, передпускового підігрівання, керування пневмопідвіскою тощо);
- системи в побуті (налаштування та керування електроприладами, отримання статистичних даних тощо).

**Рівні КФС**, які покриває використання мережі, мають такі особливості. Фізичний рівень – апаратне забезпечення, яке використовується у пристроях, зокрема датчі та мережеве обладнання.

Мережевий рівень – відповідальний за передавання даних, зібраних на фізичному рівні.



Рис. 11. Приклади систем з можливим використанням такої мережі

Рівень програми – протоколи та інтерфейси, які використовують пристрої для ідентифікації та зв'язку між собою.

Пульты керування – дозволяють використовувати пристрої, з'єднуватись з ними та контролювати, використовуючи панель керування – мобільний додаток. Це смартфони, планшети, ПК, традиційні пульти.

Панель інструментів – відображає інформацію про екосистему пристроїв у мережі, що дає змогу керувати системою, зазвичай використовуючи дистанційне керування.

Аналітика – програмні засоби, які аналізують дані, отримані від пристроїв. Аналітика використовується для великої кількості сценаріїв, таких як прогнозування технічного обслуговування, статистичних даних тощо.

Зберігання даних – засоби для зберігання даних КФС.

Мережі – рівень інтернет-комунікації, який дає змогу операторам звертатись до пристроїв (у системах стаціонарного призначення).

Дальність дії мережі та якісного передавання інформації залежить насамперед від потужності передавача (яка може регулюватися програмно), наявності та характеристики перешкод, типу антени.

Не тільки сигнал точки доступу повинен досягти клієнта, а й сигнал клієнта – точки. Потужність передавача модуля становить 100 мВт (20 dBm). Проте можна впевнено заявляти, що потужність типових мобільних клієнтів – у діапазоні 30–50 мВт. Отже, якщо точка транслює на 100 мВт, а клієнт – тільки на 50 мВт, в зоні покриття знайдуться місця, де клієнт буде чути точку добре, а точка клієнта – погано (або взагалі чути не буде) – асиметрія. Сигнал є, а зв'язку немає, або downlink швидкий, а uplink повільний. Може також виявитися, що для досягнення стабільнішого зв'язку потужність точки доведеться знизити.

Постає завдання забезпечення якомога симетричнішого каналу зв'язку між клієнтом (STA) і точкою (AP), щоб зрівняти швидкості uplink і downlink. Для цього потрібно спиратися на SNR (співвідношення сигнал–шум).

$$\text{SNR (STA)} = \text{Rx (AP)} - \text{RxSens (STA)},$$

$$\text{SNR (AP)} = \text{Rx (STA)} - \text{RxSens (AP)},$$

де Rx (AP / STA) – потужність прийнятого сигналу з точки/клієнта; RxSens (AP / STA) – чутливість приймання точки/клієнта.

Для спрощення приймаємо, що поріг фонового шуму нижчий від порога чутливості приймача AP/STA. Подібне спрощення цілком прийнятне, тому що якщо рівень фонового шуму для AP і STA однаковий, він ніяк не впливає на симетрію каналу:

$$\text{Rx (AP)} = \text{Tx (AP)} + \text{TxBGain (AP)} - \text{PathLoss} + \text{RxGain (STA)},$$

де Tx (AP) – потужність передавача точки на порту антени; TxBGain (AP) – посилення передачі антени точки з урахуванням всіх втрат, підсилень та спрямованості; PathLoss – втрати сигналу на шляху від точки до клієнта; RxGain (STA) – посилення приймання антени клієнта з урахуванням усіх втрат, підсилень та спрямованості.

Аналогічно,

$$\text{Rx (STA)} = \text{Tx (STA)} + \text{TxBGain (STA)} - \text{PathLoss} + \text{RxGain (AP)}.$$

Варто зауважити:

- PathLoss однаковий в обох напрямках;
- TxBGain і RxGain антен у разі звичайних антен однаковий (правильно і для AP, і для STA).

Так що можна прийняти: TxBGain (AP) = RxGain (AP) = Gain (AP), аналогічно для STA.

- Rx/Tx Gain антени клієнта мало коли відомий. Клієнтські пристрої, зазвичай, комплектуються незмінними антенами, що дає змогу вказувати потужність передавача і чутливість приймача відразу з урахуванням антени.

Разом отримуємо:

$$\text{SNR (AP)} = \text{Tx (STA)}[\text{з урахуванням антени}] - \text{PathLoss} + \text{Gain (AP)} - \text{RxSens (AP)}$$

$$\text{SNR (STA)} = \text{Tx (AP)} + \text{Gain (AP)} - \text{PathLoss} - \text{RxSens (STA)}[\text{з урахуванням антени}].$$

Різниця між SNR на обох кінцях і буде асиметрією каналу. Застосовуючи арифметику, отримуємо:

$$\text{D} = \text{SNR (STA)} - \text{SNR (AP)} = \text{Tx (STA)} - \text{Tx (AP)} - (\text{RxSens (STA)} - \text{RxSens (AP)}).$$



Асиметрія каналу не залежить від типу антени на точці й на клієнті, а залежить від різниці потужностей і чутливості приймачів. Якщо  $D < 0$ , точка буде чути клієнта краще, ніж клієнт точку. Залежно від відстані це означатиме або що потік даних від клієнта до пункту буде повільнішим, ніж від точки до клієнта, або що клієнт до точки достукатися не зможе зовсім.

Для взятих потужностей точки (100 мВт = 20 дБм) і клієнта (30–50 мВт  $\approx$  15–17 дБм) різниця потужностей становитиме 3–5 дБ. Доти, доки приймач точки чутливіший від приймача клієнта на ці самі 3–5 дБ, проблем виникати не буде. На жаль, це не завжди так. Отже, в роботі можуть спостерігатися проблеми, причому з вини точки.

Також далеко не найвідомішим фактом, що призводить до асиметрії, є те, що у більшості клієнтських пристроїв потужність передавача знижена на “крайніх” каналах (1 і 11/13 для 2.4 ГГц). На крайніх каналах потужність передавача в  $\sim 1,5$  рази нижча, ніж на середніх. Причина в тому, що Wi-Fi – зв’язок ширококутовий, утримувати сигнал чітко в межах каналу не вдасться. Ось і доводиться знижувати потужність у крайніх каналах, щоб не зачіпати сусідні з ISM діапазони.

В Україні використання Wi-Fi без дозволу Українського державного центру радіочастот можливе лише в разі використання точки доступу зі стандартною всенаправленою антеною ( $< 6$  дБ, потужність сигналу  $\leq 100$  мВт на 2,4 ГГц і  $\leq 200$  мВт на 5 ГГц) для внутрішніх (використання усередині приміщення) потреб організації. У разі сигналу більшої потужності необхідно реєструвати передавач і отримати ліцензію УДЦР.

**Методика розрахунку ефективної відстані** така. Безкабельний зв’язок працює, коли відстань між точкою доступу і смартфоном становить  $N$  метрів за відсутності перешкод на шляху сигналу. Водночас зниження інтенсивності удвічі (на 3 децибелі) еквівалентно зменшенню ефективної відстані  $N$  в корінь з двох разів – квадрат відстані обернено пропорційно до інтенсивності.

Під час проходження сигналом скляного вікна інтенсивність знижується якраз на 3 дБ, а значить, ефективна відстань зменшується у корінь з двох разів. Користуючись цією методикою, можна розрахувати, на якій дистанції зв’язок Wi-Fi все ще працюватиме в тій чи іншій ситуації:

- Вікно скляне – знижує інтенсивність на 3 дБ (у 2 рази).
- Вікно з тонуванням – 6 дБ (в 4 рази).
- Стіна з дерева – 9 дБ (у 8 разів).
- Міжкімнатна стіна панельна, бетонна підлога – 15–20 дБ (в 32 рази і більше).

Коефіцієнт, на який ділиться значення дистанції, дорівнює кореню квадратному з коефіцієнта зменшення інтенсивності.

Якщо відомо, що потужність передавача смартфона помітно менша, ніж 100 мВт, то необхідно 100 розділити на дійсну потужність у міліватах й обчислити корінь квадратний з отриманого числа. В результаті одержано коефіцієнт, на який потрібно поділити відстань, значення якого отримано за розглянутою методикою.

Хвиля, долаючи два залізобетонні перекриття, втрачає близько 30 дБ, це вже призводить до значної або повної відсутності мережі Wi-Fi. Насправді можна вважати, що після проходження двох перекриттів втрачається 35 децибел. Треба додати і загасання, залежне від довжини дистанції, тоді ми отримаємо приблизно 36–38 дБ. Отже, саме таке загасання для 100 мВт є критичним.

На вулиці за відстані 150–180 метрів наявність мережі можна помітити, але якщо бути на прямій видимості до обладнання. А стабільним зв’язок залишається на відстані 100 метрів. Як бачимо, теорія відповідає практиці з достатнім рівнем достовірності. Для надійності теоретично отриманий результат треба ділити на 2.

Всім зрозуміло, що навряд чи варто підвищувати потужність одного з передавачів, коли другий, тобто “абонентський”, залишається без змін. Те саме можна сказати і про застосування антен, що дають змогу збільшити інтенсивність хвилі, але звужують діаграму.

Налаштовуючи безкабельну мережу, необхідно вибирати не максимальне, а оптимальне значення потужності. В інтерфейсі є можливість вибору одного з декількох варіантів потужності передавача.

Модуль працює на частотах 2,4–2,4835 ГГц і дає змогу передавати дані з каналною швидкістю 54 Мбіт/с у стандарті 802.11g, сумісно з стандартом 802.11b. Для зручності передавання частота розподілена на так звані канали.

Одним з підводних каменів у налаштуванні безкабельної мережі є перекриття суміжних каналів один одним, що так само видно з рис. 12.

Із зображення зрозуміло що каналів всього 14, але залежно від країни, в якій ми перебуваємо, дозволяється використовувати тільки деякі з них. Наприклад, в Україні – 1 до 13 каналів, у Японії всі 14.

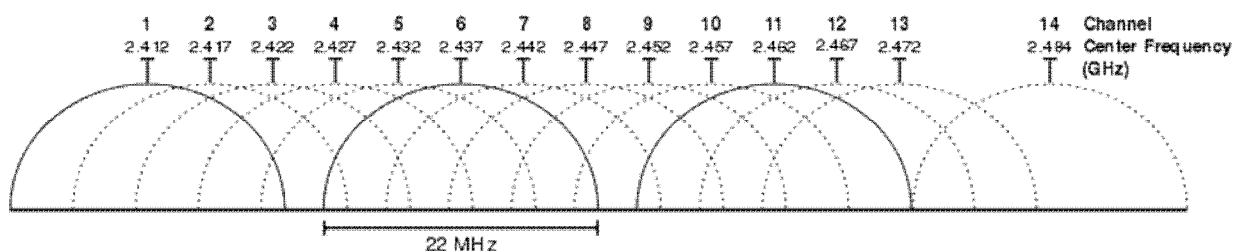


Рис. 12. Частотні канали Wi-Fi

Логічно припустити, що, налаштовуючи дві суміжні точки доступу, доволі просто їх налаштувати на різні канали. Наприклад, 1 і 2, або 1 і 3. Але ці канали перетинаються один з одним. Точки доступу, налаштовані у такий спосіб, створюватимуть перешкоди один для одного. Тобто якщо є 13 каналів, то максимум поруч ми можемо налаштувати три точки доступу стандарту b і g, які нормально співіснують, наприклад на 1, 6 і 11 каналах.

Якщо спрощено, чим більше Wi-Fi точок на каналі (чим більше точок ділять одну частоту), тим більше вони один одному заважають, тим нижча швидкість. Тому потрібно вибирати канал найменш навантажений, в ідеалі вільний.

У програмних засобах вбудовано Wi-Fi аналізатор, який, конфігуруючи мережу, виводить список точок доступу, розташованих поблизу в радіусі дії, а також канали, на яких вони працюють, та якість сигналу. Проаналізувавши ці дані, можна в ручному режимі встановити канал, який є вільним або найменш навантаженим, або вибрати режим автовизначення, який, спираючись на якість сигналу та зайнятість каналу, вибратиме найоптимальніший канал у цей момент та під час наступних запусків системи.

**Контролер модуля** містить 34 GPIO виводи, які забезпечують взаємодію з периферією через відповідні інтерфейси.

GPIO – це узагальнений інтерфейс вводу/виводу для зв'язку між компонентами комп'ютерної системи. Зазвичай представлений декількома регістрами: регістром напрямку, регістром вводу, регістром виводу та відповідними бітами їхніх станів.

Виводи модуля можна використовувати і для подання звичайних сигналів ввімкнення/вимкнення, і у вигляді інтерфейсів для з'єднання з давачами та іншими периферійними пристроями.

Далі детальніше описано інтерфейси модуля та наведено приклади їхнього використання.

**3 x UART.** Універсальний асинхронний прийомопередавач – вузол обчислювальних пристроїв, призначений для організації зв'язку з іншими цифровими пристроями. Перетворює передані дані в послідовний вигляд так, щоб було можливо передати їх по одній фізичній цифровій лінії іншому аналогічному пристрою. Метод перетворення добре стандартизований і широко застосовується в комп'ютерній техніці, інтерфейс UART є у багатьох пристроях, в яких встановлено будь-який процесор або контролер. Як правило, через цей інтерфейс відбуваються налагодження та перевірка коректності роботи пристрою.

Використовується для:

- прошивання та налагодження модуля Wi-Fi за допомогою ПК;
- під'єднання до мікроконтролерів та інших систем для передавання даних між мережею та пристроєм.

**2 x I2C.** I2C шина є однією з модифікацій послідовних протоколів обміну даних. У стандартному режимі забезпечується передавання послідовних 8-бітних даних зі швидкістю до 100 кбіт/с і до 400 кбіт/с у “швидкому” режимі. Для здійснення процесу обміну інформацією по I2C шині використовують всього два сигнали лінії даних SDA та лінія синхронізації SCL.

Проста послідовна шина I2C мінімізує кількість з’єднань між IC, IC мають менше контактів та потрібно менше доріжок.

Всі I2C-сумісні пристрої мають інтерфейс, який дозволяє їм зв’язуватися один з одним по шині навіть у тому випадку, якщо їх напруга живлення істотно відрізняється.

Наприклад, можуть бути під’єднані такі I2C давачі: лазерний давач відстані, RGB та жестів, оптичний давач завад, світла та ультрафіолету, вологи та температури, IMU (гіроскоп, акселерометр, магнітометр, барометр), струму та напруги, пульсу тощо.

**3 x SPI.** SPI – послідовний периферійний інтерфейс. З технічного погляду SPI – це синхронна чотирикабельна шина. Для з’єднання використовується конфігурація master/slave. Тільки master може генерувати імпульси синхронізації. У схемі завжди єдиний master (на відміну від тієї ж шини I2C, де можливий варіант з більш ніж одним master), кількість slave може бути різною. SPI завжди працює у повнодуплексному режимі.

Два провідники використовуються для передавання даних (MOSI, MISO), один для подавання тактових імпульсів (SCK) та один для вибору master для кожного з slave (CS).

Цей інтерфейс використовується для роботи з різними периферійними пристроями. Наприклад: ЦАП / ЦАП, потенціометри, давачі, розширювачі портів введення / виведення (GPIO), різноманітна пам’ять, складніша периферія, така як звукові кодеки та контролери Ethernet.

**2 x I2S.** I2S – стандарт інтерфейсу послідовної шини, що використовується для з’єднання цифрових аудіопристроїв. Застосовується для передавання аудіоданих між інтегральними схемами в електронному пристрої. Шина I2S передає по різних лініях сигнали синхронізації та сигнали даних, що призводить до зниження фазового тремтіння, типового для систем зв’язку, які відновлюють сигнали синхронізації з цілого потоку.

Інтерфейс I2S використовує чотири провідники, які йдуть від активного пристрою до пасивного, а також чотири сигнали, їм відповідні:

- тактовий сигнал бітової синхронізації;
- тактовий сигнал фреймової синхронізації;
- сигнал прийнятих даних;
- сигнал переданих даних.

Канали для приймання і передавання даних розділені, тобто існують окремо канал для приймання даних і канал для передавання даних. Контролер приймає дані, що передаються звуковим кодеком, але можлива і зворотна ситуація.

**18 аналогових виводів.** У разі використання аналогового сигналу показання передаються у вигляді змінної напруги на сигнальному кабелі. Сигнальна напруга може набувати значення від 0 В до напруги живлення.

У модулях, на яких побудована мережа, є аналогові входи, за допомогою яких можна зчитувати змінну напругу і на основі цього отримувати значення з давачів тощо.

Перевагою давачів з аналоговим сигналом є простота їх використання. Крім того, оскільки показання давача можна зчитувати всього однією командою, пам’ять на мікроконтролері не витрачається на зберігання алгоритму розшифрування протоколу, властивого цифровим давачам.

Розумна межа довжини кабелю для аналогового давача – не більше за 50 см. Якщо кабель від давача до мікроконтролера буде доволі довгим, він почне працювати як антена і вловлювати зовнішні електромагнітні поля: кабель сам впливатиме на вихідну напругу і тим самим спотворюватиме показання.

Щоб зменшити вплив перешкод на корисний сигнал, можна скористатися усередненням.

Дозвіл перетворювача становить 12 біт, що дає змогу на виході отримувати значення від 0 до 4096. Основним застосуванням аналогових входів більшості платформ є читання аналогових датчиків, але водночас вони мають функціональність входів/виходів широкого застосування GPIO (те саме, що і цифрові порти вводу/виводу).

Наприклад, можна використовувати такі аналогові датчики: температури; вологи, дощу, снігу; освітленості; шуму, вібрації, звуку; пилю, диму, вогню; водню, парів спирту; широкого спектра газів (горючих, чадного, природного, скрапленого вуглеводневого газу тощо); ультрафіолету; кислотності рН; струму та напруги, а також датчик Холла; потенціометри; аналогові акселерометри; ультразвукові віддалеміри.

У разі нестачі аналогових виводів є можливість розширити їхню кількість за допомогою спеціалізованих мікросхем розширення, які працюють по I2C шині.

**PWM / таймери (доступні для кожного GPIO).** Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ, англ. Pulse-width modulation (PWM)) – процес управління потужністю зміною шпаруватості імпульсів, за постійної частоти.

Цифрові виводи можуть видавати тільки два значення: логічний 0 (LOW, низький рівень) і логічну 1 (HIGH, високий). Але є виводи, які позначаються PWM.

Через те, що більшість фізичних процесів у природі мають інерцію, різкі перепади напруги від 1 до 0 будуть згладжуватися, набуваючи деякого середнього значення. За допомогою задання шпаруватості можна змінювати середню напругу на виході ШІМ.

Якщо шпаруватість дорівнює 100 %, то весь час на цифровому виході буде напруга живлення – логічна “1”. Якщо задати шпаруватість 50 %, то половину часу на виході буде логічна “1”, а половину – логічний “0”, і середня напруга дорівнюватиме  $\frac{1}{2}$  напруги живлення, і так далі.

Отже, можемо зімітувати аналоговий сигнал на цифровому виході. Це дає змогу керувати яскравістю освітлення, обертами двигунів та потужністю під'єднаних пристроїв. Управління великими потужностями здійснюється за допомогою додаткових мікросхем драйверів або транзисторних ключів, які комутують великий струм за слабкого вхідного сигналу контролера.

**Інтерфейс SD карт – SDIO master/slave.** Деякі вбудовані системи повинні мати можливість зберігання великих обсягів інформації. Наприклад, реєструвати фізичні величини та параметри (струм, напруга, температура, географічні координати) повинні зберігати отримані дані з датчиків на певному носії, для подальшого перегляду даних у зручному для користувача вигляді. Для вирішення такого завдання найочевиднішим видається використання USB флеш-накопичувачів. Вони поширені на ринку і дають змогу зберігати великі обсяги інформації. Але для деяких малих вбудованих систем першорядним фактором є компактність, і габарити цих накопичувачів можуть виявитися надмірними. Тому непоганою альтернативою USB є використання SD-карт, які дуже компактні й дають змогу обмінюватися даними за допомогою поширеного інтерфейсу SPI або спеціального інтерфейсу для SD-карт.

Хоча за допомогою SPI організація зв'язку хост-контролера з картою не спричиняє ускладнень, все ж шина SD надає більше можливостей і дає змогу пересилати інформацію з більшою швидкістю за рахунок наявності чотирьох ліній передавання даних.

## Висновки

Результати досліджень проблеми об'єднання пристроїв у багатоагентну систему дають можливість досягти високої ефективності, реалізуючи структурні рішення автономних вузлів вбудованої локальної мережі КФС та алгоритми їх роботи.

Отримані наукові результати можна використати для побудови та розгортання автономних локальних мереж, не прив'язаних до місцевості, які є переносними та легко розгортаються в

автоматичному режимі. Перший з ввімкнених пристроїв стає точкою доступу Wi-Fi з ТСП сервером, який комутує та перенаправляє повідомлення між адресатами-клієнтами, що також автоматично під'єднуються до заданої точки доступу.

Розроблена мережа дає змогу легко організувати систему керування за допомогою програмного забезпечення для засобів на ОС Android без необхідності перепід'єднання до кожного пристрою окремо. Також додаток дає змогу здійснювати конфігурацію основних налаштувань мережі за допомогою BLE, що робить мережу функціональнішою та гнучкішою у використанні.

1. Melnyk A. O. *Cyber-physical systems: problems of creation and directions of development* / Lviv Polytechnic National University Press // *Computer systems and networks*. – 2014. – No. 806. – P. 154–161.
2. Melnyk A. O. *Multilevel base platform of cyber-physics systems* // *Cyber-physical systems: achievements and challenges* // *Materials of the first scientific seminar, Lviv, 2015*. – P. 5–15.
3. Melnyk A. O. *Integration of the levels of the cyberphysical system* // Lviv Polytechnic National University Press. *Computer systems and networks*. – 2015. – No. 830. – P. 61–67.
4. Miyushkovich Ye.G., Paramud Ya. S. *Telecommunication interfaces of cybernetic systems: application concept* // *Cyber-physical systems of achievements and challenges: materials of the Scientific seminar, June 25–26, 2015, Lviv* / Lviv Polytechnic National University. – Lviv: *Ukrainian Technologies*, 2015. – P. 28–36.
5. Miyushkovich Ye. G., Grebeniak A. V., Paramud Ya. S. *Telecommunication subsystems of cyber-physical systems* // Lviv Polytechnic National University Press. *Computer systems and networks*. – 2016. – No. 857. – P. 65–73.