

# ВБУДОВАНА ІОТ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ В ІОТ ІНФРАСТРУКТУРІ SMART CITY

*Нікольський Сергій Сергійович, аспірант, Клименко Ірина Анатолівна, д.т.н, доцент  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», Україна; e-mail: [serhiy.nikolskiy@gmail.com](mailto:serhiy.nikolskiy@gmail.com)*

## Анотація

Запропоновані концептуальні рішення та апаратно-програмні засоби для дистанційного керування дорожнім рухом. Обґрунтований гібридний багаторівневий підхід до реалізації IoT інфраструктури дозволить реалізувати масштабовані IoT інфраструктури з інтеграцією в хмарні технології та сервіси. Локалізація апаратно-програмних засобів керування дорожнім рухом на нижньому рівні IoT інфраструктури в безпосередньому наближенні до пристроїв збирання даних забезпечує формування керуючих впливів в реальному часі та розвантажує канали зв'язку на верхніх рівнях архітектури IoT інфраструктури. Запропоновано технологію формування керуючих впливів для дистанційного керування дорожнім рухом, яка базується на розробленій системі AT команд для розвертання веб-серверу та генерації веб-сторінок засобами вбудованої IoT платформи на сучасних мікроконтролерах. Запропонована технологія дозволяє формувати керуючі впливи в режимі реального часу, в зручному для сприйняття текстовому форматі з використанням веб-інтерфейсу в локальному домені IoT інфраструктури та дозволяє візуалізувати інформацію на віддалених дисплеях і інформаційних дошках, а також на дисплеях вбудованих в апаратуру автомобільних засобів. Запропонована технологія може бути використана для інформування учасників дорожнього руху про критичні ситуації, а також вбудована в розумні світлофори в системах дистанційного керування дорожнім рухом, або використана для реалізації віртуальних світлофорів. Запропонована технологія реалізована у вигляді експериментального макету вбудованої IoT платформи.

## Ключові слова

Вбудовані системи, Інтернет речей, периферійні обчислення, мікроконтролер, дистанційне керування, контроль руху, Smart City.

## Abstract

Proposed conceptual solutions and hardware-software tools for remote traffic management. A justified hybrid multilevel approach to IoT infrastructure implementation will enable the realization of scalable IoT infrastructure with integration into cloud technologies and services. The localization of hardware-software traffic management tools at the lower level of the IoT infrastructure, in close proximity to data collection devices, ensures the generation of control influences in real time and relieves communication channels at the higher levels of the IoT infrastructure architecture. A technology for generating control influences for remote traffic management is proposed, which is based on the developed AT command system for deploying a web server and generating web pages using the capabilities of the embedded IoT platform on modern microcontrollers. The proposed technology allows for the formation of control influences in real-time, in an easily comprehensible textual format, using a web interface in the local domain of the IoT infrastructure. It also enables the visualization of information on remote displays and information boards, as well as on displays integrated into automotive equipment. The proposed technology can be used to inform road traffic participants about critical situations and can be embedded in smart traffic lights within remote traffic management systems or used to implement virtual traffic lights. The proposed technology has been implemented as an experimental model of an embedded IoT platform.

## Keywords

Embedded systems, Internet of Things, Edge Computing, Microcontroller Unit, remote control, traffic control, Smart City.

## 1. Вступ

Досягнення в області бездротових каналів зв'язку в останні роки відкрили перспективи використання Інтернет для популяризації послуг. Значно вплинули на цей прогрес хмарні технології та послуги, які надають можливість необмеженого масштабування обчислювальної потужності, ємності зберігання

даних, сервісів аналітики та моніторингу. Для забезпечення постійно зростаючих людських потреб, все більш значною стає проблема розвитку інформаційної інфраструктури. Це обумовлено необхідністю реалізації зв'язку між великою кількістю пристроїв, які в сучасних інфраструктурах часто перевищують кількість користувачів. На сьогодні найбільш популярним рішенням цієї проблеми є Інтернет речей (IoT, Internet of Things).. Парадигма IoT, яка активно втілюється і стає невід'ємною частиною людського оточення, в першу чергу спрямована на здійснення багатьох процесів без участі людини.

Це обґрунтовує актуальну проблематику взаємодії між речами без втручання людини в парадигмі IoT, яка передбачає автоматизоване збирання даних з розподілених та віддалених датчиків, обробку та аналіз надвеликих обсягів різноманітних даних, зокрема інтелектуальний аналіз та підтримку режиму реального часу. [1]. Автоматизація процесів в парадигмі IoT робить можливим розроблення ймовірнісних поведінкових сценаріїв та середовищ, які здатні збільшити рівень комфорту та безпеки у житті людства, та загалом значно вплинути на розвиток людського суспільства в цілому. Реалізація концепції розумного міста (Smart city) невід'ємно пов'язана сьогодні з парадигмою IoT [2, 3]. Ця концепція полягає в основі перспективного розвитку та оптимізації систем електронного урядування та автоматизації управління повсякденним життям міст у всьому світі.

З ростом урбанізаційних процесів зростає кількість транспортних засобів, що, в свою чергу, призводить до перевантаження трафіку і появи заторів. Один з актуальних напрямів розвитку IoT інфраструктури стосується керування дорожнім рухом. В літературних джерелах описані різноманітні автоматизовані системи дистанційного керування дорожнім рухом [2, 4, 5], зокрема дистанційного керування на основі «розумних світлофорів» [6], які інтегруються в IoT інфраструктуру Smart City. Передові виклики в цій області описані, як заміна фізичних світлофорів віртуальними. За таких умов зменшення втручання людини сприятиме зменшенню кількості помилок, спричинених «людським фактором» під час диспетчерського керування рухом транспорту. Інтелектуалізація в таких системах базується на розробленні алгоритмів та методики функціонування автоматичних засобів збирання та оброблення даних в інфраструктурі IoT [3].

Автоматизоване дистанційне керування в парадигмі IoT базується на використанні бездротових технологій і каналів зв'язку малого та середнього радіуса дії [7]. Бездротові технології Wi-Fi на сьогодні передають значну частину бездротового трафіку від різних IoT пристроїв [8, 9], що обумовлює стрімкий рівень розвитку Wi-Fi, покликаний забезпечити надзвичайно високу пропускну здатність та надійність передавання даних в інфраструктурі IoT [3].

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Тематика дистанційного керування є актуальною в парадигмі сучасних розумних міст, що базуються на технологіях IoT. Ця тематика описана в великій кількості літературних джерел. В роботі [10] узагальнені характерні особливості реалізації систем дистанційного керування, зокрема їх апаратної складової.

Для реалізації засобів автоматизованого дистанційного керування в IoT використовують різноманітні технології бездротового зв'язку в мережі Інтернет. Від вибору технологій передавання даних датчиками залежить продуктивність IoT застосунку. В інфраструктурі Інтернету речей (IoT) застосовуються різноманітні технології реалізації пристроїв збирання інформації, зокрема це стосується пристроїв IoT, які є невід'ємними частинами більш складніших рішень, таких як розумні міста або розумні системи керування. Багато датчиків, спеціально призначених для вузького діапазону застосувань, широко використовуються для рішення відповідних задач в IoT [11]. В роботі [7] наведено детальний огляд та аналіз технологій бездротового зв'язку малого та середнього радіуса дії для застосунків IoT. Зазначено, що найбільш поширеними бездротовими інтерфейсами для реалізації дистанційного зв'язку в складних інфраструктурах та керуючих системах є радіоканали різного радіуса дії та частотного діапазону, такі як ultra-wideband (UWB), Radio Frequency Identification (RFID), bluetooth, WiFi, Zigbee. Bluetooth використовують для бездротової передачі даних між IoT пристроями на короткі відстані. Для середнього радіуса дії перевага віддається технологіям 2G, 3G/GSM, 4G/LTE, 5G. Передову позицію займає технологія WiFi, виключно через низьку затримку, високу швидкість передачі даних і розширений діапазон. В роботі [3] автори зазначають, що майбутні IoT пристрої все більше залежатимуть від наступних поколінь Wi-Fi, які будуть потужнішими, ефективнішими та складнішими. Сьогодні Wi-Fi технології відповідають за значну частину бездротового трафіку даних різних пристроїв, а шосте покоління Wi-Fi (Wi-Fi 6) означає підвищену ефективність зв'язку, а також використовуватиме нещодавно доступний спектр 6 ГГц (Wi-Fi 6E). Роботи над стандартизацією сьомого покоління (Wi-Fi 7) покликані забезпечити надзвичайно високу пропускну здатність (IEEE 802.11be). [8, 9]

Разом з цим, для інфраструктури IoT реалізація каналів передачі даних є екстенсивним засобом підвищення ефективності, наразі розробники IoT інфраструктур розглядають комплекс інтенсивних заходів, які стосуються вдосконалення архітектури IoT та розроблення ефективного програмного та апаратного забезпечення. Основний концептуальний підхід, який на сьогодні є обґрунтованим в парадигмі IoT це розташування частини інфраструктури на місці, тобто на границі мережі IoT (EC, Edge Computing). Зважаючи на актуальність хмарних технологій, які надають потужні сервіси обробки та аналітики даних,

сховища та масштабовану розподілену обчислювальну потужність на сьогодні найбільш актуальний гібридний підхід до архітектури IoT, який передбачає інтеграцію хмарних та граничних технологій. Гібридна архітектура, що є яка є синергією хмарного та локального IoT середовища описана в роботі [12]. Архітектурні вдосконалення з використанням граничних обчислень переносять частину обчислень та сховищ даних до джерела даних, що сприятиме підвищенню ефективності збирання та аналізу даних за рахунок зменшення часу відклику, забезпеченню режиму реального часу, зберігання пропускну здатності, збільшенню достовірності результатів, безпеці, зменшенню енерговитрат.

Рішення на основі гібридного підходу та Edge Computing описані в великій кількості літературних джерел, що присвячені розробкам в області розвитку розумних місць. Розумні паркувальні майданчики [1, 4], засоби керування трафіком [12], та розумні світлофори [6] є найбільш характерними прикладами.

Проблеми підвищення ефективності процесів збирання й аналізу даних в режимі реального часу, вдосконалення апаратних та програмних засобів для збирання, аналізу даних та формування керуючих впливів на границі IoT, розроблення граничних обчислювальних сервісів є актуальними задачами, вирішенню яких присвячена дана стаття.

### **3. Мета і задачі дослідження**

Мета дослідження полягає в розробці концептуальних та апаратно-програмних засобів для реалізації дистанційного керування дорожнім рухом з використанням бездротових каналів передавання даних WiFi. Ціллю дослідження є розроблення апаратно-програмних засобів на рівні локального домену інфраструктури IoT, які можуть бути інтегровані в глобальну існуючу інфраструктуру розумного міста, яка побудована в рамках концепції гібридної архітектури IoT на основі технології граничних обчислень. Поставлені задачі:

- Обґрунтувати концепцію реалізації системи дистанційного керування дорожнім рухом з можливістю інтеграції в глобальну інфраструктуру IoT розумного міста для подальшої імплементації.
- Для вирішення задачі дистанційного керування розробити апаратно-програмні засоби для реалізації вбудованої IoT платформи, яка здатна забезпечити процеси автоматизованого збирання даних та передачі керуючих впливів в локальному домені інфраструктури IoT.
- Розробити експериментальний стенд для реалізації та налаштування вбудованої IoT платформи.

### **4. Матеріали та методи розроблення засобів дистанційного керування**

#### **4.1. Обґрунтування концепції дистанційного керування дорожнім рухом в розумному місці для імплементації розроблюваних програмно-апаратних засобів**

Підхід розумного світлофора з використанням розумних технологій та спеціальних алгоритмів, які враховують потік автомобілів і велосипедів залежно від обстановки на перехресті, розглядається в роботі [6]. Система враховує навантаження на дорозі та перемикає сигнал світлофора в залежності від кількості транспортних засобів. Параметрами перемикання світлофора є навантаження на дорозі, а також загальні викиди вуглецю діоксиду, які знімаються з датчиків і розраховуються системою. Описана передова ідея заміни фізичних світлофорів віртуальними. Для реалізації цієї концепції автори роботи пропонують використати мікроконтролер, який виконує функцію розумного світлофора. Розумний світлофор в свою чергу є частиною всієї інфраструктури IoT включаючи інтеграцію з хмарними технологіями. Розумний світлофор є мікрокомп'ютером із трансивером, який підключений до глобальної інфраструктури. З іншого боку розумні світлофори є ретранслятором у бездротовій глобальній мережі, який має зв'язок з автомобільними комп'ютерами. Автори не розглядають гібридні архітектури, але загалом запропоноване передове рішення полягло в основу досліджень виконаних в даній статті.

Відомий метод інтелектуального керування дорожнім рухом, в який можуть бути інтегровані розроблювані засоби дистанційного керування, описаний в роботі [12]. Ідея базується на розгортанні сенсорних мереж на кожному дорожньому перехресті. Для моніторингу кількості транспортних засобів можуть бути використані гібридні датчики для виявлення присутності транспортних засобів на певному місці, а також для ідентифікації автомобіля за його реєстраційним номером, наданим міткою бездротового радіозв'язку RFID. Використовуються датчики присутності, встановлені на смугах руху на кожному перехресті, для визначення щільності руху і управління світлофорами для збільшення потоку транспорту на цьому перехресті. Метод заснований на розгортанні топології кластерної мережі, щоб різні типи датчиків, встановлених на кожному перехресті, могли відправляти свої дані в глобальний центр керування системи з відповідного шлюзу.

Все це лягає в теорію гібридної організації архітектури IoT. Ми розглядаємо локальний домен на рівні кожного кластеру мережі. Граничний маршрутизатор виконує роль шлюзу для доступу до глобального центру керування. Вбудована система на базі мікроконтролера виконує завдання збирання та

локального аналізу інформації з датчиків і сенсорів локального домену – кластеру. Зв'язок з хмарними сервісами відбувається через центр керування. Центр керування також має можливість з'єднання з запропонованими технічними рішеннями в кожному локальному домені для передачі керуючих впливів і повідомлень, але це виходить за рамки досліджень в цій статті.

На рис. 1 представлено концепцію дистанційного керування дорожнім рухом в розумному місті для подальшої імплементації. Концепція розроблена на підставі аналізу відомих систем дистанційного автоматичного керування дорожнім рухом і реалізації розумних світлофорів. Розглядається, як найбільш актуальна, гібридна тривірнева архітектура, структура якої наведена на рис. 1. Перший рівень представляє собою локальний домен, на якому локалізуються система сенсорів та датчиків. Центром локального керування, який виконує функції агрегатора даних, локального сервера аналітики та пристрою керування розумним світлофором, зв'язаний з усіма пристроями локального домену і з верхніми рівнями IoT інфраструктури. Центральний центр керування виконує функцію інтеграції локальних доменів і може бути реалізований або на границі другого рівня IoT інфраструктури або на рівні хмарних технологій та сервісів.

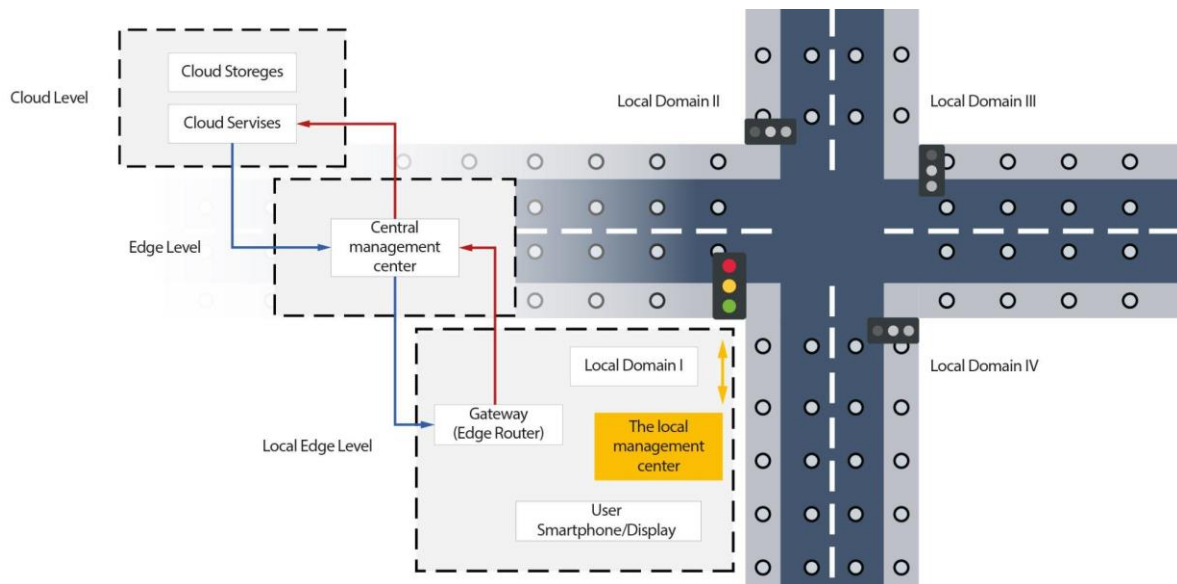


Рис. 1 Структурна схема реалізації тривірневої гібридної архітектури IoT для дистанційного керування дорожнім рухом

## 4.2. Програмно-апаратні засоби для реалізації вбудованої IoT платформи

Для розроблення експериментально макету вбудованої IoT платформи використана плата для розробки Global Logic StarterKit [13], у склад плати для розробки входить MCU (Microcontroller Unit) STM32F407 Discovery з мікроконтролером STM32F407VGT6 компанії STMicroelectronics (Європейська інтернаціональна компанія, Франція, Італія) та плата розширення, яка містить вбудований символічний дисплей і набір необхідних датчиків. Під час експериментів використані датчики температури, загазованості повітря й акселерометр.

Плата для розробки Global Logic StarterKit не містить програмного та апаратного забезпечення для підключення до інфраструктури IoT. Для підключення до IoT використано один з найпопулярніших MCU для IoT застосунків – ESP8266 з Wi-Fi модулем. Для підключення до IoT використано одне з найпопулярніших автономних транзистерів WIFI - контролер ESP8266. Для збирання даних з датчиків і підключення до інфраструктури IoT використовуються бездротова технологія передавання даних WIFI [7], яка дозволяє забезпечити необхідну дальність сигналу в локальному домені IoT і задовільний рівень енергоспоживання для розроблюваного IoT рішення.

MCU ESP8266 у конфігурації за замовчуванням завантажується у режимі послідовного модема. В цьому режимі є можливість спілкуватися з модулем ESP8266 за допомогою набору команд AT. AT-команди ESP8266 поділяються на команди рівня Wi-Fi та рівня TCP/IP. Набір команд AT є фактичним стандартом зв'язку з модулем ESP8266. Детально використання AT команд для з'єднання з модулем ESP8266 розглянуто також авторами в роботі [4]. Фактично AT команди це альтернатива командному

рядку для рішень на історичних роутерах. Але ці рішення на сьогодні залишаються актуальними та часто використовуються в пристроях GSM, Wi-Fi, Bluetooth для конфігурації та зв'язку з хостом.

## 5. Розроблення вбудованої IoT платформи для збирання даних з датчиків та формування керуючих впливів в локальному домені IoT інфраструктури

Структура вбудованої IoT платформи представлена на рис. 2. Архітектура локального домену IoT інфраструктури складається з вбудованої IoT платформи на базі MCU STM32F407 Discovery, який з'єднаний з модулем ESP8266 через інтерфейс UART.

Для віддаленого інтерактивного з'єднання з модулем ESP8266 запропонована технологія використання AT команди. MCU виконує функцію хоста, який надсилає AT-команди і очікує на відповіді або інші сповіщення від модуля ESP8266. MCU виконує функцію хоста, який надсилає AT-команди і очікує на відповіді або інші сповіщення від модуля ESP8266. MCU через ESP8266 автоматично на рівні мікропрограми підключається до робочої мережі із зазначеним ідентифікатором бездротової мережі SSID (Service Set Identifier) та стає веб-сервером. Інші хости локальної мережі IoT інфраструктури підключаються до цього веб-сервера та отримують статично створену веб-сторінку з показниками датчиків в реальному часі. Вузлами локальної мережі можуть бути користувачі мобільних пристроїв з встановленим застосунком, автомобільні комп'ютери та інші вбудовані в автомобіль системи, граничні сервери оброблення та збереження даних, локальні диспетчерські станції тощо. Структурна схема інтеграції експериментального стенда в інфраструктуру локального домену IoT наведена на рис. 2.

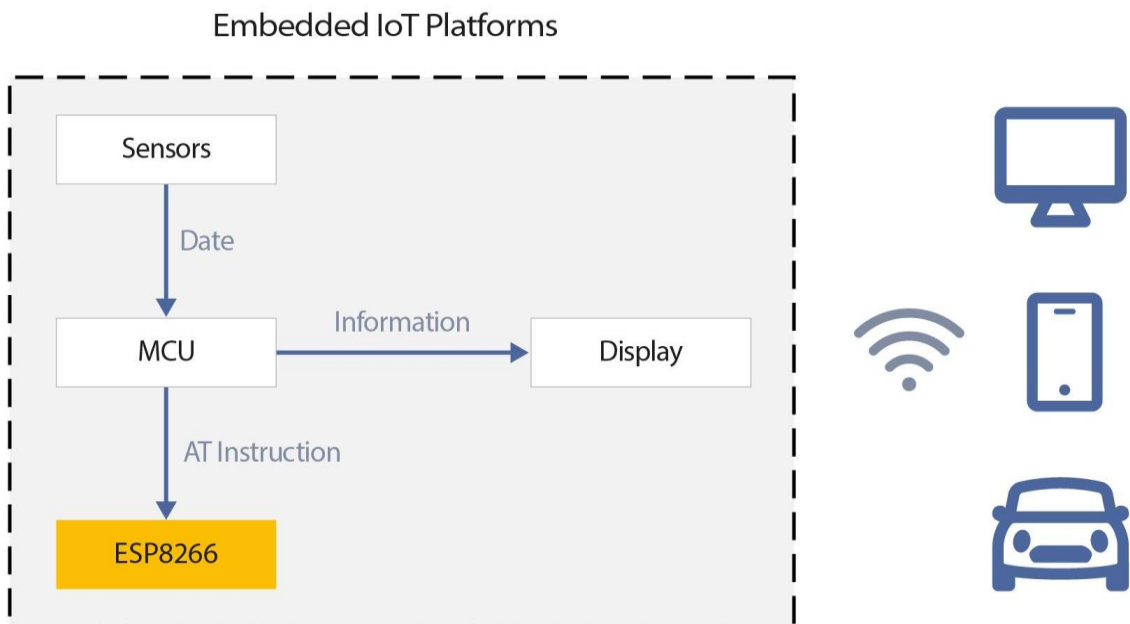


Рис. 2 Структура вбудованої IoT системи

Структурна схема запропонованого програмного рішення та взаємозв'язок основних програмних модулів представлена на рис. 3. Програмне забезпечення вбудованої IoT платформи на базі MCU STM32F407 Discovery реалізовано на операційній системі FreeRTOS, для розроблення або інтеграції драйверів з інших джерел використовувалося вбудоване програмне забезпечення STM32 HAL. Для конфігурації контролера STM32F407 використано середовище розробки STM32CubeMX. Середовище розробки STM32CubeMX це інструмент з графічним інтерфейсом від компанії STMicroelectronics, який призначено саме для автоматичного конфігурування пристроїв STM32, а також для генерації вихідного коду мовою C.

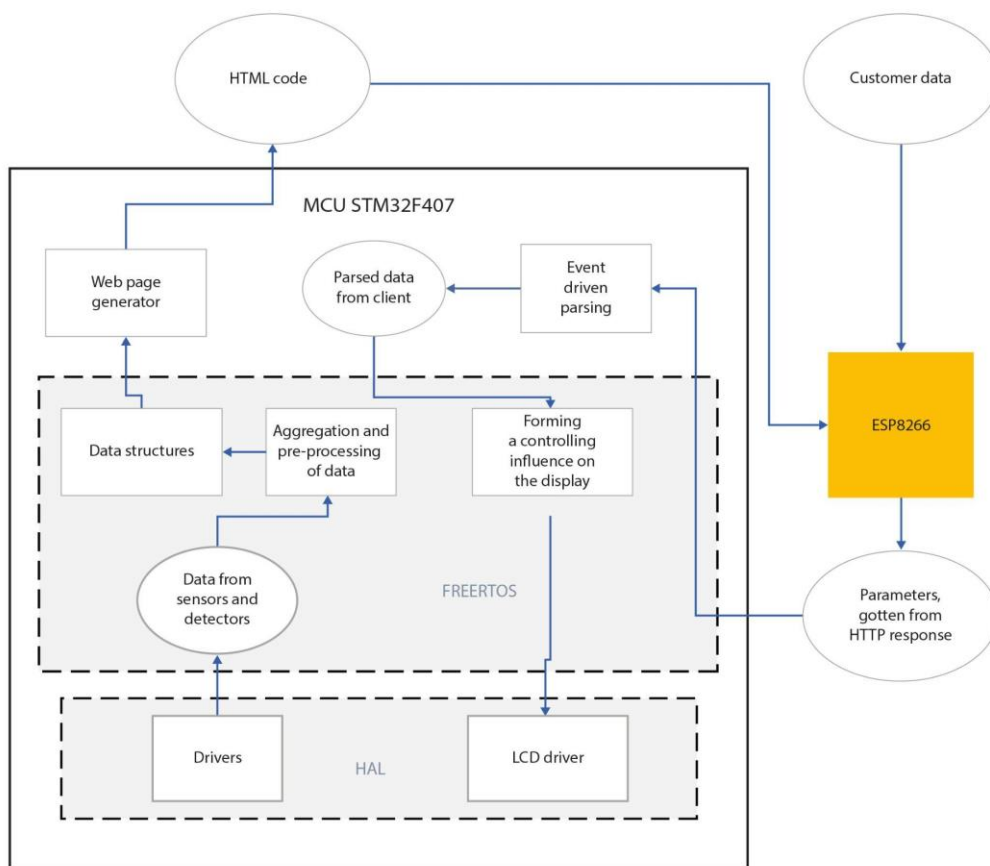


Рис. 3. Структурна схема програмного забезпечення

Для реалізації запропонованої технології розвертання веб-серверу та генерації веб-сторінок розроблено засоби віддаленого інтерактивного з'єднання з модулем ESP8266 на основі AT команд. Розроблена система AT команд для реалізації веб-інтерфейсу для з'єднання з платою Global Logic StarterKit. Для розробки системи команд для створення та функціонування веб-серверу, а також налагодження і експериментів використано віддалений термінал рісосоm. Першим кроком за допомогою AT команди вбудована система перевіряє, чи є зв'язок з модулем ESP8266. Після введення команди в терміналі виводяться інформація про відправлене повідомлення (ехо), після натискання на ENTER – отримуємо відповідь OK. Розроблена система команд заснована на використанні стандартного набору команд. Для експериментів із підключенням і дослідженням працездатності системи в мережному оточенні в системі команд використовуються базові типи команд з необхідними параметрами:

- AT+<x>=? – тест
- AT+<x>? – запит
- AT+<x>=<...> – установка
- AT+<x> – команда без параметрів

Виконанням наведених команд дозволяє зрозуміти, що рішення працездатне і особливою перевагою AT команд є мовний інтерфейс, який одночасно зрозумілий людині і дозволяє писати парсери на рівні користувацького програмного забезпечення.

Команди створюються мовою C і, як було зображено у попередньому експерименті, відправити команду у віддаленому терміналі нескладно. Проблема виникає під час отримання результату виконання команди. Для чого запропоновано систему команд і експериментальну методику використання AT команд для керування модулем ESP8266.

**Експеримент 1.** Нехай потрібно підключитися до точки доступу з параметрами доступу ssid='Hello', psk='World'. Необхідно визначити в якому стані знаходиться модуль, чи він працездатен, чи доступна точка доступу для підключення. працює він.

Методика підключення розділяється на наступні етапи:

1. AT - перевірка відповіді на AT команду

2. AT+RST - скидання модуля до початкового стану. (очікування відповіді *ready*)
3. ATE0 - відключення *echo* (очікування відповіді *OK*)
4. AT+CWJAP=1 - встановлення стану станція - клієнт (очікування відповіді *OK*)
5. AT+CWJAP="Hello","World" - підключення до точки доступу (очікування відповіді *WIFI CONNECTED*)

**Експеримент 2.** У випадку, якщо модуль ESP8266 вже підключений до точки доступу *WIFI*.

Команда AT+CWJAP? дозволяє перевірити до якого WIFI зараз підключено модуль, і чи підключено взагалі. Відповідь прийде у вигляді +CWJAP:ssid. Але у такому разі краще не посилати AT+RST.

**Експеримент 3.** Методика створення веб-сервера на базі модуля ESP8266.

AT+CWMUX=mode - підключення до декількох (до 4х) з'єднань для сервера. Команда встановлення режиму декількох з'єднань дозволяє включити сервер:

AT+CWMUX=1 встановлює режим декількох з'єднань;

AT+CIPSERVER=mode,port - встановлює режим сервера, після цього інші пристрої, що знають адресу модуля, можуть створити з ним з'єднання. В якості параметрів команди встановлюються наступні значення: порт - 80, створити сервер - 1. Отже, наступна команда дозволяє встановити режим сервера:

AT+CIPSERVER=1,80.

**Експеримент 4.** Створивши веб-сервер, очікуємо повідомлень. Для того, щоб зчитувати повідомлення, необхідно налаштувати переривання на порту UART. Це було зроблено наступним чином. Коли приходить нове 8-бітне число на лінії, виконується переривання, та записує це число в кільцевий буфер. Потім зчитує рядок із буфера і шукає індикатори, які дозволяють визначити типи даних, що прийшли. Дані, що приходять з модуля виглядають наступним чином:

WIFI <слово індикатор>ready - модуль готовий до роботи

busy p. - не готовий<id>,

CONNECT - індикатор підключення клієнту<id>,

CLOSED - індикатор відключення клієнту.

Для реалізації проєкта розроблена модифікована прошивка для ESP8266. Для компілювання і прошивання вбудованої системи використано середовище розробки STM32CubeMX. Після настроювання конфігурації прошивка зашивається на STM32F407 Discovery, вона починає працювати і шукати зв'язок з модулем ESP8266.

## 6. Обговорення результатів дослідження

Розроблене програмне забезпечення надає можливість створення веб-інтерфейсу для датчиків, сенсорів і дисплеїв в інфраструктурі IoT. Розроблене програмне рішення створює веб-сервер на рівні вбудованої системи в локальній інфраструктурі IoT. Схему підключення між MCU Global Logic StarterKit і модулем ESP8266 можна побачити на рис. 3, експерименти з апаратним устаткуванням зображено на фото на рис. 4.

В роботі [13] авторами досліджено ефективність модифікації запропонованого рішення з використанням веб-інтерфейсу для реалізації віддалених моніторів та дошок оголошень. Описані рішення можуть бути використані для реалізації засобів для передачі керуючих впливів в текстовому вигляді на монітори або дисплеї автомобільного комп'ютера. Приклад генерації веб-сторінки на віддаленому IoT пристрої (наприклад, пульта диспетчера) наведено на рис. 5. Веб-сторінка налаштована на автоматичне оновлення через 4 секунди або за необхідністю в ручному режимі.



Рис. 4. Підключення дисплея для передавання керуючих впливів

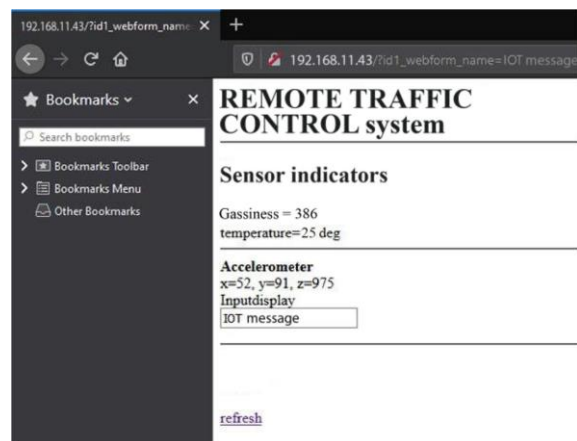


Рис. 5. Приклад генерації веб-сторінки

На веб-сторінці експериментального макета виводяться показники датчиків – температура, загазованість повітря, показники осей акселерометра в реальному часі. Просунутим функціоналом для системи керування рухом є формування текстового рядка, який може бути введено оператором в форму на веб-сторінці. Також текстова інформація для передавання керуючих впливів для клієнта може бути сформована автоматично на підставі результату оброблення даних. За допомогою текстового рядка можна передавати сповіщення про затори, або перевантаження певної ділянки дороги в географічних межах кожного локального домену IoT інфраструктури.

Запропоновано програмне рішення для реалізації функціональної можливості збирання даних, та формування керуючих впливів у вигляді текстової інформації. Розроблені засоби реалізовані на рівні локального домену інфраструктури IoT, як показано на рис. 1. На рівні локального домену відбуваються процеси збирання даних з датчиків та сенсорів. Безпосередньо процеси збирання даних з сенсорів не розглядалися в даній статті, але це може бути задачею для подальших досліджень. Передбачається подальша реалізація гібридної багаторівневої архітектури IoT, яка базується на використанні хмарних сервісів для подальшого аналізу даних і інтеграції локальних доменів в глобальну інфраструктуру IoT.

Розроблений експериментальний макет використовує обмежену кількість датчиків. Ідея локального безхмарного веб-сервера залишається актуальною в контексті розвитку технологій граничних обчислень, надійності, обробки даних в реальному часі, вартості. Драйвери збирають дані в задану структуру, яка також містить кінцевий автомат веб-сервера. Потім дані копіюються на сформовану веб-сторінку – текст у буфер RAM. І ще одне завдання налаштовує ESP8266 для ініціалізації сервера та підключення до Інтернету. Якщо ESP8266 успішно підключено, завдання, що обробляє HTTP та будь-які інші запити від ESP8266, може отримати підключення від іншого пристрою. Коли воно збувається, з'єднання встановлюється, а веб-сторінка оновлюється новими значеннями і передається клієнту.

Розроблене апаратно-програмне рішення можна легко перенести на будь-які апаратні засоби з використанням більш потужних міні-комп'ютерів, орієнтованих на встановлення універсальних операційних систем та розширити набори датчиків та сенсорів для рішення задач дистанційного керування дорожніми засобами. Використання потужних контролерів дозволить реалізувати інтелектуальну аналітику на рівні локального домену, що дозволить прискорити реакцію системи, забезпечуючи режим реального часу. Аналітика на рівні хмарних сервісів в цьому випадку буде доцільна для подальшого статистичного аналізу і передбачень критичних ситуацій. На локальні засоби може бути покладена задача корекції статистичних даних та екстреного реагування.

## 7. Висновки

В статті запропонований та обґрунтований гібридний багаторівневий підхід до реалізації IoT інфраструктури, який базується на технології граничних обчислень. Локалізація засобів керування дорожнім рухом на нижньому рівні IoT інфраструктури в безпосередньому приближенні до пристроїв збирання даних, а також використання в локальному IoT домені технології бездротової передачі даних WiFi, дозволило реалізувати обробку даних з IoT датчиків в реальному часі та розвантажити канали зв'язку в глобальній мережі на верхніх рівнях архітектури IoT інфраструктури. Запропонований багаторівневий підхід дозволить реалізувати масштабовані IoT інфраструктури для керування дорожнім трафіком в системі розумного міста з майбутньою інтеграцією в хмарні технології та сервіси.

Розроблені апаратно-програмні засоби дистанційного керування дорожнім рухом дозволяють вдосконалити існуючі системи керування трафіком шляхом автоматизованого збирання та агрегації даних з датчиків на границі локального рівня IoT інфраструктури, динамічного моніторингу стану завантаженості дороги й загазованості повітря та формування керуючих впливів для клієнтів у зручному текстовому форматі в реальному часі. Розроблені засоби вдосконалення систем керування трафіком мають можливість інтеграції в глобальну IoT інфраструктуру та підключення до хмарних сервісів для подальшого масштабування.

З метою вдосконалення систем дистанційного керування дорожнім рухом запропоновано технологію формування керуючих впливів, яка на відміну від відомих технологій базується на розробленій системі AT команд для розвертання веб-серверу та генерації веб-сторінок засобами вбудованої IoT платформи на мікроконтролерах. Запропонована технологія дозволяє формувати керуючі впливи в режимі реального часу, в зручному для сприйняття текстовому форматі з використанням веб-інтерфейсу в локальному домені IoT інфраструктури. Це дозволяє візуалізувати керуючу та іншу інформацію на віддалених дисплеях і інформаційних дошках, а також на дисплеях вбудованих в апаратуру автомобільних засобів. Запропонована технологія може бути використана для інформування учасників дорожнього руху про критичні ситуації, а також вбудована в розумні світлофори в системах дистанційного керування дорожнім рухом, або використана для реалізації віртуальних світлофорів.

Запропонована технологія реалізована у вигляді експериментального макету вбудованої IoT платформи, експерименти з яким показали її ефективність. Запропоноване рішення для будь-якого IoT



пристрою в локальній мережі надає віддалений веб-інтерфейс та можливість дистанційного керування його датчиками з відображенням інформації через веб-інтерфейс.

## References

- [1] I. Klymenko, A. Gaidai, S. Nikolskyi, V. Tkachenko, “The Architectural Concept Of The Monitoring System On The Basis On A Neuron Module IoT Data Analytics”, *Адаптивні системи автоматичного управління*, p. 111-123, 2022.
- [2] Lim C., Kim K.-J., Maglio P., “Smart cities with big data: Reference models, challenges, and considerations”, *Cities*, p. 86–99, 2018.
- [3] A. Bagwari, J. Bagwari, T. Anand, B. Chaurasia, R.P.S. Gangwar, M. Kamrul Hasan, “The Role of IoT in Smart Technologies”, 2022.
- [4] F. Al-Turjman, A. Malekloo, “Smart parking in IoT-enabled cities: A survey”, *Sustainable Cities and Society*, 2019.
- [5] A. Hilmani, A. Maizate, L. Hassouni “Automated Real-Time Intelligent Traffic Control System for Smart Cities Using Wireless Sensor Networks”, *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2020.
- [6] V. Miz, V. Hahanov, “Smart traffic light in terms of the Cognitive road traffic management system (CTMS) based on the Internet of Things”, *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2014)*, 2014.
- [7] G. Oguntala a, R. Abd-Alhameed a, S. Jones a, J. Noras a, M. Patwary b, J. Rodriguez, “Indoor location identification technologies for real-time IoT-based applications: An inclusive survey”, *Computer Science Review*, 2018, p. 55-79.
- [8] M. Alias, D. Dzaki, N. Din, S. Deros, R. Passarella, A. Chaai, “IoT-Based Transmission Tower Monitoring Communications and Visualization Platform”, *2022 IEEE Symposium on Future Telecommunication Technologies (SOFTT)*, 2022.
- [9] A. Ali, M. Khan, N. Bolong, K. Maarof, S. Tanalol, “Conceptual and design framework for smart stormwater filtration”, *2020 IEEE 2nd International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAIET)*, 2020.
- [10] Z. Tengfei, L. Qinxiao, M. Fumin, “Remote control system of smart appliances based on wireless sensor network”, *25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, p. 3704–3709, 2013.
- [11] L. Vukonić, M. Tomić, “Ultrasonic Sensors in IoT Applications”, *45th Jubilee International Convention on Information*, p. 415-420, 2022.
- [12] A. Hilmani, A. Maizate, L. Hassouni, “Automated Real-Time Intelligent Traffic Control System for Smart Cities Using Wireless Sensor Networks”, *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2020.
- [13] I. Muraviov, V. Taraniuk, I. Klymenko, “Making an IoT development platform from a simple microcontroller demonstration board”, *Information, Computing and Intelligent systems*, p. 68 – 76, 2020.

---

## Data about authors

Нікольський Сергій Сергійович

Аспірант

Кафедра обчислювальної техніки

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

пр. Берестейський, 37, м. Київ, Україна, 03056

E-mail: serhiy.nikolskiy@gmail.com

Контактний тел.: +38 050 059 02 04

Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 6

Кількість статей у міжнародних базах даних – 0  
Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4893-3339>

Serhiy Nikolskiy

PhD Student

Department of Computer Engineering

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Berestetskyu ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056

E-mail:

[serhiy.nikolskiy@gmail.com](mailto:serhiy.nikolskiy@gmail.com)

Contact tel. +38 050 059 02 04

The number of articles in national databases – 6

The number of articles in international databases – 0

Number ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4893-3339>

Клименко Ірина Анатоліївна

Доктор технічних наук, доцент

Кафедра обчислювальної техніки

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

пр. Берестейський, 37, м. Київ, Україна, 03056

E-mail: [ikliryna@gmail.com](mailto:ikliryna@gmail.com)

Контактний тел.: +38 050 356 10 24

Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 100

Кількість статей у міжнародних базах даних – 8

Номер ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5345-8806>

Iryna Klymenko

Doctor of technical sciences, Associate Professor

Department of Computer Engineering

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Berestetskyu ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056

E-mail: [ikliryna@gmail.com](mailto:ikliryna@gmail.com)

Contact tel. +38 050 356 10 24

The number of articles in national databases – 100

The number of articles in international databases – 8

Number ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5345-8806>

---