

НОЗДРЕНКОВ ВАЛЕРІЙ СТАНІСЛАВОВИЧ ✉ – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри комп'ютерних наук та системного аналізу, Черкаський державний технологічний університет; м. Черкаси, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0579-6821>; e-mail: v.s.nozdrenkov.d24@chdtu.edu.ua.

ПАВЛОВ АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління, Сумський державний університет, м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8861-8472>; e-mail: a.pavlov@ksu.sumdu.edu.ua.

ОЛЕКСІЄНКО ГАЛИНА АНДРІЇВНА – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0274-5095>; e-mail: galyana2@ukr.net.

ЖУРАВЛЬОВ ОЛЕКСАНДР ЮРІЙОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри комп'ютеризованих систем управління, Сумський державний університет, м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7834-6661>; e-mail: san.75@i.ua.

ПЕТРОВСЬКИЙ МИХАЙЛО ВАСИЛЬОВИЧ – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, Сумський державний університет; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0387-3136>; e-mail: m.petrovskiy@etech.sumdu.edu.ua.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ БЕЗІНЕРЦІЙНИМ ДЖЕРЕЛОМ ОСВІТЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ІОТ-ТЕХНОЛОГІЙ

У статті розглянуто підхід до енергоефективного керування безінерційними світлодіодними джерелами освітлення, інтегрованими в локальну інформаційно-керуючу мережу на основі технологій Інтернету Речей. Показано, що світлодіоди, як безінерційні об'єкти, миттєво реагують на зміни керуючого сигналу, тому у разі наявності шумів сенсора та стохастичних затримок передавання даних у мережі виникає нестійка динаміка освітленості, мерехтіння та зниження комфортності сприйняття світлового середовища. Для усунення зазначених недоліків запропоновано алгоритм стабілізації світлового потоку, що ґрунтується на методі прямого порівняння виміряного значення освітленості з уставкою з подальшим удосконаленням регулювання за рахунок фільтра низьких частот та інтегруючої ланки. Такий підхід дозволяє одночасно пригнічувати шумові компоненти, компенсувати статичну похибку, підвищувати плавність перехідних процесів і зменшувати вплив затримок у каналах зв'язку. Алгоритм реалізовано у серверній частині системи за допомогою Node-RED з використанням мови JavaScript, що забезпечує можливість адаптації параметрів регулятора, ведення архівів і передачу керуючих дій на модуль Інтернету Речей через протокол ModBus TCP. Останній формує сигнали широтно-імпульсної модуляції для світлодіодного освітлювача та забезпечує апаратну частину керування. Для оцінювання роботи алгоритму створено модель у MATLAB Simulink, яка враховує нелінійні спотворення сенсора, зовнішні збурення, випадкові мережеві затримки та безінерційність світлодіодного пристрою. Результати моделювання демонструють стійку роботу системи, відсутність мерехтіння, плавну динаміку регулювання та незначну статичну похибку. Імплементация на реальному стенді підтвердила ефективність запропонованого підходу та його придатність до впровадження в системах автоматизованого керування освітленням у побутових, комерційних і виробничих приміщеннях.

Ключові слова: світлодіодне освітлення (LED); безінерційний об'єкт; стабілізація освітленості; енергоефективне керування; Інтернет Речей (IoT); ModBus TCP; ШІМ-регулювання; фільтр низьких частот; І-регулятор; MATLAB Simulink; автоматизація освітлення.

Вступ. Світлодіодні (LED) джерела освітлення сьогодні є ключовими елементами енергоефективних систем, оскільки забезпечують високий коефіцієнт корисної дії, низьке енергоспоживання та можливість гнучкого керування світловим потоком. У багатьох прикладних задачах – від освітлення робочих просторів до автоматизованих систем Smart Lighting – виникає потреба у стабільному рівні освітленості, адаптованому до зовнішніх умов та вимог користувача. Однак побудова стійкого контуру керування освітленням у реальних умовах експлуатації залишається складним технічним завданням, насамперед через фізичні та інформаційні особливості LED-пристроїв та мережевих середовищ.

Світлодіодні освітлювачі є безінерційними об'єктами: зміна керуючого впливу миттєво відображається на світловому потоці. У системах зі зворотним зв'язком це часто спричиняє підсилення випадкових флуктуацій, шумів вимірювань та збурень, що надходять з боку сенсорів або мережі. Навіть невеликі завади можуть породжувати швидкі хаотичні

коливання, які сприймаються як мерехтіння – критично небажаний ефект у більшості практичних застосувань. Додаткову складність створюють властивості локальних інформаційно-керуючих мереж, на яких базуються сучасні рішення Інтернету Речей (IoT). У таких системах виміряні значення освітленості та керуючі команди передаються через канали, що характеризуються стохастичними затримками, нерівномірністю надходження пакетів і можливими короткочасними втратами з'єднання. За таких умов стандартні методи регулювання, які не враховують мережеві ефекти, починають демонструвати нестабільну роботу, зтяжні перехідні процеси або помітну статичну похибку. Особливо проблемними є ситуації, коли затримка отримання даних порівняна з частотою зміни світлового сигналу.

Урахування цих особливостей вимагає застосування спеціалізованих алгоритмів, здатних забезпечити стійке керування світловим потоком у шумових та непередбачуваних умовах мережевої взаємодії. Актуальним є вибір методів, які дозволяють

© В. С. Ноздренков, А. В. Павлов, Г. А. Олексієнко, О. Ю. Журавльов, М. В. Петровський, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

одночасно пригнічувати високочастотні шуми сенсорного каналу, компенсувати статичну похибку та формувати плавну та передбачувану реакцію системи на зміну уставки. Особливої уваги заслуговує поєднання фільтруючих та інтегруючих ланок у дискретній реалізації, що забезпечує адаптацію системи до характеру її динаміки – швидкої реакції LED та нестабільності мережі.

Запропонований у роботі підхід спрямований на створення енергоефективної системи керування світлодіодним освітленням, здатної забезпечити стабільність світлового потоку й відсутність мерехтіння у широкому діапазоні реальних умов роботи. Робота поєднує теоретичне моделювання, серверну реалізацію та аналіз перехідних процесів, що дозволяє комплексно оцінити якість регулювання та стійкість системи.

Мета статті. Метою даної наукової статті є розробка, аналітичне обґрунтування та практична реалізація методу стабілізації світлового потоку безінерційних світлодіодних джерел освітлення у системах зі зворотним зв'язком, що функціонують на основі IoT-технологій та характеризуються стохастичними затримками передавання даних і зашумленню сенсорних сигналів. У межах дослідження передбачається формалізація LED-освітлювача як безінерційного об'єкта керування, побудова математичної моделі процесу регулювання, а також дослідження впливу мережевих та вимірвальних завдань на динаміку системи.

Особлива увага приділена синтезу дискретного алгоритму керування, що комбінує метод прямого порівняння вимірної освітленості з уставкою, фільтрацію високочастотних шумів та інтегруючу корекцію для усунення статичної похибки. Такий підхід дозволяє компенсувати миттєву реакцію світлодіодного освітлювача на флуктуації сигналу та забезпечити плавні перехідні процеси навіть за умов нестабільного інформаційно-керуючого середовища.

У роботі також розглядається серверно-клієнтська архітектура реалізації системи на базі платформи Node-RED із використанням промислового протоколу ModBus TCP, що забезпечує масштабованість, надійність обміну даними та узгодженість між програмним алгоритмом і апаратним модулем формування сигналів широтно-імпульсної модуляції (ШИМ). Розроблений метод проілюстровано за допомогою моделювання у MATLAB Simulink, результати якого дозволяють оцінити стійкість системи, форму перехідних процесів, шумостійкість та ефективність регулятора у різних режимах роботи.

Отримані результати мають прикладну цінність для впровадження у системах автоматизованого керування освітленням у побутових, комерційних та виробничих приміщеннях, де необхідна висока якість регулювання, відсутність мерехтіння та енергоефективність у поєднанні з можливістю інтеграції у сучасну IoT-інфраструктуру.

Огляд літературних джерел. Проблематика штучного освітлення активно досліджується у світлотехнічній літературі, зосереджуючись на

параметрах інтенсивності, кольоровості та пульсаціях світлового потоку, а також на їх впливі на зорову діяльність та фізіологічний стан людини. У роботі [1] показано, що неприродні режими освітлення у темний період доби можуть спричинити порушення циркадних ритмів через пригнічення секреції мелатоніну. Авторами запропоновано концепцію циркадного освітлення, яка передбачає підбір кольорової температури та спектру світла залежно від виду діяльності та добового циклу користувача. Це формує запит на створення систем керування, здатних динамічно змінювати параметри світла відповідно до фізіологічних вимог.

У статті [2] розглянуто побудову RGB-систем освітлення, що імітують зміну спектрального складу сонячного світла протягом доби. Наведені оптимальні співвідношення компонент RGB для різних часових інтервалів, що дозволяє підвищити комфортність освітлення в приміщенні. Дослідження підкреслює важливість колірної складової освітленості, проте не розглядає питання стійкості керування та реакції системи на флуктуації сенсорних даних.

У роботі [3] проведено аналіз нормативних документів, що регламентують вимоги до світлотехнічних характеристик LED-світильників. Автори акцентують на важливості жорсткіших вимог до кольориметричних параметрів та методів їх вимірювання, зокрема точності передавання кольорів і колірної температури. Це важливо для систем, де освітленість регулюється автоматично, оскільки коливання світлового потоку можуть призводити до помітного відхилення від нормативних значень.

Огляд [4] детально аналізує вплив спектрального розподілу потужності джерел світла на зорову продуктивність у мезопічних умовах. Порівняння різних типів ламп демонструє значну роль спектру у суб'єктивному сприйнятті яскравості, що підкреслює актуальність точного керування параметрами LED-освітлювачів у широкому діапазоні умов.

Дослідження систем зниження яскравості та підтримання сталої освітленості наведено у статті [5]. Автори показують, що існує помітна різниця між заданим рівнем освітленості та фактичною величиною в зоні виконання візуальних завдань, навіть при наявності системи автоматичного регулювання. Це підтверджує необхідність корекції зворотного зв'язку і вдосконалення алгоритмів керування.

Роботи [6, 7] досліджують моделі освітлення, які поєднують денне світло та штучні джерела, розробляючи контролери на основі штучних нейронних мереж і методів прогнозування. Експериментальні результати демонструють значну економію електроенергії при збереженні параметрів комфорту користувача. Однак більшість моделей орієнтовані на інерційні системи або комбіновані режими освітлення і не враховують особливості безінерційних LED-пристроїв, які реагують на зміну сигналу миттєво.

У публікації [8] розглянуто питання оцінки потенційної енергоефективності систем керування освітленням перед їх впровадженням. Авторами

визначено залежності між зовнішньою та внутрішньою освітленістю, що дає змогу оцінити можливості зменшення енергоспоживання. Проте мережеві аспекти реалізації таких систем залишаються поза увагою.

Інша група робіт [9–15] стосується методів моніторингу та діагностики мережевої інфраструктури, яка є важливою складовою для будь-якої системи автоматизації, зокрема й освітлення. Запропоновані методи охоплюють автоматичний аналіз мережевого трафіку, виявлення аномалій, передбачення та локалізації збоїв на основі машинного навчання, аналізу логів та моделей Петрі. Ці дослідження демонструють важливість врахування стану мережевої інфраструктури для коректної роботи систем керування, але не аналізують її вплив на стабільність світлового потоку LED-пристроїв.

Узагальнюючи розглянуті джерела, можна зробити висновок, що значна кількість досліджень зосереджена на покращенні візуального комфорту, енергоефективності та якості параметрів освітлення. Однак комплексні підходи, що поєднують характеристики світлодіодних джерел, поведінку сенсорних каналів та вплив мережевих затримок у системах зі зворотним зв'язком, досліджені недостатньо. Це визначає необхідність розроблення алгоритмів керування, здатних забезпечити стабільний світловий потік у реальних умовах роботи IoT-систем.

Опис причинно-наслідкових зв'язків в об'єкті керування. Світлодіодні джерела освітлення сьогодні займають провідні позиції серед штучних джерел світла, що зумовлено їх значними експлуатаційними перевагами. До них належать висока довговічність, низьке енергоспоживання, екологічна безпечність, стійкість до змін температури та напруги, якість передавання кольору, механічна надійність та широкий спектр можливостей регулювання. Саме ці властивості роблять LED-прилади базовими елементами сучасних інтелектуальних систем освітлення.

Однак у контексті автоматичного керування світловим потоком з використанням зворотного зв'язку виникає низка специфічних труднощів, пов'язаних як з фізичними особливостями світлодіодів, так і з характеристиками інформаційно-керуючої інфраструктури. Найважливішою рисою LED-освітлювачів є їх безінерційність. На відміну від традиційних джерел світла, світлодіод практично миттєво реагує на зміну керуючого сигналу. Така реакція є корисною для високошвидкісних систем, але створює проблеми у замкнених контурах, де найменші флуктуації вимірюваного сигналу викликають пропорційні коливання світлового потоку. У результаті система стає надмірно чутливою до шумів і може демонструвати ефект мерехтіння, навіть якщо середня яскравість залишається стабільною.

Другим важливим фактором є нелінійність залежності між робочим струмом LED і світловим потоком. У більшості випадків ця залежність є близькою до лінійної в певному діапазоні, однак за його межами характеристика має виражену нелінійність. В умовах автоматичного керування це

може призводити до зміни коефіцієнтів підсилення системи залежно від робочої точки. У разі використання дискретного або пропорційного регулювання це проявляється у вигляді нерівномірної динаміки: швидкої реакції в одних режимах і надмірної чутливості або затримок в інших.

Третя група проблем пов'язана з інформаційно-керуючими каналами, через які передаються значення освітленості та керуючі сигнали. Мережеві IoT-системи за своєю природою схильні до шумів, випадкових затримок, втрати пакетів і нерегулярності надходження даних. У таких умовах виміряне сенсором значення освітленості може значно відхилитися від актуального на момент прийняття рішення, що призводить до хибної оцінки стану об'єкта керування. Враховуючи безінерційність LED-приладу, навіть невеликі інформаційні затримки можуть спричинити суттєві коливання вихідного світлового потоку або розбалансування контуру.

Сукупність зазначених факторів формує складну причинно-наслідкову динаміку. Миттєва реакція LED-приладу посилює вплив шумів сенсора; нелінійність «струм – світловий потік» змінює характеристики системи залежно від режиму роботи; мережеві затримки порушують узгодженість між фактичним і вимірним значенням. Усе це ускладнює реалізацію стійкого замкненого регулювання освітленості на основі уставочного значення, що потребує спеціального алгоритмічного підходу та ретельного урахування властивостей об'єкта.

У подальших розділах буде розглянуто процес стабілізації світлового потоку із застосуванням сенсора освітленості в контурі зворотного зв'язку та детально проаналізовано, яким чином зазначені причинно-наслідкові зв'язки впливають на якість регулювання.

Опис світлодіодного освітлювача як об'єкта керування. Ключовою особливістю світлодіода є те, що його світловипромінювання виникає у момент пропускання робочого струму через p-n перехід, а величина світлового потоку визначається значенням струму. Оскільки керування світлодіодом у практичних системах здійснюється за допомогою ШІМ-сигналу, діюче значення якого є еквівалентом середнього значення струму, яскравість випромінювання безпосередньо залежить від параметрів ШІМ-керування. Такий зв'язок добре ілюструє залежність між світловим потоком і струмом світлодіода (рис. 1).

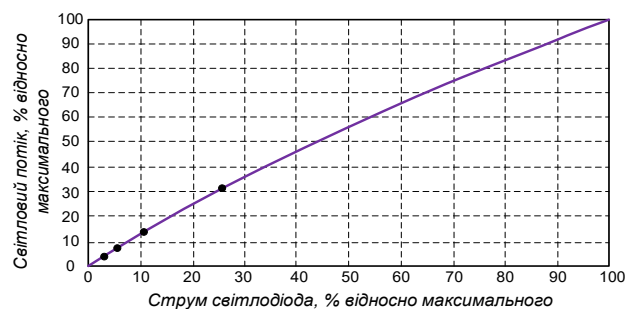


Рисунок 1 – Залежність світлового потоку світлодіода від струму

Детальний аналіз наведеної характеристики показує, що у робочому діапазоні світлодіод може бути апроксимований лінійною залежністю «струм – світловий потік». Це дає змогу розглядати LED-прилад як лінійну безінерційну ланку, яку можна описувати простою передатною функцією без урахування часової інерції. Додатковим підтвердженням можливості такої лінеаризації є використання саме ШІМ-керування, оскільки середня потужність і середній струм при імпульсній модуляції змінюються практично лінійно відносно коефіцієнта заповнення.

Враховуючи ці властивості, стає очевидно, що основні труднощі замкненої системи керування освітленістю пов'язані не з поведінкою самого LED-приладу, а з особливостями каналу зворотного зв'язку. Шумові процеси, нерівномірність надходження даних, затримки передачі та інші мережеві ефекти спотворюють виміряне значення освітленості. Оскільки світлодіод, як безінерційний об'єкт, реагує на зміни керуючого сигналу миттєво, будь-які флуктуації даних сенсора одразу перетворюються на зміни світлового потоку. Це призводить до розхитування всієї системи, появи мерехтіння та помітного погіршення якості освітлення.

Моделювання процесу керування освітленням.

Оцінимо особливості перехідних процесів у системі керування освітленням, використовуючи, як основний алгоритм регулювання, метод прямого порівняння вихідної освітленості з уставочним значенням (П-метод). У такому підході керуючий вплив формується на основі різниці між виміряною яскравістю приміщення, поданою у відсотках від максимально можливого значення відповідного освітлювача, та заданим рівнем освітленості. На рис. 2 наведена структурна схема Matlab/Simulink-моделі, де виділено три ключові підсистеми.

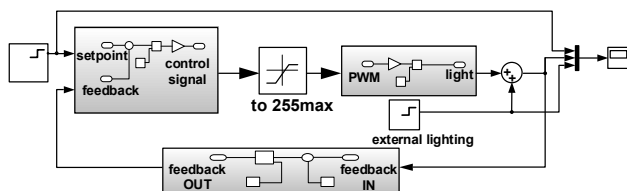


Рисунок 2 – Matlab/Simulink-модель для керування освітленням за методом прямого порівняння вихідного значення освітленості приміщення з уставочним значенням

Перша підсистема (рис. 3 а) забезпечує перетворення ШІМ-сигналу у світловий потік. Вона моделює процес, у якому коефіцієнт заповнення імпульсного сигналу визначає середнє значення струму світлодіода, а отже і яскравість випромінювання. Такий опис дозволяє відтворити характерну безінерційність LED-приладу, який миттєво реагує на будь-які зміни керуючого впливу.

Друга підсистема (рис. 3 б) реалізує алгоритм прямого порівняння фактичної освітленості з уставочним значенням. На основі цього порівняння формується керуючий сигнал, який визначає необхідну зміну ШІМ-параметра. Такий підхід відображає роботу пропорційного регулятора, здатного швидко реагувати

на відхилення, але водночас чутливого до коливань і нерівномірності сигналів зворотного зв'язку.

Третя підсистема (рис. 3 в) моделює шумові процеси та стохастичні затримки, характерні для реального сенсорного каналу. Вона враховує спотворення вимірювань та випадкові інтервали надходження даних, що дозволяє оцінити поведінку системи в умовах, максимально наближених до практичних. Саме ця модельна складова показує, наскільки нестабільність зворотного зв'язку впливає на коливання світлового потоку та загальну якість регулювання.

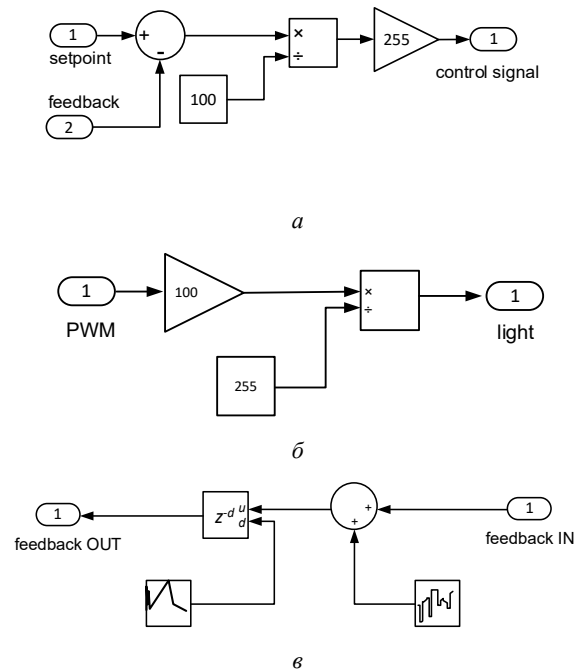


Рисунок 3 – Підсистеми Matlab/Simulink-моделі керування

У сукупності ці підсистеми дають змогу відтворити повний цикл керування освітленням і дослідити, як взаємодія між LED-приладом, алгоритмом регулювання та каналом передачі даних формує динаміку перехідних процесів

Аналіз графіка перехідного процесу (рис. 4) показує, що вихідний сигнал містить значну шумову складову, яка виникає через флуктуації даних зворотного зв'язку. За таких умов стає очевидною необхідність застосування додаткової фільтрації. Оптимальним рішенням є включення до структури керування фільтра низьких частот з передатною функцією $W_f(p) = 1/(T_\mu p + 1)$, де T_μ визначає часове згладжування та фактично задає ширину смуги пропускання аперіодичної ланки (рис. 5). Застосування такого фільтра дозволяє пригнічувати високочастотні шумові складові та суттєво покращує плавність реакції системи. Відповідний графік перехідного процесу наведено на рис. 6, з якого видно, що доданий фільтр низьких частот зі сталою часу $T_\mu = 0.3$ (сек) значно покращив результат, подавивши основну шумову складову та зробивши процес коригування освітлення плавним, що гарно вплине на його сприйняття споживачем. Однак з'явилась статична похибка у

вихідному сигналі, що на практиці виглядатиме як недостатнє освітлення приміщення.

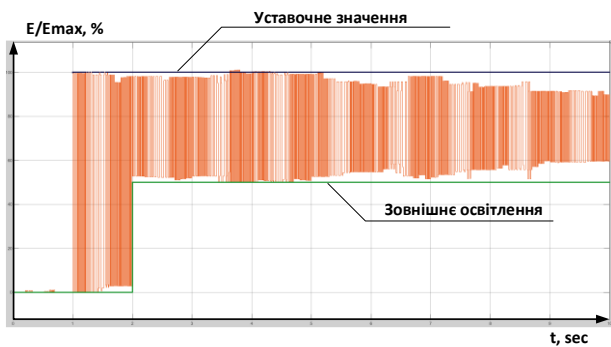


Рисунок 4 – Результат моделювання керування освітленням за методом прямого порівняння вихідного значення освітленості приміщення з уставочним значенням

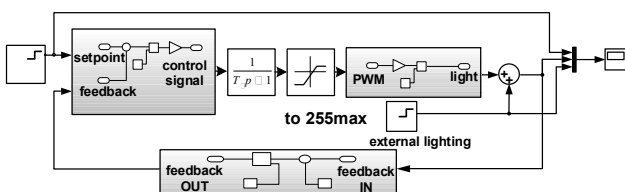


Рисунок 5 – Matlab/Simulink-модель з відповідними підсистемами для керування освітленням за методом прямого порівняння вихідного значення освітленості приміщення з уставочним значенням та послідовним фільтром низьких частот

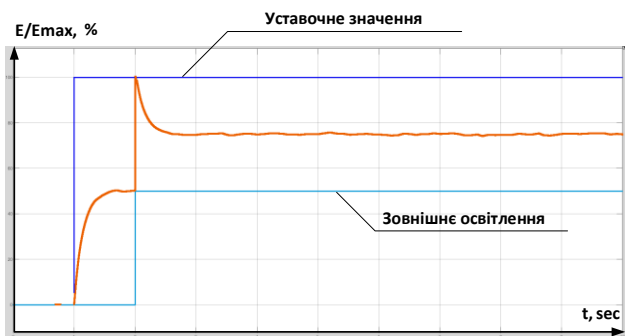


Рисунок 6 – Результат моделювання керування освітленням за методом прямого порівняння вихідного значення освітленості приміщення з уставочним значенням та послідовним фільтром низьких частот

Усунення виявленої статичної похибки не становить особливих труднощів, оскільки вона виникає через те, що система має нульовий ступінь астатизму і не здатна автоматично компенсувати постійне відхилення між уставкою та фактичним значенням освітленості. Найпростішим і водночас найбільш ефективним способом підвищення астатизму є введення інтегруючої ланки, яку послідовно підключають після фільтра низьких частот. Така ланка накопичує різницю між заданим і вимірним сигналом і поступово коригує керуючий вплив доти, доки відхилення не буде повністю усунуте. Іншими словами, система переходить у режим роботи з інтегральною складовою, що відповідає використанню інтегрального (I) регулятора.

Завдяки цьому підходу навіть за наявності фільтрації, яка частково згладжує сигнал і може створювати затримку в досягненні уставки, система все одно точно виходить на потрібний рівень освітленості. Інтегруюча дія компенсує залишкові похибки, забезпечує автоматичну корекцію і робить перехідний процес більш передбачуваним. Як показують результати моделювання, наведені на рис. 6 і 7, додавання I-регулятора дозволяє зберегти плавність регулювання і водночас забезпечує повне досягнення заданого рівня освітленості без коливань і перерегулювання.

Завдяки цьому підходу навіть за наявності фільтрації, яка частково згладжує сигнал і може створювати затримку в досягненні уставки, система все одно точно виходить на потрібний рівень освітленості. Інтегруюча дія компенсує залишкові похибки, забезпечує автоматичну корекцію і робить перехідний процес більш передбачуваним. Як показують результати моделювання, наведені на рис. 7 і 8, додавання I-регулятора дозволяє зберегти плавність регулювання і водночас забезпечує повне досягнення заданого рівня освітленості без коливань і перерегулювання. Графік на рис. 8 демонструє роботу системи після включення I-регулятора, встановленого послідовно за фільтром низьких частот. Як видно з результатів моделювання, перехідний процес повністю позбавлений недоліків, які спостерігалися на попередніх етапах. Динаміка зміни освітленості стала плавною і стабільною, без шумових коливань та затяжних перерегулювань. Така поведінка системи відповідає вимогам комфортного сприйняття освітлення людиною і забезпечує якість регулювання, прийнятну для практичного використання.

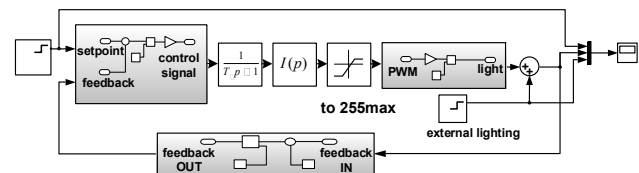


Рисунок 7 – Matlab/Simulink-модель з відповідними підсистемами для керування освітленням за методом прямого порівняння вихідного значення освітленості приміщення з уставочним значенням та послідовним фільтром низьких частот, а також I-регулятором

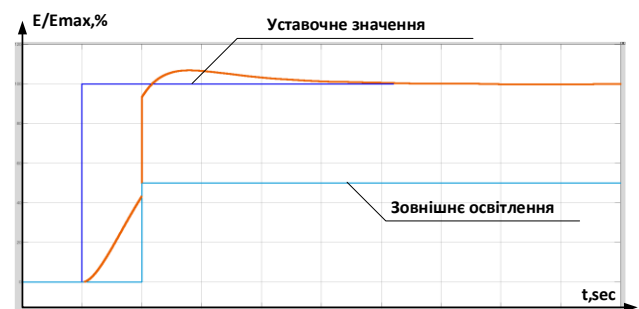


Рисунок 8 – Результат моделювання керування освітленням за методом прямого порівняння вихідного значення освітленості приміщення з уставочним значенням та послідовним фільтром низьких частот

Після отримання позитивних результатів моделювання постала необхідність перевірити роботу алгоритму у реальних умовах. Для цього було створено стенд, призначений для апробації та налаштування основних підсистем системи керування освітленням. Його структура наведена на рис. 9, де показано взаємне розташування та функціональні зв'язки ключових елементів. Такий стенд дозволив оцінити працездатність алгоритму, врахувати особливості реальних сенсорних сигналів та перевірити стійкість системи під дією зовнішніх збурень.

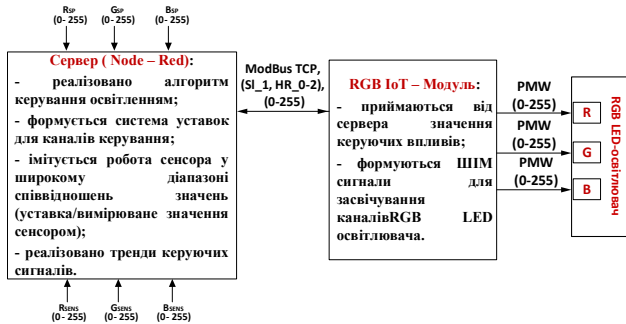


Рисунок 9 – Структурна організація елементів стенду

Як видно з рис. 9, стенд імітаційно-інтеграційного тестування містить кілька основних підсистем, які забезпечують повний цикл керування світлодіодними приладами для регулювання освітленості або корекції спектральних характеристик випромінювання. Основу системи становить серверна частина, що виконує функції обчислення керуючих сигналів і оброблення даних. З нею взаємодіє RGB IoT-модуль, який приймає команди та формує сигнали керування для виконавчого елемента. Сам виконавчий елемент представлений RGB LED-освітлювачем, що відтворює необхідні режими роботи.

Архітектура та функціональна взаємодія підсистем керування освітленням. Архітектура системи керування світлодіодним освітленням включає послідовно взаємопов'язані підсистеми, кожна з яких виконує власні функції в загальному процесі формування та відтворення керуючого впливу. У повнофункціональному варіанті система передбачає наявність сенсорної підсистеми, що здійснює вимірювання освітленості приміщення за червоною, зеленою та синьою складовими спектру. Дані надходять від групи IoT-сенсорів, інтегрованих у локальну інформаційно-керуючу мережу, і слугують основою для формування зворотного зв'язку. В умовах стендового моделювання ця підсистема не застосовувалася, оскільки задавання значень вручну безпосередньо на сервері дає змогу відтворити ширший діапазон сценаріїв та виконати глибший аналіз реакції системи.

Центральним елементом системи є серверна частина, реалізована у середовищі Node-Red з використанням JavaScript. Тут виконуються алгоритми регулювання для всіх трьох каналів керування (R, G, B), налаштовуються уставки, обробляються дані зворотного зв'язку і формується керуючий вплив. Сервер також забезпечує візуалізацію роботи системи,

надає тренди сигналів, зберігає архіви та генерує діагностичну інформацію, що дозволяє оцінити стабільність та ефективність процесів.

Сформовані керуючі команди передаються до RGB IoT-модуля, який виконує роль апаратного перетворювача. Він отримує дані через протокол ModBus TCP і генерує відповідні ШІМ-сигнали з потрібною амплітудою та коефіцієнтом заповнення. Завдяки цьому забезпечується плавне регулювання інтенсивності кожного кольорового каналу відповідно до вимог алгоритму.

Кінцевим виконавчим елементом системи є RGB LED-освітлювач, що працює від напруги 12 В і підтримує плавне регулювання яскравості. Обраний тип освітлювача здатний формувати необхідний спектр випромінювання та забезпечувати потрібну потужність для створення заданих умов освітлення. Саме він фізично відтворює керуючий вплив, перетворюючи обчислені та передані сигнали у відповідний світловий потік.

У сукупності описані підсистеми утворюють цілісну керуючу структуру, в якій сенсори забезпечують вимірювання, сервер формує керування, IoT-модуль виконує апаратне перетворення, а освітлювач реалізує вихідний світловий сигнал. Така архітектура дозволяє гнучко налаштовувати систему, аналізувати її поведінку та оцінювати якість роботи алгоритмів як у моделюванні, так і під час практичної експлуатації.

Математична адаптація алгоритму керування для практичної реалізації. Отримані раніше результати моделювання у середовищі Matlab/Simulink підтверджують, що використання в ролі керуючого алгоритму структури з інтегральною та фільтраційною складовими є ефективним при роботі з безінерційними світлодіодними джерелами. Такий алгоритм забезпечує плавність перехідних процесів, усуває шумові коливання та дозволяє точно досягати заданого рівня освітленості навіть за наявності нестабільного зворотного зв'язку.

Враховуючи вираз передатної функції регулятора (рис. 10), запишемо наступне рівняння:

$$pX_{Fout} = \frac{k}{T_{\mu}p + 1} X_{Fin} \quad (1)$$

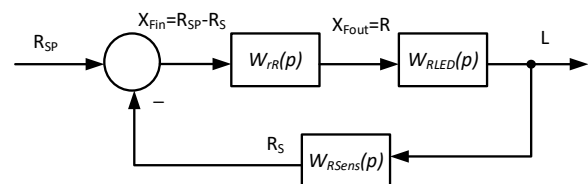


Рисунок 10 – Базова структурна схема R-каналу керування освітленням

Відомо, що передатна функція $k/(T_{\mu}p + 1)$ виконує роль фільтру низьких частот, тому введемо наступне її визначення:

$$\frac{X_{Fin}^{filtered}}{X_{Fin}^{NONfiltered}} = \frac{k}{T_{np}p + 1}. \quad (2)$$

Якщо переписати вираз (1) з урахуванням виразу (2), отримаємо:

$$pX_{Fout} = \frac{X_{Fin}^{filtered}}{X_{Fin}^{NONfiltered}} X_{Fin}. \quad (3)$$

Опишемо ліву частину виразу (3). Ліва частина є нічим іншим як операцією інтегрування, тобто, якщо врахувати, що на сервері інтегрування має бути лише чисельним, з кроком за часом, який визначатиметься швидкістю передавання пакетів за протоколом ModBus, то можна задати структуру алгоритму керування в чисельному вигляді наступним чином:

$$R = R + \text{Math.Round}\left(\frac{X_{Fin}^{filtered}}{X_{Fin}^{NONfiltered}} X_{Fin}\right). \quad (4)$$

У виразі (4) «*Math.Round*» є функцією округлення до нижчого цілого значення з урахуванням специфіки керуючого ШІМ - сигналу.

Врахуємо, що фільтрований вхідний сигнал регулятора знаходиться у функціональній залежності з сигналом R, тобто

$$X_{Fin}^{filtered} = R_{SP} - (R_S + aR), \quad (5)$$

де α – оператор зв'язку між R_S та R .

Вираз (4) нескладно звести до наступного виразу:

$$\begin{aligned} R &= R + \\ &+ \text{Math.Round}\left(\frac{(R_{SP} - R_S)R_{SP} - (R_S + \alpha R)}{X_{Fin}^{NONfiltered}}\right); \\ R &= R + \\ &+ \text{Math.Round}\left(\frac{R_{SP}^2 + R_S^2 - \alpha(\Delta R)R - 2R^*}{X_{Fin}^{NONfiltered}}\right); \\ \Delta R &= R_{SP} - R_S; \\ R^* &= R_{SP}R_S; \end{aligned} \quad (6)$$

Беручи до уваги вираз (2), отримуємо кінцевий варіант регуляторного рівняння:

$$R = R + \text{Math.Round}\left(k \frac{R_{SP}^2 + R_S^2 - \alpha(\Delta R)R - 2R^*}{R_{SP} - R_S + d}\right), \quad (7)$$

де k, a, d – можна розглядати як коефіцієнти налаштування «фільтра-регулятора» та присвоювати їм дійсні додатні значення. Програмна реалізація алгоритму керування для червоного каналу наведена на рис. 11.

Тестування роботи регулятора в системі керування освітленням. Тестування розробленого регулятора проводилося повним складом каналів керування, у межах всіх передбачених режимів роботи системи. В процесі випробувань було сформовано

групу трендів, що відображають зміну ключових параметрів системи та дозволяють оцінити її динаміку в різних експлуатаційних умовах. Особливу увагу приділено аналізу поведінки системи у трьох характерних сценаріях: роботі в умовах повної відсутності зовнішнього освітлення, у режимі змішаного освітлення з додатковими світловими джерелами, а також у ситуаціях, коли вимірвальний канал зазнає впливу шумів і завад. Для кожного з цих режимів було зафіксовано реакцію системи та оцінено її стійкість, плавність регулювання та здатність забезпечувати досягнення уставок.

```
var RS=global.get("R_Sens"), SP=global.get("R_SP");
var R=global.get("R"), k=1, a=1.01, d=100, init=1000;

if(isNaN(R)) R=init;

var num=(SP*SP)+(RS*RS)-a*(SP-RS)*R-2*SP*RS;
var den=(SP-RS)+d;
var dv=Math.round(k*num/den);

R = (SP>RS) ? R+dv : R-dv;
R = Math.max(0,Math.min(255,R));

global.set("R",R);

msg.payload={value:[R],fc:16,unitid:1,address:0,quantity:1};
return msg;
```

Рисунок 11 – Програмна реалізація алгоритму керування для окремого каналу (R-channel)

На рис. 12 наведено характерні тренди для червоного каналу керування, які демонструють повну відповідність отриманих результатів очікуваним теоретичним властивостям системи. За зеленим та синім каналами спостерігалася аналогічна поведінка, що свідчить про коректність роботи регулятора в усьому діапазоні RGB-керування.

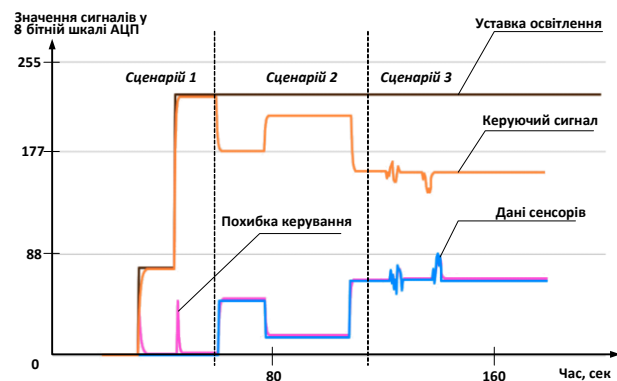


Рисунок 12 – Тренди сигналів за червоним каналом керування (R-channel)

Висновки. На основі розробленої моделі було проведено серію експериментів у середовищі MATLAB Simulink, що дозволило дослідити закономірності процесів керування освітленням у широкому діапазоні режимів. У роботі наведено лише ті результати, які найбільш чітко демонструють принципи функціонування системи керування та особливості взаємодії між моделлю освітлювача, сенсорним каналом і обчислювальною частиною системи.

Проведений аналіз показав, що метод прямого порівняння фактичної освітленості з уставочним

значенням забезпечує стійку роботу системи, однак її якість значною мірою залежить від рівня шумів у сенсорному каналі та характеру затримок у мережі. Встановлено, що вплив цих факторів може суттєво погіршувати динаміку перехідних процесів. У той же час додавання послідовного фільтра низьких частот дозволяє ефективно зменшувати шумові складові, забезпечуючи більш плавну реакцію та підвищуючи комфортність сприйняття освітлення.

Окремо було виявлено, що компенсація статичної похибки можлива шляхом підвищення ступеня астатизму системи, що досягається введенням інтегруючої ланки або використанням І-регулятора. Це дозволяє забезпечити точне досягнення заданого рівня освітленості навіть у присутності зовнішніх збурень. Практичне тестування також довело ефективність використаної архітектури «сервер – виконавчий пристрій зі зворотним зв'язком», за умови використання надійного протоколу обміну даними, такого як ModBus TCP, який гарантує достовірність і стабільність переданих величин.

Математично адаптований алгоритм керування показав високу ефективність у всіх досліджених режимах. Він забезпечує мінімальне перерегулювання (менше 1%) без втрати швидкодії, знижує вплив шумових процесів, а також дозволяє отримати близьке до нульового значення статичної та динамічної похибок. Отримані результати підтверджують перспективність застосування такого алгоритму у практичних системах освітлення та створюють основу для подальшої оптимізації та розширення функціональних можливостей системи.

Список літератури

1. Кожушко Г. М., Сахно Т. В., Назаренко В. І. Проблеми проектування систем освітлення з врахуванням невізуальних впливів світла. *Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи*: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, м. Тернопіль, Україна, 29–31 трав. 2024 р. Тернопіль, 2024. С. 8–10.
2. Зеленков І. А., Вакула Н. О. Динамічні режими освітлення у виробничих умовах. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2005. № 3 (25). С. 184–187. DOI: <https://doi.org/10.18372/2306-1472.25.1186>.
3. Напрямки вдосконалення стандартів на світлодіодну техніку та освітлення з її використанням / С. В. Шпак та ін. *Комунальне господарство міст*. 2020. Т. 1, № 154. С. 57–66. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-1-154-57-66>.
4. Fotios S., Cheal C., Boyce P. R. Light source spectrum, brightness perception and visual performance in pedestrian environments: a review. *Lighting Research & Technology*. 2005. Vol. 37, no. 4. P. 271–291. DOI: <https://doi.org/10.1191/1365782805li139oa>.
5. Modelling the behavior of lighting systems controlled at a constant level of illuminance / P. Valicek et al. *2018 VII. Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4)*, Trebic, Czech Republic, 18–20 September 2018. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/lumenv.2018.8520993>.
6. Smart lighting system using ANN-IMC for personalized lighting control and daylight harvesting / N. K. Kandasamy et al. *Building and Environment*. 2018. Vol. 139. P. 170–180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.005>.
7. Saving energy by maximising daylight and minimising the impact on occupants: an automatic lighting system approach / M. Papinutto et al. *Energy and Buildings*. 2022. Vol. 268. 112176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112176>.
8. Kaminska A., Ozadowicz A. Lighting control including daylight and energy efficiency improvements analysis. *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 8. 2166. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11082166>.
9. Know your Achilles' heel / A. Zand et al. *31st Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC '15)*, Los Angeles, CA, USA, 7–11 December 2015. New York, New York, USA, 2015. P. 41–50. DOI: <https://doi.org/10.1145/2818000.2818012>.
10. Proactive failure detection learning generation patterns of large-scale network logs / T. Kimura et al. *IEICE Transactions on Communications*. 2019. E102.B, no. 2. P. 306–316. DOI: <https://doi.org/10.1587/transcom.2018ebp3103>.
11. Automatic fault detection with Bayes method in university campus network / I. F. Kilincer et al. *2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, Malatya, Turkey, 16–17 September 2017. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/idap.2017.8090323>.
12. Automatic fault detection and diagnosis in cellular networks and beyond 5G: intelligent network management / A. K. Sangaiah et al. *Algorithms*. 2022. Vol. 15, no. 11. 432. DOI: <https://doi.org/10.3390/a15110432>.
13. Failure identification in smart grids based on Petri net modeling / V. Calderaro et al. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011. Vol. 58, no. 10. P. 4613–4623. DOI: <https://doi.org/10.1109/tie.2011.2109335>.
14. Detecting sensor faults, anomalies and outliers in the Internet of Things: a survey on the challenges and solutions / A. Gaddam et al. *Electronics*. 2020. Vol. 9, no. 3. 511. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9030511>.
15. Дзюбинський О. Дослідження та програмна реалізація системи виявлення несправності елементів цифрових пристроїв. *Збірник праць молодих науковців ЦНТУ*. 2023. № 13. С. 220–229.

References

1. G. M. Kozhushko, T. V. Sakhno, and V. I. Nazarenko, "Problemy proektuvannia system osvittennia z vrakhuvanniam nevizualnykh vplyviv svitla [Problems of lighting systems design taking into account the non-visual effects of light]," in *Lighting and Power Engineering: History, Problems and Perspectives*, Ternopil, Ukraine, May 29–31, 2024. Ternopil: TNTU, 2024, pp. 8–10. (in Ukrainian)
2. I. A. Zelenkov and N. O. Vakula, "Dynamic modes of illumination in productions terms," *Proceedings of National Aviation University*, no. 3 (25), pp. 184–187, Mar. 2005, doi: <https://doi.org/10.18372/2306-1472.25.1186> (in Ukrainian)
3. S. Shpak, V. Martirosova, T. Sakhno, and G. Kozhushko, "Directions for improvement of standards on led technique and lighting with its use," *Municipal economy of cities*, vol. 1, no. 154, pp. 57–66, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-1-154-57-66> (in Ukrainian)
4. S. Fotios, C. Cheal, and P. R. Boyce, "Light source spectrum, brightness perception and visual performance in pedestrian environments: A review," *Lighting Research & Technology*, vol. 37, no. 4, pp. 271–291, Dec. 2005, doi: <https://doi.org/10.1191/1365782805li139oa>
5. P. Valicek, T. Novak, J. Beseda, and K. Sokansky, "Modelling the behavior of lighting systems controlled at a constant level of illuminance," in *2018 VII. Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4)*, Trebic, Czech Republic, Sep. 18–20, 2018. IEEE, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/lumenv.2018.8520993>
6. N. K. Kandasamy, G. Karunagaran, C. Spanos, K. J. Tseng, and H. Soong, "Smart lighting system using ANN-IMC for personalized lighting control and daylight harvesting," *Building and Environment*, vol. 139, pp. 170–180, Jul. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.005>
7. M. Papinutto et al., "Saving energy by maximising daylight and minimising the impact on occupants: An automatic lighting system approach," *Energy and Buildings*, vol. 268, May 2022, Art. no. 112176, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112176>
8. A. Kaminska and A. Ozadowicz, "Lighting control including daylight and energy efficiency improvements analysis," *Energies*, vol. 11, no. 8, Aug. 2018, Art. no. 2166, doi: <https://doi.org/10.3390/en11082166>
9. A. Zand, A. Houmansadr, G. Vigna, R. Kemmerer, and C. Kruegel, "Know your Achilles' heel," in *31st Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC '15)*, Los Angeles, CA, USA,

- Dec. 7–11, 2015. New York, New York, USA: ACM Press, 2015, pp. 41–50, doi: <https://doi.org/10.1145/2818000.2818012>
10. T. Kimura, A. Watanabe, T. Toyono, and K. Ishibashi, "Proactive failure detection learning generation patterns of large-scale network logs," *IEICE Transactions on Communications*, E102.B, no. 2, pp. 306–316, Feb. 2019, doi: <https://doi.org/10.1587/transcom.2018ebp3103>
 11. I. F. Kilincer, F. Ertam, O. Yaman, and A. Akbal, "Automatic fault detection with Bayes method in university campus network," in *2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, Malatya, Turkey, Sep. 16–17, 2017. IEEE, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/idap.2017.8090323>
 12. A. K. Sangaiah, S. Rezaei, A. Javadpour, F. Miri, W. Zhang, and D. Wang, "Automatic fault detection and diagnosis in cellular networks and beyond 5G: Intelligent network management," *Algorithms*, vol. 15, no. 11, Nov. 2022, Art. no. 432, doi: <https://doi.org/10.3390/a15110432>
 13. V. Calderaro, C. N. Hadjicostis, A. Piccolo, and P. Siano, "Failure identification in smart grids based on Petri net modeling," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 10, pp. 4613–4623, Oct. 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/tie.2011.2109335>
 14. A. Gaddam, T. Wilkin, M. Angelova, and J. Gaddam, "Detecting sensor faults, anomalies and outliers in the Internet of Things: A survey on the challenges and solutions," *Electronics*, vol. 9, no. 3, Mar. 2020, Art. no. 511, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics9030511>
 15. O. Dziubynskyi, "Doslidzhennia ta prohramna realizatsiia systemy vyavleniia nespravnosti elementiv tsyfrovyykh prystroiv [Research and software implementation of a system for detecting faults in digital device components]," *Zbirnyk prats molodykh naukovtsiv TsNTU [Collection of works by young scientists Central Ukrainian National Technical University]*, no. 13, pp. 220–229, 2023. (in Ukrainian)

Надійшло (received) 8.12.2025

UDC 681.518:004.942

NOZDRENKOV VALERII ✉ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Postdoctoral Researcher at the Department of Computer Science and Systems Analysis, Cherkasy State Technological University; Cherkasy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0579-6821>; e-mail: v.s.nozdrenkov.d24@chdtu.edu.ua.

PAVLOV ANDRII – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Computerized Control Systems Department; Sumy State University; Sumy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8861-8472>; e-mail: a.pavlov@ksu.sumdu.edu.ua.

OLEKSIENKO GALYNA – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Computer Science Department; Sumy State University; Sumy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0274-5095>; e-mail: galyana2@ukr.net.

ZHURAVLOV OLEKSANDR – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Senior Lecturer of the Computerized Control Systems Department; Sumy State University; Sumy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7834-6661>; e-mail: san.75@i.ua.

PETROVSKYI MYKHAILO – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Electric Power Engineering Department; Sumy State University; Sumy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0387-3136>; e-mail: m.petrovskiy@etech.sumdu.edu.ua.

ENERGY-EFFICIENT CONTROL OF A NON-INERTIAL LED LIGHTING SOURCE USING IOT TECHNOLOGIES

The article presents an approach to energy-efficient control of non-inertial light-emitting diode lighting sources integrated into a local information-control network based on Internet of Things technologies. It is demonstrated that light-emitting diodes, being non-inertial devices, respond instantly to fluctuations in the control signal; therefore, sensor noise and stochastic communication delays lead to unstable lighting dynamics, visible flicker, and a decrease in the visual comfort of indoor environments. To eliminate these issues, a control algorithm for stabilizing the luminous flux is proposed. It is based on the direct comparison between the measured illuminance and the setpoint, with further enhancement through the use of a low-pass filter and an integrating element. This combined structure suppresses noise components, compensates for static error, smooths transient processes, and reduces the negative effects of communication delays within the network. The algorithm is implemented on the server side of the system using the Node-RED platform and JavaScript, which enables flexible parameter tuning, data logging, and transmission of control commands to an Internet of Things module via the ModBus TCP protocol. The Internet of Things module generates pulse-width modulation signals for the light-emitting diode lighting device and executes control actions at the hardware level. To evaluate the effectiveness of the proposed method, a MATLAB Simulink model was developed, incorporating sensor distortions, external disturbances, random network delays, and the non-inertial behaviour of light-emitting diode devices. Simulation results demonstrate stable system performance, the absence of flicker, smooth transient responses, and negligible steady-state error. Experimental validation on a physical test bench confirmed the applicability and reliability of the proposed control strategy for automated lighting systems in residential, commercial, and industrial environments that require energy-efficient and stable light-emitting diode illumination.

Keywords: LED lighting; non-inertial system; illuminance stabilization; energy-efficient control; Internet of Things (IoT); ModBus TCP; PWM control; low-pass filter; integral controller; MATLAB Simulink; lighting automation.