

УДК 621.311.22:621.311.24

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359895

СИНТЕЗ РОБАСТНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИМ ОСВІТЛЕННЯМ В УМОВАХ ПАРАМЕТРИЧНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Плешков П.Г.	канд. техн. наук, професор, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2141-4811 , e-mail: kafedra.etssem@gmail.com ;
Зінзура В.В.	канд. техн. наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6357-064X , e-mail: vasiliy.zinzura@gmail.com ;
Петрова К.Г.	канд. техн. наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1928-6833 , e-mail: kateflash27@gmail.com ;
Гарасьова Н.Ю.	канд. техн. наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3609-4681 , e-mail: ngarasova@gmail.com ;
Солдатенко В.П.	канд. техн. наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7781-9343 , e-mail: kirovograd41@gmail.com

У статті розв'язується актуальна науково-практична задача забезпечення стабільності та енергоефективності автоматичних систем промислового освітлення. В умовах тривалої експлуатації відбувається параметрична деградація оптичного середовища та температурне старіння компонентів світлодіодів. Це призводить до значного зниження якості перехідних процесів при використанні класичних пропорційно-інтегрально-диференціальних регуляторів, виникнення перерегулювання та шкідливого для зору працівників мерехтіння світла. Метою даного дослідження є розробка алгоритму робастного керування системою промислового світлодіодного освітлення на базі апарату H_∞ -синтезу для забезпечення стабільних нормативних показників зорового комфорту в умовах експлуатаційної деградації обладнання та дії неконтрольованих зовнішніх збурень. Для досягнення поставленої мети застосовано математичний апарат H_∞ синтезу в рамках розширеної задачі змішаної чутливості. Сформовано систему вагових фільтрів, які забезпечують системі астатизм, робастну стійкість до високочастотних шумів. Знаходження субоптимального контролера здійснювалося шляхом розв'язання системи алгебраїчних матричних рівнянь Ріккати у просторі станів. Результати комп'ютерного моделювання підтвердили суттєву перевагу запропонованого методу. Встановлено, що в умовах параметричної деградації класичний регулятор допускає значний рівень перерегулювання, тоді як синтезований робастний контролер усуває перерегулювання та стабільно утримує нормативний рівень освітленості. Наукова новизна дослідження полягає в обґрунтуванні та застосуванні методу робастного синтезу з прямим штрафуванням зусилля керування безпосередньо для систем світлодіодного освітлення, що унеможливує різкі сплески струму в драйверах. Практична значущість одержаних результатів полягає у можливості впровадження алгоритму в промислові мікроконтролери для забезпечення високого зорового комфорту, оптимізації енергоспоживання та подовження терміну служби обладнання. Подальші дослідження у даному напрямі доцільно зосередити на інтеграції розробленого алгоритму з методами нечіткої логіки для створення гібридних адаптивних систем керування розумним освітленням.

Ключові слова: робастне керування; енергоефективне освітлення; параметрична невизначеність; змішана чутливість; пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор; промислові світлодіодні системи.

Постановка проблеми

У сучасних умовах глобального переходу до енергозберігаючих технологій та концепції Industry 4.0 підвищення енергоефективності систем штучного освітлення є одним із пріоритетних напрямів розвитку промислової інфраструктури. Сучасні автоматизовані системи освітлення на базі світлодіодних технологій дозволяють суттєво знизити енергоспоживання. Проте в умовах реальних промислових цехів виникає практична задача: забезпечення стабільного нормативного

рівня освітленості (наприклад, для точних зорових робіт) в умовах інтенсивної дії неконтрольованих зовнішніх збурень, таких як раптова поява глибоких тіней від рухомих механізмів чи мостових кранів.

Наукова задача ускладнюється тим, що промислові системи освітлення піддаються невідворотній експлуатаційній деградації. Запилення вторинної оптики світильників, помутніння лінз, температурне старіння світловипромінюючих кристалів та зміна теплового опору радіаторів призводять до неперервної зміни динамічних параметрів об'єкта керування. Це

призводить до формування яскраво вираженої параметричної невизначеності систем освітлення.

Класичні системи автоматичного керування (САК), побудовані на базі лінійних пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів, налаштовуються для номінальних умов роботи. Як показує інженерна практика, при значному експлуатаційному зношенні оптичного середовища такі регулятори втрачають запас стійкості. Спроби лінійної системи компенсувати зовнішні збурення в деградованому стані призводять до виникнення перерегулювання та низькочастотних коливань рівня освітленості. Це є негативним явищем, оскільки зорова втома персоналу прямо впливає на безпеку праці та продуктивність. Крім того, неконтрольовані різкі сплески керуючого сигналу створюють ударні струмові навантаження на електронні компоненти LED-драйверів, суттєво скорочуючи їхній термін служби.

Важливим питанням, на вирішення якого спрямоване дане дослідження, є розробка такого алгоритму керування, який би гарантував абсолютну відсутність коливання рівнів освітленості та перерегулювань на всьому діапазоні життєвого циклу світильника. Постає завдання не просто забезпечити стійкість системи керування до збурень, але й аналітично обмежити енергію керуючого впливу для фізичного захисту апаратної частини. Відповідно, дослідження методів структурного синтезу робастних контролерів, здатних одночасно задовольняти критерії візуального комфорту та апаратних обмежень, є надзвичайно актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В роботах [1–4] розроблено інформаційні системи та застосунки для моніторингу й керування освітленням на основі даних із сенсорів та природного світла. Проте суттєвим недоліком цих рішень є фокус виключно на програмному рівні керування або моніторингу: вони не містять строгих математичних алгоритмів стабілізації струмів LED-драйвера в умовах раптових збурень. У роботі [5] розглядається інтелектуальне керування освітленням тунелів з використанням сонячної енергії. Однак запропоновані алгоритми не враховують параметричної невизначеності об'єкта під час тривалої експлуатації.

В роботі [6] запропоновано застосування нечіткого контролера на базі алгоритму Мамдані для систем розумного дому, в тому числі і для систем керування штучним освітленням. В дослідженні [7] пропонується для оброблення даних низької якості від оптичних датчиків застосовувати математичний апарат нечіткої логіки та генетичні алгоритми. Загальним недоліком підходів [6, 7] є відсутність строгих математичних гарантій стійкості замкненої системи та неможливість аналітично задати обмеження на величину зусилля керування, що може призводити до некоректної роботи апаратної частини. В роботі [8] розроблено систему

керування на базі комунікації видимим світлом, недоліком якої є висока чутливість якості регулювання до оптичних перешкод.

У дослідженні [9] для стабілізації підвищувально-понижуючого DC-DC перетворювача застосовано метод ковзного режиму. Незважаючи на високу швидкість реакції, недоліком цього методу є виникнення високочастотних пульсацій керуючого сигналу, що призводить до передчасного зношення компонентів та появи високочастотного мерехтіння світла. У роботах [10–12] доведено високу ефективність алгоритмів модельно-прогнозуючого керування для інженерних систем будівель. Однак суттєвим обмеженням цього методу є потреба у значних обчислювальних ресурсах, що робить його непридатним для інтеграції у бюджетні мікроконтролери для керування швидкозмінними електричними процесами LED-драйверів.

Найбільш перспективним підходом для подолання параметричної невизначеності є робастне керування. В роботі [13] запропоновано введення елементів робастності в контур керування світлодіодами, а в [14] синтезовано робастний контролер низького порядку для знижувального перетворювача. Проте ці рішення є досить вузькоспрямованими і не враховують оптичних показників світильників. У дослідженнях [15, 16] успішно застосовано апарат H_∞ -синтезу для стабілізації мікромереж та перетворювачів. Головним недоліком цих робіт у контексті освітлення є те, що вони орієнтовані виключно на електричні параметри електромереж і не адаптовані до специфіки систем освітлення.

Таким чином, незважаючи на значну кількість публікацій, питання застосування H_∞ -синтезу, а саме у вигляді постановки розширеної задачі змішаної чутливості $S/KS/T$ безпосередньо для систем промислового освітлення залишається невирішеним. Відсутність робастних алгоритмів, які б одночасно гарантували відсутність перерегулювання в умовах деградації оптики та мали жорстке обмеження на рівень керуючого сигналу, підтверджує актуальність розробки запропонованої в даній статті системи керування рівнем освітленості.

Мета статті

Метою даного дослідження є розробка алгоритму робастного керування системою промислового світлодіодного освітлення на базі апарату H_∞ -синтезу для забезпечення стабільних нормативних показників зорового комфорту в умовах експлуатаційної деградації обладнання та дії неконтрольованих зовнішніх збурень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести математичне моделювання системи промислового світлодіодного освітлення з урахуванням його номінального стану та умов експлуатаційної деградації, формалізованої у вигляді мультиплікативної параметричної невизначеності.

2. Сформулювати розширену задачу змішаної чутливості та аналітично розрахувати параметри вагових фільтрів, що гарантують системі астатизм, робастну стійкість до шумів та обмеження рівня сигналу керування.

3. Виконати синтез субоптимального H_∞ -контролера шляхом розв'язання системи алгебраїчних матричних рівнянь Ріккати у просторі станів та здійснити аналіз полюсів і нулів отриманої передавальної функції.

4. Здійснити порівняльне комп'ютерне моделювання динаміки САК із синтезованим H_∞ -контролером та класичним ПІД-регулятором для перевірки їхньої робастності в умовах дії раптових зовнішніх збурень та деградації оптичного середовища.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є система автоматичного керування промисловим освітленням робочої зони, що включає електротехнічну та оптичну складові. Предметом дослідження виступають алгоритми робастного керування, спрямовані на стабілізацію заданого рівня освітленості в умовах параметричної невизначеності об'єкта та дії зовнішніх неконтрольованих збурень.

Основним методом розв'язання задачі стабілізації обрано математичний апарат H_∞ -синтезу. Для врахування фізичних обмежень апаратної частини, зокрема, для запобігання струмовим перевантаженням LED-драйвера, та забезпечення необхідної якості перехідних процесів застосовано розширену задачу змішаної чутливості. Синтез субоптимального контролера здійснювався шляхом розв'язання системи алгебраїчних матричних рівнянь Ріккати у просторі станів.

Для верифікації синтезованого алгоритму та порівняльного аналізу застосовано метод комп'ютерного моделювання. Усі матричні обчислення, а також побудова логарифмічних амплітудно-частотних (ЛАЧХ) і перехідних характеристик виконувалися у програмному середовищі MATLAB із використанням спеціалізованого пакета Robust Control Toolbox.

Сценарій моделювання передбачав дослідження динаміки замкненої системи при відпрацюванні цільового рівня освітленості 500 лк та реакції на адитивне зовнішнє збурення (раптову появу тіні) амплітудою -150 лк. Для доведення робастності системи експеримент проводився за двох експлуатаційних станів:

- номінальні умови – чисте оптичне середовище та номінальна швидкодія драйвера;
- умови експлуатаційної деградації – зниження коефіцієнта передачі оптичного тракту на 40% та зростання інерційності системи в 3 рази.

Оцінка ефективності запропонованого H_∞ -контролера здійснювалася шляхом кількісного порівняння перегулювання та величини динамічного відхилення з аналогічними показниками класичного ПІД-регулятора.

Виклад основного матеріалу

Вирішення проблеми надійного керування промисловим освітленням вимагає переходу від класичних лінійних ПІД-регуляторів до сучасних робастних систем. Для забезпечення незмінного рівня зорового комфорту, оптимізації енергоспоживання та захисту апаратної частини LED-драйверів від струмових перевантажень у даній роботі запропоновано застосувати апарат H_∞ -керування. Базовим етапом для реалізації цієї процедури є формування математичної моделі системи, яка враховує як номінальну динаміку об'єкта, так і його невідворотну експлуатаційну деградацію.

Структурна схема та математична модель системи

Узагальнена структурна схема замкненої САК рівнем освітленості наведена на рис. 1.

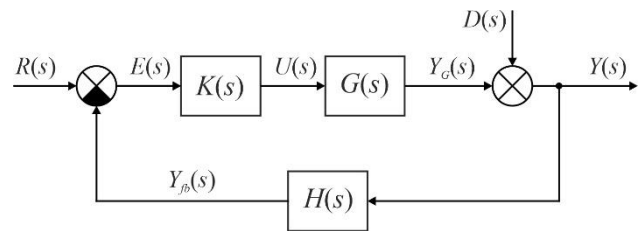


Рис. 1 – Структурна схема САК рівнем освітлення

У схемі на рис. 1: $K(s)$ – передавальна функція контролера; $G(s)$ – передавальна функція об'єкта керування (сукупність драйвера, LED-матриці та оптичного середовища цеху); $H(s)$ – передавальна функція датчика освітленості; $R(s)$ – завдання керування (бажаний рівень освітленості); $Y_p(s)$ – сигнал з виходу датчика освітленості; $E(s) = R(s) - Y_p(s)$ – сигнал помилки керування; $U(s)$ – керуючий вплив; $Y(s)$ – фактична освітленість на робочій поверхні; $D(s)$ – зовнішнє адитивне збурення на виході об'єкта (раптове затінення від рухомих механізмів, мостових кранів тощо).

Номінальна передавальна функція об'єкта $G_{nom}(s)$ апроксимується аперіодичною ланкою першого порядку:

$$G_{nom}(s) = \frac{k_{nom}}{T_{nom}s+1} = \frac{100}{0,1s+1} \quad (1)$$

В умовах промислової експлуатації система знає деградації – запилення лінз, старіння кристалів, задимленість, що можна описати як мультиплікативну невизначеність параметрів. Деградовану модель $G_{deg}(s)$ зі знизеним на 40% коефіцієнтом передачі та збільшеною втричі інерційністю можна записати у вигляді:

$$G_{deg}(s) = \frac{60}{0,3s+1} \quad (2)$$

Аналіз функцій чутливості

У класичній постановці задачі H_∞ -синтезу якість роботи замкненої системи визначається компромісом між трьома базовими передавальними функціями:

1. Функція чутливості $S(s) = (I + G(s) \cdot K(s))^{-1}$ – описує передачу збурення $D(s)$ на вихід $Y(s)$ та

визначає статичну похибку. Для високої точності необхідно мінімізувати $|S(j\omega)|$ на низьких частотах.

2. Передавальна функція за керуванням $KS(s) = K(s)(I + G(s) \cdot K(s))^{-1}$ відображає вплив збурень та задаючого сигналу на керуючу напругу $U(s)$. Обмеження цієї функції є важливим для запобігання струмового перевантаження апаратної частини LED-драйвера.

3. Комплементарна функція чутливості $T(s) = G(s) K(s) (I + G(s) \cdot K(s))^{-1}$ визначає стійкість системи до високочастотних паразитних параметрів LED-драйвера (зокрема, комутаційних пульсацій ШІМ) та шумів оптичних сенсорів. Потребує мінімізації на високих частотах.

Враховуючи алгебраїчну тотожність $S(s) + T(s) = I$, одночасна мінімізація обох функцій у всьому спектрі частот є принципово неможливою. Це обмеження вимагає знаходження оптимального компромісу між показниками швидкодії та запасами робастної стійкості.

Вибір вагових функцій

Для знаходження цього компромісу використано задачу змішаної чутливості. Суть H_∞ -синтезу полягає у знаходженні такої передавальної функції контролера $K(s)$, що стабілізує замкнену систему та утримує H_∞ -норму матриці передавальних функцій (від зовнішніх збурень до вектора зважених сигналів) на рівні, меншому за задане субоптимальне значення γ . Тобто регулятор має мінімізувати H_∞ -норму розширеної матриці:

$$\| \begin{bmatrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)K(s)S(s) \\ W_3(s)T(s) \end{bmatrix} \|_\infty < \gamma. \quad (3)$$

На рис. 2 наведено структурну схему розширеного об'єкта керування з ваговими фільтрами $W_1(s)$, $W_2(s)$ та $W_3(s)$.

Відповідно до структурної схеми (рис. 2), для постановки розширеної задачі змішаної чутливості введено вектор зважених контрольованих виходів $Z_1(s)$, $Z_2(s)$ та $Z_3(s)$. Ці сигнали формують математичну модель розширеного об'єкта і застосовуються виключно на етапі аналітичного синтезу.

Вони виконують роль критеріальних функцій при розв'язанні системи рівнянь Ріккати для знаходження оптимального контролера:

- $Z_1(s) = W_1(s)E(s)$ – зважений сигнал похибки керування. Мінімізація норми цього сигналу гарантує досягнення необхідних показників якості перехідного процесу: високої статичної точності та заданої швидкодії при виході на номінальний рівень освітленості (еквівалентно мінімізації функції чутливості $S(s)$).

- $Z_2(s) = W_2(s)U(s)$ – зважений сигнал керуючого впливу. Введення цього критерію дозволяє аналітично обмежити максимальну амплітуду та швидкість наростання генерованої ШІМ напруги. Це є необхідною умовою для запобігання надмірним зростанням керуючого

впливу та захисту силових електронних компонентів LED-драйвера від струмових перевантажень.

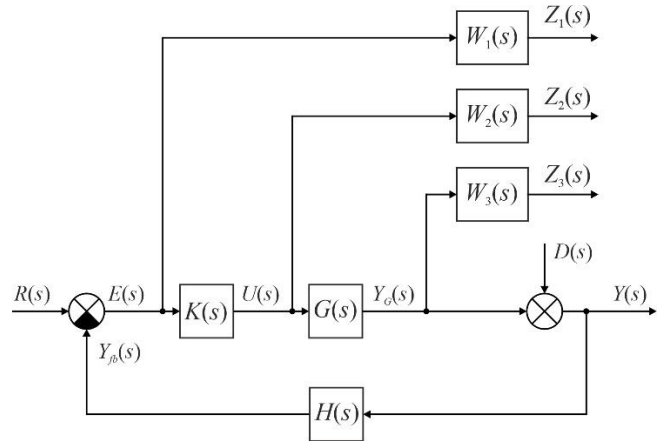


Рис. 2 – Структурна схема узагальненого об'єкта для H_∞ -синтезу

- $Z_3(s) = W_3(s)U(s)$ – зважений вихідний сигнал об'єкта. Обмеження цього параметра у високочастотному спектрі забезпечує робастну стійкість САК. Це дозволяє ефективно знижувати реакцію системи на вимірювальні шуми оптичного сенсора та високочастотні пульсації силового перетворювача (еквівалентно мінімізації комплементарної функції чутливості $T(s)$).

Синтез передавальних функцій вагових фільтрів здійснюється аналітично за методом асимптотичного формування ЛАЧХ.

Ваговий фільтр швидкодії $W_1(s)$ отримується на основі стандартної передавальної функції фільтра низьких частот:

$$W_1(s) = \frac{s/M_1 + \omega_{B1}}{s + \omega_{B1}A_1}, \quad (4)$$

де M_1 – максимально допустиме значення (пік) функції чутливості, що обмежує перерегулювання системи (обрано $M_1 = 2$); ω_{B1} – бажана смуга пропускання, яка визначає швидкість виходу на заданий рівень освітленості (обрано $\omega_{B1} = 2$ рад/с); A_1 – максимально допустима статична похибка в сталому режимі (обрано $A_1 = 0.0005$, що гарантує похибку менше 0,05% для точного утримання 500 лк).

Підставивши обрані значення у формулу (4) отримаємо кінцевий вираз для фільтра $W_1(s)$:

$$W_1(s) = \frac{s/2 + 2}{s + 2 \cdot 0.0005} = \frac{0,5s + 2}{s + 0.001}. \quad (5)$$

Ваговий фільтр зусилля керування W_2 задано у вигляді вагового коефіцієнта, що обмежує максимальну амплітуду керуючого ШІМ-сигналу. Введення цього параметра дозволяє уникнути надмірної інтенсивності керуючого впливу, узгоджуючи динаміку перехідного процесу з фізичними можливостями апаратної частини та захищаючи силові компоненти LED-драйвера від струмових перевантажень під час компенсації рапто-вих зовнішніх збурень.

Ваговий фільтр робастної стійкості $W_3(s)$, який обмежує комплементарну функцію чутливості $T(s)$, синтезовано у вигляді класичного фільтра верхніх частот:

$$W_3(s) = \frac{s/\omega_{B3} + A_3}{s/(\omega_{B3}M_3) + 1} \quad (6)$$

де M_3 – максимальний коефіцієнт підсилення у високо-частотній області, що визначає рівень придушення вимірювальних шумів сенсора (обрано $M_3 = 10$); ω_{B3} – частота зрізу, яка обмежує смугу пропускання замкненої системи та визначає межу початку інтенсивного пригнічення високочастотних завод (обрано $\omega_{B3} = 10$ рад/с); A_3 – мінімальний коефіцієнт підсилення фільтра в робочій (низькочастотній) області, що мінімізує його вплив на основну динаміку системи (обрано $A_3 = 0.05$). Після підстановки обраних параметрів передавальна функція набуває вигляду:

$$W_3(s) = \frac{\frac{s}{10} + 0,05}{\frac{s}{10 \cdot 10} + 1} = \frac{0,1s + 0,05}{0,01s + 1} \quad (7)$$

Логарифмічні амплітудно-частотні характеристики вагових фільтрів $W_1(s)$, $W_2(s)$ і $W_3(s)$, наведені на рис. 3.

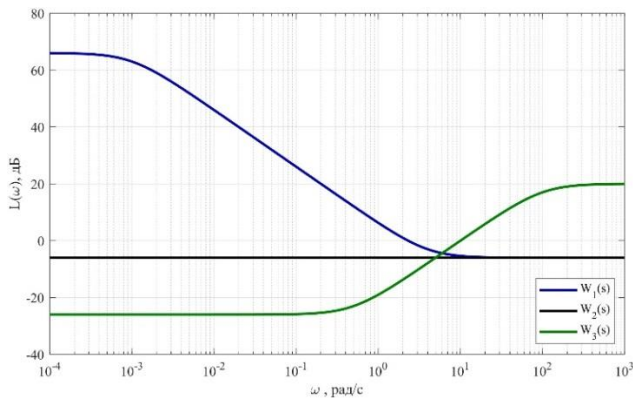


Рис. 3 – Логарифмічні амплітудно-частотні характеристики вагових фільтрів $W_1(s)$, $W_2(s)$ і $W_3(s)$

Аналіз наведених характеристик свідчить, що ваговий фільтр $W_1(s)$ має значний коефіцієнт підсилення (понад 60 дБ) у низькочастотній області ($\omega < 10^{-2}$ рад/с). Це накладає обмеження на функцію чутливості $S(s)$, забезпечуючи її асимптотичну мінімізацію на низьких частотах, що гарантує системі властивості астатизму та швидку компенсацію сталих збурень. У свою чергу, коефіцієнт передачі фільтра $W_3(s)$ інтенсивно зростає в області високих частот ($\omega > 10$ рад/с), де зосереджені вимірювальні шуми та комутаційні пульсації силового перетворювача. Обмежуючи комплементарну функцію чутливості $T(s)$ у цій зоні, фільтр забезпечує необхідний запас робастної стійкості САК.

Синтез робастного контролера

Для переходу до процедури синтезу узагальнений об'єкт керування перетворюється з частотної області у простір станів і описується системою матричних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1w(t) + B_2u(t) \\ z(t) = C_1x(t) + D_{12}u(t) \\ y(t) = C_2x(t) + D_{21}w(t) \end{cases} \quad (8)$$

де $x(t)$ – вектор стану розширеної системи; $w(t)$ – вектор зовнішніх збурень; $u(t)$ – вектор керування; $z(t)$ – вектор керованих виходів (штрафних сигналів z_1, z_2, z_3); $y(t)$ – вектор вимірювань; $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{12}, D_{21}$ – відповідні матриці простору станів.

Згідно з процедурою знаходження субоптимального контролера $K(s)$, який мінімізує H_∞ -норму розширеної матриці та забезпечує виконання умови $\|T_{zw}\|_\infty < \gamma$, зводиться до розв'язання двох алгебраїчних матричних рівнянь Ріккати:

$$- \text{рівняння Ріккати для задачі керування:} \\ A^T X + XA + X(\gamma^{-2}B_1B_1^T - B_2B_2^T)X + C_1^T C_1 = 0; \quad (9)$$

$$- \text{рівняння Ріккати для задачі оцінювання:} \\ AY + YA^T + Y(\gamma^{-2}C_1^T C_1 - C_2^T C_2)Y + B_1B_1^T = 0. \quad (10)$$

Необхідною і достатньою умовою існування стабілізуючого H_∞ – контролера є наявність симетричних додатно визначених розв'язків $X \geq 0$ та $Y \geq 0$, а також виконання спектральної умови для їх добутку $\rho(XY) < \gamma^2$.

Матричні обчислення здійснювалися у програмному середовищі MATLAB (пакет Robust Control Toolbox). У результаті розв'язання системи рівнянь Ріккати для розширеної задачі змішаної чутливості $S / KS/T$ отримано оптимальне значення критерію $\gamma = 0.5906 < 1$, що свідчить про успішне досягнення заданих обмежень. Еквівалентна передавальна функція синтезованого робастного контролера має вигляд:

$$K_{Hinf}(s) = \frac{220,78(s+100)(s+10)}{(s+20130)(s+322,8)(s+0,001)} \quad (11)$$

Аналіз структури синтезованого контролера підтверджує її повну відповідність заданим критеріям якості. Наявність полюса, розташованого поблизу початку координат, надає системі властивості астатизму, що є необхідною умовою для забезпечення нульової статичної похибки. Динамічна компенсація інерційності деградованого об'єкта досягається за рахунок нулів чисельника ($s = -100$ та $s = -10$). Водночас високочастотні полюси знаменника ($s = -20130$ та $s = -322,8$) обмежують смугу пропускання контролера, забезпечуючи крутий спад коефіцієнта передачі на високих частотах. Таке частотне профілювання є прямим наслідком дії вагового фільтра $W_2(s)$, що гарантує генерацію фізично допустимих керуючих ШІМ-сигналів та надійно захищає силові компоненти LED-драйвера від струмових перевагажень.

Результати та їх обговорення

Для верифікації ефективності синтезованого робастного H_∞ -контролера та підтвердження його переваг над існуючими системами керування було здійснено порівняльне комп'ютерне моделювання. З метою оцінки робастних властивостей алгоритмів, моделювання проводилося для двох крайніх експлуатаційних станів об'єкта: номінального (чиста оптика,

номінальна швидкодія) та деградованого (зниження коефіцієнта передачі на 40% та зростання інерційності втричі).

Програма моделювання передбачала відпрацювання системою нормативного рівня освітленості (500 лк) із подальшим внесенням ступінчастого зовнішнього збурення амплітудою -150 лк на 10-й секунді, що імітує раптову появу глибокої тіні в робочій зоні. В якості базової системи керування для порівняння було використано ПІД-регулятор, налаштований на оптимальну швидкодію для номінальних умов роботи.

На рис. 4 наведено сімейство перехідних характеристик системи при відпрацюванні одиничного стрібка для 5 різних станів експлуатаційної деградації (від номінального $T = 0,1$ с, $k = 100$ до граничного $T = 0,3$ с, $k = 60$).

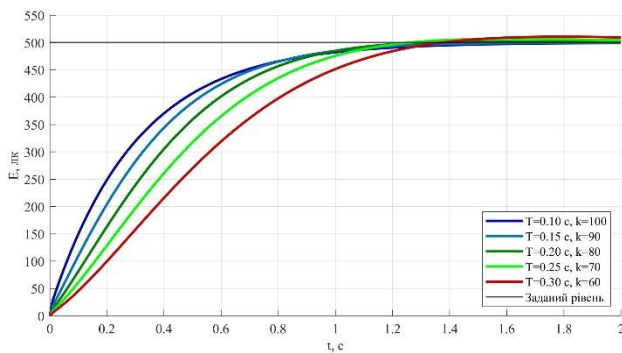


Рис. 4 – Сімейство перехідних характеристик робастної системи

Аналіз графіків на рис. 4 доводить, що система зберігає аперіодичний характер перехідного процесу на всьому розрахунковому діапазоні параметричної невизначеності. Синтезований H_{∞} -контролер стабільно виводить систему на заданий рівень 500 лк без перерегулювань.

Графіки перехідних процесів базової та розробленої САК для номінальних умов експлуатації наведені на рис. 5, а для умов деградації об'єкта керування – на рис. 6.

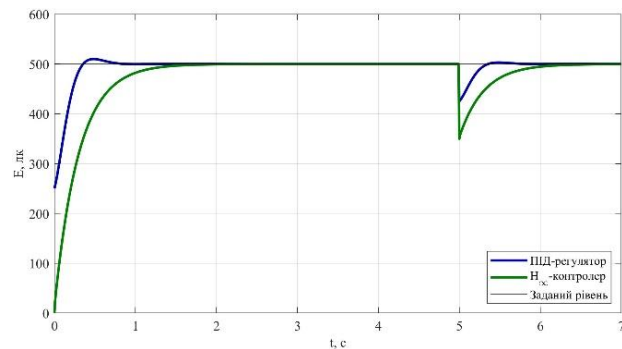


Рис. 5 – Графіки перехідних процесів в системі автоматичного керування освітленням за номінальних умов експлуатації

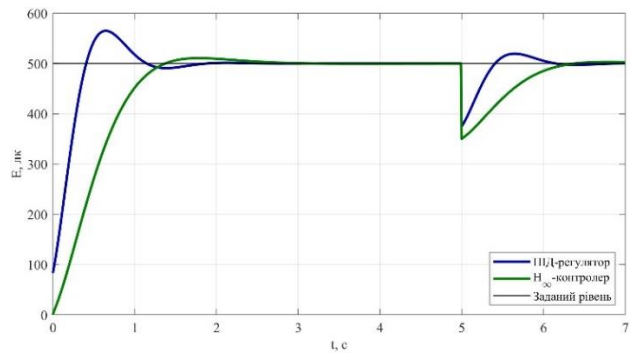


Рис. 6 – Перехідні процеси в системі автоматичного керування освітленням в умовах деградації об'єкта

Кількісні показники якості перехідних процесів для порівнюваних систем зведено у табл. 1.

Таблиця 1
Порівняльні показники якості систем керування освітленням

Показник якості перехідного процесу	ПІД-регулятор (номінальні умови)	H_{∞} -контролер (номінальні умови)	ПІД-регулятор (умови деградації)	H_{∞} -контролер (умови деградації)
Перерегулювання при старті, лк	10,0	0	65,0	10,6
Глибина відхилення при збуренні, лк	73,0	142,0	122,5	148,5

Аналіз отриманих перехідних характеристик дозволяє зробити висновки щодо якості обох систем керування. У номінальному режимі обидва контролери демонструють задовільні показники, швидко виводячи систему на заданий рівень освітленості без значної статичної похибки. Однак в умовах експлуатаційної деградації об'єкта їхня поведінка кардинально відрізняється, що повністю підтверджує висунуту на початку дослідження гіпотезу щодо обмеженості лінійних регуляторів.

Як видно з отриманих даних, при зміні параметрів оптичного середовища ПІД-регулятор допускає перерегулювання (понад 13%) та появи коливальних процесів, що є неприпустимим за санітарними нормами зорового комфорту. Крім того, неконтрольована інтенсивність керуючого впливу ПІД-регулятора в моменті дії збурень провокує небезпечні струмові піки в LED-драйвері.

Натомість запропонований H_{∞} -контролер, завдяки структурному введенню штрафних фільтрів $W_1(s)$ та W_2 , зберігає аперіодичність перехідних

процесів на всьому діапазоні параметричної невизначеності. Він повністю усуває перерегулювання на старті та демонструє допустиме значення динамічного відхилення при реакції на тінь. Плавне, алгоритмічно обмежене наростання керуючого сигналу унеможливорює стрімкі зростання струму, що позитивно впливає на подовження ресурсу апаратної частини системи.

Таким чином, результати моделювання кількісно підтверджують, що алгоритмічне обмеження інтенсивності керування на етапі H_∞ -синтезу є ефективним інженерним рішенням, яке гарантує якісне відпрацювання збурень навіть за умов критичної деградації об'єкта.

Висновки

В результаті проведених досліджень розв'язано актуальну науково-практичну задачу стабілізації та підвищення енергоефективності систем автоматичного керування промисловим освітленням. За підсумками виконаної роботи сформульовано такі основні висновки:

1. Встановлено, що формалізація експлуатаційної деградації оптичного середовища (заплення лінз, старіння світлодіодів) та зростання інерційності апаратури у вигляді мультиплікативної параметричної невизначеності дозволяє з високою точністю математично охопити найгірші сценарії роботи об'єкта. Це створює надійну базу для проектування робастних систем, нечутливих до зношення обладнання.

2. Доведено високу ефективність застосування розширеної задачі змішаної чутливості ($S/KS/T$) безпосередньо для систем світлодіодного освітлення. З'ясовано, що цілеспрямоване введення частотно-залежного штрафного фільтра на зусилля керування є інженерно необхідним: воно обмежує швидкість наростання керуючого сигналу та гарантує захист силових компонентів LED-драйвера від небезпечних струмових сплесків.

3. В результаті розв'язання системи матричних рівнянь Ріккати отримано субоптимальний робастний H_∞ -контролер. Аналіз його передавальної функції підтвердив, що оптимізоване розташування полюсів та нулів забезпечує системі одночасно властивості астазису (відпрацювання заданого рівня без статичної похибки) та робастну стійкість до високочастотних вимірвальних шумів сенсора.

4. За результатами порівняльного комп'ютерного моделювання виявлено, що класичний ПД-регулятор за умов параметричної деградації втрачає запас стійкості, генеруючи значне перерегулювання та провокуючи шкідливий для зору флікер-ефект. Натомість підтверджено, що застосування синтезованого H_∞ -контролера дозволяє повністю усунути перерегулювання на всьому діапазоні параметричної невизначеності та плавно нівелювати вплив раптових зовнішніх збурень (тіней), стабільно забезпечуючи нормативний зоровий комфорт та високу загальну енергоефективність системи.

Перелік використаних джерел

- [1] Advancing smart lighting: a developmental approach to energy efficiency through brightness adjustment strategies / Widartha V. P., Ra I., Lee S. Y., Kim C. S. *Journal of Low Power Electronics and Applications*. 2024. Vol. 14. Article 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/jlpea14010006>.
- [2] Information system of street lighting control in a smart city / Vaskiv R. I., Hrybovskiy O. M., Kunanets N. E., Duda O. M. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2024. No. 3. Article 212. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-3-18>.
- [3] Internet of Things-Based LED Driver Switch Mode Power Supply (SMPS) Monitoring System / W. Widjonarko et al. *Proceedings of the International Conference on Recent Innovations in Sustainable Engineering Solutions 2025 (ICONRISES 2025)*, Jember, Indonesia, 12–13 September 2025. Pp. 227–242. DOI: https://doi.org/10.2991/978-94-6463-920-9_23.
- [4] Sorokin A., Chaikin M. Microcontroller-based intelligent lighting control system with adaptation to environmental conditions. *Control, Navigation and Communication Systems*. 2025. Vol. 4, no. 82. Pp. 134–137. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.4.134>.
- [5] Weijiang Z. Design of tunnel illumination control system with solar energy. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 173. Article 02003. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817302003>.
- [6] Real-Time Lighting Control System for Smart Home Applications / Budianto D., Nurmaini S., Tutuko B., Rafflesia S. P. *Computer Engineering and Applications Journal*. 2018. Vol. 7, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.18495/comengapp.v7i3>.
- [7] Villar J. R., de la Cal E., Sedano J., García M. Evaluating the low quality measurements in lighting control systems. *Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications, 5th International Workshop (SOCO 2010)*, Guimarães, Portugal, 16 June 2010. Pp. 119–126. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-13161-5_16.
- [8] Visible light communications for sensing and lighting control / Warmerdam K., Pandharipande A., Caicedo D., Zuniga M. *IEEE Sensors Journal*. 2016. Vol. 16, no. 17. Pp. 6718–6726. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2585199>.
- [9] Robust Control using Sliding Mode Controller for SEPIC DC/DC Converter / Nurwati T., Hasanah R. N., Djuriatno W., Ardhenta L. *Engineering Letters*. 2025. Vol. 33, no. 12. Pp. 5308–5314.
- [10] Pasupuleti M. K. Model Predictive Control for Smart HVAC Systems in Green Buildings. *International Journal of Academic and Industrial Research Innovations (IJAIRI)*. 2025. Vol. 5. Pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.62311/nesx/rphcrefcs1>.
- [11] Tarragona J., Gangoellés M., Casals M. Model predictive control for managing indoor air quality levels in

- buildings. *Energy Reports*. 2024. Vol. 12. Pp. 787-797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.06.053>.
- [12] Model predictive control lowers barriers to adoption of heat-pump water heaters: A field study / L. D. R. Premer et al. *Energy Conversion and Management*. 2026. Vol. 348. Article 120723. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120723>.
- [13] Baklanov A., Grigoryeva S., Györök G. Control of led lighting equipment with robustness elements. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2016. Vol. 13, no. 5. Pp. 105-119. DOI: <https://doi.org/10.12700/APH.13.5.2016.5.6>.
- [14] Sedehi A., Alfi A., Mirjafari M. Low-order Robust Controller for DC-DC Quadratic Buck Converter: Design and Implementation. *Journal of AI and Data Mining*. 2024. Vol. 12, no. 1. Pp. 15-25. DOI: <https://doi.org/10.22044/jadm.2024.13584.2475>.
- [15] Smart search implemented h-infinity control design for dab converter in dc microgrid / Liu Z., Ebrahimi J., Narm H. G., Eren S. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2024. Vol. 12, no. 2. Pp. 1906-1920. DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2024.3351130>.
- [16] Robust decentralized voltage control for uncertain DC microgrids / Shafiee-Rad M., Sadabadi M. S., Shafiee Q., Jahed-Motlagh M. R. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021. Vol. 125. Article 106468. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106468>.

SYNTHESIS OF A ROBUST SYSTEM FOR AUTOMATIC CONTROL OF ENERGY-EFFICIENT LIGHTING UNDER CONDITIONS OF PARAMETRIC UNCERTAINTY

Plieshkov P.H.	PhD (Engineering), professor, Central Ukrainian National Technical University Kropyvnytskyi, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2141-4811 , e-mail: kafedra.etsem@gmail.com ;
Zinzura V.V.	PhD (Engineering), associate professor, Central Ukrainian National Technical University Kropyvnytskyi, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6357-064X , e-mail: vasiliyinzura@gmail.com ;
Petrova K.H.	PhD (Engineering), associate professor, Central Ukrainian National Technical University Kropyvnytskyi, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1928-6833 , e-mail: kateflash27@gmail.com ;
Harasova N.Yu.	PhD (Engineering), associate professor, Central Ukrainian National Technical University Kropyvnytskyi, м. Кропивницький, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3609-4681 , e-mail: ngarasova@gmail.com ;
Soldatenko V.P.	PhD (Engineering), associate professor, Central Ukrainian National Technical University Kropyvnytskyi, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7781-9343 , e-mail: kirovograd41@gmail.com

The article solves the current scientific and practical problem of ensuring the stability and energy efficiency of automatic industrial lighting systems. Under conditions of long-term operation, parametric degradation of the optical medium and temperature aging of LED components occur. This leads to a significant decrease in the quality of transient processes when using classical proportional-integral-differential regulators, the occurrence of overregulation and flickering of light harmful to the eyesight of workers. The purpose of this study is to develop an algorithm for robust control of the industrial LED lighting system based on the synthesis apparatus to ensure stable regulatory indicators of visual comfort under conditions of operational degradation of equipment and the action of uncontrolled external disturbances. To achieve the set goal, a mathematical synthesis apparatus was applied within the framework of an extended mixed sensitivity problem. A system of weighting filters was formed that provide the system with astaticity and robust resistance to high-frequency noise. Finding the suboptimal controller was carried out by solving a system of algebraic matrix Riccati equations in the state space. The results of computer simulation confirmed the significant advantage of the proposed method. It was established that under conditions of parametric degradation, the classical controller allows a significant level of overshoot, while the synthesized robust controller eliminates overshoot and stably maintains the regulatory level of illumination. The scientific novelty of the study lies in the justification and application of the robust synthesis method with direct penalty of the control effort directly for LED lighting systems, which makes sharp current surges in the drivers impossible. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of implementing the algorithm in industrial microcontrollers to ensure high visual comfort, optimize energy consumption and extend the service life of the equipment. Further research in this direction should be focused on integrating the developed algorithm with fuzzy logic methods to create hybrid adaptive smart lighting control systems.

Keywords: *robust control; energy-efficient lighting; parametric uncertainty; mixed sensitivity; proportional-integral-differential controller; industrial LED systems.*

References

- [1] V. P. Widartha, I. Ra, S. Y. Lee, and C. S. Kim, "Advancing smart lighting: a developmental approach to energy efficiency through brightness adjustment strategies," *Journal of Low Power Electronics and Applications*, vol. 14, article 6, 2024. doi: [10.3390/jlpea14010006](https://doi.org/10.3390/jlpea14010006).
- [2] R. I. Vaskiv, O. M. Hrybovskiy, N. E. Kunanets, and O. M. Duda, "Information system of street lighting control in a smart city," *Radio Electronics, Computer Science, Control*, no. 3, article 212, 2024. doi: [10.15588/1607-3274-2024-3-18](https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-3-18).
- [3] W. Widjonarko et al, "Internet of Things-Based LED Driver Switch Mode Power Supply (SMPS) Monitoring System," in *Proc. of the Int. Conf. on Recent Innovations in Sustainable Engineering Solutions 2025 (ICONRISES 2025)*, Jember, Indonesia, September 12–13, 2025, pp. 227-242. doi: [10.2991/978-94-6463-920-9_23](https://doi.org/10.2991/978-94-6463-920-9_23).
- [4] A. Sorokin, and M. Chaikin, "Microcontroller-based intelligent lighting control system with adaptation to environmental conditions," *Control, Navigation and Communication Systems*, vol. 4, no. 82, pp. 134-137, 2025. doi: [10.26906/SUNZ.2025.4.134](https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.4.134).
- [5] Z. Weijiang, "Design of tunnel illumination control system with solar energy," *MATEC Web of Conferences*, vol. 173, article 02003, 2018. doi: [10.1051/mateconf/201817302003](https://doi.org/10.1051/mateconf/201817302003).
- [6] D. Budianto, S. Nurmaini, B. Tutuko, and S. P. Rafflesia, "Real-Time Lighting Control System for Smart Home Applications," *Computer Engineering and Applications Journal*, vol. 7, no. 3, 2018. doi: [10.18495/comengapp.v7i3](https://doi.org/10.18495/comengapp.v7i3).
- [7] J. R. Villar, E. de la Cal, J. Sedano, and M. García, «Evaluating the low quality measurements in lighting control systems», in *Proc. of the Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications, 5th International Workshop (SOCO 2010)*, Guimarães, Portugal, June 16, 2010, pp. 119-126, 2010. doi: [10.1007/978-3-642-13161-5_16](https://doi.org/10.1007/978-3-642-13161-5_16).
- [8] K. Warmerdam, A. Pandharipande, D. Caicedo, and M. Zuniga, «Visible light communications for sensing and lighting control», *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 17, pp. 6718-6726, 2016. doi: [10.1109/JSEN.2016.2585199](https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2585199).
- [9] T. Nurwati, R. N. Hasanah, W. Djurianto, and L. Ardenta, "Robust Control using Sliding Mode Controller for SEPIC DC/DC Converter," *Engineering Letters*, vol. 33, no. 12, pp. 5308-5314, 2025.
- [10] M. K. Pasupuleti, "Model Predictive Control for Smart HVAC Systems in Green Buildings," *International Journal of Academic and Industrial Research Innovations (IJAIRI)*, vol. 5, pp. 1-11, 2025. doi: [10.62311/nex/rphcrefcs1](https://doi.org/10.62311/nex/rphcrefcs1).
- [11] J. Tarragona, M. Gangoellis, and M. Casals, "Model predictive control for managing indoor air quality levels in buildings," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 787–797, 2024. doi: [10.1016/j.egyr.2024.06.053](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.06.053).
- [12] L. D. R. Premer, E. N. Pergantis, L. Semmelmann, D. Ziviani, and K. J. Kircher, "Model predictive control lowers barriers to adoption of heat-pump water heaters: A field study," *Energy Conversion and Management*, vol. 348, article 120723, 2026. doi: [10.1016/j.enconman.2025.120723](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120723).
- [13] A. Baklanov, S. Grigoryeva, and G. Györök, "Control of led lighting equipment with robustness elements," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 13, no. 5, pp. 105-119, 2016. doi: [10.12700/APH.13.5.2016.5.6](https://doi.org/10.12700/APH.13.5.2016.5.6).
- [14] A. Sedehi, A. Alfi, and M. Mirjafari, "Low-order Robust Controller for DC-DC Quadratic Buck Converter: Design and Implementation," *Journal of AI and Data Mining*, vol. 12, no. 1, pp. 15-25, 2024. doi: [10.22044/jadm.2024.13584.2475](https://doi.org/10.22044/jadm.2024.13584.2475).
- [15] Z. Liu, J. Ebrahimi, H. G. Narm, and S. Eren, "Smart search implemented h-infinity control design for dab converter in dc microgrid," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 12, no. 2, pp. 1906-1920, 2024. doi: [10.1109/JESTPE.2024.3351130](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2024.3351130).
- [16] M. Shafiee-Rad, M. S. Sadabadi, Q. Shafiee, and M. R. Jahed-Motlagh, "Robust decentralized voltage control for uncertain DC microgrids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 125, article 106468, 2021. doi: [10.1016/j.ijepes.2020.106468](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106468).

Стаття надійшла 15.02.2026

Стаття прийнята 13.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Синтез робастної системи автоматичного керування енергоефективним освітленням в умовах параметричної невизначеності / П. Г. Плешков та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2026. Вип. 53, том 2. С. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359895>.