



УДК 004.4:004.7:656.13

ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕГУЛЮВАННЯ ЯСКРАВОСТІ СИГНАЛІВ У КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ВУЛИЧНИМ РУХОМ

SOFTWARE AND HARDWARE FOR SIGNAL BRIGHTNESS CONTROL IN COMPUTER-INTEGRATED TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEMS

¹Великодний С.С., ²Діброва В.М., ³Зайцева-Великодна С.С., ⁴Кумайгородський В.В.¹Stanislav Velykodniy, ²Dibrova Viktor, ³Svitlana Zaitseva-Velykodna, ⁴Vadym Kumaihorodskiy^{1,2,3,4}Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова, Одеса, УкраїнаORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8590-7610>, <https://orcid.org/0009-0001-8329-5283>,<https://orcid.org/0000-0001-7453-8821>, <https://orcid.org/0009-0007-2032-4191>E-mail: velykodniy@gmail.com, dibroff@gmail.com, svetlana.zaytseva@gmail.com, vadimkym@gmail.com

Copyright © 2025 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>DOI: [10.15673/atbp.v17i3.3212](https://doi.org/10.15673/atbp.v17i3.3212)

Анотація. Сучасні умови розвитку міської інфраструктури висувають підвищені вимоги до ефективності систем керування дорожнім рухом. Одним із ключових елементів транспортної інфраструктури є світлофорні комплекси, які не лише забезпечують безпеку учасників дорожнього руху, але й впливають на пропускну здатність транспортних потоків. Традиційні системи регулювання світлофорів функціонують із фіксованими параметрами яскравості, що не враховують змін умов освітленості довкілля. Це знижує енергоефективність та може негативно позначатися на комфорті й безпеці водіїв та пішоходів.

Мета дослідження полягає у теоретичному обґрунтуванні, дослідженні методів адаптивного регулювання яскравості вуличних світлофорів та розробці програмно-технічного забезпечення із використанням мікроконтролерної платформи Arduino. У роботі здійснено огляд і класифікацію сучасних технологій адаптивного регулювання, а особливу увагу приділено аналізу їхніх переваг і обмежень у контексті побудови інтелектуальних транспортних систем. Методологія дослідження ґрунтується на моделюванні структури системи за допомогою UML-діаграм, що дозволяє формалізувати логіку роботи й взаємодію компонентів.

Розроблено алгоритм адаптивного керування, який враховує динамічні зміни рівня зовнішнього освітлення та визначає оптимальні порогові значення для вибору інтенсивності світлових сигналів. Для перевірки працездатності створено Arduino-скетч, виконано апаратну реалізацію прототипу та здійснено його експериментальне тестування. Отримані результати демонструють ефективність запропонованого рішення, зокрема забезпечення зменшення споживання електроенергії та підвищення якості візуального сприйняття світлофорних сигналів у різних умовах освітленості. Практична значущість роботи полягає у можливості застосування системи як у великих містах, так і в менших населених пунктах завдяки простоті реалізації, низькій вартості та гнучкості інтеграції.

Abstract. The current stage of urban infrastructure development imposes increasingly stringent requirements on the efficiency of traffic control systems. One of the key components of the transport infrastructure is traffic light complexes, which not only ensure the safety of road users but also significantly influence the throughput capacity of traffic flows. Traditional traffic light control systems generally operate with fixed brightness parameters that do not take into account variations in environmental lighting conditions. This reduces energy efficiency and may adversely affect the comfort and safety of drivers and pedestrians.

The purpose of this research is to provide a theoretical justification, to investigate methods of adaptive regulation of traffic light brightness, and to develop software and hardware solutions based on the Arduino microcontroller platform. The study includes a review and classification of modern adaptive regulation technologies, with particular attention given to the analysis of their advantages and limitations in the context of developing intelligent transportation systems.



The research methodology is grounded in modeling the system structure using UML diagrams, which makes it possible to formalize the operational logic and component interactions.

An adaptive control algorithm was developed that accounts for dynamic changes in external illumination and determines optimal threshold values for selecting the intensity of light signals. To validate the proposed approach, an Arduino sketch was created, a hardware prototype was implemented, and experimental testing was conducted. The obtained results confirm the effectiveness of the solution, in particular by reducing energy consumption and improving the visual perception of traffic light signals under various lighting conditions. The practical significance of the study lies in the possibility of implementing the system both in large urban centers and in smaller settlements, owing to its simplicity of implementation, low cost, and flexible integration potential.

Ключові слова: адаптивна світлофорна система, регулювання яскравості, інтернет речей, діаграма, алгоритм, широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), енергоефективність, сенсор

Key words: adaptive traffic light system, brightness control, Internet of Things (IoT), diagram, algorithm, pulse-width modulation (PWM), energy efficiency, sensor

Вступ

У контексті розвитку концепції «розумних міст» (smart cities) та зростаючих вимог до енергоефективності міської інфраструктури особливої уваги потребує оптимізація роботи систем керування дорожнім рухом. Світлофорні комплекси є невід'ємним елементом транспортної інфраструктури, забезпечуючи безпеку дорожнього руху та регламентуючи переміщення транспортних засобів і пішоходів.

Традиційні світлофорні системи зазвичай функціонують із фіксованим рівнем яскравості сигналів, що не враховує змінних зовнішніх чинників – природної освітленості, погодних умов чи добових коливань. Такий підхід спричиняє підвищене енергоспоживання, зниження ефективності сприйняття сигналів учасниками дорожнього руху та невідповідність сучасним стандартам енергоощадності.

В умовах реалізації міжнародних програм сталого розвитку та впровадження інтелектуальних транспортних систем (Intelligent Transportation Systems, ITS) особливої актуальності набуває створення адаптивних світлофорних комплексів. Використання мікроконтролерних платформ, зокрема Arduino, у поєднанні з сенсорними технологіями, що становить собою комп'ютерно-інтегровану систему, забезпечує можливість розробки систем автоматизованого регулювання яскравості світлофорних сигналів у режимі реального часу. Це дозволяє оптимізувати споживання енергоресурсів, зменшити експлуатаційні витрати та підвищити рівень безпеки дорожнього руху.

Таким чином, дослідження методів побудови адаптивних світлофорних систем (АСС) на базі платформи Arduino відповідає сучасним глобальним тенденціям цифровізації та розвитку енергоефективних технологій, а також має вагомое наукове й прикладне значення для впровадження у міську інфраструктуру.

1 Аналіз існуючих даних, технологій і постановка проблеми

У багатьох країнах світу активно впроваджуються системи автоматизованого регулювання яскравості світлофорів, що спрямовані на зменшення енергоспоживання та підвищення рівня безпеки дорожнього руху. Використання таких технологій відповідає сучасним тенденціям розвитку інтелектуальних транспортних систем – ITS та енергоефективної міської інфраструктури [1].

Серед найуживаніших технологій регулювання яскравості світлофорів можна виокремити такі:

- а) фотоелектричні датчики – технологія передбачає застосування сенсорів для визначення рівня природного освітлення та подальшого коригування яскравості світлофорних сигналів; найчастіше такі системи поєднуються з LED-технологіями, що забезпечує оперативне й енергоефективне регулювання світлового потоку [2];
- б) часові алгоритми регулювання – зміна яскравості здійснюється відповідно до заданого розкладу; наприклад: у нічний час світлофори працюють із пониженим рівнем яскравості, що дозволяє скоротити споживання електроенергії [3];
- в) інтелектуальні системи управління – базуються на застосуванні методів штучного інтелекту (ШІ) та мережевих сенсорів, що збирають інформацію про інтенсивність транспортного потоку, погодні умови й рівень зовнішнього освітлення; на основі цих даних система у режимі реального часу коригує параметри яскравості світлофорів [4];
- г) системи на базі Інтернету речей (IoT) – такі рішення дозволяють здійснювати віддалене управління світлофорними комплексами через мережу Інтернет; у результаті можлива централізована корекція рівня яскравості сигналів на основі даних сенсорів, що відображають стан навколишнього середовища [5];
- д) адаптивні світлофорні системи – поєднують кілька наведених підходів для досягнення максимальної ефективності; у ряді міст уже застосовуються інтегровані рішення, які комбінують сенсори зовнішнього освітлення, алгоритми ШІ та автоматизоване управління для динамічної зміни інтенсивності світлофорних сигналів [6].

Додатково перспективним напрямом є інтеграція світлофорних систем з інтелектуальними модулями аналізу транспортного потоку та механізмами взаємодії з аварійно-рятувальними службами [7]. Це забезпечує можливість оперативного реагування на зміну дорожньої ситуації та підвищує загальний рівень безпеки руху.

Проведений детальний аналіз зазначених технологій дозволяє окреслити їхні переваги й обмеження, а також визначити перспективні напрями подальшого розвитку. Використання сучасних сенсорних технологій і



мікроконтролерних платформ створює передумови для розробки адаптивної системи, здатної автоматично регулювати яскравість світлофорів залежно від зовнішнього освітлення та супутніх факторів навколишнього середовища (НС). Це, у свою чергу, створює підґрунтя для вибору оптимальної методики реалізації системи регулювання яскравості світлофорів на базі мікроконтролерної платформи Arduino.

Таким чином, постановка проблеми дослідження передбачає аналіз існуючих підходів до реалізації систем адаптивного управління світловими сигналами, розробку методики їх ефективного регулювання та оцінку можливостей практичного впровадження результатів роботи в умовах міського середовища.

Об'єкт дослідження – процес адаптивного регулювання яскравості у системах управління вуличним рухом в залежності від змінних зовнішніх умов.

Предмет дослідження – методи та технічні засоби реалізації автоматизованого управління яскравістю світлофорів із застосуванням мікроконтролерної платформи Arduino.

2 Мета і завдання дослідження

Мета роботи полягає у теоретичному обґрунтуванні, дослідженні методів адаптивного регулювання яскравості вуличних світлофорів та розробці програмно-технічного забезпечення із використанням мікроконтролерної платформи Arduino.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- а) здійснити аналіз сучасних технологій автоматизованого регулювання яскравості світлофорів;
- б) дослідити апаратні та програмні можливості мікроконтролерної платформи Arduino у контексті створення систем адаптивного управління світлофорними комплексами;
- в) розробити алгоритм динамічного регулювання яскравості світлофорних сигналів на основі даних сенсорів зовнішнього освітлення;
- г) реалізувати експериментальний прототип системи та провести перевірку його працездатності й ефективності;
- д) здійснити оцінку перспектив впровадження запропонованого рішення в умови реальної експлуатації міської інфраструктури.

3 Методи і матеріали досліджень

3.1 Проектування алгоритмічного забезпечення регулювання яскравості світлофорних сигналів

Розроблений алгоритм спрямований на створення енергоефективної та безпечної системи керування світлофорами, яка динамічно адаптується до змін параметрів навколишнього середовища. Це дозволяє не лише зменшити споживання електроенергії, а й підвищити зручність та безпеку дорожнього руху.

Вхідні дані:

- _ датчик освітленості (фоторезистор, BH1750 або аналогічний);
- _ мікроконтролер Arduino (наприклад, Arduino Uno);
- _ світлофорні модулі або світлодіодні індикатори;
- _ джерело живлення.

Основні етапи алгоритму:

- а) ініціалізація: налаштування пінів контролера для роботи з сенсором освітленості та світлодіодними модулями; калібрування сенсора для визначення граничних рівнів освітленості;
- б) зчитування даних із сенсора: отримання значення освітленості у люксах (для BH1750) або в аналогових одиницях (для фоторезистора); застосування методів фільтрації (усереднення результатів кількох вимірювань) для зменшення похибки та шумів;
- в) обробка даних: визначення відповідного рівня яскравості світлофора на основі виміряного значення; застосування порогових значень для переходу між режимами яскравості, наприклад:
 - _ яскравий день – 100% яскравості;
 - _ сутінки – 70%;
 - _ ніч – 40%;
- г) регулювання яскравості: використання широтно-імпульсної модуляції (ШИМ, англ. PWM) для плавного регулювання яскравості світлодіодних модулів; забезпечення поступових переходів між режимами для уникнення різких змін, які можуть негативно впливати на сприйняття сигналів водіями;
- д) циклічне оновлення: постійний моніторинг рівня зовнішнього освітлення з періодичним оновленням параметрів світлофора; врахування раптових змін (вплив автомобільних фар чи різка зміна погодних умов);
- е) захист та енергоефективність: контроль граничних рівнів яскравості для забезпечення довговічності світлодіодних елементів; оптимізація енергоспоживання за рахунок використання адаптивних режимів.

Діаграми послідовності (ДП, англ. Sequence Diagram) в застосовуються для моделювання динамічної взаємодії між об'єктами у часовій площині, відображаючи послідовність обміну повідомленнями. Вони дозволяють виявити механізми взаємодії об'єктів у межах конкретного сценарію, що має суттєве значення як для етапу аналізу, так і для проектування системи [8].

З метою деталізації процесів було сформовано ДП у вигляді програмного коду зі зв'язками, а також виконано її графічну побудову для АСС (рис. 1).

Наведемо пояснення до об'єктів та зв'язків, зображених на ДП:



- а) датчик освітленості (LDR): здійснює зчитування поточного рівня зовнішнього освітлення та передає дані до мікроконтролера Arduino;
- б) Arduino: приймає дані від сенсора, передає їх алгоритму керування для обробки та надсилає сигнали на світлодіоди з метою регулювання яскравості;
- в) алгоритм керування: інтерпретує показники сенсора та визначає рівень яскравості світлофорів відповідно до встановлених порогових значень (наприклад: 100 % – при високому рівні освітлення, 70 % – у сутінках, 40 % – в умовах низької освітленості);
- г) світлофор (LED): отримує сигнал від Arduino та змінює інтенсивність світіння за допомогою ШІМ (PWM);
- д) система моніторингу: фіксує дані про стан системи (рівень освітленості, поточну яскравість світлофорів) для віддаленого контролю або збереження.
- е) циклічний процес: після коригування яскравості Arduino робить паузу на визначений проміжок часу, ініціює повторне зчитування даних із сенсора та запускає новий цикл роботи;



Рис. 1 – Діаграма послідовності для адаптивної світлофорної системи
Fig. 1 – Sequence Diagram for the Adaptive Traffic Light System

Таким чином, побудована діаграма послідовності відображає повний цикл взаємодії між апаратними та програмними компонентами системи, забезпечуючи наочну інтерпретацію алгоритму адаптивного регулювання яскравості світлофорів у реальному часі.

Діаграма активності (ДА), також відома як Activity Diagram є одним із базових інструментів візуального моделювання, що призначений для графічного відображення потоків управління та взаємодії у складних системах [9]. Такий тип діаграм дає можливість формалізувати логіку виконання процесів, послідовність операцій, а також механізми розгалуження й синхронізації, які виникають у ході функціонування системи. ДА широко використовується у моделюванні бізнес-процесів; описі алгоритмів програмного забезпечення; відображенні сценаріїв взаємодії користувачів із системою.

У межах цього дослідження розроблено ДА для АСС. Для формалізації поведінки системи вона подана графічній інтерпретації на рис. 2.

На початковому етапі система виконує ініціалізацію та встановлює порогові значення освітленості для різних умов середовища: яскравий день; сутінки; ніч. Після цього система переходить у робочий цикл, де здійснюється зчитування показників сенсора освітленості та перевірка їх коректності. У випадку отримання валідних даних вони обробляються, а рівень яскравості світлофора визначається на основі порівняння з установленими пороговими межами: 100% – для умов яскравого денного освітлення; 70% – для сутінків; 40% – для нічного часу.

Якщо рівень освітленості виявляється нижчим за мінімальне значення, система переходить у режим роботи з мінімально допустимою яскравістю. Додатково здійснюється перевірка на наявність різких змін умов освітлення, і у разі їх виявлення виконується повторний розрахунок параметрів яскравості.

Цикл роботи завершується паузою перед повторним зчитуванням даних, що дозволяє оптимізувати обчислювальні ресурси. Якщо умова продовження роботи більше не виконується, система завершує функціонування. Такий підхід забезпечує енергоефективність та адаптивність світлофорної системи, підвищуючи безпеку дорожнього руху в реальних умовах НС.

Діаграма станів (ДС), або State Machine Diagram є важливим інструментом для моделювання поведінки об'єктів у системах. Вона відображає множину можливих станів об'єкта та події, що ініціюють переходи між цими станами. Використання ДС є особливо ефективним при аналізі життєвого циклу: об'єктів; автоматизованих систем; бізнес-процесів; технічних пристроїв; де зміна стану відбувається під впливом певних умов або дій користувачів [10].



У рамках даного дослідження застосування ДС дозволяє чітко структурувати алгоритмічну логіку роботи АСС, що спрощує подальшу розробку, аналіз та налагодження системи. Графічне представлення ДС АСС наведено на рис.3.

Представлена ДС відображає процес автоматичного регулювання яскравості світлофорів залежно від рівня зовнішнього освітлення. Логіка переходів між станами є наступною:

- система ініціалізується та переходить у стан очікування даних від сенсорів освітленості;
- після отримання сигналу здійснюється зчитування рівня освітленості та аналіз отриманих даних;
- на основі аналізу визначається відповідний режим яскравості світлофорів: 100 % при яскравому денному освітленні; 70 % у сутінках; 40 % у нічний час; мінімальна яскравість при дуже низькому освітленні;
- встановлений режим підтримується до наступного циклу оновлення даних;
- система перебуває у стані моніторингу змін освітлення та періодично перевіряє його рівень;
- у разі настання часу оновлення або виявлення значних змін освітлення виконується новий цикл зчитування та корекції яскравості;
- при необхідності система може бути переведена у стан вимкнення.

Таким чином, застосування ДС дозволяє забезпечити адаптивне регулювання яскравості світлофорів із урахуванням реальних умов НС та ефективне управління енергоспоживанням.

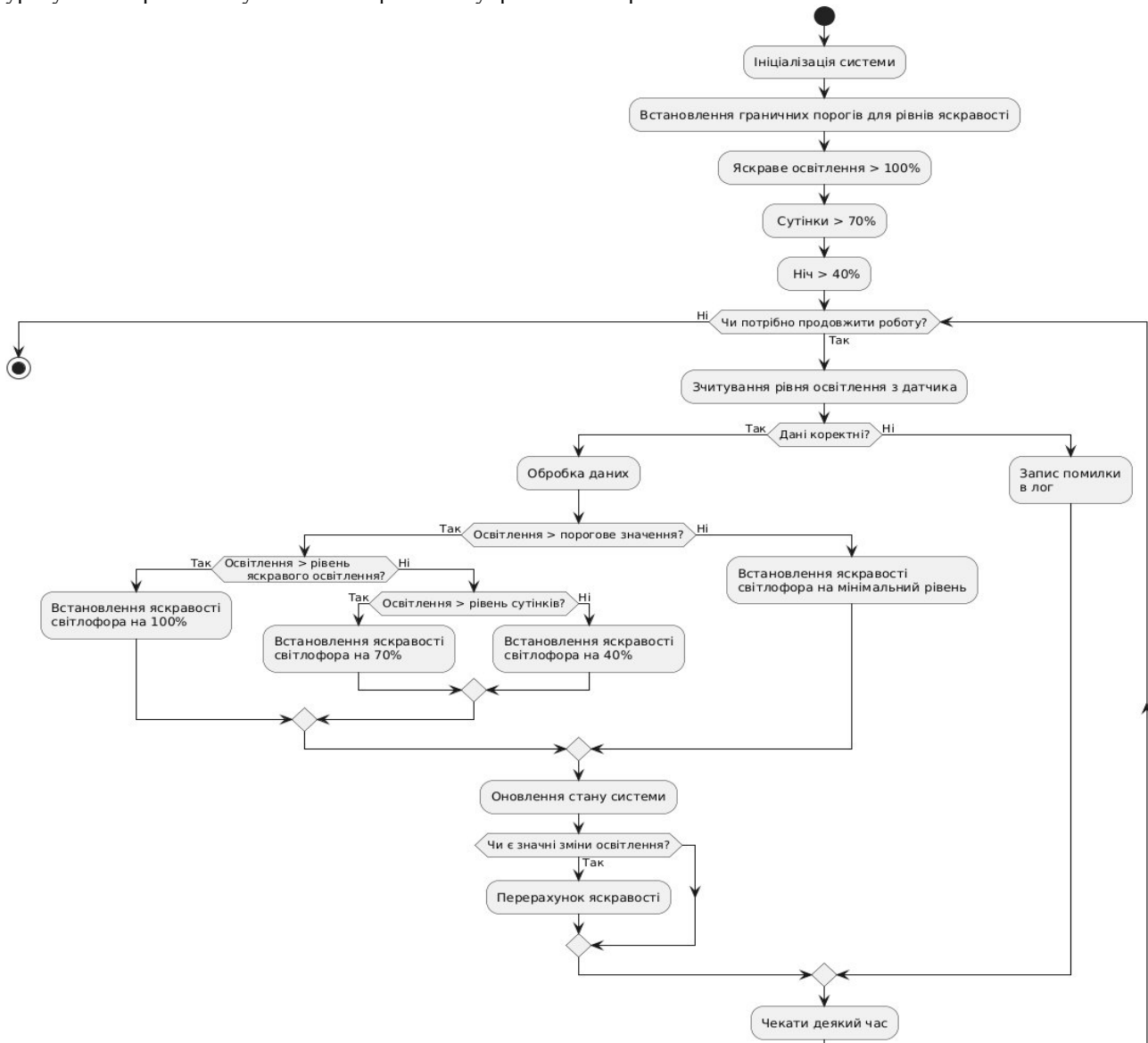


Рис. 2 – Діаграма активності, що описує процес автоматичного регулювання яскравості світлофорів на основі даних сенсорів зовнішнього освітлення

Fig. 2 – Activity Diagram Illustrating the Process of Automatic Traffic Light Brightness Adjustment Based on External Light Sensor Data

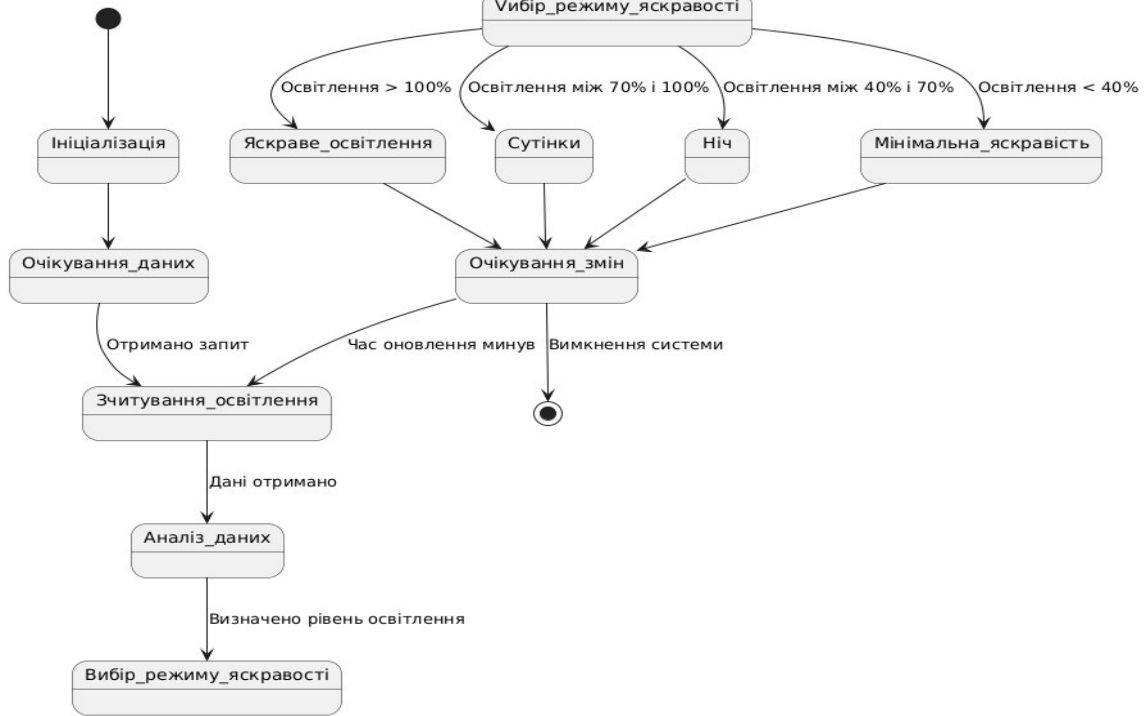


Рис. 3 – Діаграма станів для системи регулювання яскравості світлофорів
Fig.3 – State Diagram for the Traffic Light Brightness Control System

3.2 Розробка програмно-технічного забезпечення

Процес розробки реалізується у кілька етапів:

- визначається структура системи за допомогою діаграми класів;
- розробляється архітектура системи через діаграму компонентів;
- демонструється практична взаємодія елементів за допомогою діаграми об'єктів.

Така послідовність дозволяє спочатку закласти міцну структурну основу, а потім поетапно деталізувати поведінку та взаємодії між компонентами системи.

Діаграма класів (ДК), або Class Diagram є однією з основних структурних діаграм для моделювання систем. Вона призначена для графічного відображення статичної структури системи, включаючи: класи, атрибути, методи та відносини між класами. Головна мета ДК – продемонструвати, як об'єкти взаємодіють між собою та забезпечити чітке уявлення про архітектуру програмного забезпечення [11]. Побудуємо ДК для АСС на базі Arduino (рис. 4).

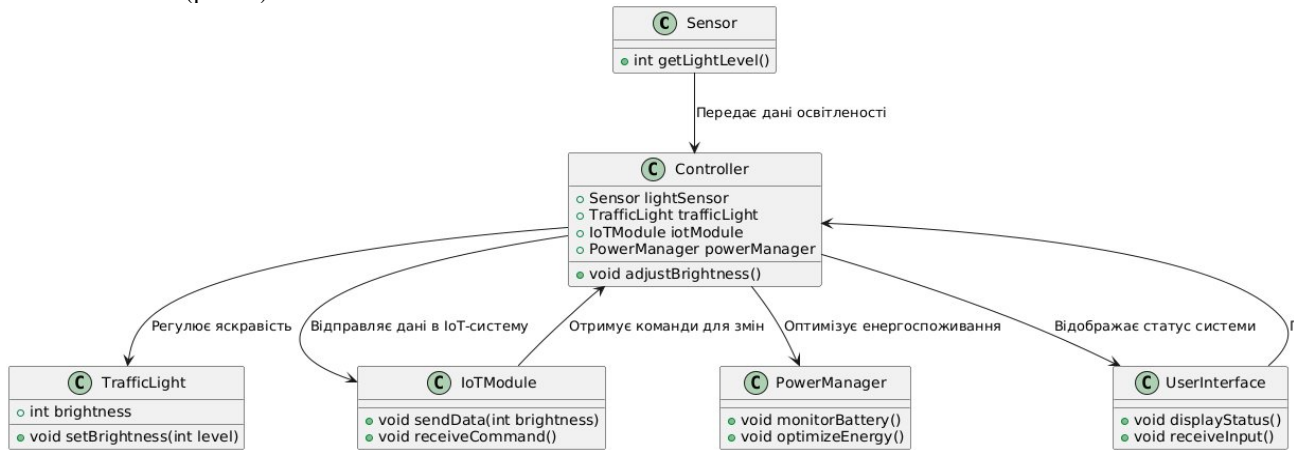


Рис. 4 – Діаграма класів для адаптивної світлофорної системи
Fig. 4 – Class Diagram for the Adaptive Traffic Light System

Основні класи системи включають:

- «Sensor» – відповідає за зчитування рівня зовнішнього освітлення;
- «TrafficLight» – клас світлофора, що забезпечує регулювання яскравості світлодіодів;



- «Controller» – центральний контролер, який отримує дані від сенсора, аналізує їх та встановлює рівень яскравості, координуючи взаємодію з іншими компонентами;
- «IoTModule» – забезпечує інтеграцію системи з мережею Інтернету речей (IoT) та обмін командами;
- «PowerManager» – здійснює моніторинг та оптимізацію енергоспоживання;
- «UserInterface» – надає користувачам можливість контролювати стан системи та вводити команди.

Взаємодія між класами забезпечує реалізацію адаптивної системи, здатної реагувати на зміни освітлення, підтримувати зв'язок із IoT-мережами та оптимізувати використання енергії.

Діаграма компонентів (ДКМ) є одним із ключових засобів об'єктно-орієнтованого аналізу та проектування програмного забезпечення. Вона призначена для моделювання фізичних компонентів системи та відображення їхніх взаємозв'язків на високому рівні абстракції [12]. У нашому дослідженні необхідно побудувати ДКМ для:

- а) представлення архітектурної структури програмної системи;
- б) визначення функціонального призначення її окремих складових;
- в) демонстрації взаємодії між компонентами;
- г) опису механізмів розподілу та комунікації програмних модулів.

До базових елементів ДКМ належать компоненти, серед яких виділяють: модулі, сервіси, інтерфейси та з'єднання. Залежно від призначення, компоненти реалізують: програмні бібліотеки, бази даних, вебсервіси тощо. На основі цього сформуємо графічне представлення ДКМ (рис. 5).

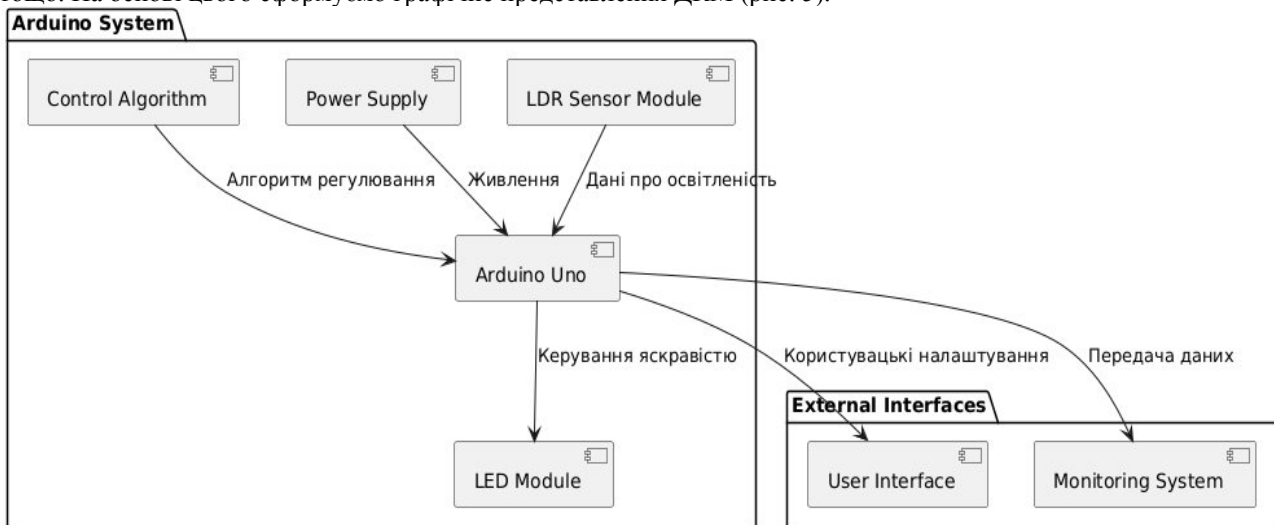


Рис. 5 – Діаграма компонентів для адаптивної світлофорної системи

Fig. 5 – Component Diagram for the Adaptive Traffic Light System

З'єднання між компонентами відображають існуючі залежності та потоки даних, а призначення самих компонентів пояснимо нижче:

- а) Arduino Uno – центральний модуль, що виконує обробку даних від сенсорів, реалізує алгоритм управління яскравістю та формує сигнали керування для світлодіодів;
- б) LDR Sensor Module – датчик освітленості, який передає виміряні значення до Arduino для подальшої обробки;
- в) LED Module – набір індикаторів (червоний, жовтий, зелений), що імітують роботу світлофора, яскравість яких регулюється Arduino;
- г) Power Supply – забезпечує стабільне живлення системи, підключене безпосередньо до контролера;
- д) Control Algorithm – програмний модуль, що реалізує логіку адаптивного керування інтенсивністю світлових сигналів;
- е) External Interfaces, які включають: User Interface (UI) – забезпечує налаштування параметрів системи користувачем та Monitoring System – передає дані про стан системи для віддаленого моніторингу.

Отже, побудована ДКМ відображає архітектуру АСС, її основні компоненти та взаємозв'язки, що забезпечують адаптивне керування та ефективне використання енергоресурсів.

Діаграма об'єктів (ДО) (англ. Object Diagram) належить до структурних діаграм і використовується для відображення конкретного стану об'єктів системи у визначений момент часу [9, 11]. Головне призначення ДО полягає у візуалізації практичної структури програмної системи, що дозволяє простежити взаємодію її елементів у процесі виконання. У нашому дослідженні побудова ДО необхідна для:

- а) ілюстрації стану системи в межах певної операції;
- б) відображення взаємозв'язків під час виконання сценаріїв чи тестів;
- в) спрощення подання складної логіки функціонування екземплярів класів.



На відміну від діаграми класів (ДК), яка моделює узагальнену структуру, ДО фокусується на конкретних прикладах із визначеними у дослідженні атрибутами – це забезпечує більш наочне уявлення про поведінку АСС за певних умов. У межах виконання теми дослідження побудовано графічне представлення ДО (рис. 6).



Рис. 6 – Діаграма об'єктів для адаптивної світлофорної системи
Fig. 6 – Object Diagram for the Adaptive Traffic Light System

Розкриємо призначення об'єктів:

- Sensor (LDR) – фізичний сенсор освітленості, який зчитує рівень зовнішнього освітлення в одиницях люксів (Lux); у наведеному прикладі значення 350 Lux свідчить про недостатнє освітлення (сутінки чи нічний час);
- Arduino – мікроконтролер, що отримує дані від сенсора і керує світлодіодами за допомогою PWM; наприклад, параметр `pwmValue = 128` відповідає приблизно 50% яскравості LED-сигналів;
- ControlAlgorithm – модуль, що містить логіку визначення яскравості світлофорів залежно від освітленості: «>800 Lux» – 100% яскравість; «400 – 800 Lux» – 70% яскравість; «<400 Lux» – 40% яскравість;
- TrafficLight – об'єкт, що реалізує функції світлофора та включає світлодіоди червоного, жовтого й зеленого кольорів; має параметр `currentBrightness`, значення якого у даному випадку дорівнює 70%;
- MonitoringSystem – компонент, відповідальний за збереження й передачу інформації про стан системи з метою віддаленого спостереження та аналізу;
- зв'язки між об'єктами: Sensor передає дані до Arduino; Arduino спрямовує дані до ControlAlgorithm; ControlAlgorithm регулює яскравість через TrafficLight; після налаштування параметрів Arduino надсилає інформацію до MonitoringSystem.

Таким чином, ДО відображає актуальний стан об'єктів, їхні атрибути та взаємозв'язки у процесі функціонування алгоритму автоматичного регулювання яскравості світлофорів.

3.3 Реалізація апаратної конфігурації прототипу та програмного скетчу

Визначимо функціональні і апаратні елементи системи для реалізації АСС (мінімальний набір):

- мікроконтролер: Arduino Mega / Uno або сумісна плата;
- IoT-модуль – ESP8266 або ESP32 для організації віддаленого моніторингу й налаштування параметрів системи;
- фоторезистор (LDR) сумісний із аналоговим входом Arduino, з можливістю інтеграції з модулем передачі даних IoT;
- світлодіоди (LED): 3 × LED (Red, Yellow, Green);
- обмежувальні резистори для LED: 3 × 220 Ω та резистор для формування дільника напруги з LDR: 10 kΩ;
- з'єднувальні дроти (залежно від плати) та макетна плата (breadboard) для прототипування.

Наведемо таблицю підключення компонентів, яка дозволить адресно підключити прототип АСС (табл. 1).

На підставі побудованих UML-діаграм переходимо до розробки експериментального програмного коду – «скетчу» для мікроконтролерної платформи Arduino. Запропонований код – здійснює періодичне зчитування рівня зовнішньої освітленості та виконує динамічне регулювання інтенсивності світлодіодних індикаторів світлофора відповідно до обраної логіки керування.

**Таблиця 1 – Адресне підключення компонентів АСС**

Апаратний елемент	Комірки макетної плати	Позначення пінів Arduino
Red LED (анод)	через 220Ω	D9 (PWM)
Yellow LED (анод)	через 220Ω	D10 (PWM)
Green LED (анод)	через 220Ω	D11 (PWM)
LED катоди	GND rail	GND
LDR (верх)	+5V rail	
LDR (низ)	вузол A → A0	A0 (analog)
10 kΩ резистор	вузол A → GND	GND
Arduino 5V	+5V rail	5V
Arduino GND	– rail	GND
ESP8266 Vcc	3.3V rail	3.3V (окреме джерело)
ESP8266 GND	GND rail	GND
ESP8266 RX/TX	через «level shifter»	до Arduino TX / RX

Для реалізації процесів завантаження та тестування створеного програмного забезпечення необхідно виконати наступні етапи:

- відкрити середовище розробки Arduino IDE;
- завантажити скетч, призначений для регулювання яскравості світлофорних індикаторів (рис. 7);
- активувати монітор послідовного порту та перевірити коректність даних, що надходять від датчика освітленості LDR;
- проаналізувати зміну рівня яскравості світлодіодів у відповідь на варіації зовнішнього освітлення.

```

Traffic_Lights.ino
25  if (lightLevel >= DIM_THRESHOLD) { // Якщо рівень освітленості перевищує поріг яскравого світла
26      brightness = 255; // Встановлюємо яскравість на 100%
27  } else if (lightLevel >= DIM_THRESHOLD) { // Якщо рівень освітленості середній (сутінки)
28      brightness = 178; // Встановлюємо яскравість на 70%
29  } else { // Якщо рівень освітленості низький (ніч)
30      brightness = 102; // Встановлюємо яскравість на 40%
31  }
32
33  analogWrite(RED_LED, brightness); // Застосовуємо обчислену яскравість до червоного світлодіода
34  analogWrite(YELLOW_LED, brightness); // Застосовуємо обчислену яскравість до жовтого світлодіода
35  analogWrite(GREEN_LED, brightness); // Застосовуємо обчислену яскравість до зеленого світлодіода
36  }
37
38  void loop() {
39      int lightLevel = analogRead(LIGHT_SENSOR); // Зчитуємо значення рівня освітленості з датчика
40      Serial.print("Освітленість: "); // Виводимо текстове повідомлення в монітор порту
41      Serial.println(lightLevel); // Виводимо рівень освітленості у серійний монітор
42      adjustBrightness(lightLevel); // Викликаємо функцію регулювання яскравості
43      delay(1000); // Затримка в 1 секунду перед наступним зчитуванням даних

```

Output

Sketch uses 3568 bytes (1%) of program storage space. Maximum is 253952 bytes.
Global variables use 214 bytes (2%) of dynamic memory, leaving 7978 bytes for local variables. Maximum is 8192 bytes.

Рис. 7 – Реалізований програмний скетч для регулювання інтенсивності світлофорних сигналів, інтегрований у середовище розробки Arduino IDE

Fig. 7 – Implemented software sketch for controlling the intensity of traffic light signals, integrated into the Arduino IDE development environment

4 Результати досліджень

Основні теоретичні результати роботи охоплюють:

- аналіз сучасних технологій регулювання яскравості світлофорних систем, включно з фотоелектричними сенсорами, часовими алгоритмами, інтелектуальними системами керування та IoT-рішеннями;
- розроблення алгоритму автоматичної зміни інтенсивності світлових сигналів залежно від рівня зовнішнього освітлення із визначенням оптимальних порогових значень;
- побудову UML-діаграм, що відображають структуру, логіку функціонування та взаємодію компонентів системи;
- створення програмного забезпечення та розроблення схеми апаратної реалізації з використанням світлодіодів, фоторезистора та допоміжних елементів;



д) виготовлення й тестування прототипу, який підтвердив працездатність і ефективність запропонованого підходу.

В результаті експериментальних досліджень було створено прототип адаптивної світлофорної системи із реалізацією наступних функціональних процесів:

- а) ініціалізація апаратних інтерфейсів та калібрування сенсора освітленості;
- б) періодичне зчитування аналогового сигналу з LDR;
- в) попередня фільтрація / усереднення значень для зниження шумів;
- г) перетворення виміряного рівня освітленості у визначений режим яскравості, відповідно до встановлених порогів;
- д) регулювання інтенсивності LED за допомогою PWM із плавними переходами для уникнення різких змін індикації;
- е) передавання телеметричних даних та прийом команд конфігурації через IoT-модуль ESP8266 / ESP32 для віддаленого моніторингу та управління.

5 Обговорення результатів

При представленні результатів експериментальних досліджень та в процесі обговорення реалізації програмно-технічного комплексу, фахівцями та експертами було виділено та сформульовано додаткові рекомендації:

- а) калібрування: на момент першої ініціалізації скетчу слід зробити процедуру калібрування LDR – зчитати значення при відомих умовах (повний день, сутінки, ніч) і встановити реальні пороги (не жорстко 800 / 400 Lux, якщо використовується фоторезистор з аналоговими одиницями);
- б) фільтрація: рекомендовано обчислювати середнє з експериментальної серії (5 – 10 вимірювань) або застосувати експоненційне згладжування, щоб уникнути «стрибаючих» впливів від світла автомобільних фар;
- в) плавний перехід LED: при зміні режиму слід поступово змінювати PWM (наприклад, інкремент ± 1 кожні 10 – 20 ms), щоб забезпечити комфортне сприйняття;
- г) безпека при підключенні ESP: необхідно переконатись, що сигнали між Arduino (5V) та ESP (3.3V) проходять через «level shifter» або застосовувати резисторний поділ для «TX»; не підключати 5V «TX» прямо у ESP «RX»;
- д) живлення: якщо живлення Arduino відбувається від зовнішнього адаптера, треба переконатись, що його вихід стабільний та має достатній рівень струму для підключених модулів.

Висновки

У дослідженні представлено підхід до реалізації адаптивного регулювання яскравості вуличних світлофорів із використанням апаратно-програмної платформи Arduino. Отримані результати підтверджують актуальність проблеми енергоефективного керування світлофорними системами в умовах зростання навантаження на транспортну інфраструктуру сучасних міст.

Розроблене програмно-технічне забезпечення дозволяє адаптивно змінювати інтенсивність світлових сигналів залежно від рівня зовнішнього освітлення, що сприяє підвищенню безпеки руху та зменшенню втомлюваності водіїв і пішоходів від надмірно яскравих сигналів у нічний час. Крім того, система забезпечує суттєве скорочення енергоспоживання, що особливо важливо в контексті розвитку концепцій «зелених» та енергоощадних міст.

Виконаний аналіз сучасних технологій засвідчив, що поєднання фотоелектричних датчиків, алгоритмів автоматичного керування та можливостей інтеграції з IoT-рішеннями відкриває перспективи для формування комплексних інтелектуальних транспортних систем. Запропонований підхід може бути масштабований та інтегрований у більш складні мережеві інфраструктури, включно з елементами «розумного міста».

Практична значущість розробки полягає у можливості впровадження адаптивної системи в міську інфраструктуру з метою зниження енергоспоживання (особливо у критичні періоди енергодефіциту) та підвищення безпеки дорожнього руху. Використання IoT-компонентів здатне забезпечити віддалений моніторинг та централізоване керування, а інтеграція із «розумними» транспортними мережами сприятиме оптимізації трафіку. Запропоноване рішення є відносно недорогим, простим у реалізації та здатним до гнучкої модифікації під специфічні умови експлуатації. Це створює передумови для його впровадження не лише у великих містах, а й у менших населених пунктах.

Подальші дослідження доцільно зосередити на впровадженні алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування транспортних потоків, інтеграції системи з іншими елементами «розумного міста» та підвищенні енергоефективності за рахунок використання відновлюваних джерел живлення (наприклад: сонячних панелей із накопичувачами енергії), що підвищить автономність та екологічну стійкість запропонованого рішення.

Список використаних джерел

1. Kaluarachchi, Y. Implementing data-driven smart city applications for future cities. *Smart Cities*. 2022, 5, P. 455–474.
2. Hamidi Nur Diyana Mohd, Subramaniam Siva Kumar, Esro Mazran, Yusuf Ismail. Analysis and development of a self-dimming module for road traffic signals. *International Journal of Recent Technology and Applied Science*, 2023, vol. 5, no. 1, P. 42–53. DOI: 10.36079/lamintang.ijortas-0501.498.



3. Павловський В. О. Методи регулювання циклу світлофорного об'єкта з урахуванням часових та метеорологічних факторів. *Збірник наукових праць Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2019. С. 85–92.
4. Almaliki M. Hybrid adaptive traffic lights management (H-ATLM) using deep deterministic policy gradient (DDPG). *Sustainability*, 2025, vol. 17, no. 14, art. 6462. DOI: 10.3390/su17146462.
5. Mondal M. A., Rehena Z. An IoT-based congestion control framework for intelligent traffic management system. In *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Data Engineering*. Udupi, India, 23–24 May 2019. P. 1287–1297.
6. Yusuf A'isyah Nur Aulia, Arifin Ajib Setyo, Zulkifli Fitri Yuli. Recent development of smart traffic lights. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*. 2021. vol. 10. no. 1, P 224–233. DOI: 10.11591/ijai.v10.i1.pp224-233.
7. Djahel S., Doolan R., Muntean, G. M., Murphy J. A communications-oriented perspective on traffic management systems for smart cities: Challenges and innovative approaches. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2024, 17. P. 125–151.
8. Velykodniy S., Burlachenko Zh., Zaitseva-Velykodna S. Modelling the behavioural component of the emergent parallel processes of working with graph databases using Petri net-tools. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*. (Scopus) 2021. Vol. 36. Iss. 6. P. 498–515. (Scopus) DOI: <https://doi.org/10.1080/17445760.2021.1934836>. Taylor & Francis Group, England & Wales. London.
9. Великодний С. С. Моделі та методи проактивного управління проектами із розвитку програмних систем і продуктів. Монографія. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2021. 322 с. ISBN 978-966-186-182-3.
10. Velykodniy S. S. Analysis and synthesis of the results of complex experimental research on reengineering of open CAD systems. *Applied Aspects of Information Technology*. 2019. Vol. 2. No 3. P. 186–205. DOI: 10.15276/aait.03.2019.2.
11. Великодний С. С., Тимофєєва О. С. Реінжиніринг програмного забезпечення інформаційних систем: монографія. Одеса: ОДЕКУ, 2020. 160 с.
12. Velykodniy S. Reengineering of open software system of 3D modeling BRL-CAD. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2019. No 3 (9), P. 62–71.

References

- [1] Y. Kaluarachchi, “Implementing data-driven smart city applications for future cities,” *Smart Cities*, vol. 5, pp. 455–474, 2022.
 - [2] H. N. D. Mohd, S. S. Kumar, M. Esro, and Y. Ismail, “Analysis and development of a self-dimming module for road traffic signals,” *Int. J. Recent Technol. Appl. Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 42–53, 2023, doi: 10.36079/lamintang.ijortas-0501.498.
 - [3] V. O. Pavlovskiy, “Metody rehuliuвання tsyklad svitlofornoho ob'iekta z urakhuvanniam chasovykh ta meteorolohichnykh faktoriv,” *Zb. nauk. prats. Nats. tekhn. un-tu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut»*, pp. 85–92, 2019.
 - [4] M. Almaliki, “Hybrid adaptive traffic lights management (H-ATLM) using deep deterministic policy gradient (DDPG),” *Sustainability*, vol. 17, no. 14, art. 6462, 2025, doi: 10.3390/su17146462.
 - [5] M. A. Mondal and Z. Rehena, “An IoT-based congestion control framework for intelligent traffic management system,” in *Proc. Int. Conf. Artif. Intell. Data Eng.*, Udupi, India, 23–24 May 2019, pp. 1287–1297.
 - [6] Y. A. N. Aulia, A. A. Setyo, and Z. F. Yuli, “Recent development of smart traffic lights,” *IAES Int. J. Artif. Intell.*, vol. 10, no. 1, pp. 224–233, 2021, doi: 10.11591/ijai.v10.i1.pp224-233.
 - [7] S. Djahel, R. Doolan, G. M. Muntean, and J. Murphy, “A communications-oriented perspective on traffic management systems for smart cities: Challenges and innovative approaches,” *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 17, pp. 125–151, 2024.
 - [8] S. Velykodniy, Zh. Burlachenko, and S. Zaitseva-Velykodna, “Modelling the behavioural component of the emergent parallel processes of working with graph databases using Petri net-tools,” *Int. J. Parallel, Emergent, Distrib. Syst.*, vol. 36, no. 6, pp. 498–515, 2021, doi: 10.1080/17445760.2021.1934836.
 - [9] S. S. Velykodniy, *Modeli ta metody proaktyvnoho upravlinnia proiektamy iz rozvytku prohramnykh system i produktiv*. Odesa: Odeskyi derzh. ekol. un-t, 2021, 322 s. ISBN 978-966-186-182-3.
 - [10] S. S. Velykodniy, “Analysis and synthesis of the results of complex experimental research on reengineering of open CAD systems,” *Appl. Aspects Inf. Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 186–205, 2019, doi: 10.15276/aait.03.2019.2.
 - [11] S. S. Velykodniy and O. S. Tymofieieva, *Reinzhyning prohramnoho zabezpechennia informatsiinykh system*. Odesa: ODEKU, 2020, 160 s.
 - [12] S. Velykodniy, “Reengineering of open software system of 3D modeling BRL-CAD,” *Innov. Technol. Sci. Solut. Ind.*, no. 3(9), pp. 62–71, 2019.
- Отримана в редакції 12.06.2025. Прийнята до друку 18.06.2025. Received 12 June 2025. Approved 18 June 2025. Available in Internet 30 June 2025