

ГОВОРУЩЕНКО Тетяна

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-7942-1857>

e-mail: hovorushchenko@khmnu.edu.ua

ВОЙЧУР Юрій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3085-7315>

voichury@khmnhu.edu.ua

ЗАПЛАВСЬКИЙ Даниїл

Хмельницький національний університет

ytkaplayboss@gmail.com

ФУНКЦІОНАЛЬНО-ЛОГІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ «РОЗУМНІ ЛІХТАРІ»

Розумні ліхтарі як елемент кіберфізичних систем стають не лише джерелом світла, але й повноцінним елементом інтелектуального міського середовища, що відіграє ключову роль у побудові ефективного, безпечного та сталого міста майбутнього.

У процесі реалізації було створено повноцінну автоматизовану систему, яка виконує низку дій: вмикає або вимикає LED-лампу залежно від рівня освітлення та руху/наближення людини, активує звукову сигналізацію у разі нахилу або хитання ліхтаря. Крім того, передбачено можливість перемикання режимів роботи між ручним та автоматичним, що дозволяє користувачеві адаптувати систему до своїх потреб і умов навколишнього середовища.

Апаратна частина розумного ліхтаря, побудована на базі ESP32 у поєднанні з системою датчиків, забезпечує високу точність збору даних, надійність у роботі та можливість адаптивного управління освітленням. Така система дозволяє ефективно реагувати на зміну умов довкілля і забезпечує сталі показники енергоефективності, що є важливою умовою для екологічно орієнтованих рішень. Завдяки коректному підбору компонентів і їх правильній інтеграції, отримана система здатна функціонувати в широкому діапазоні умов і задовольняти сучасні потреби у сфері моніторингу навколишнього середовища та автоматизованого управління інфраструктурою.

Важливою особливістю проєкту є підтримка дистанційного керування та моніторингу параметрів у режимі реального часу завдяки використанню мобільного застосунку Blynk IoT. Інтеграція з Wi-Fi мережею забезпечує постійний зв'язок між пристроєм та користувачем, дозволяючи переглядати показники сенсорів, змінювати режими роботи та надсилати керуючі команди. Така функціональність суттєво підвищує ефективність використання системи та робить її надзвичайно зручною в експлуатації.

Ключові слова: елементна база, синтез схеми, проєктування схеми, кіберфізична система, логіка функціонування системи.

HOVORUSHCHENKO Tetiana, VOICHUR Yurii, ZAPLAVSKYI Danyil

Khmelnytskyi National University

FUNCTIONAL AND LOGICAL DESIGN OF THE HARDWARE OF THE CYBERPHYSICAL SYSTEM “SMART STREETLIGHTS”

Smart streetlights, as part of cyber-physical systems, are not just a source of light, but also a key part of a smart urban environment, playing a big role in building an efficient, safe, and sustainable city of the future.

During implementation, a fully automated system was created that performs a number of actions: it turns the LED lamp on or off depending on the level of lighting and human movement/approach, and activates an audible alarm if the lamp is tilted or shaken. In addition, it is possible to switch between manual and automatic modes, allowing the user to adapt the system to their needs and environmental conditions.

The hardware part of the smart lamp, based on ESP32 in combination with a sensor system, ensures high data collection accuracy, reliability in operation, and the possibility of adaptive lighting control. Such a system allows you to effectively respond to changing environmental conditions and ensures consistent energy efficiency, which is an important condition for environmentally friendly solutions. Thanks to the correct selection of components and their proper integration, the resulting system is capable of functioning in a wide range of conditions and meeting modern needs in the field of environmental monitoring and automated infrastructure management.

An important feature of the project is the support of remote control and real-time monitoring of parameters through the use of the Blynk IoT mobile application. Integration with a Wi-Fi network provides a constant connection between the device and the user, allowing them to view sensor readings, change operating modes, and send control commands. This functionality significantly increases the efficiency of the system and makes it extremely convenient to use.

Keywords: element base, circuit synthesis, circuit design, cyber-physical system, system functioning logic.

Стаття надійшла до редакції / Received 16.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.05.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

У нинішніх умовах стрімкого розвитку цифрових технологій, зростання урбанізації, підвищення вимог до енергоефективності, екологічної безпеки та автоматизації міського простору, виникає нагальна потреба у впровадженні інтелектуальних інженерних систем нового покоління. Такі системи повинні не лише забезпечувати базову функціональність, але й бути здатними до самостійного прийняття рішень, адаптації до змін зовнішнього середовища, гнучкого управління ресурсами та постійного моніторингу стану об'єктів у режимі реального часу. Це дозволяє підвищити ефективність функціонування міської інфраструктури, оптимізувати витрати та поліпшити якість життя мешканців [1, 2].

Саме таким вимогам відповідають кіберфізичні системи – комплексні рішення, що поєднують у собі апаратне забезпечення, інтелектуальні алгоритми, сенсори збору даних, системи обробки інформації та канали бездротового зв'язку. Одним з яскравих прикладів застосування кіберфізичних систем у міському середовищі є система розумного вуличного освітлення. Вона являє собою інтегроване рішення, яке об'єднує сучасні джерела світла (наприклад, світлодіодні лампи), контролери, датчики руху, освітленості та погодних умов, а також програмне забезпечення для централізованого або автономного управління [3, 4].

Таким чином, розумні ліхтарі як елемент кіберфізичних систем стають не лише джерелом світла, але й повноцінним елементом інтелектуального міського середовища, що відіграє ключову роль у побудові ефективного, безпечного та сталого міста майбутнього [5].

Вибір елементної бази для апаратної частини кіберфізичної системи «Розумні ліхтарі»

Апаратна частина є фундаментальною складовою проєкту, адже саме від неї залежить ефективність, надійність і точність роботи всієї системи. Правильний вибір компонентів визначає подальші можливості розумного ліхтаря, його функціональні характеристики, а також зручність інтеграції у вже існуючі системи розумного міста.

Для реалізації розумного ліхтаря обрано мікроконтролер ESP32 (рис. 1), який сьогодні є одним із найбільш популярних рішень у сфері IoT (Інтернет речей). Основна причина вибору ESP32 – це поєднання високої обчислювальної потужності, великої кількості периферійних інтерфейсів, а також вбудованих засобів бездротового зв'язку Wi-Fi та Bluetooth. Мікроконтролер ESP32 базується на двоядерному 32-бітному процесорі Tensilica LX6 з тактовою частотою до 240 МГц, що дозволяє виконувати складні обчислювальні задачі без втрати продуктивності. Цей чіп має досить велику кількість входів/виходів (GPIO), що дозволяє одночасно підключати численні датчики і виконавчі пристрої. Важливою перевагою ESP32 є наявність різних протоколів зв'язку: I2C, SPI, UART, ADC, DAC, PWM, що робить цей мікроконтролер дуже гнучким і підходящим для взаємодії з багатьма типами сенсорів і модулів. Можливість бездротового підключення через Wi-Fi дозволяє легко передавати зібрані дані у хмару або локальну мережу, що є ключовою вимогою сучасних розумних систем.



Рис. 1. Мікроконтролер ESP32

У системі розумного ліхтаря необхідно вирішити кілька ключових задач: автоматичне регулювання рівня освітлення залежно від зовнішніх умов, а також контроль якості навколишнього середовища для забезпечення екологічної безпеки і комфорту. Для цього було обрано кілька типів датчиків.

Для автоматичного керування яскравістю ліхтаря важливо точно вимірювати рівень природного освітлення. Ця задача покладена на цифровий датчик BH1750, який спеціалізується на вимірюванні освітленості в люксах. Його переваги – висока точність, простота використання та інтерфейс I2C, що мінімізує кількість з'єднань і знижує рівень електричних перешкод. BH1750 чудово підходить для задач, де необхідна швидка реакція на зміни рівня світла, наприклад, при заході сонця або у похмурі дні. Однак варто враховувати, що він може бути чутливим до прямих сонячних променів, що іноді викликає похибки у вимірах.

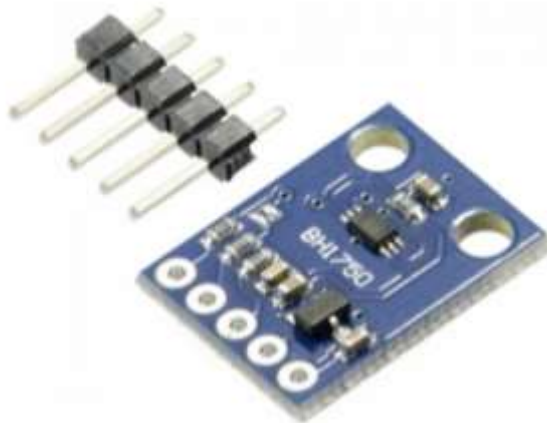


Рис. 2. Датчик освітленості BH1750

Модуль BME688 є сучасним комплексним рішенням, що поєднує в одному корпусі датчики температури, вологості, атмосферного тиску, а також сенсор летких органічних сполук (VOC). Це робить його унікальним для задач, де потрібен багатофакторний моніторинг середовища. Використання BME688 дозволяє регулювати освітлення з урахуванням погодних умов та адаптувати роботу ліхтаря до погодних умов. Недоліком є більш висока ціна і складність налаштування, зокрема необхідність роботи з пропрієтарними алгоритмами обробки даних.



Рис. 3. Мультисенсор BME688

Інфрачервоний датчик руху HC-SR501 (рис. 4) вмикає або підсилює яскравість ліхтаря, коли наближається пішохід або автомобіль. Датчик виявляє зміну інфрачервоного випромінювання (тепла), коли людина або тварина рухається в зоні дії. У режимі очікування датчик неактивний. Щойно виявлено рух, він видає сигнал "HIGH", що може увімкнути світло ліхтаря. Ліхтар вмикається на повну яскравість, коли HC-SR501 фіксує рух. Через кілька секунд автоматично зменшує яскравість або вимикається, якщо руху немає. Такий датчик є дешевим і доступним, простим у використанні (видає цифровий сигнал), енергоефективним та регульованим.



Рис. 4. Інфрачервоний датчик руху HC-SR501

Датчик нахилу / акселерометр MPU6050 (рис. 5) виявляє, якщо ліхтар нахилився або впав (наприклад, через аварію чи сильний вітер). Це шестивісний інерціальний модуль, який поєднує в собі акселерометр (вимірює прискорення по осях X, Y, Z) та гіроскоп (вимірює кутові швидкості обертання). Акселерометр вимірює лінійні прискорення – можна обчислити нахил або падіння об'єкта. Гіроскоп вимірює обертання – корисно для виявлення раптових поворотів, хитання. MPU6050 постійно відстежує положення ліхтаря. У разі сильного нахилу або удару, система надсилає сповіщення до центрального серверу або увімкнення аварійного світла. Може також зберігати інформацію про подію у пам'яті. Такий датчик є недорогим та багатофункціональним, поєднує два датчики в одному, підтримується багатьма бібліотеками (Arduino, STM, ESP).

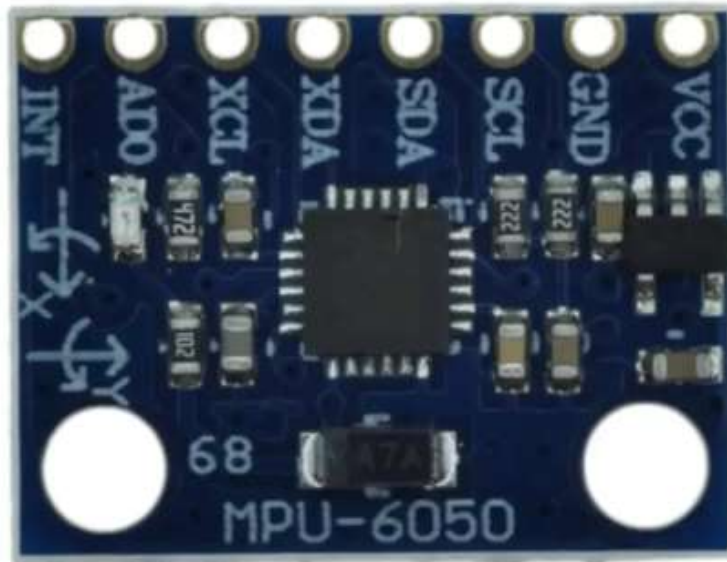


Рис. 5. Датчик нахилу / акселерометр MPU6050

Вибір апаратного комплексу для реалізації проєкту розумного ліхтаря є одним із ключових етапів, що визначає не лише функціональність, але й надійність, масштабованість та енергоефективність усієї системи. У даному дослідженні було обґрунтовано застосування мікроконтролера ESP32 у поєднанні з низкою датчиків. Така апаратна архітектура виявилася вдалою з огляду на наявність численних технічних переваг, які відповідають сучасним вимогам до систем інтелектуального управління зовнішнім середовищем.

Серед основних переваг варто насамперед відзначити високу функціональність запропонованого рішення. Система здатна виконувати одразу кілька завдань – контролювати рівень освітлення на вулиці, вмикати та вимикати вуличне освітлення, стежити за справністю та стійкою ліхтарів. Така багатофункціональність реалізується без істотного ускладнення архітектури завдяки використанню ESP32, який підтримує обробку даних з кількох сенсорів одночасно, має вбудовані засоби зв'язку та розширені можливості програмної інтеграції.

Гнучкість підключення – ще одна важлива перевага, притаманна даному рішення. Завдяки широкому набору інтерфейсів мікроконтролера ESP32, таких як GPIO, I2C, SPI, UART тощо, користувач отримує можливість підключення великої кількості цифрових і аналогових сенсорів. Це дає змогу легко адаптувати систему під конкретні завдання, додавати нові компоненти або замінювати існуючі без значного перегляду усієї апаратної частини або зміни прошивки.

Особливу увагу слід приділити енергоефективності, що має критичне значення в автономних системах, які можуть працювати від акумуляторів або сонячних панелей. ESP32 підтримує кілька режимів зниженого енергоспоживання, включаючи light sleep і deep sleep, що дозволяє значно продовжити час автономної роботи пристрою. Це особливо актуально для ліхтарів, які працюють на відкритому повітрі та можуть мати обмежений доступ до централізованих джерел живлення.

Бездротова передача даних на базі Wi-Fi – ще одна важлива перевага використання ESP32. Завдяки вбудованому модулю бездротового зв'язку, система може передавати зібрані дані на віддалений сервер, мобільний додаток або хмарне сховище в реальному часі, забезпечуючи віддалений моніторинг і керування. Це суттєво підвищує рівень інтерактивності та зручності експлуатації пристрою.

Однак, попри значну кількість переваг, використання запропонованих компонентів має і певні недоліки, які слід враховувати на етапі розробки та впровадження системи. Одним із таких є необхідність регулярного обслуговування та калібрування датчиків. З часом датчики можуть втрачати точність або забруднюватися, що потребує періодичного технічного втручання, у тому числі очищення або заміни.

Датчики освітленості можуть давати неточні показники при прямому сонячному світлі або високому рівні запиленості навколишнього середовища.

Проектування апаратної частини кіберфізичної системи «Розумні ліхтарі»

Функціональна логіка проекту передбачає, що мікроконтролер ESP32 виконує періодичне зчитування значень з ряду підключених сенсорів. У випадку, якщо до ліхтаря наближається людина, система автоматично активує світлодіодне освітлення шляхом подачі сигналу на відповідний цифровий вихід. У випадку, якщо освітленість середовища падає нижче встановленого порогового значення, система автоматично активує світлодіодне освітлення шляхом подачі сигналу на відповідний цифровий вихід. Якщо ж реєструється падіння чи хитання ліхтаря, вмикається звукове попередження за допомогою підключеного бузера, що виконує роль індикатора ризику для користувача або обслуговуючого персоналу.

Логіка функціонування всієї системи, а також принципи взаємодії між апаратними компонентами та мікроконтролером, схематично зображені на рис. 6. Структурна схема ілюструє порядок підключення сенсорів до ESP32, а також відображає сигнальні лінії та процесорну обробку даних, необхідну для коректного функціонування всієї автоматизованої системи.

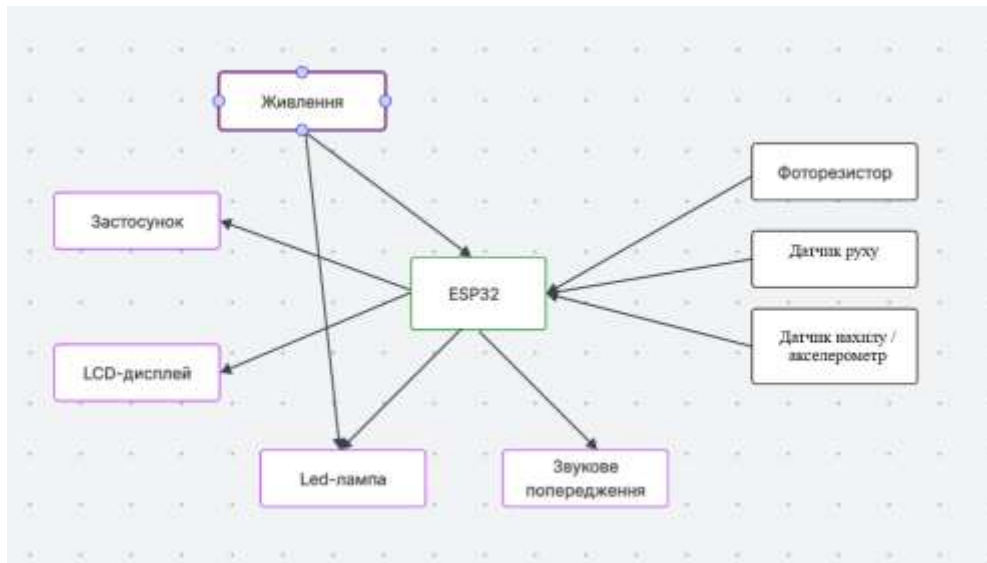


Рис. 6. Логіка функціонування кіберфізичної системи «Розумні ліхтарі»

Для моделювання та тестування проекту розумного ліхтаря було обрано віртуальне середовище Wokwi.

Схема підключення компонентів системи представлена на рис. 7.

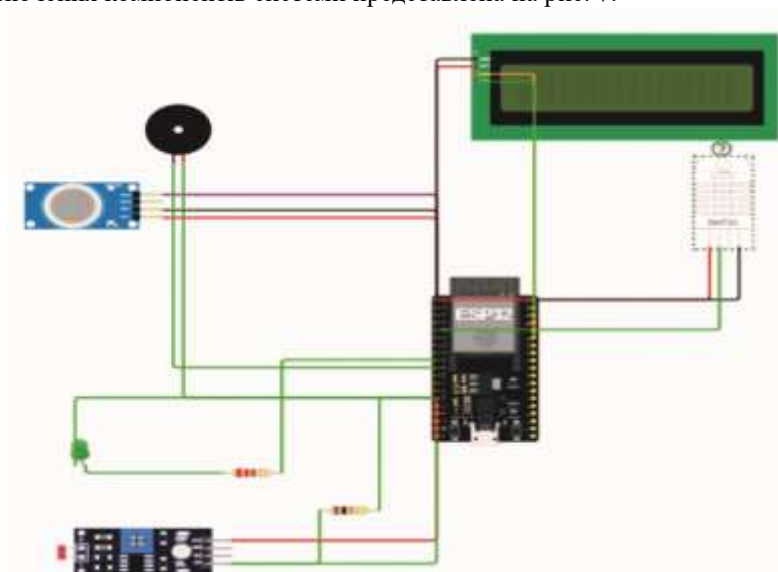


Рис. 7. Схема підключення компонентів кіберфізичної системи «Розумні ліхтарі»

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

1) Розумні ліхтарі як елемент кіберфізичних систем стають не лише джерелом світла, але й повноцінним елементом інтелектуального міського середовища, що відіграє ключову роль у побудові ефективного, безпечного та сталого міста майбутнього.

2) У процесі реалізації було створено повноцінну автоматизовану систему, яка виконує низку дій: вмикає або вимикає LED-лампу залежно від рівня освітлення та руху/наближення людини, активує звукову сигналізацію у разі нахилу або хитання ліхтаря. Крім того, передбачено можливість перемикавання режимів роботи між ручним та автоматичним, що дозволяє користувачеві адаптувати систему до своїх потреб і умов навколишнього середовища.

3) Апаратна частина розумного ліхтаря, побудована на базі ESP32 у поєднанні з системою датчиків, забезпечує високу точність збору даних, надійність у роботі та можливість адаптивного управління освітленням. Така система дозволяє ефективно реагувати на зміну умов довкілля і забезпечує сталі показники енергоефективності, що є важливою умовою для екологічно орієнтованих рішень. Завдяки коректному підбору компонентів і їх правильній інтеграції, отримана система здатна функціонувати в широкому діапазоні умов і задовольняти сучасні потреби у сфері моніторингу навколишнього середовища та автоматизованого управління інфраструктурою.

4) Важливою особливістю проєкту є підтримка дистанційного керування та моніторингу параметрів у режимі реального часу завдяки використанню мобільного застосунку Blynk IoT. Інтеграція з Wi-Fi мережею забезпечує постійний зв'язок між пристроєм та користувачем, дозволяючи переглядати показники сенсорів, змінювати режими роботи та надсилати керуючі команди. Така функціональність суттєво підвищує ефективність використання системи та робить її надзвичайно зручною в експлуатації.

Література

1. SMART STREET LIGHTING USING IOT. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*. 2024. URL: <https://doi.org/10.56726/irjmets50033>.
2. Mohamed S. A. E. Smart Street Lighting Control and Monitoring System for Electrical Power Saving by Using VANET. *International Journal of Communications, Network and System Sciences*. 2013. Vol. 06, no. 08. P. 351–360. URL: <https://doi.org/10.4236/ijcns.2013.68038>.
3. Khemakhem S., Krichen L. A comprehensive survey on an IoT-based smart public street lighting system application for smart cities. *Franklin Open*. 2024. P. 100142. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fraope.2024.100142>.
4. Vlah-Vigrinovka G., Vigrinovsky M., Ivanyuk O. Remote control system for street lighting based on internet of things technologies. *Computer Technologies of Printing*. 2021. Vol. 1, no. 45. P. 26–32. URL: <https://doi.org/10.32403/2411-9210-2021-1-45-26-32>.
5. Wang Q., Lv H. Intelligent lighting control system based on Internet of things technology. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2310, no. 1. P. 012060. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2310/1/012060>.

References

1. SMART STREET LIGHTING USING IOT. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*. 2024.
2. Mohamed S. A. E. Smart Street Lighting Control and Monitoring System for Electrical Power Saving by Using VANET. *International Journal of Communications, Network and System Sciences*. 2013. Vol. 06, no. 08. P. 351–360.
3. Khemakhem S., Krichen L. A comprehensive survey on an IoT-based smart public street lighting system application for smart cities. *Franklin Open*. 2024. P. 100142.
4. Vlah-Vigrinovka G., Vigrinovsky M., Ivanyuk O. Remote control system for street lighting based on internet of things technologies. *Computer Technologies of Printing*. 2021. Vol. 1, no. 45. P. 26–32.
5. Wang Q., Lv H. Intelligent lighting control system based on Internet of things technology. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2310, no. 1. P. 012060.