

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-12>

УДК 628.972:681.513.5

ПЛЄШКОВ ПЕТРО

Центральноукраїнський національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0003-2141-4811>
e-mail: kafedra.etsem@gmail.com

ЗІНЗУРА ВАСИЛЬ

Центральноукраїнський національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0001-6357-064X>
e-mail: vasilyzinzura@gmail.com

ПЕТРОВА КАТЕРИНА

Центральноукраїнський національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-1928-6833>
e-mail: kateflash27@gmail.com

СОЛДАТЕНКО ВАЛЕНТИН

Центральноукраїнський національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-7781-9343>
e-mail: kirovograd41@gmail.com

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ОСВІТЛЕННЯМ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ НА ОСНОВІ МЕТОДУ
БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ**

Робота присвячена вирішенню актуальної проблеми підвищення енергоефективності систем штучного освітлення навчальних закладів. У сучасних школах та університетах освітлення становить значну частку загального енергоспоживання, при цьому забезпечення якісного світлового середовища є критично важливим для здоров'я та працездатності здобувачів освіти. Метою роботи є розробка та дослідження методу централізованого керування, що ефективно поєднує штучне та природне світло, мінімізуючи втрати енергії при дотриманні санітарних норм.

Авторами проаналізовано недоліки традиційних децентралізованих систем керування на базі локальних ПІД-регуляторів. Показано, що такі системи через відсутність координації між джерелами світла схильні до завищення рівня освітленості для гарантування норм у найгірших точках. Для вирішення цієї задачі було розроблено математичну модель світлового поля в аудиторії з комбінованим освітленням. Задачу керування сформульовано як задачу багатокритеріальної оптимізації. Запропонований підхід використовує метод наближення до утопічної точки в просторі критеріїв для пошуку компромісу між трьома суперечливими критеріями: сумарною споживаною потужністю, рівномірністю розподілу світла та похибкою відстеження.

Чисельне моделювання проведено для типової аудиторії з вікном в умовах інтенсивної інсоляції. Порівняльний аналіз показав, що запропонована система автоматичного керування знижує споживання електроенергії зі 114,56 Вт (базова ПІД-модель) до 103,58 Вт. Економія енергії склала 9,58%. Система продемонструвала вищу точність керування: середня абсолютна похибка зменшилася з 303,6 лк до 269,5 лк. На відміну від базової моделі, яка підтримувала надлишкову мінімальну освітленість 474,1 лк, оптимізована система досягла рівня рівно 450,0 лк, працюючи на межі допустимої області. Це доводить, що алгоритм інтелектуально адаптує світловий потік, димуючи світильники біля вікна та компенсуючи нестачу світла лише в глибині приміщення.

Впровадження розроблених алгоритмів у системи керування будівлею дозволяє досягти суттєвої економії енергоресурсів у навчальних корпусах без модернізації силового обладнання, виключно за рахунок програмної оптимізації режимів керування.

Ключові слова: енергоефективність, LED-освітлення, багатокритеріальна оптимізація, системи автоматичного керування.

PLIESHKOV PETRO, ZINZURA VASYL, PETROVA KATERYNA, SOLDATENKO VALENTYN
Central Ukrainian National Technical University

**ENERGY-EFFICIENT AUTOMATIC LIGHTING CONTROL SYSTEM FOR EDUCATIONAL
INSTITUTIONS BASED ON MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION METHOD**

The work is devoted to solving the urgent problem of increasing the energy efficiency of artificial lighting systems in educational institutions. In modern schools and universities, lighting accounts for a significant share of total energy consumption, while ensuring a high-quality lighting environment is critically important for the health and performance of students. The aim of the work is to develop and study a centralized control method that effectively combines artificial and natural light, minimizing energy losses while complying with sanitary standards. The authors analyzed the shortcomings of traditional decentralized control systems based on local PID controllers. It was shown that such systems, due to the lack of coordination between light sources, are prone to overestimating the level of illumination to guarantee standards at the worst points. To solve this problem, a mathematical model of the light field in a classroom with combined lighting was developed. The control problem is formulated as a multi-criteria optimization problem. The proposed approach uses the method of approximation to a utopian point in the space of criteria to find a compromise between three conflicting criteria: total power consumption, light distribution uniformity and tracking error.

Numerical simulation was carried out for a typical auditorium with a window under conditions of intense insolation. Comparative analysis showed that the proposed automatic control system reduces electricity consumption from 114.56 W (baseline PID model) to 103.58 W. Energy savings amounted to 9.58%. The system demonstrated higher control accuracy: the average absolute error decreased from 303.6 lux to 269.5 lux. In contrast to the baseline model, which maintained an excess minimum illumination of 474.1 lux, the optimized system reached a level of exactly 450.0 lux, operating at the limit of the permissible area. This proves that the algorithm intelligently adapts the light flux, dimming the lamps near the window and compensating for the lack of light only in the depths of the room.

The implementation of the developed algorithms in building control systems allows achieving significant energy savings in educational buildings without upgrading power equipment, solely through software optimization of control modes.

Keywords: energy efficiency, LED lighting, multi-criteria optimization, automatic control systems.

Стаття надійшла до редакції / Received
Прийнята до друку / Accepted
Опубліковано / Published



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Плешков Петро, Зінзура Василь, Петрова Катерина, Солдатенко Валентин

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Забезпечення рівня енергоефективності будівель є одним із пріоритетних завдань сучасної енергетики в рамках концепції сталого розвитку. Особливої актуальності це питання набуває для освітніх закладів, де системи штучного освітлення можуть складати до 40% загального енергоспоживання будівлі. При цьому специфіка навчального процесу вимагає суворого дотримання санітарних норм освітленості [1], оскільки якість світлового середовища безпосередньо впливає на працездатність, зоровий комфорт та здоров'я здобувачів освіти.

Традиційні системи автоматизації, що базуються на використанні локальних датчиків освітленості та незалежних контурів регулювання (наприклад, ПІД-регуляторів для кожної групи світильників), мають суттєві недоліки при роботі в умовах змішаного освітлення. Головною проблемою є відсутність координації між джерелами світла: кожен локальний регулятор намагається компенсувати збурення (зміни денного світла), не враховуючи вплив сусідніх світильників. Це призводить до явища «світлового перенасичення», коли для гарантованого забезпечення норм у найгіршій точці робочої зони система змушена підтримувати надлишковий рівень яскравості в інших точках, що нівелює потенціал енергозбереження.

Крім того, сучасні вимоги до систем керування виходять за межі простої стабілізації рівня люксів. Необхідно одночасно враховувати низку суперечливих критеріїв: мінімізацію споживання енергії, забезпечення рівномірності розподілу світла та точне виконання нормативних вимог. Локальні системи керування алгоритмічно неспроможні вирішувати таку багатопараметричну задачу.

Аналіз досліджень та публікацій

Автори роботи [2] у своєму огляді технологій Daylight Harvesting зазначають, що на освітлення припадає до 20% споживання первинної енергії в комерційних будівлях, підкреслюючи, що інтеграція природного світла є ключовим фактором концепції «Зеленого будівництва». У публікації [3] підтверджується, що потенціал економії енергії при використанні систем Daylight Harvesting становить 20–60%.

Проте, як зазначено в [3], існуючі системи часто стикаються з проблемою низького рівня сприйняття користувачами та недостатньою технічною надійністю. Більшість досліджень фокусуються на апаратній частині, тоді як алгоритми керування, що забезпечують баланс між економією та комфортом, залишаються слабким місцем.

У роботі [4] запропоновано розподілений алгоритм, де кожен світильник має власний контролер і датчики. Хоча це підвищує гнучкість, недоліком такого підходу є складність обміну інформацією між сусідніми вузлами та ризик нестабільності системи (проблеми зі збіжністю алгоритму) при спробі досягти глобального оптимуму. У роботі [5] розглядається інтеграція датчиків присутності та ультразвукових сенсорів. Обмеженням даного методу є висока вартість та складність апаратної реалізації системи визначення присутності, а також складність математичного розділення внеску штучного та природного світла без централізованої моделі.

Розвиток IoT-технологій призвів до появи рішень, подібних до системи, описаної в [6], яка використовує WiFi-інфраструктуру для детектування присутності. Попри високі показники економії (до 93%), суттєвим недоліком є залежність від специфічної мережевої інфраструктури та необхідність використання мобільних додатків користувачами, що є неприйнятним для навчальних аудиторій, де увага студентів має бути зосереджена на навчальному процесі, а не на керуванні лампою через смартфон.

Окремий напрямок досліджень – використання методів штучного інтелекту та евристичної оптимізації. Результати огляду, наведені в [7], свідчать, що методи оптимізації складають 51% сучасних підходів. Зокрема, у статті [8] застосовано генетичні алгоритми для оптимізації освітлення в навчальних класах. Аналогічний підхід на базі алгоритму NSGA-II використано в роботі [9] для бібліотек та в [10] для атріумів у холодних регіонах. Суттєвим недоліком цих робіт у контексті систем реального часу є те, що генетичні алгоритми та параметричне моделювання, використані авторами, орієнтовані на етап проектування будівлі або статичного налаштування, а не на динамічне керування. Вони вимагають значних обчислювальних ресурсів і часу, що унеможливує їх використання в недорогих контролерах для миттєвої реакції на зміну хмарності.

Сучасні спроби реалізації адаптивного керування на базі мікроконтролерів та машинного навчання, як у роботі [12], демонструють перспективність IoT-рішень. Однак використання нейромереж вимагає великих обсягів навчальних даних та попередньої підготовки, що ускладнює масштабування системи на нові приміщення без повторного навчання. Крім того, ML-моделі працюють як «чорна скринька» і не гарантують математичної точності виконання обмежень (санітарних норм) у кожний момент часу, на відміну від аналітичних методів.

У публікації [12] запропоновано систему «інтелектуального освітлення» на базі локальної оптимізації. Проте, як і в інших розподілених системах, тут виникає проблема збіжності цільової освітленості при швидких змінах зовнішніх умов.

Аналіз літературних джерел свідчить про наявність розриву між теоретичними методами глобальної

оптимізації (які є занадто повільними для реального часу) та простими локальними системами (які є енергетично неефективними або нестабільними). Існує потреба у розробці централізованого методу керування, який би базувався на швидкому математичному апараті і забезпечував гарантоване виконання багатокритеріальних вимог в режимі реального часу без надлишкових обчислювальних витрат. Саме вирішенню цієї задачі і присвячена дана робота.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є підвищення енергоефективності системи освітлення навчальної аудиторії шляхом розробки та дослідження методу централізованого керування, що базується на вирішенні задачі багатокритеріальної оптимізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробити математичну модель розподілу освітленості, що враховує вплив природного та штучного світла.
2. Сформулювати задачу керування як задачу багатокритеріальної оптимізації з критеріями енергоспоживання, рівномірності та точності.
3. Провести порівняльне математичне моделювання запропонованого методу та класичної системи з локальними зворотними зв'язками для оцінки потенціалу енергозбереження.

Виклад основного матеріалу

Система автоматичного керування освітленням розглядається як замкнена система автоматичного керування, що функціонує в умовах стохастичних збурень. Функціональна схема такої системи наведена на рис. 1.

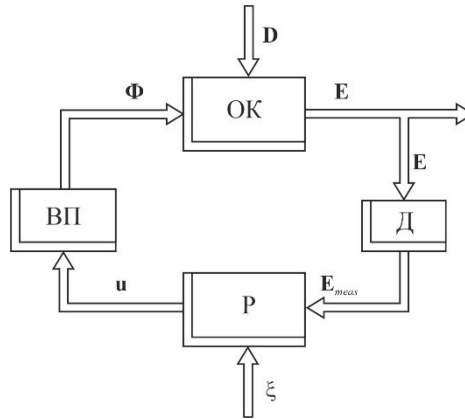


Рис. 1. Функціональна структурна схема системи керування освітленням

На рис 1:

$\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_N]^T$ – вектор керування – вектор сигналів димування, нормований у діапазоні $[0, 1]$, визначає рівень світлового потоку кожного світильника;

$\mathbf{D} = [d_1, d_2, \dots, d_M]^T$ – вектор збурення – вектор значень природної освітленості від вікон, яка носить випадковий характер і змінюється в часі;

$\mathbf{E} = [E_1, E_2, \dots, E_M]^T$ – вектор вихідних величин – вектор значень результуючої освітленості на робочих поверхнях;

$\mathbf{E}_{meas} = [E_{meas1}, E_{meas2}, \dots, E_{measM}]^T$ – вектор вимірних вихідних величин – вектор вимірних значень результуючої освітленості на робочих поверхнях;

$\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_M]^T$ – вектор значень світлового потоку, створюваного кожним світильником;

ξ – вектор задаючих параметрів. До його складу входить значення бажаного рівня освітленості E_{ref} , що визначається санітарними нормами;

N – кількість світильників;

M – кількість контрольних точок.

ОК – об'єкт керування (світлове поле приміщення), яке формується внаслідок суперпозиції світлових потоків від двох типів джерел: керованих (штучне освітлення) та некерованих (природне освітлення);

Р – регулятор, який реалізує закон керування. Він порівнює поточні значення освітленості з уставками та формує керуючі впливи;

ВП – виконавчий пристрій, в ролі якого виступає електронний драйвер світлодіодного світильника з інтерфейсом димування (наприклад, DALI або 0-10 V). Він перетворює цифровий сигнал керування \mathbf{u} у струм живлення світлодіодів, змінюючи їх світловий потік Φ ;

Д – датчики зворотного зв'язку – фотосенсори, розташовані в площині робочих столів або вмонтовані у світильники. Вони вимірюють фактичну освітленість \mathbf{E}_{meas} , яка є сумою штучної та природної складових;

Ключовою проблемою керування є компенсація зовнішнього збурення \mathbf{D} таким чином, щоб вихідна величина \mathbf{E} залишалася в межах допустимої області $E_i > E_{ref}$ при мінімальних витратах енергії на формування керування \mathbf{u} .

Для реалізації системи керування освітленням неперервне поле освітленості робочої площини

дискретизується. Робоча поверхня (на висоті h від рівня підлоги) розбивається на сітку контрольних точок, у яких здійснюється розрахунок або вимірювання освітленості.

Освітленість у будь-якій i -й контрольній точці ($i = 1 \dots M$) визначається як сума компонент штучного освітлення від усіх джерел та зовнішнього збурення (природного освітлення). У матричному вигляді рівняння статистики системи записується так:

$$\mathbf{E} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{D}, \quad (1)$$

де \mathbf{A} – матриця впливу розмірністю $M \times N$. Елемент матриці впливу a_{ij} чисельно дорівнює освітленості, яку створює j -й світильник у i -й точці при $u_j = 1$ і відсутності інших джерел світла. Значення коефіцієнтів a_{ij} є постійними для фіксованої геометрії приміщення і розраховуються на основі фотометричних даних світильників (кривих сили світла) за законом обернених квадратів:

$$a_{ij} = \frac{I_j}{h_{ij}^2} \cos^3 \alpha_{ij}, \quad (2)$$

де I_j – сила світла у напрямку точки i ;
 h_{ij} – висота підвісу світильника над розрахунковою площиною;
 α_{ij} – кут падіння променя.

При формуванні матриці впливу та розрахунку природної компоненти в рамках задачі розробки системи керування було не враховувалось багаторазове відбиття світла від стін та стелі (розсіяна компонента другого порядку). Вважається, що основний внесок в освітленість робочих поверхонь дає пряме випромінювання джерел та первинне розсіяне світло від вікна.

Математична модель розподілу природної освітленості d_i у точці i з координатами (x, y) описується емпіричною залежністю, що враховує геометрію віконного отвору та закон поглинання світлового потоку середовищем:

$$D(x, y) = E_{day}^{max} e^{-\mu_y y} e^{-\mu_x \Delta x(x)}, \quad (3)$$

де E_{day}^{max} – максимальна освітленість на рівні вікна (прийнято 2000 лк);
 y – відстань від площини вікна вглиб приміщення (м);
 μ_y – коефіцієнт загасання світлового потоку вглиб кімнати (визначається геометричними параметрами приміщення та відбиваючими властивостями поверхонь, у моделі прийнято $\mu_y = 0,6 \text{ м}^{-1}$);
 μ_x – коефіцієнт бокового розсіювання світла ($\mu_x = 1,5 \text{ м}^{-1}$);
 $\Delta x(x)$ – функція відстані до віконного отвору вздовж осі X , яка визначається як:

$$\Delta x(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \in [x_{start}, x_{end}] \\ \min(|x - x_{start}|, |x - x_{end}|), & \text{if } x \notin [x_{start}, x_{end}] \end{cases} \quad (4)$$

де $[x_{start}, x_{end}]$ – координати розташування вікна.

Задачу енергоефективного керування системою освітлення найдоцільніше розглядати як задачу багатокритеріальної оптимізації. При такому підході векторний критерій оптимізації $J(\mathbf{u})$ включає три складові, що суперечать одна одній:

1. Мінімізація енергоспоживання (J_1):

$$J_1(\mathbf{u}) = P_\Sigma(\mathbf{u}) = \sum_{j=1}^N P_j^{nom} u_j \rightarrow \min, \quad (5)$$

де P_j^{nom} – номінальна активна потужність j -го світильника.

Слід зазначити, що вираз (5) передбачає допущення у вигляді лінійної залежності споживаної потужності від керуючого сигналу драйвера, критерій записується як

2. Максимізація рівномірності освітлення (J_2) передбачає забезпечення зорового комфорту за рахунок мінімізації відхилення від середнього значення на робочій поверхні. Критерій визначається як середньоквадратичне значення відхилень від середнього значення по приміщенню:

$$J_2(\mathbf{u}) = \sigma_E(\mathbf{u}) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (E_j(\mathbf{u}) - \bar{E})^2} \rightarrow \min, \quad (6)$$

де \bar{E} – поточна середня освітленість:

$$\bar{E} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M E_i, \quad (7)$$

3. Точність підтримання заданого рівня (J_3) – даний критерій мінімізує відхилення освітленості від цільового значення E_{ref} (наприклад, 500 лк):

$$J_3(\mathbf{u}) = \delta_E(\mathbf{u}) = \sum_{i=1}^M (E_i(\mathbf{u}) - E_{ref})^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

Задача оптимізації вирішується при виконанні обмежень:

- фізичні обмеження керування: $0 \leq u_j \leq 1$;

- санітарні норми: $E_i(\mathbf{u}) \geq E_{norm}$, де E_{norm} – мінімально допустимий рівень освітленості.

Для знаходження компромісного рішення багатокритеріальної задачі використано метод наближення до утопічної точки в просторі критеріїв з використанням метрики Чебишева (L_∞). Даний підхід дозволяє звести багатокритеріальну задачу до однокритеріальної шляхом мінімізації зваженої відстані від поточної точки до утопічної точки (теоретичного ідеалу) у просторі критеріїв. Це гарантує знаходження Парето-ефективних рішень навіть для неопуклих фронтів, що є перевагою над класичним методом лінійної згортки. Цей підхід реалізує стратегію мінімаксу, запобігаючи ситуаціям, коли покращення одного критерію досягається за рахунок

критичного погіршення інших.

Алгоритм синтезу автоматичного керування складається з наступних етапів:

1. Визначення утопічної точки. Шляхом вирішення серії задач скалярної оптимізації для критеріїв (5), (6), (8) знаходяться мінімальні значення для кожного критерію окремо:

$$J_k^{\circ} = \min_{\mathbf{u}} J_k(\mathbf{u}), \quad (9)$$

Вектор $J^{\circ} = \{J_1^{\circ}, J_2^{\circ}, J_3^{\circ}\}$ формує утопічну точку у просторі критеріїв.

2. Нормування критеріїв. Оскільки критерії мають різну фізичну розмірність (Вт, лк²), виконується перехід до безрозмірних величин $\tilde{J}_k \in [0,1]$:

$$\tilde{J}_k(\mathbf{u}) = \frac{J_k(\mathbf{u}) - J_k^{\circ}}{J_k^{\max} - J_k^{\circ}}, \quad (10)$$

де J_k^{\max} – максимальне значення критерію (точка надіра).

3. Формування цільової функції. Для варіанту застосування зваженої метрики Чебишева глобальну цільову функцію можна записати в наступному вигляді:

$$F(\mathbf{u}) = \max\{w_1|\tilde{J}_1(\mathbf{u})|, w_2|\tilde{J}_2(\mathbf{u})|, w_3|\tilde{J}_3(\mathbf{u})|\} \rightarrow \min, \quad (11)$$

де w_k – вагові коефіцієнти значущості критеріїв, для яких справедливі умови:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^3 w_k = 1, \\ w_k > 0. \end{cases}, \quad (12)$$

Функція (11) є недиференційованою, тому для застосування чисельних методів задачу (11) найдоцільніше трансформувати у задачу нелінійного програмування з однією допоміжною змінною λ .

Таким чином, остаточно постановка задачі оптимізації виглядає так: знайти вектор \mathbf{u}_{opt} та скаляр λ , що забезпечують:

$$\begin{cases} \lambda \rightarrow \min, \\ w_k \tilde{J}_k(\mathbf{u}) \leq \lambda, k = 1, 2, 3, \\ \mathbf{A}\mathbf{u} + \mathbf{D} \geq \mathbf{E}_{norm}, \\ 0 \leq u_j \leq 1, j = 1 \dots N \end{cases}, \quad (13)$$

Така постановка гарантує знаходження Парето-оптимального розв'язку, який є збалансованим відносно заданих пріоритетів w_k , забезпечуючи при цьому безумовне виконання норм освітленості.

Для перевірки ефективності запропонованого методу було розроблено імітаційну модель системи освітлення. Моделювання виконувалося для приміщення навчальної аудиторії з наступними геометричними параметрами:

- габаритні розміри приміщення (ДхШхВ): (8,0×6,0×2,7 м);
- висота робочої поверхні (рівень столів): $h_{work} = 0,8$ м;
- ефективна висота підвісу світильників: $H_{eff} = 2,7 - 0,8 = 1,9$ м.

Система штучного освітлення складається з $N = 6$ світлодіодних світильників, розташованих у два ряди над робочими зонами. Координати встановлення світильників: $X \in \{2; 4; 6\}$ м, $Y \in \{1; 5; 4; 5\}$ м. Кожен світильник моделюється як точкове джерело світла з косинусним розподілом сили світла.

Номінальна активна потужність одного світильника становить $P_{nom} = 40$ Вт, Вт, максимальний світловий потік – $\Phi_{max} = 4500$ лм.

У якості цільових зон (Target Areas) визначено поверхні шести навчальних столів розміром 0,8×1,4 м, центри яких співпадають з проекціями світильників. Розрахунок критеріїв якості виконується виключно для точок, що належать поверхням столів.

Дослідження проводилося для сценарію з інтенсивною інсоляцією (яскравий сонячний день), що дозволяє оцінити потенціал системи щодо енергозбереження. Джерелом природного світла виступає вікно шириною 4 м, розташоване вздовж стіни $Y = 0$ (у діапазоні $X \in [2, 0; 6, 0]$ м). Максимальна освітленість від вікна на рівні підвіконня прийнята рівною $E_{day}^{max} = 2000$ лк. Просторовий розподіл денного світла $D(x, y)$ апроксимувався функцією, що враховує експоненційне загасання світлового потоку вглиб приміщення (коефіцієнт загасання $\alpha = 0,6$) та ефект бокового розсіювання світла від віконного отвору.

Порівняльний аналіз виконувався для двох систем керування:

1. Базова модель – моделює роботу традиційної системи, де кожен світильник керується незалежним ПД-регулятором за сигналом від індивідуального датчика освітленості/присутності. В такій системі датчик зазвичай вимірює освітленість у центрі робочої зони. Проте, через нерівномірність світлорозподілу, освітленість на краях столу завжди нижча, ніж у центрі. Для гарантованого забезпечення санітарної норми ($E_{min} \geq 450$ лк) у найгіршій точці робочої зони, уставка регулятора для центру столу була розрахована із запасом і встановлена на рівні $E_{set} = 650$ лк лк.

2. Запропонована оптимальна модель реалізує алгоритм мінімізації функції Чебишева (див. п. 1). Цільовий рівень освітленості встановлено $E_{ref} = 500$ лк, а жорстке обмеження знизу – $E_{lim} = 450$ лк лк.

Вагові коефіцієнти критеріїв було обрано емпіричним шляхом для забезпечення балансу між економією та комфортом:

- вага енергоспоживання: $w_1 = 0,5$;
- вага рівномірності: $w_2 = 0,3$;

- вага точності $w_3 = 0,2$.

Такий розподіл ваг відображає концепцію енергоефективного керування, де зниження витрат є домінуючим фактором при обов'язковому дотриманні нормованих показників якості.

Для оцінки ефективності запропонованого алгоритму було проведено серію чисельних експериментів. На першому етапі аналізувався простір пошуку рішень у координатах критеріїв якості ($P_\Sigma, \sigma_E, \delta_E$).

На рис. 2 наведено діаграми розсіювання, отримані шляхом генерації 3000 випадкових векторів керування \mathbf{u} методом Монте-Карло.

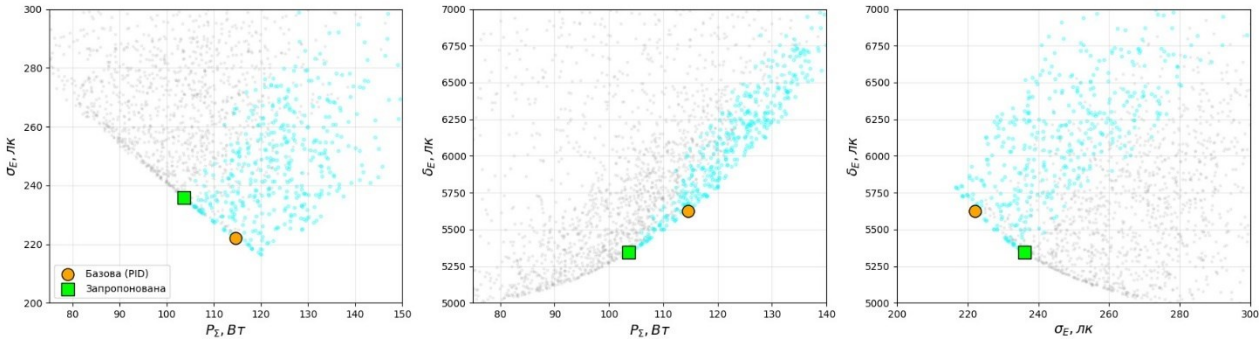


Рис. 2. Аналіз простору критеріїв (діаграми Парето)

Ця візуалізація дозволяє оцінити топологію простору рішень та компроміси між критеріями.

Важливою особливістю наведених графіків є поділ множини рішень на дві групи:

- сірі точки відповідають векторам керування, при яких хоча б в одній контрольній точці порушується санітарна норма ($E_{\min} < 450$ лк). Такі рішення відкидаються системою як неприпустимі, навіть якщо вони забезпечують наднизьке енергоспоживання.
- Бірюзові точки формують область допустимих рішень, де виконуються всі обмеження ($E_{\min} \geq 450$ лк). Саме серед цієї множини алгоритм шукає оптимальне рішення.

Маркерами на графіках позначено: рішення базової системи з ПІД-регулятором (помаранчевий круг); та рішення, знайдене запропонованим алгоритмом оптимізації (зелений квадрат). Як видно з рис. 1, запропоноване рішення знаходиться на Парето-ефективному фронті (нижня ліва межа бірюзової хмари), що свідчить про найкращий можливий баланс критеріїв.

Просторовий розподіл освітленості для обох досліджуваних систем наведено на картах ізолукс (рис. 3).

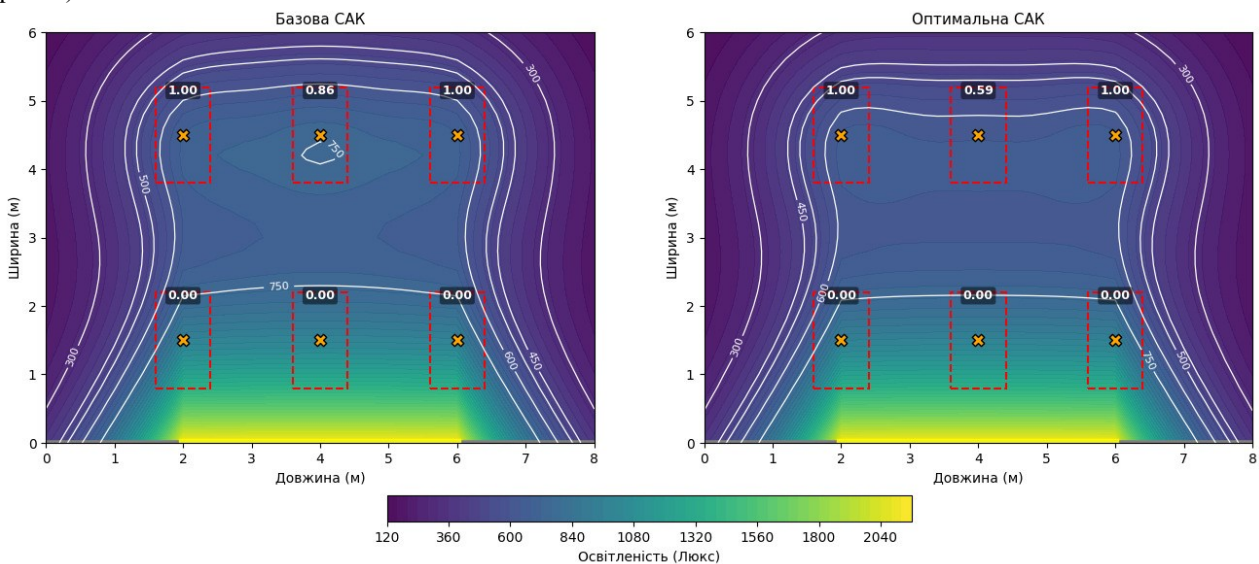


Рис. 3. Карти розподілу освітленості

Аналіз карт розподілу освітленості, зображених на рис. 3, показує принципову відмінність у стратегіях керування. Так, базова модель демонструє ефект «пересвітлення». Світильники, розташовані ближче до вікна (нижній ряд), працюють на значній потужності ($u \approx 0,46$), а світильники другого ряду – на повну потужність ($u = 1$), намагаючись створити рівномірне поле. Це призводить до надмірної освітленості в центрі кімнати. В той же час оптимальна модель максимально використовує ресурс денного світла. Світильники біля вікна вимкнені майже повністю ($u \approx 0$), оскільки природного світла там достатньо. Натомість, світильники в глибині приміщення працюють на рівні, необхідному для компенсації нестачі світла. Ізолукси плавно огинають зони природного освітлення, створюючи енергоефективний градієнт.

Кількісне порівняння ефективності двох підходів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння показників ефективності систем керування

Критерій якості	Позначення	Базова модель (PID)	Запропонована модель
Сумарна потужність, Вт	P_{Σ}	114,56	103,58
Нерівномірність освітлення	σ_E	222,14	235,97
Середня похибка (MAE), лк	δ_E	303,6	269,5
Середня освітленість, лк	E_{avg}	803,2	768,2
Мінімальна освітленість, лк	E_{min}	474,1	450,0
Економія енергії, %			9,58%

Узагальнюючи результати чисельного моделювання, можна стверджувати, що перехід від децентралізованого керування до багатокритеріальної оптимізації дозволяє вирішити проблему енергетичної надлишковості, притаманну класичним системам. Отримана економія енергоресурсів досягається не за рахунок зниження зорового комфорту, а завдяки синергії штучного та природного освітлення: система адаптивно знижує потужність світильників у привіконних зонах, компенсуючи нестачу світла лише там, де це дійсно необхідно. Це підтверджує, що для сучасних навчальних приміщень критично важливим є впровадження алгоритмів, здатних враховувати просторову неоднорідність світлового поля та знаходити оптимальний баланс між суперечливими критеріями якості в режимі реального часу.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У роботі вирішено задачу підвищення енергоефективності систем штучного освітлення навчальних приміщень шляхом впровадження методу багатокритеріальної оптимізації. На основі проведеного чисельного моделювання отримано наступні результати:

1. Доведено, що застосування системи керування рівнем освітленості на основі математичного апарату багатокритеріальної оптимізації дозволяє знизити споживання електроенергії на 9,58 % (з 114,56 Вт до 103,58 Вт) в умовах інтенсивної інсоляції.

2. Встановлено, що запропонований алгоритм забезпечує вищу точність дотримання світлотехнічних вимог. Середня абсолютна похибка регулювання δ_E зменшилася з 303,6 лк до 269,5 лк, що свідчить про усунення ефекту «пересвітлення», характерного для традиційних систем.

3. Показано здатність розробленої системи працювати на межі допустимої області: мінімальна освітленість у робочій зоні склала рівно 450,0 лк (санітарна норма), тоді як базова система підтримувала надлишковий рівень 474,1 лк. Це підтверджує, що оптимізатор ефективно використовує ресурс природного світла, не створюючи зайвих запасів яскравості.

4. Виявлено, що зростання нерівномірності розподілу освітленості σ_E у запропонованій системі (235,97 проти 222,14) є наслідком формування енергоефективного градієнта штучного світла, який адаптивно компенсує нерівномірність денного світла, що є допустимим для комбінованих систем освітлення.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямі полягають у практичній апаратній реалізації розробленої САК на базі сучасних мікроконтролерів (наприклад, з використанням IoT-технологій) та його експериментальній апробації в умовах діючої навчальної аудиторії. Крім того, доцільним є дослідження динаміки роботи системи при швидких стохастичних змінах природної інсоляції, наприклад, в умовах мінливої хмарності.

Література

- ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2018. 133 с.
- Rambhad, K. S. Daylight Harvesting System: A Review on Light Harvesting Technologies in Commercial Buildings. *Int. J. Anal. Exp. Finite Elem. Anal.*, 2014, vol. 1, p. 13–17.
- Gentile, N., Dubois, M. C., Laike, T. Daylight harvesting control systems design recommendations based on a literature review. 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015, p. 632–637. DOI: 10.1109/EEEIC.2015.7165237.
- Caicedo, D., Pandharipande, A. Distributed illumination control with local sensing and actuation in networked lighting systems. *IEEE Sensors Journal*, 2012, vol. 13(3), p. 1092–1104. DOI: 10.1109/JSEN.2012.2228850.
- Pandharipande, A., Caicedo, D. Daylight integrated illumination control of LED systems based on enhanced presence sensing. *Energy and Buildings*, 2011, vol. 43(4), p. 944–950. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.12.018.
- Zou, H., Zhou, Y., Jiang, H., Chien, S. C., Xie, L., Spanos, C. J. WinLight: A WiFi-based occupancy-driven lighting control system for smart building. *Energy and Buildings*, 2018, vol. 158, p. 924–938. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.09.001.
- Wagiman, K. R., Abdullah, M. N., Hassan, M. Y., Radzi, N. H. M., Bakar, A. H. A., Kwang, T. C. Lighting system control techniques in commercial buildings: Current trends and future directions. *Journal of Building Engineering*, 2020, vol. 31, p. 101342. DOI: 10.1016/j.job.2020.101342.
- Rambe, Y., Nasution, A., Muhathir, M., Wahyu, M., Selfira, S. Optimization of Lighting and Visual Comfort for Energy Efficiency in Classroom. *Civil Engineering and Architecture*, 2024, vol. 12, p. 1854–1868. DOI: 10.1016/j.cea.2024.100001.

10.13189/cea.2024.120343.

9. Cui, X., Ahn, C. W. Multi-Objective Optimization of Natural Lighting Design in Reading Areas of Higher Education Libraries. *Buildings*, 2025, vol. 15(9), p. 1560. DOI: 10.3390/buildings15091560.

10. Gao, Y., Zhao, S., Huang, Y., Pan, H. Multi-Objective Optimization of Daylighting–Thermal Performance in Cold-Region University Library Atriums: A Parametric Design Approach. *Energies*, 2025, vol. 18(5), p. 1184. DOI: 10.3390/en18051184.

11. Al-Sheikh, M., Ameen, I. An Adaptive and Scalable Indoor Lighting Control System Using ESP32 Microcontrollers, IoT, and Machine Learning. *International Academic Research Journal of Engineering and Technology*, 2024, vol. 5(2), p. 1–11. DOI: 10.47310/iarjet.2024.v5.i2.004.

12. Miki, M., Hiroyasu, T., Imazato, K. Proposal for an intelligent lighting system, and verification of control method effectiveness. *IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, 2004, vol. 1, p. 520–525. DOI: 10.1109/ICCIS.2004.1460469.

References

1. DBN V.2.5-28:2018. Pryrodne i shtuchne osvittlenia [Natural and artificial lighting]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2018. 133 p.
2. Rambhad, K. S. (2014). Daylight Harvesting System: A Review on Light Harvesting Technologies in Commercial Buildings. *Int. J. Anal. Exp. Finite Elem. Anal.*, 1, 13-17.
3. Gentile, N., Dubois, M. C., & Laike, T. (2015). Daylight harvesting control systems design recommendations based on a literature review. In *2015 IEEE 15th international conference on environment and electrical engineering (EEEIC)* (pp. 632-637). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2015.7165237>
4. Caicedo, D., & Pandharipande, A. (2012). Distributed illumination control with local sensing and actuation in networked lighting systems. *IEEE Sensors Journal*, 13(3), 1092-1104. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2228850>
5. Pandharipande, A., & Caicedo, D. (2011). Daylight integrated illumination control of LED systems based on enhanced presence sensing. *Energy and Buildings*, 43(4), 944-950. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.018>
6. Zou, H., Zhou, Y., Jiang, H., Chien, S. C., Xie, L., & Spanos, C. J. (2018). WinLight: A WiFi-based occupancy-driven lighting control system for smart building. *Energy and Buildings*, 158, 924-938. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.001>
7. Wagiman, K. R., Abdullah, M. N., Hassan, M. Y., Radzi, N. H. M., Bakar, A. H. A., & Kwang, T. C. (2020). Lighting system control techniques in commercial buildings: Current trends and future directions. *Journal of Building Engineering*, 31, 101342. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101342>
8. Rambe, Yuni, Nasution, Aulia, Muhathir, Muhathir, Wahyu, M. & Selfira, Sakina. (2024). Optimization of Lighting and Visual Comfort for Energy Efficiency in Classroom. *Civil Engineering and Architecture*. 12. 1854-1868. 10.13189/cea.2024.120343. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120343>
9. Cui, X., & Ahn, C. W. (2025). Multi-Objective Optimization of Natural Lighting Design in Reading Areas of Higher Education Libraries. *Buildings*, 15(9), 1560. <https://doi.org/10.3390/buildings15091560>
10. Gao, Y., Zhao, S., Huang, Y., & Pan, H. (2025). Multi-Objective Optimization of Daylighting–Thermal Performance in Cold-Region University Library Atriums: A Parametric Design Approach. *Energies*, 18(5), 1184. <https://doi.org/10.3390/en18051184>
11. Al-Sheikh, Mustafa & Ameen, Ibrahim. (2024). An Adaptive and Scalable Indoor Lighting Control System Using ESP32 Microcontrollers, IoT, and Machine Learning. 5. 1-11. 10.47310/iarjet.2024.v5.i2.004. <https://doi.org/10.47310/iarjet.2024.v5.i2.004>
12. Miki, M., Hiroyasu, T., & Imazato, K. (2004, December). Proposal for an intelligent lighting system, and verification of control method effectiveness. In *IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, 2004. (Vol. 1, pp. 520-525). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCIS.2004.1460469>