

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-58>
УДК 65.011.56:681.586:004.738.5

ОРДА ОЛЕКСІЙ

Національний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
e-mail: oleksiy.orda@gmail.com

БОНДАРЕНКО НАТАЛІЯ

Національний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0002-9237-8187>
e-mail: nalbondarenko@gmail.com

БОНДАРЕНКО ВІКТОР

Національний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0003-1663-4799>
e-mail: vicnbondarenko@gmail.com

ПРИСТРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЙНЯТОСТІ ПАРКОМІСЦЬ В СИСТЕМІ СМАРТ-ПАРКІНГУ

Враховуючи сучасні виклики урбанізації, зокрема дефіцит паркувального простору та потребу в автоматизованому обліку вільних місць, у статті запропоновано архітектуру пристрою, призначеного для точного визначення зайнятості паркомісць з використанням ультразвукових сенсорів RCWL-1601, мікроконтролера STM32F103C8T6 та Wi-Fi модуля ESP-07. Архітектура пристрою включає три ключові підсистеми: сенсорну, обчислювальну та комунікаційну. Пристрій забезпечує бездротову передачу даних, підтримує автономну роботу, простий у монтажі та не потребує втручання в дорожнє покриття. Проведено порівняльний аналіз з існуючими комерційними рішеннями, який підтвердив суттєве зниження вартості — до 5–10 разів при збереженні належної функціональності.

За результатами тестування пристрій продемонстрував стабільну роботу, точне виявлення транспортного засобу та надійний зв'язок в умовах критичних паркінгів. Розглянуто обмеження експлуатації на відкритому повітрі, зокрема вплив температури, вологості та потребу в додатковому захисті.

У перспективі передбачено інтеграцію з хмарними платформами, додавання нових типів зв'язку (GSM, LoRaWAN), впровадження інтелектуальних алгоритмів та забезпечення інформаційної безпеки. Запропоноване рішення є універсальною платформою для побудови масштабованої системи моніторингу паркомісць у рамках концепції «розумного міста», що робить його ефективним рішенням для розгортання в міських умовах.

Ключові слова: Смарт-паркінг, ультразвуковий сенсор, STM32, Wi-Fi, автоматизований облік, енергоефективність, бездротова передача даних

**ORDA OLEKSII, BONDARENKO NATALIYA,
BONDARENKO VIKTOR**

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

PARKING OCCUPANCY DETECTOR IN SMART PARKING SYSTEM

This article presents the design and testing of a parking occupancy detection device, a key element of smart parking infrastructure. As cities face increasing vehicle density and parking shortages, there is a growing demand for affordable, autonomous, and scalable systems capable of accurately identifying vacant parking spots. The developed solution is based on the STM32F103C8T6 microcontroller, RCWL-1601 ultrasonic sensor, and ESP-07 Wi-Fi module. The proposed device features modular architecture and is designed for easy deployment and integration into existing urban infrastructure without requiring pavement modification.

The system architecture consists of three main subsystems: input, processing, and output. The ultrasonic sensor detects vehicles based on distance measurements, while the microcontroller handles signal processing, occupancy status determination, memory buffering, and communication management. The ESP-07 module provides wireless data transmission to a server or mobile application. LED indicators offer real-time visualization of parking status, enhancing user convenience.

Functional testing conducted on a model parking stand demonstrated high detection accuracy (± 2 cm), low latency in wireless communication (up to 0.5 seconds), and energy-efficient performance suitable for battery-powered operation. The solution is ideal for covered parking areas and can be adapted for outdoor use following environmental testing.

In addition to its base functionality, the device allows for future upgrades, including integration with cloud-based monitoring systems, implementation of additional communication interfaces (e.g., GSM, LoRaWAN), and support for intelligent algorithms like pattern recognition or parking time estimation. Security enhancements such as TLS encryption can also be embedded. Overall, the prototype provides a versatile and cost-effective platform for smart city applications, offering both localized operation and networked scalability. Comparative analysis with existing commercial solutions confirmed a significant cost reduction — up to 5–10 times while maintaining proper functionality.

Keywords: Smart parking, ultrasonic sensor, STM32, Wi-Fi, automated accounting, energy efficiency, wireless data transmission.

Стаття надійшла до редакції / Received 27.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.06.2025

Вступ

Зростання кількості автомобілів у містах створює значне навантаження на паркувальну інфраструктуру, особливо в центральних районах мегаполісів. Необхідність ефективного управління

паркомісцями, скорочення часу пошуку вільного місця та підвищення зручності для користувачів обумовлює актуальність впровадження смарт-систем паркування. В основі таких систем лежить технологія автоматизованого обліку паркомісць із використанням пристроїв, які взаємодіють із сенсорами, модулями зв'язку та серверною частиною.

Існуючі рішення у сфері смарт-паркінгу демонструють широкий спектр архітектурних підходів, сенсорних технологій та комунікаційних протоколів, проте часто є складними у встановленні, малопридатними для автономної роботи або надто дорогими для масового впровадження. Тому актуальним є створення компактного, енергоефективного та доступного за ціною пристрою, здатного забезпечувати точне визначення зайнятості паркомісць, просту інтеграцію з іншими компонентами системи та стабільну передачу даних.

Метою цієї роботи є створення пристрою визначення зайнятості паркомісць на основі мікроконтролера STM32 з використанням ультразвукового сенсора та модуля Wi-Fi. Основна увага приділяється архітектурі пристрою, вибору оптимальної елементної бази та перевірці його працездатності в умовах, наближених до реальної експлуатації. Застосування описаного пристрою в системі смарт-паркінгу має забезпечити просте розгортання системи в рамках міської інфраструктури із перспективою подальшої масштабованості.

Постановка задачі

Ефективне функціонування системи смарт-паркінгу значною мірою залежить від точності детектування транспортного засобу, стабільності передачі даних та здатності системи до автономної роботи. Ключовим елементом, що реалізує ці функції на рівні кожного паркомісця, є пристрій визначення зайнятості паркомісць, який повинен мати достатню обчислювальну потужність, низьке енергоспоживання та можливість легкої інтеграції з периферійними сенсорами та каналами зв'язку.

Виходячи з аналізу існуючих рішень (табл. 1), сформульовано такі основні вимоги до розроблюваного пристрою:

- забезпечення точного виявлення факту зайнятості паркомісця на основі сенсорних даних;
- підтримка бездротової передачі інформації до серверної частини або мобільного додатку;
- простота монтажу, відсутність потреби у вбудовуванні у дорожнє покриття;
- енергоефективність та підтримка режимів енергозбереження для автономної роботи від акумулятора;
- можливість масштабування системи без істотної модифікації архітектури пристрою.

Розробка має передбачати мінімізацію вартості компонентів, гнучкість програмної логіки, а також сумісність з інтерфейсами майбутніх інформаційних табло, веб- або мобільних застосунків.

Таблиця 1

Порівняння деяких існуючих рішень у сфері смарт-паркінгу

Система	Тип сенсора	Тип зв'язку	Потреба в монтажі в покриття	Енергоспоживання	Особливості
Urbiotica U-Spot [1]	Магнітометричний	LoRaWAN / NB-IoT	Так	Низьке	Висока точність, автономність до 10 років
Parklio Smart Parking [2]	Інфрачерво-ний + BLE	Bluetooth / Wi-Fi	Ні	Середнє	Мобільне керування, цифрові ключі
Streetline / Bosch [3]	відеоаналіти-ка	Wi-Fi / LTE	Ні	Високе	AI-аналітика, ANPR, контроль порушень

Очікуваним результатом є створення функціонального прототипу пристрою, що відповідає зазначеним вимогам, придатного для подальшого розгортання у міському середовищі.

Структурна схема запропонованого пристрою

Пристрій системи обліку паркомісць базується на мікроконтролері STM32F103C8T6 [4], що відзначається поєднанням енергоефективності, обчислювальної потужності та підтримкою численних інтерфейсів. Архітектура пристрою має модульну будову і включає три основні функціональні підсистеми (рис. 1): вхідну, обчислювальну та вихідну.

Вхідна підсистема складається з ультразвукових сенсорів типу RCWL-1601 [5], які призначені для виявлення транспортного засобу над паркомісцем шляхом вимірювання відстані. Завдяки імпульсному режиму роботи сенсорів досягається висока енергоефективність, а монтаж на поверхні не потребує втручання у дорожнє покриття, що знижує витрати на інсталяцію. Сенсори підключаються до мікроконтролера через стандартні 4-контактні конектори типу 6PCV-04, що забезпечує зручність у налагодженні та обслуговуванні.

Обчислювальна підсистема реалізується на базі мікроконтролера STM32, який забезпечує обробку сигналів від сенсорів, визначення статусу паркомісця (вільне/зайняте), фільтрацію перешкод та зберігання подій у вбудованій Flash-пам'яті. У разі потреби реалізується підтримка функцій самодіагностики та буферизації подій. Мікроконтролер також відповідає за керування модулем зв'язку та LED-індикацією.

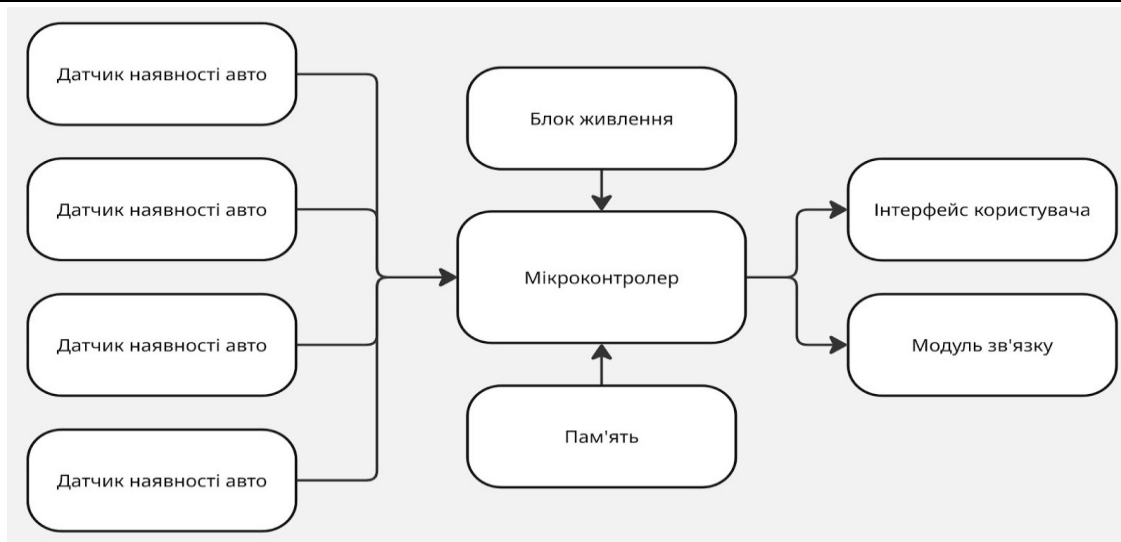


Рис. 1. Структурна схема пристрою

Вихідна підсистема складається з бездротового модуля ESP-07 [6] (на базі ESP8266), який забезпечує передачу даних до серверної частини за допомогою Wi-Fi [7]. Для інформування користувачів про статус місць реалізовано локальну світлодіодну індикацію.

Живлення пристрою здійснюється через USB-інтерфейс mini-B, а стабілізацію напруги 3.3 В виконує лінійний стабілізатор RT9193-33GB [8]. Для забезпечення стабільної роботи мікроконтролера застосовано два кварцових резонатори: 8 МГц для системного тактування та 32.768 кГц для годинника реального часу (RTC).

Такий підхід до побудови архітектури дає змогу реалізувати компактний, надійний та масштабований пристрій, придатний для автономної роботи у складних умовах міського середовища із забезпеченням балансу між точністю, функціональністю та вартістю.

Для оцінки економічної ефективності запропонованого рішення здійснено порівняльний аналіз вартості вузла, що включає чотири ультразвукових сенсори RCWL-1601, один мікроконтролер STM32F103C8T6, один Wi-Fi модуль ESP-07, стабілізатор, роз'єм живлення та друковану плату, з аналогічними рішеннями (таблиця 2).

Таблиця 2

Орієнтовна вартість одного вузла

Рішення	Склад вузла	Орієнтовна ціна за вузол, \$	Джерело даних
Запропонований пристрій	4× RCWL-1601 + ESP-07 + STM32F103C8T6 + плата	~12–15	[5], [6], [7]
Urbiotica U-Spot	Магнітометричний сенсор з LoRa	80–120	[1]
Parklio Smart Parking	ІЧ сенсор + BLE	60–90	[2]
Streetline / Bosch	Відеоаналітика + Wi-Fi	300–500	[3]

Запропоноване рішення демонструє в 5–10 разів нижчу вартість, ніж більшість комерційних аналогів, і при цьому забезпечує достатню функціональність для впровадження в муніципальній або приватній інфраструктурі. Його модульність дає змогу адаптувати систему під кількість контрольованих місць без істотного зростання витрат.

Тестування пристрою

Після завершення розробки апаратної частини пристрою проведено комплексне функціональне тестування з метою перевірки коректності роботи основних підсистем. Основну увагу приділено точності детекції транспортного засобу, стабільності бездротового зв'язку та енергоспоживанню пристрою.

Тестування проводилося на макетному стенді з імітацією паркомісця. Ультразвукові сенсори RCWL-1601 демонстрували впевнену роботу в умовах типового освітлення, при температурі 22–25°C та висоті монтажу до 80 см. Похибка детекції не перевищувала ± 2 см, що дозволяло точно визначати наявність транспортного засобу над сенсором.

Передача даних через Wi-Fi модуль ESP-07 здійснювалася стабільно в межах покриття роутера, із затримкою до 0.5 с при оновленні статусу місця. Перевірено коректність передачі даних, які включали інформацію про унікальний ідентифікатор контролера та статус паркомісця.

Результати тестування засвідчують відповідність пристрою технічним вимогам в обмеженому діапазоні температур, що дозволяє рекомендувати його для встановлення в критичних паркінгах, з перспективою адаптації до зовнішніх умов у разі проходження відповідних випробувань.

Особливості експлуатації пристрою

Використання пристрою на відкритому повітрі супроводжується низкою викликів, які потребують додаткового врахування на етапі інсталяції та експлуатації:

- температурні перепади: ультразвукові сенсори чутливі до змін швидкості звуку з температурою, а це може впливати на точність визначення відстані, що можна компенсувати додатковим температурним сенсором і адаптивним алгоритмом фільтрації;
- опади та бруд: накопичення вологи чи сміття на мембрані сенсора може спричинити хибні спрацювання, тому рекомендується використання герметичного корпусу зі скошеним отвором;
- монтаж та живлення: зовнішнє встановлення вимагає надійного кріплення та захисту від вандалізму, а для забезпечення автономності пристрої можуть бути оснащені сонячною панеллю та акумулятором.

Проведене тестування на макетному стенді не охоплювало повного діапазону зовнішніх впливів, тому для застосування у вуличних умовах рекомендується додатково провести кліматичні та пило-вологозахисні випробування.

Перспективи пристрою

Незважаючи на базову функціональність, розроблений пристрій має потенціал для масштабування та подальшої модернізації. Нижче подано основні напрями вдосконалення:

1. Інтеграція з міською інфраструктурою – передбачено можливість підключення пристрою до хмарної платформи або системи диспетчеризації для централізованого моніторингу паркінгів у місті.
2. Модульна архітектура – відкриває можливість розширення інтерфейсів пристрою, наприклад: додавання модулів GSM або LoRaWAN для роботи в місцях без Wi-Fi покриття.
3. Інтелектуальна обробка даних – завдяки достатній обчислювальній потужності STM32 можливе впровадження алгоритмів для розпізнавання шаблонів паркування, визначення середнього часу стоянки тощо.
4. Захист та безпека – впровадження апаратного шифрування або безпечних каналів зв'язку (TLS) для запобігання несанкціонованому доступу до системи.

Таким чином, запропоновано не лише прототип функціонального пристрою для локального обліку паркомісць, а й універсальну платформу для побудови розгалуженої системи інтелектуального паркування з підтримкою сучасних стандартів «розумного міста».

Висновки

У статті представлено структурну схему, реалізацію та тестування прототипу пристрою для виявлення зайнятості паркомісць у рамках системи смарт-паркінгу. Запропоноване рішення базується на поєднанні бюджетної елементної бази (STM32F103C8T6, RCWL-1601, ESP-07), модульної архітектури та простого монтажу без втручання в дорожнє покриття. Такий підхід дає змогу досягти оптимального балансу між вартістю, точністю та енергоефективністю.

Функціональне тестування продемонструвало високу точність виявлення транспортного засобу (до ± 2 см), стабільність бездротової передачі даних із затримкою не більше 0.5 с, а також енергоощадність, що робить пристрій придатним для автономної роботи від акумулятора. За оціночними даними, вартість одного вузла у 5–10 разів нижча за найближчі комерційні аналоги, що відкриває можливості для масштабного впровадження у муніципальній інфраструктурі або приватних паркінгах.

Обґрунтовано вимоги до експлуатації пристрою в умовах відкритого повітря та запропоновано шляхи удосконалення, включно з додаванням захисту від кліматичних впливів, підтримкою GSM/LoRaWAN, підключенням до хмарних сервісів та впровадженням алгоритмів інтелектуальної обробки даних.

Таким чином, запропонований пристрій є не лише ефективним локальним рішенням для обліку паркомісць, але й перспективною платформою для побудови масштабованої, інтелектуальної системи смарт-паркінгу відповідно до концепції «розумного міста».

Література

1. Urbiotica U-Spot: Smart Parking Sensor [Електронний ресурс] // Urbiotica. – Режим доступу: <https://www.urbiotica.com/en/>. – Дата звернення: 16.05.2025.
2. Parklio Brain | Universal Electronic Module [Електронний ресурс] // Parklio. – Режим доступу: <https://parklio.com/>. – Дата звернення: 16.05.2025.
3. Streetline Parker Platform [Електронний ресурс] // Streetline. – Режим доступу: <https://www.streetline.com/our-innovations/>. – Дата звернення: 16.05.2025.
4. STM32F103x8/xB Reference Manual [Електронний ресурс] // STMicroelectronics. – Режим доступу: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/CD00171190.pdf – Дата звернення: 16.05.2025.
5. RCWL-1601 – Ultrasonic Sensor Module [Електронний ресурс] // HopeRF / datasheetspdf.com. – Режим доступу: <https://datasheetspdf.com/pdf/RCWL-1601>. – Дата звернення: 16.05.2025.
6. ESP-07 WiFi Module [Електронний ресурс] // <https://www.mikrocontroller.net>. – Режим доступу: https://www.mikrocontroller.net/attachment/338570/Ai-thinker_ESP-07_WIFI_Module-EN.pdf. – Дата звернення: 16.05.2025.

7. Dawoud D.S., Dawoud P. Serial Communication Protocols and Standards – River Publishers, 2020. – 353 p.
8. RT9193-33GB Low Dropout Linear Regulator – Datasheet [Електронний ресурс] // Richtek Technology Corp. – Режим доступу: https://www.richtek.com/assets/product_file/RT9193/DS9193-12.pdf. – Дата звернення: 16.05.2025.

References

1. Urbiotica U-Spot: Smart Parking Sensor [Electronic resource] // Urbiotica. – Access mode: <https://www.urbiotica.com/en/>. – Access date: 16.05.2025.
2. Parklio Brain | Universal Electronic Module [Electronic resource] // Parklio. – Access mode: <https://parklio.com/>. – Access date: 16.05.2025.
3. Streetline Parker Platform [Electronic resource] // Streetline. – Access mode: <https://www.streetline.com/our-innovations/>. – Access date: 16.05.2025.
4. STM32F103x8/xB Reference Manual [Electronic resource] // STMicroelectronics. – Access mode: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/CD00171190.pdf. – Access date: 16.05.2025.
5. RCWL-1601 – Ultrasonic Sensor Module [Electronic resource] // HopeRF / datasheetpdf.com. – Access mode: <https://datasheetpdf.com/pdf/RCWL-1601>. – Access date: 16.05.2025.
6. ESP-07 WiFi Module [Electronic resource] // Mikrocontroller.net. – Access mode: https://www.mikrocontroller.net/attachment/338570/Ai-thinker_ESP-07_WIFI_Module-EN.pdf. – Access date: 16.05.2025.
7. Dawoud D.S., Dawoud P. Serial Communication Protocols and Standards. – River Publishers, 2020. – 353 c.
8. RT9193-33GB Low Dropout Linear Regulator – Datasheet [Electronic resource] // Richtek Technology Corp. – Access mode: https://www.richtek.com/assets/product_file/RT9193/DS9193-12.pdf. – Access date: 16.05.2025.