

Розробка системи адаптивного керування розумними вуличними ліхтарями з використанням технологій IoT та машинного навчання для оптимізації енергоспоживання та безпеки міського середовища

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У статті розглянуто розробку системи адаптивного керування розумними вуличними ліхтарями на основі технологій Інтернету речей (IoT) та машинного навчання. Запропоновано підхід до створення моделі, яка інтегрує дані з датчиків руху, освітленості, погодних умов та пішогодного трафіку для оптимізації енергоспоживання та підвищення безпеки міського середовища. Описано принципи побудови системи, технічні аспекти обробки даних та їх застосування для адаптивного керування освітленням. Проаналізовано переваги використання такої системи для зменшення енергоспоживання, підвищення безпеки пішоходів і транспортних потоків, а також розглянуто виклики, пов'язані з інтеграцією IoT-пристроїв, обробкою великих обсягів даних та забезпеченням кібербезпеки.

Ключові слова: розумні вуличні ліхтарі, IoT, машинне навчання, енергоспоживання, міська безпека, кібербезпека.

Abstract

This article presents the development of an adaptive control system for smart street lighting based on Internet of Things (IoT) and machine learning technologies. An approach to creating a model that integrates data from motion sensors, light sensors, weather conditions, and pedestrian traffic to optimize energy consumption and enhance urban safety is proposed. The principles of system construction, technical aspects of data processing, and their application for adaptive lighting control are described. The advantages of using such a system for reducing energy consumption, improving pedestrian and traffic safety, and the challenges related to IoT device integration, large-scale data processing, and cybersecurity are analyzed.

Keywords: smart street lighting, IoT, machine learning, energy consumption, urban safety, cybersecurity.

Вступ

У контексті швидкої урбанізації та зростання вимог до енергоефективності й безпеки міських середовищ, традиційні системи вуличного освітлення стають застарілими через їхню статичність і високе енергоспоживання. Розумні вуличні ліхтарі, керовані за допомогою технологій Інтернету речей (IoT) та машинного навчання, пропонують інноваційний підхід до адаптивного управління освітленням [1]. Такі системи дозволяють динамічно регулювати інтенсивність світла залежно від реальних потреб, що сприяє економії енергії, зниженню викидів CO₂ та підвищенню безпеки в міських зонах. Інтеграція даних із датчиків, камер спостереження та відкритих джерел забезпечує точне прогнозування пішогодного й транспортного трафіку, що є основою для створення ефективних і стійких міських екосистем [2]. Ця технологія є важливим елементом концепції «розумного міста», спрямованого на підвищення комфорту та безпеки мешканців.

Сутність та архітектура системи адаптивного керування розумними вуличними ліхтарями

Система адаптивного керування розумними вуличними ліхтарями базується на інтеграції IoT-пристроїв, машинного навчання та хмарних обчислень для створення динамічної моделі управління освітленням. Її основна мета — оптимізувати енергоспоживання, забезпечуючи при цьому достатній рівень освітлення для безпеки пішоходів і транспорту в реальному часі. Система використовує різноманітні джерела даних: датчики руху (інфрачервоні, ультразвукові), які фіксують присутність пішоходів або транспортних засобів; датчики освітленості, що вимірюють рівень природного світла для автоматичного регулювання яскравості; метеорологічні дані (температура, опади, туман) з погодних станцій або відкритих джерел; а також дані пішогодного та транспортного трафіку, зібрані

через камери з комп'ютерним зором, Wi-Fi/Bluetooth-трекери або мобільні додатки [3]. Ці дані передаються через IoT-мережу (LoRaWAN, NB-IoT або Zigbee) до центрального сервера або хмарної платформи, де обробляються алгоритмами машинного навчання. Для прогнозування трафіку та керування освітленням використовуються моделі глибокого навчання, зокрема RNN і LSTM, що аналізують часові ряди й виявляють закономірності в поведінці пішоходів і транспорту. Технічна реалізація включає інструменти для обробки даних (Pandas, NumPy), машинного навчання (TensorFlow, PyTorch), IoT-інтеграції (AWS IoT, Google Cloud IoT, Azure IoT) і візуалізації (інтерактивні вебпанелі на JavaScript або Dash). Система дає змогу динамічно регулювати яскравість ліхтарів, адаптувати їх до погодних умов, змін у трафіку та непередбачуваних подій (аварій, масових заходів), наприклад, знижуючи яскравість у зонах із низьким трафіком уночі та підвищуючи її при виявленні руху.

Практичне застосування

Запропонована система має широкий спектр застосувань у міському середовищі, зокрема забезпечує енергоефективність завдяки адаптивному керуванню освітленням, що дозволяє зменшити енергоспоживання на 30–50% порівняно з традиційними системами, сприяючи зниженню витрат і викидів CO₂; підвищує безпеку завдяки автоматичному підсвічуванню зон із пішоходами чи транспортом, що знижує ризик аварій у темний час доби; оптимізує інфраструктуру шляхом аналізу даних про трафік для планування розміщення ліхтарів, пішохідних переходів і зон відпочинку; інтегрується з іншими сервісами розумного міста, такими як управління громадським транспортом, створюючи комплексну цифрову екосистему; а також дозволяє ефективно планувати освітлення під час масових заходів, фестивалів чи спортивних подій завдяки прогнозуванню пішохідного трафіку. У перспективі система може масштабуватися до регіонального рівня, інтегруючись із транспортними системами, розумними електромережами та іншими елементами інфраструктури «розумного міста».

Виклики та обмеження технології

Розробка та впровадження системи адаптивного керування розумними вуличними ліхтарями пов'язані з низкою складних викликів, які потребують комплексного підходу. По-перше, інтеграція IoT-пристроїв у міське середовище ускладнюється через різноманітність датчиків, різні протоколи зв'язку та обмеження мережевих ресурсів, що ускладнює їхню синхронізацію та забезпечення стабільної роботи всієї системи. По-друге, обробка великих обсягів даних із численних сенсорів, камер та трекерів вимагає потужної обчислювальної інфраструктури й розробки ефективних алгоритмів для аналізу інформації в режимі реального часу, що забезпечує швидке реагування на зміни в трафіку або погодних умовах.

Кібербезпека є критичним аспектом, адже IoT-пристрої часто є вразливими до атак, тому впровадження надійних механізмів шифрування, автентифікації, контролю доступу і захисту даних є обов'язковим для запобігання потенційним загрозам. Крім того, використання камер та трекерів для збору інформації про пішоходів піднімає питання конфіденційності, тому важливо дотримуватись законодавчих норм, таких як GDPR, а також впроваджувати методи анонімізації і мінімізації збору персональних даних для захисту приватного життя громадян.

Фінансові витрати на встановлення, модернізацію та обслуговування розумних ліхтарів, датчиків, мережевого обладнання і серверних рішень можуть бути значними, що вимагає ретельного планування бюджету, пошуку джерел фінансування та оцінки ефективності інвестицій через довгострокову економію енергоресурсів і підвищення безпеки. Точність прогнозів системи керування напряму залежить від якості та обсягу зібраних даних, а також від здатності моделей машинного навчання адаптуватися до динамічних змін у міському середовищі, таких як сезонні коливання, урбаністичні трансформації чи непередбачувані події (наприклад, аварії, масові заходи).

Для подолання цих викликів необхідний міждисциплінарний підхід, що передбачає співпрацю фахівців із галузей IoT, аналітики даних, машинного навчання, кібербезпеки, міського планування і правового регулювання. Важливо також налагоджувати партнерства між муніципалітетами, приватним сектором, науково-дослідними інститутами та громадськими організаціями для забезпечення комплексного впровадження системи, а також її подальшої підтримки, масштабування і модернізації. Окрім технічних аспектів, значну роль відіграє інформування населення про переваги системи, що сприятиме підвищенню довіри та прийняттю нових технологій у повсякденному житті міста.

Висновок

Система адаптивного керування розумними вуличними ліхтарями на основі технологій IoT та машинного навчання є перспективним інструментом для створення енергоефективних і безпечних міських середовищ. Вона забезпечує динамічне управління освітленням, зниження енергоспоживання та підвищення безпеки пішоходів і транспорту. Водночас успішне впровадження системи вимагає подолання технічних, етичних і фінансових викликів, що передбачає комплексний підхід і залучення кваліфікованих фахівців. У майбутньому такі системи стануть невід'ємною частиною «розумних міст», сприяючи їхній сталості та адаптивності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hu, X., Liu, Y., Li, Y., Zhang, Q., & Liu, X. (2023). Energy-efficient adaptive street lighting control using IoT and machine learning. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14, 193–210. URL: <https://doi.org/10.1007/s12652-022-03645-3> (дата звернення: 30.05.2025).
2. Singh, D., Tripathi, G., & Jara, A.J. (2021). A survey on smart street lighting system technologies: Challenges and solutions. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102595. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102595> (дата звернення: 30.05.2025).
3. Bedi, G., Venayagamoorthy, G.K., Singh, R., Brooks, R.R., & Wang, K.C. (2018). Review of Internet of Things (IoT) in electric power and energy systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(2), 847–870. URL: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2802704> (дата звернення: 30.05.2025).

Журба Даниїл Юрійович – студент групи 4ПІ-22Б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: daniazhurba2004@gmail.com

Zhurba Danyil Yuriyovych – student of group 4PI-22B, Faculty of Information Technology and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: daniazhurba2004@gmail.com