

УДК 621.311.22:621.311.24

DOI 10.31548/energiya1(83).2026.091

**СИНТЕЗ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗОВНІШНІМ ОСВІТЛЕННЯМ
МУНІЦИПАЛЬНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ
ОПТИМІЗАЦІЇ****П. Г. Плешков, кандидат технічних наук, професор****Центральноукраїнський національний технічний університет**<https://orcid.org/0000-0003-2141-4811>E-mail: kafedra.etsem@gmail.com**В. В. Зінзура, кандидат технічних наук, доцент****Центральноукраїнський національний технічний університет**<http://orcid.org/0000-0001-6357-064X>E-mail: vasiliyzinzura@gmail.com**К. Г. Петрова, кандидат технічних наук, доцент****Центральноукраїнський національний технічний університет**<https://orcid.org/0000-0002-1928-6833>E-mail: kateflash27@gmail.com**В. П. Солдатенко, кандидат технічних наук, доцент****Центральноукраїнський національний технічний університет**<https://orcid.org/0000-0002-7781-9343>E-mail: kirovograd41@gmail.com**В. М. Павленко, кандидат технічних наук, доцент****Національний університет біоресурсів і природокористування України**<https://orcid.org/0000-0003-2163-8508>E-mail: v.pavlenko@nubip.edu.ua

Анотація. Робота присвячена актуальній проблемі підвищення рівня енергоефективності муніципальних систем зовнішнього освітлення, які часто функціонують із надлишковим запасом потужності.

Метою дослідження є підвищення енергетичної ефективності та якості функціонування систем вуличного освітлення шляхом удосконалення системи керування, яка враховує рівень природного освітлення, показники рівномірності світлового потоку та ресурс роботи обладнання.

Розроблено математичну модель просторового розподілу світлового поля та сформульовано задачу автоматичного керування рівнем освітленості як задачу багатокритеріальної оптимізації. Для знаходження компромісного рішення між мінімізацією енергоспоживання, максимізацією рівномірності освітлення та ресурсу обладнання використано метод наближення до утопічної точки в просторі критеріїв із використанням чебишевської метрики.

Чисельне моделювання для типової ділянки автомагістралі підтвердило ефективність запропонованого підходу. Встановлено, що адаптивна система забезпечує зниження споживання електроенергії на 27,9% (з 600 Вт до 432,6 Вт) порівняно з традиційними таймерними системами. Економія досягається за рахунок компенсації природного фону та усунення технологічного запасу освітленості – зниження мінімального рівня з 20,02 лк до нормованих 15,00 лк. При цьому забезпечується підвищення поздовжньої рівномірності з 0,778 до 0,790 та збільшення прогнозованого ресурсу світильників майже удвічі (до 100 тис. годин) за рахунок зниження теплового навантаження.

Впровадження методу дозволяє створювати системи класу Smart City, що адаптуються до реальних умов видимості, гарантуючи безпеку руху за мінімальних експлуатаційних витрат.

Ключові слова: система вуличного освітлення, багатокритеріальна оптимізація, адаптивне керування, муніципальні системи, світлодіодні світильники

Вступ. У сучасних умовах розвитку енергетики підвищення рівня енергоефективності муніципальної інфраструктури набуває критичного значення. Системи зовнішнього

освітлення є одними з найбільших споживачів електроенергії у комунальному секторі, складова витрат яких може сягати до 40%.

Сучасна модернізація мереж освітлення переважно зосереджена на заміні газорозрядних джерел світла на світлодіодні. Проте, потенціал LED-технологій не використовується повною мірою через застосування застарілих підходів до автоматичного керування системами освітлення. Більшість існуючих систем функціонують за жорстким графіком, забезпечуючи номінальний режим роботи світильників впродовж усього темного часу доби.

Ключовою проблемою традиційного підходу є необхідність закладання значного коефіцієнта запасу ($K_z = 1,3 \dots 1,5$) на етапі проектування для компенсації майбутньої деградації світлового потоку та забруднення оптики. Це призводить до того, що нові системи освітлення створюють надлишкову освітленість, що є нераціональним використанням електроенергії. Крім того, такі системи не враховують динаміку природного освітлення у сутінковий період, що також знижує їхню ефективність.

Вирішення цієї проблеми полягає у переході до адаптивних систем керування, здатних у реальному часі коригувати світловий потік світильників. Однак, існуючі методи керування часто є однокритеріальними, спрямованими виключно на заощадження енергії. Це може призводити до погіршення рівномірності освітлення та скорочення ресурсу обладнання. Тому задача удосконалення системи автоматичного керування рівнем освітленості, яка забезпечує баланс між енергоефективністю, якістю освітлення та надійністю, є актуальною.

Огляд літературних джерел. У роботі [1] проведено комплексний огляд сучасних методів автоматичного керування вуличним освітленням. Автори пропонують нову класифікацію стратегій – від базових систем на основі таймерів, до систем на основі комп'ютерного зору. Попри широке охоплення функціоналу IoT (моніторинг середовища, зарядження електромобілів), у дослідженні недостатньо уваги приділено математичному моделюванню процесів деградації обладнання, а основний акцент зроблено на архітектурі систем, а не на оптимізації режимів їх роботи.

У статті [2] розглядається впровадження систем повної адаптації згідно зі стандартом UNI 11248 на прикладі масштабних проєктів в Італії та В'єтнамі. Автори доводять ефективність динамічного регулювання на основі даних про трафік та погоду. Однак недоліком такого підходу є висока вартість розгортання сенсорної мережі та залежність ефективності системи від надійності каналів зв'язку і точності датчиків, що ускладнює її експлуатацію в умовах обмеженого бюджету.

Дослідження [3] присвячене оптимізації автономних фотоелектричних систем освітлення, де головними критеріями обрано енергоспоживання та глобальну рівномірність освітлення. Хоча запропонований підхід є багатокритеріальним, він орієнтований на специфіку сонячної генерації та може бути реалізований лише на етапі проектування інфраструктури. Це унеможливорює його пряме використання для оперативного керування мережевими світильниками в реальному часі.

У роботі [4] запропоновано інтегровану структуру оптимізації системи освітлення для житлових районів із використанням алгоритму NSGA-II, що дозволяє знайти баланс між освітленістю зон активності та світловим забрудненням житла. Проте основним обмеженням такого підходу є те, що оптимізація стосується проєктних параметрів (висота опор, відстань між ними), і, як і у випадку попередньої системи, він не може бути покладений в основу роботи системи автоматичного керування освітленням.

У роботі [5] розглядаються методи предиктивного обслуговування LED-світильників на основі стандартів LM-80 та TM-21. Автори використовують модель експоненціальної деградації для прогнозування залишкового ресурсу. Недоліком підходу є те, що ресурс розглядається лише як параметр для моніторингу, а не як параметр автоматичного керування, який можна максимізувати шляхом корекції струму навантаження.

Автори статті [6] пропонують адаптивну систему керування на базі глибокого навчання та вбудованих обчислювачів Jetson Nano для розпізнавання об'єктів у реальному часі. Попри

технологічну новизну, таке рішення вимагає значних апаратних ресурсів, що суттєво здорожчує систему. Крім того, дискретне перемикання яскравості при виявленні об'єкта може створювати дискомфорт для водіїв, що не враховано в алгоритмі.

У дослідженні [7] виконано оцінювання впливу технічного обслуговування на енергетичні показники дорожнього освітлення. Автори акцентують увагу на фізичній заміні компонентів та чищенні оптики. Однак робота не пропонує методів автоматизованої компенсації втрат світлового потоку через систему керування, що змушує закладати надлишкові коефіцієнти запасу ще на етапі проектування.

У роботі [8] представлено підхід до керування на основі класів енергоефективності стандарту EN-15232 та протоколу LonWorks. Запропоновані функціональні стратегії дозволяють знизити споживання до 45%, проте вони базуються на жорстких сценаріях автоматизації. Такий підхід позбавлений гнучкості, необхідної для пошуку оптимального компромісу в умовах стохастичних змін природного освітлення.

У роботі [9] представлено стратегію динамічного керування яскравістю на основі глибокого навчання з підкріпленням, що адаптується до щільності транспортного потоку. Автори демонструють високу енергоефективність у масштабах Smart City, проте модель фокусується виключно на поточному споживанні, ігноруючи кумулятивний вплив температурних режимів на деградацію люмінофора світлодіодів.

Дослідження [10] присвячене використанню багатокритеріальних генетичних алгоритмів для проектування мереж освітлення. Автори враховують початкові інвестиції та експлуатаційні витрати, але цей підхід має статичний характер і призначений для етапу планування інфраструктури, що не дозволяє застосовувати його для оперативного керування системою в реальному часі під час зміни природного фону.

Автори статті [11] пропонує концепцію «цифрових двійників» для моніторингу стану муніципальних систем. Використання IoT-платформи дозволяє відстежувати параметри кожного драйвера, проте в роботі відсутній математичний апарат для автоматичного пошуку компромісних рішень без участі оператора.

У статті [12] запропоновано гібридну модель на основі згорткових нейронних мереж (CNN) для короткострокового прогнозування необхідного рівня освітленості в муніципальних мережах. Автори акцентують увагу на точності передбачення пікових навантажень. Проте, як і в багатьох рішеннях на основі штучного інтелекту, у роботі не розглядається аспект фізичного зношення обладнання, що обмежує можливість використання даної моделі для довгострокового керування життєвим циклом системи.

У статті [13] запропоновано модель на основі алгоритму імітації відпалу для багатокритеріальної оптимізації. Метод ефективний для пошуку компромісу між рівномірністю та потужністю на етапі розрахунку геометрії опор, проте він не враховує стохастичну зміну природного освітлення в сутінковий період, що є ключовим фактором для адаптивних систем.

Автори роботи [14] розглядають архітектуру Smart City на базі IoT з використанням LDR-датчиків. Система демонструє високу надійність, проте просте порогове керування (дискретне димування) не забезпечує необхідної плавності переходів для візуального комфорту водіїв, що підкреслює перевагу аналітичних методів апроксимації світлового поля, запропонованих у даному дослідженні.

У статті [15] досліджується «динамічне трекінгове освітлення» для пішохідних зон. Використання інтерактивних моделей дозволяє досягти балансу між безпекою та енергозбереженням, однак автори визнають проблему надмірної обчислювальної складності при масштабуванні на магістральні мережі, що робить доцільним використання більш швидких метрик, таких як чебишевська відстань.

Таким чином, аналіз наведених наукових джерел свідчить про відсутність комплексної методики, яка б розглядала керування вуличним освітленням як задачу багатокритеріальної оптимізації в реальному часі. Існуючі рішення або ігнорують показник ресурсу обладнання, або вимагають дороговартісної сенсорної інфраструктури, чи не забезпечують належної

плавності регулювання для візуального комфорту. Це обґрунтовує доцільність розроблення методу, який поєднує енергоефективність, якість освітлення та довговічність світильників у єдиній цільовій функції.

Мета дослідження – підвищенні рівня енергетичної ефективності та якості функціонування систем вуличного освітлення шляхом удосконалення системи керування, яка враховує рівень природного освітлення, показники рівномірності світлового потоку та ресурс роботи обладнання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі дослідження:

1. Розробити математичну модель просторового розподілу освітленості дорожнього полотна, яка враховує геометричні параметри розміщення світлодіодних світильників, їхні світлотехнічні характеристики та стохастичний вплив природного фону.

2. Сформулювати задачу адаптивного керування як задачу багатокритеріальної оптимізації, визначивши цільові функції енергоефективності, рівномірності освітлення та ресурсу обладнання, а також обґрунтувати метод пошуку кінцевого розв'язку.

3. Виконати комп'ютерне моделювання запропонованої системи та провести порівняльний аналіз її ефективності в порівнянні з існуючими системами.

Матеріали і методи дослідження. Для розрахунку світлового поля розглядається ділянка дороги довжиною L та шириною W , яка освітлюється групою з N світлодіодних світильників. Стан системи керування описується вектором $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_N]^T$, де $u_j \in [u_{min}, 1]$ – скалярний коефіцієнт димування j -го світильника (u_{min} – нижнє обмеження драйвера, 1 – номінальна потужність).

Освітленість $E(x, y)$ у довільній точці дорожнього полотна з координатами (x, y) визначається як сума штучної E_{art} та природної E_{nat} складових і залежить від вектора керування \mathbf{u} :

$$E(x, y, \mathbf{u}) = E_{art}(x, y, \mathbf{u}) + E_{nat}, \quad (1)$$

де E_{nat} – рівень природного фонового освітлення, який вважається рівномірно розподіленим на розрахунковому інтервалі часу.

Внесок j -го світильника в розрахункову точку визначається його індивідуальним налаштуванням u_j за законом обернених квадратів:

$$E_j(x, y) = u_j \frac{\Phi_{nom} \cdot K_{diag}(\gamma) \cos(\alpha)}{2\pi d_j^2}, \quad (2)$$

де Φ_{nom} – номінальний світловий потік світильника; d_j – відстань від джерела світла до розрахункової точки; α – кут падіння променя до нормалі поверхні; γ – кут між променем і оптичною віссю світильника; $K_{diag}(\gamma)$ – функція, що апроксимує криву сили світла.

Синтез адаптивної системи керування зводиться до пошуку оптимального вектора \mathbf{u}_{opt} , який забезпечує компроміс між трьома суперечливими показниками якості:

1. Критерій енергоспоживання (J_1), спрямований на мінімізацію сумарної активної потужності системи:

$$J_1(\mathbf{u}) = \sum_{j=1}^N (P_{nom} u_j) \rightarrow \min, \quad (3)$$

де P_{nom} – номінальна потужність одного світильника.

2. Критерій рівномірності освітлення (J_2), визначається як відношення мінімальної освітленості до середньої в розрахунковій області та підлягає максимізації:

$$J_2(\mathbf{u}) = U_0 = \frac{\min_k \{E_k(\mathbf{u})\}}{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M E_k(\mathbf{u})} \rightarrow \max, \quad (4)$$

де $E_k(\mathbf{u})$ – сумарна освітленість у k -й точці розрахункової сітки, M – кількість точок.

3. Критерій ресурсу обладнання (J_3), базується на моделі Арреніуса, яка описує залежність швидкості деградації люмінофора від теплового навантаження. Зниження

середнього струму експоненційно подовжує прогнозований термін експлуатації ((T_{life})). Даний критерій також підлягає максимізації:

$$J_3(\mathbf{u}) = T_{life} = T_{nom} \exp(\alpha(1 - \bar{u})) \rightarrow \max, \quad (5)$$

де T_{nom} – номінальний ресурс, α – емпіричний коефіцієнт (для LED $\alpha \approx 2,5$), $\bar{u} = \frac{1}{N} \sum u_j$ – середнє значення вектора керування.

Таким чином, задача багатокритеріальної оптимізації рівнем освітленості може бути записана у вигляді:

$$\begin{cases} J_1(\mathbf{u}) \rightarrow \min \\ J_2(\mathbf{u}) \rightarrow \max \\ J_3(\mathbf{u}) \rightarrow \max \\ E_k(\mathbf{u}) \geq E_{norm}, \quad \forall k \in [1, M] \\ u_{min} \leq u_j \leq 1, \quad \forall j \in [1, N] \end{cases} \quad (6)$$

Для розв'язання сформульованої задачі (1) найдоцільніше використати метод наближення до утопічної точки в просторі критеріїв. При цьому будемо використовувати чебишевську метрику. На попередньому етапі критерії, що вимагали максимізації (J_2, J_3), були зведені до задач мінімізації шляхом інверсії знака. Таким чином, сформовано вектор цільових функцій, кожна компонента якого підлягає мінімізації:

$$\mathbf{F}(\mathbf{u}) = [J_1(\mathbf{u}), -J_2(\mathbf{u}), -J_3(\mathbf{u})]^T = [F_1(\mathbf{u}), F_2(\mathbf{u}), F_3(\mathbf{u})]^T, \quad (7)$$

Оскільки компоненти вектора $\mathbf{F}(\mathbf{u})$ мають різну фізичну природу та суттєво відрізняються за порядком величин, необхідним етапом є їх нормування. Для цього вводиться поняття утопічної точки та точки надіра у просторі критеріїв.

Утопічна точка $\mathbf{F}^\circ = \{F_1^\circ, F_2^\circ, F_3^\circ\}$ являє собою вектор, компонентами якого є мінімальні значення кожного окремого критерію, досяжні в області допустимих рішень Ω :

$$F_k^\circ = \min_{\mathbf{u} \in \Omega} F_k(\mathbf{u}), \quad k = 1, 2, 3. \quad (8)$$

Точка надіра $\mathbf{F}^{nadir} = \{F_1^{nadir}, F_2^{nadir}, F_3^{nadir}\}$ – це вектор, компоненти якого являють собою максимальні значення критеріїв у межах множини Парето-ефективних рішень. Координати точки надіра визначаються як максимум по кожному стовпчику матриці:

$$F_k^{nadir} = \max\{F_k(\mathbf{u}^{(1)}), F_k(\mathbf{u}^{(2)}), F_k(\mathbf{u}^{(3)})\}, \quad (9)$$

де $\mathbf{u}^{(k)}$ – вектори керування, що мінімізують відповідні окремі критерії.

Таким чином, можливо виконати нормування критеріїв та перейти до безрозмірних функцій належності $\mu_k(\mathbf{u})$:

$$\mu_k(\mathbf{u}) = \frac{F_k(\mathbf{u}) - F_k^\circ}{F_k^{nadir} - F_k^\circ}, \quad (10)$$

де $\mu_k \in [0, 1]$.

Оптимальний вектор керування \mathbf{u}_{opt} визначається як аргумент, що мінімізує максимальне зважене відхилення від утопічної точки:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{opt} = \arg \min_{\mathbf{u}} (\max_{k=1,2,3} \{w_k \mu_k(\mathbf{u})\}), \\ E_m(\mathbf{u}) \geq E_{norm}, \quad \forall m \in [1, M] \\ u_{min} \leq u_j \leq 1, \quad \forall j \in [1, N] \end{cases}, \quad (11)$$

де w_k – вагові коефіцієнти критеріїв ($\sum w_k = 1$), які дозволяють налаштовувати пріоритети системи керування.

Верифікацію ефективності розробленого методу багатокритеріальної оптимізації виконано шляхом математичного моделювання світлового поля для типової ділянки автомагістралі класу М4. Модель сцени включає ділянку дорожнього полотна довжиною $L = 60$ м та шириною $W = 7$ м. Освітлювальна установка складається з $N = 4$ світлодіодних світильників ($P_{nom} = 150$ Вт, $\Phi_{nom} = 15200$ лм), розміщених на висоті $H = 10$ м з кроком установки 15 м.

У якості тестового сценарію обрано режим вечірніх сутінків, що характеризується наявністю фоновому природного освітлення на рівні $E_{nat} = 2,0$ лк. Цільове значення нормованої мінімальної освітленості встановлено на рівні $E_{norm} = 15,0$ лк.

Для порівняння в якості базової системи було обрано програмну систему автоматичного керування рівнем освітленості, яка працює за часовим графіком.

Результати дослідження та їх обговорення. Для оцінювання меж простору критеріїв було згенеровано множину точок, що відповідають допустимим керуванням. Графічне зображення даної множини точок приведено на рис. 1 у вигляді графіків.

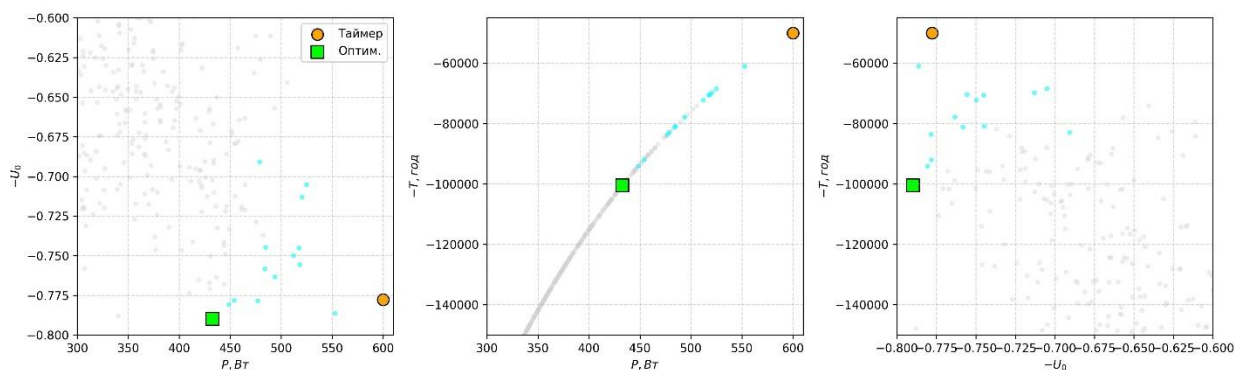


Рис. 1. Проекції простору критеріїв

На рис. 1: сірі точки – це частина простору допустимих рішень, в якій $E < E_{norm}$; - бірюзові точки – це частина простору допустимих рішень, в якій $E \geq E_{norm}$.

Аналіз графіків на рис. 1 показав, що робоча точка базової системи керування (помаранчевий маркер) знаходиться на значній відстані від області парето-оптимальних рішень. Це свідчить про субоптимальність традиційного алгоритму, який характеризується надлишковим енергоспоживанням при фіксованих показниках якості. Натомість рішення, отримане в результаті роботи адаптивного алгоритму (зелений маркер), належить до множини Парето, що гарантує мінімізацію цільових функцій при виконанні заданих обмежень.

Результати порівняльного аналізу техніко-економічних показників базової та розробленої систем наведено в таблиці 1.

Впровадження адаптивної системи дозволило зменшити сумарну активну потужність установки з 600 Вт до 432,6 Вт, що відповідає економії електроенергії на рівні 27,9 %. Досягнення такого показника зумовлено комплексною дією двох факторів:

1. Компенсація природної складової: система враховує наявність фоновому освітлення E_{nat} , відповідно знижуючи потужність штучних джерел.

2. Елімінація коефіцієнта запасу: традиційна система генерує освітленість $E_{min} = 20,02$ лк, що на 33 % перевищує нормативне значення. Запропонований алгоритм усуває цей технологічний надлишок, утримуючи параметри системи у заданому коридорі значень (таблиця).

Порівняння показників ефективності систем керування

№ з/п	Критерій якості	Базова САК	Розроблена САК
1	Активна потужність P_{\square} , Вт	600,0	432,6
2	Рівномірність U_0 , в. о.	0,778	0,790
3	Прогнозований ресурс T_{life} , год	50000	100454
4	Мін. освітленість E_{min} , лк	20,02	15,00

Просторові розподіли освітленості для досліджуваних режимів наведено на рис. 2.

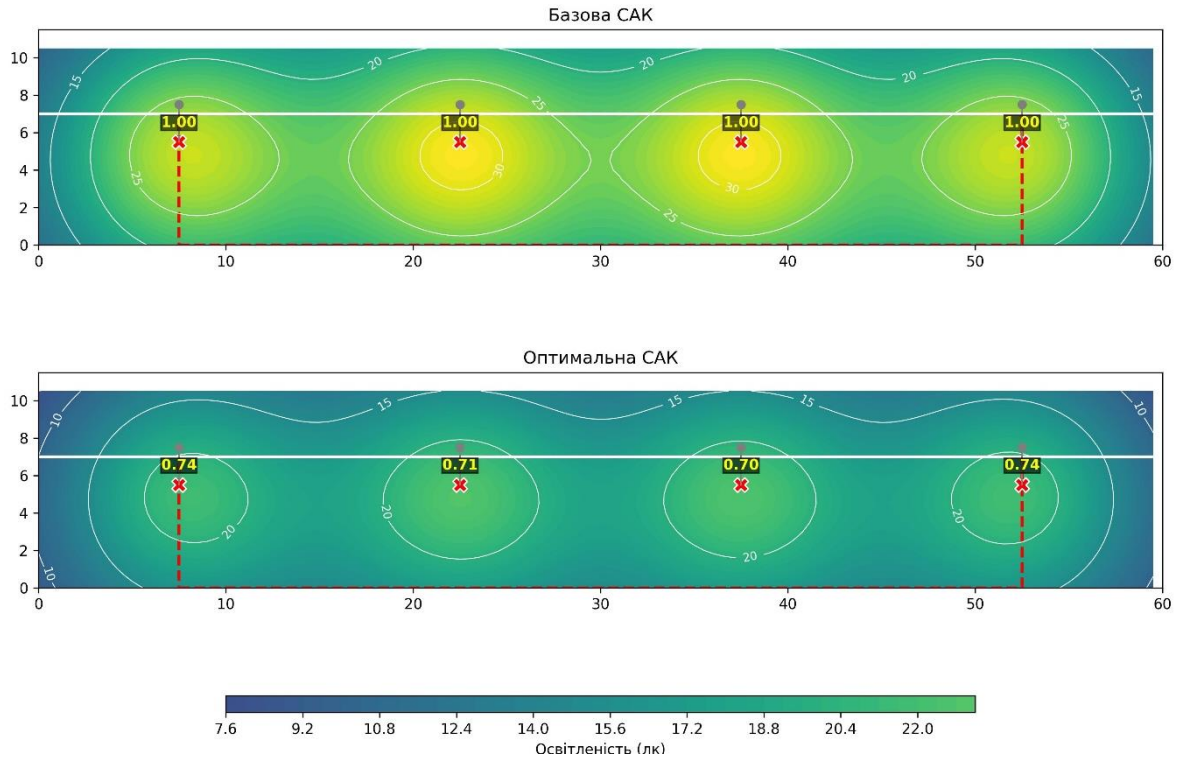


Рис. 2. Карти розподілу освітленості

У результаті розв'язання оптимізаційної задачі отримано вектор керування $\mathbf{u}_{opt} = [0,74 \ 0,71 \ 0,70 \ 0,74]$. Аналіз компонент вектора \mathbf{u}_{opt} виявляє кореляцію між режимом роботи світильника та його розташуванням у групі:

- крайні світильники (№ 1, № 4): працюють з вищим коефіцієнтом заповнення ($u \approx 0,74$), оскільки формують світлове поле на межах розрахункової ділянки, де відсутнє перекриття світлових потоків з боку зовнішніх зон.

- центральні світильники (№ 2, № 3): характеризуються глибшим рівнем димування ($u \approx 0,70$). Це пояснюється ефектом суперпозиції світлових потоків від суміжних опор з обох боків.

Такий диференційований підхід дозволив не лише оптимізувати енерговитрати, але й підвищити поздовжню рівномірність освітлення U_0 до рівня 0,790.

Окрім того, зниження середнього навантаження на систему ($\bar{u} \approx 0,72$) призводить до зменшення теплової деградації світлодіодів. Згідно з розрахунковою моделлю, це забезпечує подовження прогнозованого ресурсу експлуатації світильників до 100 тис. годин, що підтверджує економічну доцільність застосування розробленого методу.

Висновки. У роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення рівня енергетичної ефективності та якості функціонування систем вуличного освітлення. Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Розроблено математичну модель просторового розподілу світлового поля, яка, на відміну від існуючих, базується на принципі адитивності штучної та природної складових освітленості. Модель враховує світлотехнічні характеристики LED-світильників, геометричні параметри дорожньої сцени та стохастичний характер зміни фонового освітлення, що дозволило підвищити точність розрахунку режимів роботи системи у сутінковий період.

2. Сформульовано задачу керування як задачу багатокритеріальної оптимізації, в якій враховано три суперечливі критерії: мінімізацію активної потужності, максимізацію рівномірності розподілу яскравості та максимізацію прогнозованого ресурсу обладнання. Застосування методу наближення до утопічної точки з попереднім нормуванням простору критеріїв дозволило визначити оптимальний вектор керування, що забезпечує найкращий компроміс між енергозбереженням та якістю освітлення без порушення нормативних обмежень.

3. Результати чисельного моделювання підтвердили перевагу запропонованої адаптивної системи над традиційною (таймерною). Встановлено, що при наявності природного фону 2.0 лк адаптивний алгоритм забезпечує зниження енергоспоживання на 27,9% (з 600 до 432,6 Вт) при одночасному покращенні рівномірності освітлення U_0 до 0.79. Показано, що усунення технологічного запасу по світловому потоку та зниження теплового навантаження на світлодіоди дозволяє збільшити розрахунковий ресурс світильників удвічі (до 100 тис. годин).

Перспективи подальших досліджень пов'язані з інтеграцією розробленого методу в системи розумного міста з використанням IoT-сенсорів трафіку для динамічної корекції нормативних вимог залежно від інтенсивності руху транспорту в реальному часі.

Список використаних джерел

1. Agramelal F., Sadik M., Moubarak Y., Abouzahir S. Smart street light control: a review on methods, innovations, and extended applications. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 21. Art. 7415. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16217415>.
2. Comprehensive assessment of context-adaptive street lighting: Technical aspects, economic insights, and measurements from large-scale, long-term implementations / G. Pasolini et al. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 18. Art. 5942. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24185942>.
3. Multi-objective optimization applied to photovoltaic street lighting systems / O. Rabaza et al. *Proc. IEEE ICREPQ*. 2014. No. 12. P. 419. DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj12.419>.
4. An Integrated Framework for Multi-Objective Optimization of Night Lighting in Urban Residential Areas: Synergistic Control of Outdoor Activity Places Lighting and Indoor Light Trespass / F. Wen et al. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2025. Vol. 14, No. 10. Art. 397. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi14100397>.
5. Segovia-Muñoz D., Serrano-Guerrero X., Barragán-Escandón A. Predictive maintenance in led street lighting controlled with telemanagement system to improve current fault detection procedures using software tools. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2022. Vol. 20. P. 379–386. DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj20.318>.
6. Adaptive control of streetlights using deep learning for the optimization of energy consumption during late hours / M. Asif et al. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 17. Art. 6337. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15176337>.
7. Sikora R., Markiewicz P., Korzeniewska E. Evaluation of maintenance and modernization of road lighting systems using energy performance indicators. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 16. Art. 4328. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18164328>.
8. Ożadowicz A., Grela J. Energy saving in the street lighting control system—a new approach based on the EN-15232 standard. *Energy Efficiency*. 2017. Vol. 10, No. 3. P. 563–576. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-016-9476-1>.
9. Wang L., Tan J. Deep reinforcement learning for dynamic traffic-adaptive street lighting control in smart cities. *Applied Energy*. 2024. Vol. 352. Art. 121945. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121945>.

10. Garcia R., Martinez S. Multi-objective genetic algorithms for energy-efficient design and maintenance of urban lighting networks. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 410. Art. 137281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137281>.
11. Chen H., Liu Y. Digital twin-driven monitoring and predictive maintenance for LED street lighting systems. *IEEE Internet of Things Journal*. 2025. Vol. 12, No. 4. P. 3112–3124. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3356789>.
12. Kumar S., Varma G. Artificial intelligence-based hybrid models for energy consumption forecasting in municipal smart lighting networks. *Sustainable Cities and Society*. 2025. Vol. 108. Art. 105421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105421>.
13. Singh M., Kumar A. Energy efficient street lighting framework: An archived multi-objective simulated annealing based approach. *Energy Efficiency*. 2026. Vol. 19, No. 1. Art. 44. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-025-10321-4>.
14. Batra I., Malik A. Smart Street Light System: An IoT-Enabled Light System for Smart City Application. *Journal of Integrated Science and Engineering Management*. 2025. Vol. 4, No. 1. P. 112–125.
15. Xie X., Masoumi H. Energy-Efficient Dynamic Street Lighting Optimization: Balancing Pedestrian Safety and Energy Conservation. *Buildings*. 2025. Vol. 15, No. 8. Art. 1377. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15081377>.

SYNTHESIS OF AN ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR MUNICIPAL OUTDOOR LIGHTING BASED ON MULTICRITERIA OPTIMIZATION

P. Plieshkov, V. Zinzura, K. Petrova, V. Soldatenko, V. Pavlenko

Abstract. The paper addresses the urgent problem of increasing energy efficiency in municipal outdoor lighting systems, which often operate with excessive power margins. The study aims to enhance the energy efficiency and operational quality of street lighting systems by improving a control system that accounts for natural light levels, luminous flux uniformity indicators, and equipment service life.

A mathematical model of the spatial light field distribution has been developed, and the automatic lighting level control problem is formulated as a multi-objective optimization task. To find a compromise solution between minimizing energy consumption and maximizing both lighting uniformity and equipment resource, the method of approaching the "ideal (utopian) point" in the criteria space using the Chebyshev metric was applied.

Numerical simulation for a typical highway section confirmed the effectiveness of the proposed approach. It was established that the adaptive system provides a reduction in power consumption by 27.9% (from 600 W to 432.6 W) compared to traditional timer-based systems. Savings are achieved by compensating for the natural background and eliminating the technological lighting margin — reducing the minimum level from 20.02 lx to the standardized 15.00 lx. Simultaneously, longitudinal uniformity is increased from 0.778 to 0.790, and the predicted service life of the luminaires is nearly doubled (up to 100,000 hours) due to reduced thermal load.

The implementation of this method enables the creation of Smart City class systems that adapt to real-world visibility conditions, guaranteeing traffic safety at minimal operational costs.

Key words: *Street lighting system, multi-objective optimization, adaptive control, municipal systems, LED luminaires*

References

1. Agramelal, F., Sadik, M., Moubarak, Y., & Abouzahir, S. (2023). Smart street light control: a review on methods, innovations, and extended applications. *Energies*, 16(21), article number 7415. <https://doi.org/10.3390/en16217415>.
2. Pasolini, G., Bazzi, A., Florio, A., Zabini, F., Toppan, P., & Andrisano, O. (2024). Comprehensive assessment of context-adaptive street lighting: Technical aspects, economic insights, and measurements from large-scale, long-term implementations. *Sensors*, 24(18), article number 5942. <https://doi.org/10.3390/s24185942>.
3. Rabaza, O., Aznar-Dols, F., Espín-Estrella, A., & Gómez-Lorente, D. (2014). Multi-objective optimization applied to photovoltaic street lighting systems. In *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy and Power Quality (ICREPO'14)* (No. 12, pp. 419-424). <https://doi.org/10.24084/repqj12.419>.
4. Wen, F., Zhang, J., & Li, X. (2025). An Integrated Framework for Multi-Objective Optimization of Night Lighting in Urban Residential Areas: Synergistic Control of Outdoor Activity Places Lighting and Indoor Light Trespass. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(10), article number 397. <https://doi.org/10.3390/ijgi14100397>.

5. Segovia-Muñoz, D., Serrano-Guerrero, X., & Barragán-Escandón, A. (2022). Predictive maintenance in led street lighting controlled with telemanagement system to improve current fault detection procedures using software tools. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 20, 379–386. <https://doi.org/10.24084/repqj20.318>.
6. Asif, M., Ahmad, S., Al-Otaibi, R., & D'Aniello, G. (2022). Adaptive control of streetlights using deep learning for the optimization of energy consumption during late hours. *Energies*, 15(17), article number 6337. <https://doi.org/10.3390/en15176337>.
7. Sikora, R., Markiewicz, P., & Korzeniewska, E. (2025). Evaluation of maintenance and modernization of road lighting systems using energy performance indicators. *Energies*, 18(16), article number 4328. <https://doi.org/10.3390/en18164328>.
8. Ożadowicz, A., & Grela, J. (2017). Energy saving in the street lighting control system—a new approach based on the EN-15232 standard. *Energy Efficiency*, 10(3), 563–576. <https://doi.org/10.1007/s12053-016-9476-1>.
9. Wang, L., & Tan, J. (2024). Deep reinforcement learning for dynamic traffic-adaptive street lighting control in smart cities. *Applied Energy*, 352, article number 121945. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121945>.
10. Garcia, R., & Martinez, S. (2023). Multi-objective genetic algorithms for energy-efficient design and maintenance of urban lighting networks. *Journal of Cleaner Production*, 410, article number 137281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137281>.
11. Chen, H., & Liu, Y. (2025). Digital twin-driven monitoring and predictive maintenance for LED street lighting systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 12(4), 3112–3124. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3356789>.
12. Kumar, S., & Varma, G. (2025). Artificial intelligence-based hybrid models for energy consumption forecasting in municipal smart lighting networks. *Sustainable Cities and Society*, 108, article number 105421. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105421>.
13. Singh, M., & Kumar, A. (2026). Energy efficient street lighting framework: An archived multi-objective simulated annealing based approach. *Energy Efficiency*, 19(1), article number 44. <https://doi.org/10.1007/s12053-025-10321-4>.
14. Batra, I., & Malik, A. (2025). Smart Street Light System: An IoT-Enabled Light System for Smart City Application. *Journal of Integrated Science and Engineering Management*, 4(1), 112–125.
15. Xie, X., & Masoumi, H. (2025). Energy-Efficient Dynamic Street Lighting Optimization: Balancing Pedestrian Safety and Energy Conservation. *Buildings*, 15(8), article number 1377. <https://doi.org/10.3390/buildings15081377>.