

П. Г. ПЛЄШКОВ

кандидат технічних наук, професор,
завідувач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту
Центральноукраїнський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-2141-4811

В. В. ЗІНЗУРА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту
Центральноукраїнський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-6357-064X

К. Г. ПЕТРОВА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту
Центральноукраїнський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-1928-6833

В. П. СОЛДАТЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту
Центральноукраїнський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-7781-9343

СИНТЕЗ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ БАГАТОЗОННИМ ОСВІТЛЕННЯМ ПРИМІЩЕНЬ

У статті вирішується актуальна науково-практична проблема підвищення енергоефективності та зорового комфорту в системах автоматизації будівель шляхом вдосконалення систем керування штучним освітленням.

Метою дослідження є синтез нечіткої системи автоматичного керування багатозонним освітленням приміщень для ефективної компенсації стохастичних збурень природного світла та мінімізації динамічних відхилень. Встановлено, що використання пропорційно-інтегральних регуляторів в системах освітлення приміщень призводить до значних перерегулювань, насамперед через перехресний вплив світильників. Було розроблено просторову модель освітленості аудиторії, яка враховує експоненційне згасання денного світла. На базі цієї моделі синтезовано нечіткий регулятор, що використовує алгоритм логічного виведення Сугено нульового порядку з повною базою із 9 продукційних правил.

В роботі було визначено оптимальні межі трикутних функцій належності для вхідних змінних – похибки та швидкості її зміни, а також точні числові значення вихідних констант. Проведено моделювання розробленої системи керування при динамічних змінах інтенсивності денного світла, викликаних мінливою хмарністю. Порівняльний аналіз підтвердив суттєву перевагу нечіткої системи керування: забезпечено аперіодичний характер перехідного процесу та з нижчим рівнем перерегулювання, ніж для ПІ-регулятора. Показано, що оптимізована нечітка система керування дозволила зменшити сумарну інтегральну похибку для трьох зон з 5203,4 до 4872,5 лк·с порівняно з ПІ-регулятором, знизити максимальне динамічне відхилення освітленості з 83,2 до 75,2 лк. Запропонована система характеризується низькими обчислювальними витратами.

Ключові слова: автоматичне керування, нечітка логіка, алгоритм Сугено, багатозонне освітлення.

P. H. PLIESHKOV

PhD in Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Electrotechnical Systems and Energy Management
Central Ukrainian National Technical University
ORCID: 0000-0003-2141-4811



V. V. ZINZURA

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electrotechnical Systems
and Energy Management
Central Ukrainian National Technical University
ORCID: 0000-0001-6357-064X

K. H. PETROVA

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electrotechnical Systems
and Energy Management
Central Ukrainian National Technical University
ORCID: 0000-0002-1928-6833

V. P. SOLDATENKO

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electrotechnical Systems
and Energy Management
Central Ukrainian National Technical University
ORCID: 0000-0002-7781-9343

SYNTHESIS OF A FUZZY SYSTEM FOR AUTOMATIC CONTROL OF MULTI-ZONE LIGHTING OF PREMISES

The article solves the current scientific and practical problem of increasing energy efficiency and visual comfort in building automation systems by improving artificial lighting control systems.

The purpose of the study is to synthesize a fuzzy system for automatic control of multi-zone indoor lighting to effectively compensate for stochastic disturbances of natural light and minimize dynamic deviations. It was found that the use of proportional-integral controllers in indoor lighting systems leads to significant overregulation, primarily due to the cross-effect of luminaires. A spatial model of the auditorium illumination was developed, which takes into account the exponential fading of daylight. Based on this model, a fuzzy controller was synthesized that uses the zero-order Sugeno logical inference algorithm with a full base of 9 production rules.

The work determined the optimal limits of triangular membership functions for input variables – errors and the rate of its change, as well as the exact numerical values of the output constants. The developed control system was simulated under dynamic changes in daylight intensity caused by variable cloudiness. The comparative analysis confirmed the significant advantage of the fuzzy control system: the aperiodic nature of the transient process is ensured and with a lower level of overshoot than for the PI controller. It is shown that the optimized fuzzy control system allowed to reduce the total integral error for three zones from 5203.4 to 4872.5 lux·s compared to the PI controller; to reduce the maximum dynamic deviation of illumination from 83.2 to 75.2 lux. The proposed system is characterized by low computational costs.

Key words: automatic control, fuzzy logic, Sugeno algorithm, multi-zone lighting.

Постановка проблеми

Сучасні тенденції розвитку систем автоматизації будівель характеризуються посилення вимог не лише до енергоефективності, але й до забезпечення показників мікроклімату. Одним із головних факторів, що впливає на працездатність, стомлюваність та здоров'я людей у приміщеннях, є якість штучного освітлення. Оптимальне керування освітленням передбачає максимальне використання природного денного світла з динамічною компенсацією його нестачі за допомогою енергоефективних штучних джерел.

Однак рівень природного освітлення є стохастичною величиною: різкі зміни погодних умов, зокрема мінлива хмарність, створюють глибокі та швидкі збурення в системі. Забезпечення стабільного рівня нормованої освітленості на робочих поверхнях в умовах таких збурень є складною технічною задачею, що вимагає застосування адаптивних та швидкодіючих алгоритмів автоматичного керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [1] показано, що ефективність систем освітлення в значній мірі залежить від точності закладених параметрів та врахування специфіки приміщення. Проте більшість існуючих рішень мають певні обмеження при роботі зі складними динамічними об'єктами.

В дослідженнях [2] та [3] показано, що нечіткі регулятори забезпечують кращі динамічні показники та відсутність перерегулювань порівняно з традиційними системами керування. У роботі [4] запропоновано метод перетворення класичного ПІД-регулятора у нечіткий за допомогою кубічної асоціативної пам'яті. Однак суттєвим недоліком цих праць є їхня загальнотеоретична спрямованість: вони розглядають абстрактні моделі керування і не враховують специфічну нелінійність та просторові перехресні зв'язки, які виникають в реальних приміщеннях.

У роботі [5] розроблено двоканальну нечітку систему, яка додатково враховує спектральні характеристики світла та прозорість вікон. У дослідженні [6] запропоновано IoT-архітектуру керування мікрокліматом та освітленням з акцентом на інтерпретованість та експертні правила. Основним недоліком цих підходів є залежність від ручного налаштування параметрів та використання обчислювально складної бази правил типу Мамдані. Це ускладнює впровадження таких систем на бюджетних мікроконтролерах та обмежує можливості для точної машинної оптимізації перехідних процесів.

Альтернативний підхід наведено у статті [7], де оптимізація освітлення та енергоспоживання відбувається централізовано з урахуванням багатозонності. Проте недоліком такого підходу є необхідність безперервно виконувати складні розрахунки в реальному часі. Це вимагає потужних апаратних ресурсів і ускладнює систему, на відміну від використання швидкого алгоритму Сугено.

В статті [8] показані переваги нечіткого контролера над класичним безперервним диміюванням при швидких змінах освітленості. Аналогічний підхід використано в роботі [9] для тропічних широт із різкою зміною хмарності, що дозволило досягти значної економії енергії. У дослідженні [10] змодельовано нечітке керування для 3-х та 4-х зонних сценаріїв, що підтвердило ефективність розробленої системи керування. Проте головним недоліком досліджень [8 – 10] є те, що параметри функцій належності та база правил у них задаються евристично – методом підбору або на основі експертних оцінок. Такий підхід до налаштування системи не гарантує мінімізації інтегральної похибки керування під час швидких стохастичних збурень освітленості.

Таким чином, проведений аналіз показує, що незважаючи на доведену перевагу нечіткої логіки над класичними ПИ/ПД-регуляторами, більшість існуючих систем освітлення базуються на ручному налаштуванні параметрів або використовують громіздкі алгоритми, не оптимізовані під апаратні обмеження. Тому задача синтезу системи керування багатозонним освітленням, параметри якої визначаються шляхом машинної оптимізації, що забезпечить мінімізацію динамічних відхилень при зовнішніх оптичних збуреннях є актуальною.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є синтез нечіткої системи автоматичного керування багатозонним освітленням приміщень для ефективної компенсації стохастичних збурень природного світла та мінімізації динамічних відхилень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Розробити математичну модель розподілу освітленості в багатозонному приміщенні з урахуванням впливу природного світла та перехресних оптичних зв'язків між лініями світильників.
2. Синтезувати нечітку систему керування та здійснити машинну оптимізацію її функцій належності для мінімізації інтегральної похибки керування.
3. Провести імітаційне моделювання та порівняльний аналіз динамічних показників якості розробленої системи в умовах різких стохастичних збурень освітленості.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для синтезу системи автоматичного керування (САК) багатозонним освітленням необхідно розробити математичну модель об'єкта керування. Об'єкт керування являє собою багатовимірну нелінійну система з просторовим розподілом світлових потоків. Сумарний рівень освітленості E_{Σ} у будь-якій розрахунковій точці робочої поверхні з координатами x та y визначається як суперпозиція природного денного світла та штучного освітлення:

$$E_{\Sigma}(x, y, t) = E_{nat}(x, y, t) + E_{art}(x, y, t) \quad (1)$$

де $E_{\Sigma}(x, y, t)$ – сумарний рівень освітленості; $E_{nat}(x, y, t)$ – складова освітленості, що створюється природним денним світлом; $E_{art}(x, y, t)$ – складова освітленості, що створюється системою штучного освітлення.

Розподіл природного освітлення E_{nat} , що проникає через світлопрозорі конструкції, має суттєву нерівномірність. Враховуючи фізику розсіювання світла у просторі, його згасання вглиб приміщення та по ширині відносно меж вікна можна змодельовати за допомогою аперіодичних експоненційних залежностей:

$$E_{nat}(x, y, t) = E_0(t) e^{-k_x y} e^{-k_y \Delta x} \quad (2)$$

де $E_0(t)$ – поточний рівень зовнішньої освітленості; k_x, k_y – емпіричні коефіцієнти згасання світлового потоку по глибині та ширині приміщення відповідно; Δx – просторове зміщення відносно активної зони світлопрозорої конструкції.

Рівень штучної освітленості E_{art} визначається методом точкових джерел з використанням закону обернених квадратів:

$$E_{art}(x, y, t) = \sum_{i=1}^N u_i(t) \frac{I_{0,i} \cos^3 \gamma_i}{h^2} \quad (3)$$

де N – загальна кількість світильників; u_i – керуючий сигнал i -го світильника; $I_{0,i}$ – максимальний рівень сили світла; γ_i – кут падіння світлового променя; h – висота підвісу світильника.

Для переходу від розподіленої просторової моделі до зонованої моделі керування, аудиторію було умовно поділено на m локальних робочих зон, кожна з яких обслуговується однією з n груп світильників. У матричному вигляді статична модель об'єкта керування записується як:

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{D}E_0(t) + \mathbf{G}\mathbf{U}(t) \tag{4}$$

де $\mathbf{E}(t) = [E_1(t), E_2(t), \dots, E_m(t)]^T$ – вектор-стовпець сумарної освітленості в m робочих зонах; $\mathbf{D} = [d_1, d_2, \dots, d_m]^T$ – вектор коефіцієнтів природного освітлення для кожної зони; $\mathbf{U}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)]^T$ – вектор керуючих впливів для кожної з n ліній світильників; G – матриця оптичних перехресних зв'язків розмірністю $m \times n$, яка має вигляд:

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m1} & g_{m2} & \dots & g_{mn} \end{bmatrix} \tag{5}$$

де g_{ij} – елементи матриці G , які визначають вплив j -ї групи світильників на рівень освітленості в i -й зоні.

Динамічні властивості системи автоматичного керування визначаються в тому числі інерційністю датчиків освітленості. Динаміка процесу вимірювання описується диференціальним рівнянням аперіодичної ланки першого порядку:

$$T \frac{d\mathbf{E}_{meas}(t)}{dt} + \mathbf{E}_{meas}(t) = \mathbf{E}(t) \tag{6}$$

де T – стала часу сенсорної системи; $\mathbf{E}_{meas}(t) = [E_{meas,1}(t), E_{meas,2}(t), \dots, E_{meas,m}(t)]^T$ – вектор вимірних значень рівнів освітленості, який подається на вхід контролера як сигнал зворотного зв'язку.

Для візуалізації розробленої математичної моделі було побудовано статичну теплову карту розподілу освітленості, що наведена на рис. 1.

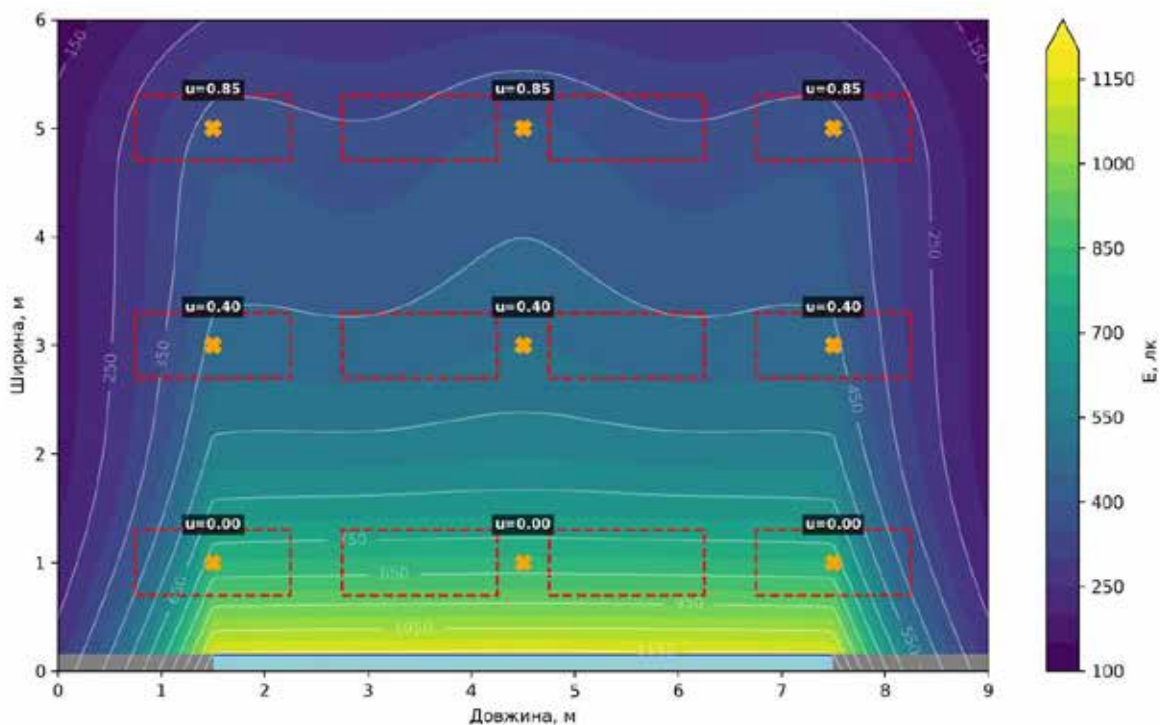


Рис. 1. Розподіл освітленості в приміщенні

Як видно з рис. 1, для підтримання заданої норми освітленості в умовах яскравого зовнішнього світла система формує нерівномірний вектор керування \mathbf{U} . Також з рис. 1 можна побачити взаємне перекриття світлових потоків від сусідніх ліній світильників, що підтверджує недіагональну структуру матриці G .

Узагальнена структурна схема розробленої замкненої системи автоматичного керування рівнем освітленості наведена на рис. 2.

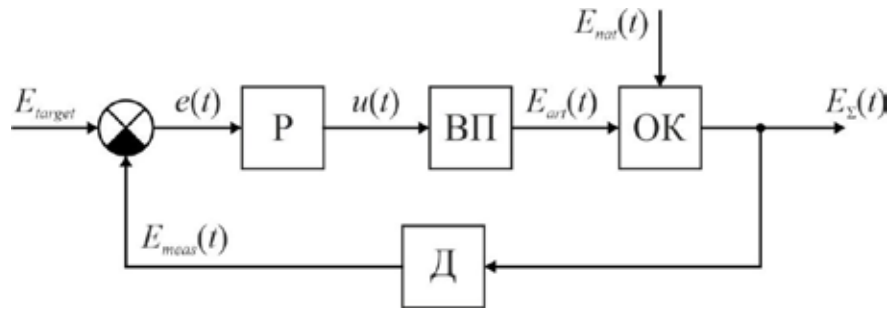


Рис. 2. Узагальнена структурна схема системи автоматичного керування рівнем освітленості

Система, схема якої наведена на рис. 2, включає наступні компоненти і сигнали:

- E_{target} – нормований рівень освітленості, який необхідно підтримувати на робочій поверхні (завдання керування).
- $e(t)$ – похибка керування;
- $u(t)$ – керуючий вплив;
- P – регулятор, який у відповідності зі значенням похибки керування $e(t)$ відповідно алгоритму керування визначає керуючий вплив $u(t)$.
- $ВП$ – виконавчий пристрій, в якості якого виступає блок світлодіодних світильників із драйверами диміювання. Виконавчий пристрій перетворює сигнал керування $u(t)$ у відповідне значення рівня штучної освітленості $E_{art}(t)$.
- $ОК$ – об'єкт керування. В якості об'єкта керування виступає фізичне середовище приміщення, в якому відбувається просторове змішування штучного $E_{art}(t)$ та природного $E_{nat}(t)$ рівнів освітленості. Вихідним сигналом об'єкта керування є сумарний рівень освітленості $E_{\Sigma}(t)$.
- $Д$ – датчик освітленості. В якості датчика освітленості виступає один або декілька фотосенсорів, що вимірюють поточний сумарний рівень освітленості в робочій зоні $E_{meas}(t)$.

У стаціонарному режимі сумарна освітленість $E_{\Sigma}(t) = E_{target}$, похибка керування $e(t) \approx 0$, і регулятор підтримує незмінний рівень потужності світильників. При виникненні зовнішнього збурення сумарна освітленість $E_{\Sigma}(t)$ в приміщенні зменшується. Датчик фіксує це падіння, внаслідок чого на виході суматора виникає похибка $e(t) > 0$. Отримавши сигнал похибки, регулятор у відповідності з закладеним в нього алгоритмом керування збільшує рівень керуючого сигналу $u(t)$. Виконавчий пристрій підвищує яскравість штучного освітлення $E_{art}(t)$ доти, доки сумарна освітленість $E_{\Sigma}(t)$ знову не досягне рівня E_{target} .

Як було зазначено вище, багатозонна система освітлення є складною багатовимірною нелінійною системою з перехресними оптичними зв'язками. Використання для таких об'єктів класичних лінійних ПІ-регуляторів пов'язане із суттєвими проблемами. Хоча ПІ-регулятор забезпечує нульову статичну похибку в усталеному режимі, він виявляється вкрай неефективним в умовах різких стохастичних збурень. Через апаратну інерційність датчиків освітленості інтегральна складова ПІ-регулятора продовжує накопичувати похибку навіть тоді, коли збурення вже минуло. Це неминуче призводить до значних перерегулювань.

Для усунення цих недоліків в роботі для синтезу системи керування рівнем освітленості в приміщенні було застосовано математичний апарат нечіткої логіки. Нечіткі регулятори не потребують абсолютно точної математичної моделі об'єкта керування і здатні забезпечити аперіодичний характер перехідних процесів без перерегулювань. Зважаючи на вимоги до обчислювальної ефективності та необхідність подальшої апаратної реалізації системи на базі мікроконтролерів було обрано алгоритм нечіткого логічного виведення типу Сугено нульового порядку.

Структурна схема розробленої нечіткої системи логічного виведення наведена на рис. 3.

Розроблений нечіткий регулятор має два входи та один вихід. Вхідними лінгвістичними змінними системи є похибка освітленості $e(t)$ та її похідна за часом $\Delta e(t)$. Вихідною змінною є приріст керуючого впливу $\Delta u(t)$.

Поточне значення сигналу керування, що подається на виконавчий пристрій, визначається наступним чином:

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t). \quad (7)$$

Для здійснення фазифікації вхідних сигналів було використано трикутні функції належності. Для досягнення максимально високої якості керування параметри функцій належності та бази правил не визначались експертним методом, а були розраховані шляхом параметричної оптимізації. Цільовою функцією виступав мінімум інтегральної похибки під час моделювання роботи системи.

Для оптимізації було використано алгоритм диференціальної еволюції, який є ефективним методом глобальної оптимізації для нелінійних багатовимірних систем. Даний алгоритм здійснював ітеративне підлаштування координат вершин трикутних функцій належності та значень вихідних сингтонів до досягнення глобального мінімуму цільової функції. У результаті роботи алгоритму робочі діапазони для вхідних змінних були визначені наступним чином:

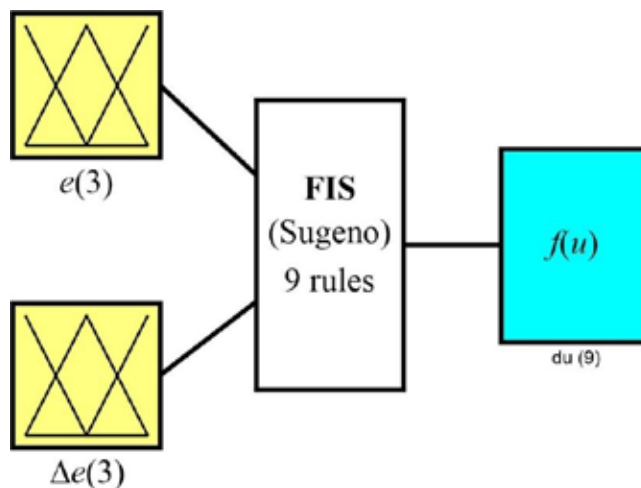


Рис. 3. Структурна схема розробленої нечіткої системи логічного виведення

$$\begin{cases} e(t) \in [-100;100] \text{ лк} \\ \Delta e(t) \in [-20;20] \text{ лк} \end{cases} \quad (8)$$

Для кожного з двох входів у цих межах рівномірно розподілено по три терми:

- *N* – від’ємне значення вхідного сигналу;
- *Z* – значення входу близьке до нуля;
- *P* – додатне значення вхідного сигналу.

Графіки функцій належності для вхідних змінних наведені на рис. 4 – 5.

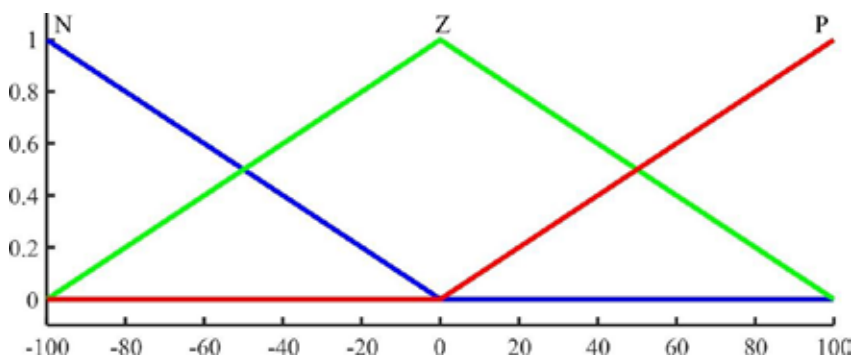


Рис. 4. Функції належності вхідної змінної *e*

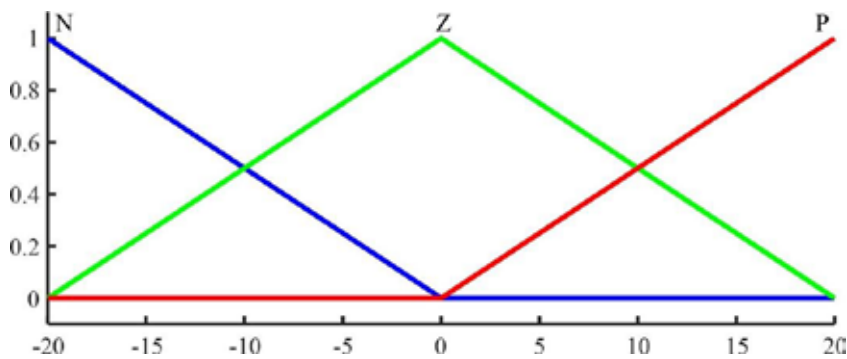


Рис. 5. Функції належності вхідної змінної Δe

База нечітких правил є повною і складається з $3 \times 3 = 9$ продукційних правил (табл. 1).

Таблиця 1

База продукційних правил нечіткого контролера Сугено

Похибка $e(t)$	Похідна $\Delta e(t)$: N (Від'ємна)	Похідна $\Delta e(t)$: Z (Нульова)	Похідна $\Delta e(t)$: P (Додатня)
N (Від'ємна)	-0,050	-0,025	0,000
Z (Нульова)	-0,020	0,000	+0,020
P (Додатня)	0,000	+0,025	+0,050

Оскільки використовується модель Сугено нульового порядку, наслідками правил виступають чіткі константи (синглтони) C_i , які відповідають конкретним значенням сигналу керування.

Числові значення синглотонів у табл. 1 були отримані в результаті роботи алгоритму оптимізації і відображають оптимальні кроки приросту сигналу керування для мінімізації інтегральної похибки.

Для дефазифікації було використано метод зваженого середнього:

$$\Delta u = \frac{\sum_{i=1}^9 w_i C_i}{\sum_{i=1}^9 w_i} \tag{9}$$

де w_i – вага i -го правила, розрахований через Т-норму функцій належності відповідних входів; C_i – вихідна константа i -го правила. Значення констант $C_1 \dots C_9$ визначають інтенсивність керуючого впливу і розраховуються на етапі параметричної оптимізації системи.

Поверхня керування нечіткого контролера наведена на рис. 6. (рис. 6),

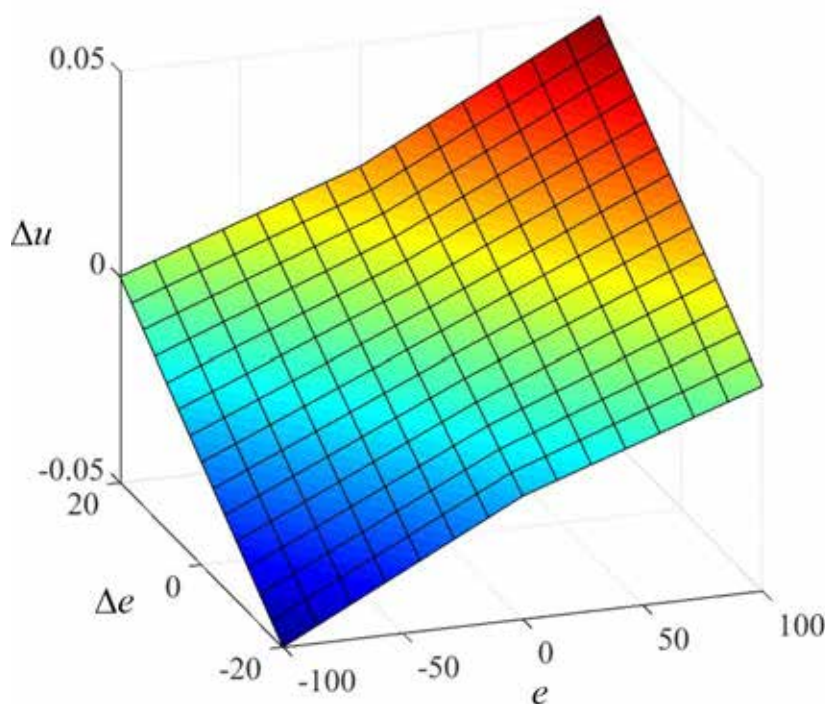


Рис. 6. Поверхня керування нечіткого контролера

Поверхня керування, що зображена на рис. 6, графічно відображає закон зміни приросту керуючого сигналу Δu нечіткого контролера залежно від поточних значень входних змінних $e(t)$ та $\Delta e(t)$.

Аналіз рис. 6 показав, що завдяки застосуванню алгоритму логічного виведення Сугено поверхня керування формується гладкою та монотонною, без точок розриву. Така топологія гарантує асимптотично плавну зміну потужності світлодіодних світильників, усуваючи ефект «мерехтіння». Водночас природне обмеження величини керуючого впливу на краях універсумів запобігає виникненню автоколиваний під час роботи системи в режимах насичення.

Для перевірки ефективності розробленої нечіткої системи автоматичного керування та її порівняння з базовим ПІ-регулятором було проведено комп'ютерне імітаційне моделювання. В якості збурювального впливу було використано математичну модель динамічної зміни природного освітлення, що імітує набігання та подальше розсіювання щільної хмари. Загальний час симуляції становить 100 с. Початковий рівень природної освітленості на підвіконні дорівнює 1200 лк. На 20-й секунді починається набігання хмари з тривалістю перехідного процесу 10 с, унаслідок чого освітленість падає до 50 лк. На 60-й секунді хмара починає розсіюватися, і освітленість повертається до початкового максимуму. Профіль змодельованого збурення рівня освітленості наведено на рис. 7.

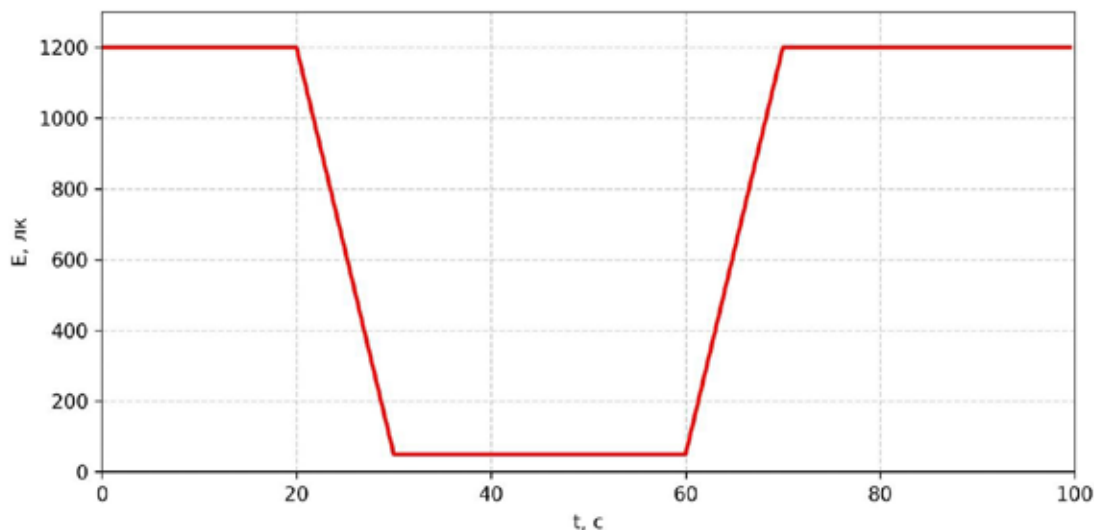


Рис. 7. Профіль зміни природної освітленості

Моделювання перехідних процесів здійснювалося одночасно для всіх трьох робочих зон (біля вікна, по центру, біля внутрішньої стіни) з урахуванням матриці перехресних зв'язків G . Заданий рівень освітленості для всіх трьох зон складав 500 лк. Результати порівняльного моделювання реакції базової САК (ПІ-регулятор) та розробленої оптимізованої нечіткої САК наведено на рис. 8 – 10.

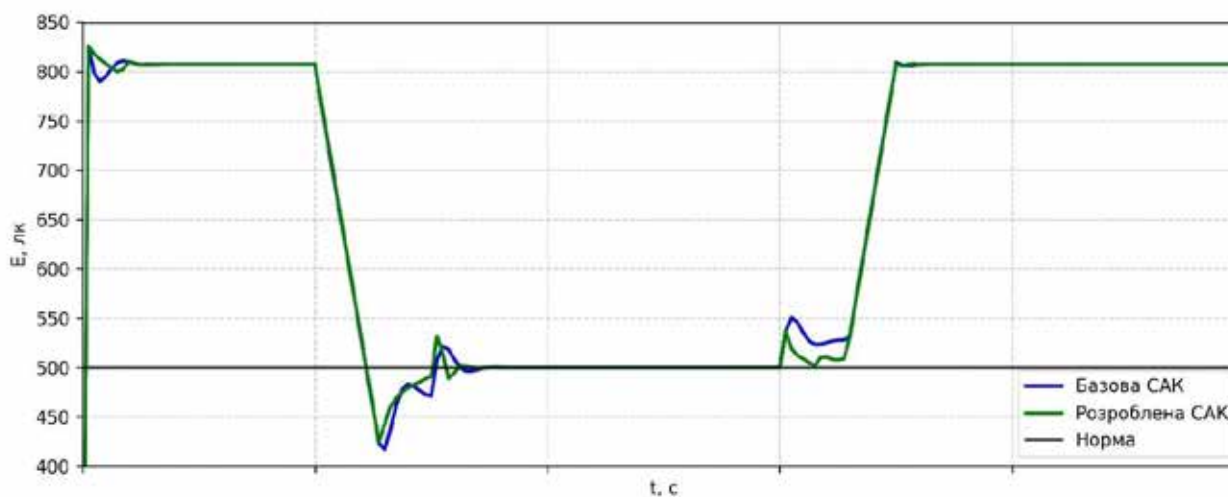


Рис. 8. Графік перехідних процесів базової та розробленої систем автоматичного керування при компенсації зовнішнього збурення (зона 1)

Аналіз отриманих графіків (рис. 8 – 10) демонструє переваги розробленої нечіткої системи керування в порівнянні з базовою. Так, для випадку базової системи під час різких змін природної освітленості спостерігаються значні коливальні процеси та перерегулювання. Найбільш сильно це проявляється в центральній (рис. 9) та віддаленій (рис. 10) зонах.

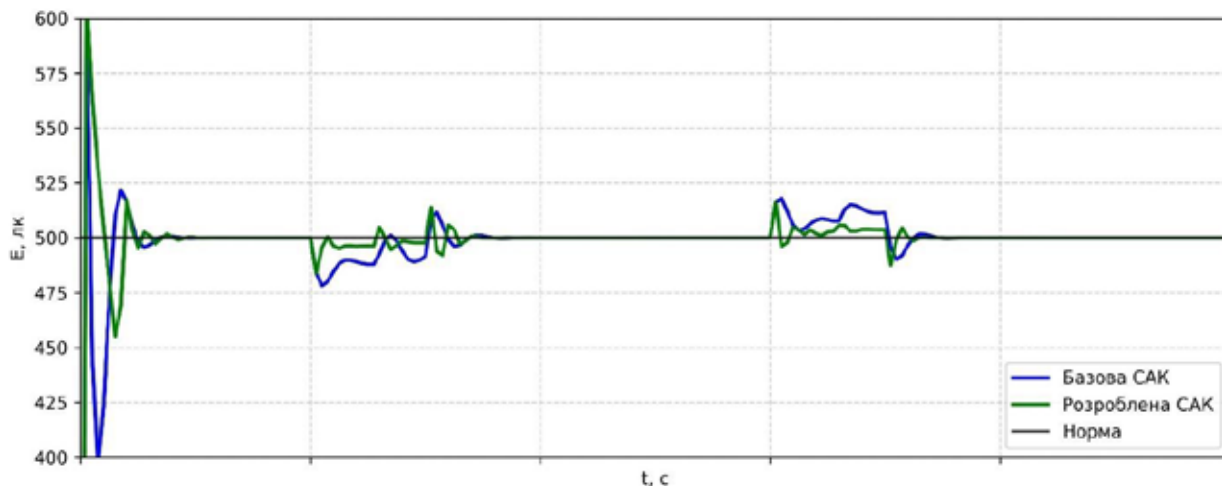


Рис. 9. Графік перехідних процесів базової та розробленої систем автоматичного керування при компенсації зовнішнього збурення (зона 2)

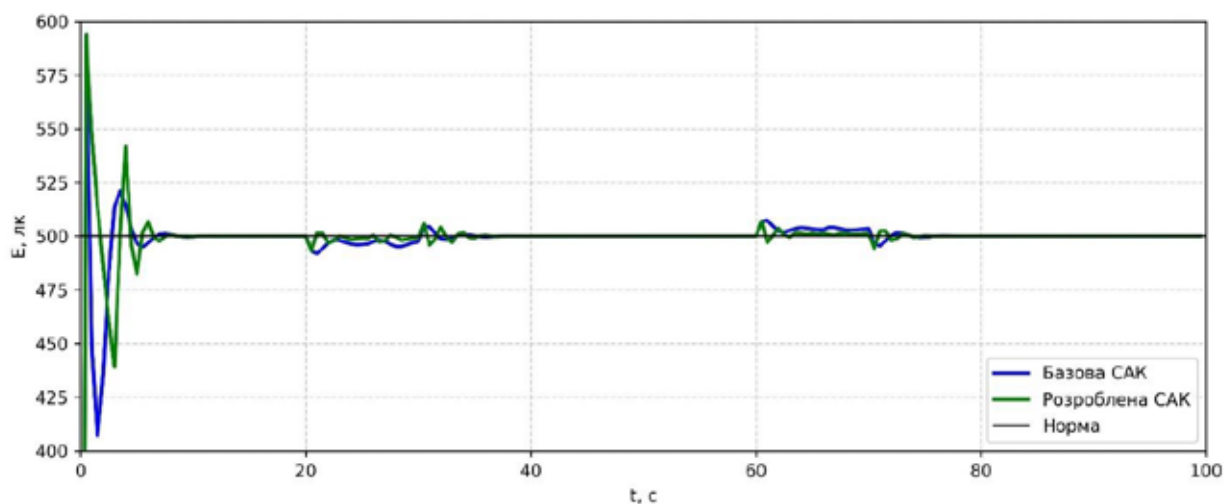


Рис. 10. Графік перехідних процесів базової та розробленої систем автоматичного керування при компенсації зовнішнього збурення (зона 3)

Натомість розроблена нечітка система автоматичного керування забезпечує протікання перехідного процесу з нижчим рівнем перерегулювання. Завдяки врахуванню швидкості зміни похибки $\Delta e(t)$ контролер предиктивно формує компенсуючий керуючий вплив. Це дає змогу ефективно демпфувати динамічні відхилення та значно швидше стабілізувати рівень освітленості.

Для об'єктивної кількісної оцінки ефективності алгоритмів було розраховано інтегральні показники якості перехідних процесів для всіх трьох зон одночасно. Результати розрахунків зведено у табл. 2.

Таблиця 2

Порівняльна таблиця показників якості (сумарно для 3-х робочих зон)

Показник якості	Базова САК (ПІ-регулятор)	Оптимізована Нечітка САК
Сумарна інтегральна похибка, лк·с	5203,4	4872,5
Максимальне динамічне відхилення освітленості, лк	83,2	75,2
Максимальна динамічна похибка, лк	309,4	308,3

Дані табл. 2 показують, що нечітка система автоматичного керування забезпечила зниження сумарної інтегральної похибки рівня освітленості на робочих поверхнях приміщення, та зниження рівня максимального динамічного відхилення освітленості. Варто зазначити, що значні рівні максимальної динамічної похибка (близько 308-309 лк) зумовлені фізичними обмеженнями виконавчих пристроїв: при появі прямого сонячного світла біля

вікна (рис. 8) рівень освітленості перевищує 800 лк, при цьому алгоритм миттєво зменшує потужність світильників до 0%.

Подальша компенсація такого надлишку освітленості можлива лише за умови інтеграції в систему керування автоматичних сонцезахисних пристроїв, що є напрямком для подальших наукових досліджень.

Висновки

У результаті проведеного дослідження синтезовано та оптимізовано нечітку систему автоматичного керування багатозонним освітленням. Проведені наукові дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. У результаті розробки та аналізу математичної моделі багатозонного освітлення встановлено, що для адекватного відтворення просторової динаміки об'єкта необхідним є врахування нелінійного експоненційного згасання природного світла та перехресних оптичних зв'язків. Показано, що взаємний оптичний вплив сусідніх ліній світлодіодних світильників формує складну багатовимірну систему, керування якою за допомогою лінійних алгоритмів призводить до виникнення небажаних коливальних процесів.

2. Результати синтезу та машинної оптимізації нечіткої системи автоматичного керування рівнем освітленості (на базі алгоритму Сугено нульового порядку) показали, що використання повної бази з 9 продукційних правил є достатнім для забезпечення високої якості керування. Встановлено, що застосування методів машинного навчання для точного налаштування меж функцій належності та значень вихідних сингтонів дозволяє мінімізувати інтегральну похибку без ускладнення архітектури нечіткої системи керування, що робить розроблений алгоритм оптимальним для технічної реалізації на основі бюджетних мікроконтролерів.

3. Результати порівняльного імітаційного моделювання перехідних процесів підтвердили значну перевагу розробленої нечіткої системи керування над базовою в умовах стохастичних збурень. Встановлено, що оптимізована нечітка система керування знижує рівень перегулювання, а також зменшує значення сумарної інтегральної похибки з 5203,4 лк·с до 4872,5 лк·с, що є суттєвою її перевагою.

Список використаної літератури

1. Al-Ghaili A. M., Kasim H., Hassan Z., Jørgensen B. N. Lighting Systems Designed for Energy Savings in Buildings (LSD-ESB): A Review. 2020 8th International Conference on Information Technology and Multimedia (ICIMU). IEEE, 2020. P. 14–19. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIMU49871.2020.9243307>

2. Tayeb E. B. M., Ali A. T. Comparison of some classical PID and fuzzy logic controllers. International Journal of Scientific and Engineering Research. 2012. Vol. 3, № 9.

3. Nguyen N. K., Nguyen D. T. A Comparative Study on PI–and PD–Type Fuzzy Logic Control Strategies. International Journal of Engineering Trends and Technology. 2021. Vol. 69, № 7. P. 101–108. DOI: <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I7P215>.

4. Chao C. T., Sutarna N., Chiou J. S., Wang C. J. Equivalence between fuzzy PID controllers and conventional PID controllers. Applied Sciences. 2017. Vol. 7, № 6. P. 513. DOI: <https://doi.org/10.3390/app7060513>.

5. Olenych I. Fuzzy logic controller for smart home lighting control. Information and Telecommunication Sciences. 2017. № 2. P. 50–55. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22017.50-55>.

6. Martínez-Rojas M., Cano C., Alcalá-Fdez J., Soto-Hidalgo J. M. Interpretable Fuzzy Control for Energy Management in Smart Buildings Using JFML-IoT and IEEE Std 1855-2016. Applied Sciences. 2025. Vol. 15, № 15. P. 8208. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15158208>.

7. Rossi M., Pandharipande A., Caicedo D., Schenato L., Cenedese A. Personal lighting control with occupancy and daylight adaptation. Energy and Buildings. 2015. Vol. 105. P. 263–272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.059>.

8. Cziker A., Chindris M., Miron A. Fuzzy controller for indoor lighting system with daylighting contribution. ELECO'2007 5th international conference on electrical and electronics engineering. 2007.

9. Dwisaputra I., Sahita S. F., Rizky M. D. Energy efficiency in lighting systems using fuzzy logic control. Proceedings of the International Conference on Sustainable Environment, Agriculture and Tourism (ICOSEAT 2022). Springer Nature, 2024. Vol. 26. P. 465. DOI: https://doi.org/10.2991/978-94-6463-086-2_63.

10. Quyen H. A., Le T. T. T., Le T. N., Pham T. M. T. Combining the Daylight and Artificial Light Based on Fuzzy Logic. AETA 2013: Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. Vol. 282. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-41968-3_11.

References

1. Al-Ghaili, A. M., Kasim, H., Hassan, Z., & Jørgensen, B. N. (2020, August). Lighting Systems Designed for Energy Savings in Buildings (LSD-ESB): A Review. In 2020 8th International Conference on Information Technology and Multimedia (ICIMU) (pp. 14-19). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIMU49871.2020.9243307>

2. Tayeb, E. B. M., & Ali, A. T. (2012). Comparison of some classical PID and fuzzy logic controllers. in International Journal of Scientific and Engineering Research. Vol. 3, Issue 9.

3. Nguyen, N. K., & Nguyen, D. T. (2021). A Comparative Study on PI–and PD–Type Fuzzy Logic Control Strategies. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 69(7), 101-108. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I7P215>
4. Chao, C. T., Sutarna, N., Chiou, J. S., & Wang, C. J. (2017). Equivalence between fuzzy PID controllers and conventional PID controllers. *Applied Sciences*, 7(6), 513. <https://doi.org/10.3390/app7060513>
5. Olenych, I. (2017). Fuzzy logic controller for smart home lighting control. *Information and Telecommunication Sciences*, (2), 50-55. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22017.50-55>
6. Martínez-Rojas, M., Cano, C., Alcalá-Fdez, J., & Soto-Hidalgo, J. M. (2025). Interpretable Fuzzy Control for Energy Management in Smart Buildings Using JFML-IoT and IEEE Std 1855-2016. *Applied Sciences*, 15(15), 8208. <https://doi.org/10.3390/app15158208>
7. Rossi, M., Pandharipande, A., Caicedo, D., Schenato, L., & Cenedese, A. (2015). Personal lighting control with occupancy and daylight adaptation. *Energy and Buildings*, 105, 263-272. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.059>
8. Cziker, A., Chindris, M., & Miron, A. (2007). Fuzzy controller for indoor lighting system with daylighting contribution. In *ELECO'2007 5th international conference on electrical and electronics engineering*.
9. Dwisaputra, I., Sahita, S. F., & Rizky, M. D. (2024). Energy efficiency in lighting systems using fuzzy logic control. In *Proceedings of the International Conference on Sustainable Environment, Agriculture and Tourism (ICOSEAT 2022)* (Vol. 26, p. 465). Springer Nature. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-086-2_63
10. Quyen, H.A., Le, T.T.T., Le, T.N., Pham, T.M.T. (2014). Combining the Daylight and Artificial Light Based on Fuzzy Logic. In: Zelinka, I., Duy, V., Cha, J. (eds) *AETA 2013: Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences*. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 282. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41968-3_11

Дата першого надходження статті до видання: 19.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 07.05.2026