

РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ НА ОСНОВІ LED-ЛАМП У СЕРЕДОВИЩІ SCILAB/XCOS

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розроблено комплекс моделей системи автоматичного керування освітленням на основі LED-ламп, що включає вербальну, структурну, функціональні та імітаційну моделі. Структурна модель представлена у вигляді орієнтованого графа взаємозв'язків між компонентами системи. Функціональні моделі описують динамічні та статичні характеристики основних підсистем: датчика освітленості, ПІД-регулятора, виконавчого механізму та лампи. Імітаційну модель реалізовано в середовищі Scilab/Xcos із застосуванням промислового ПІД-регулятора та обліком інерційності виконавчих елементів. Результати моделювання підтверджують стабільну роботу системи в умовах змінного природного освітлення та демонструють ефективне підтримання заданого рівня освітленості.

Ключові слова: LED-освітлення, імітаційна модель, Scilab/Xcos, ПІД-регулятор, система автоматичного керування, зворотний зв'язок.

Abstract

A complex of models for an automatic LED lighting control system has been developed, including verbal, structural, functional, and simulation models. The structural model is represented as a directed graph of interconnections between system components. Functional models describe the dynamic and static characteristics of the key subsystems: light sensor, PID controller, actuator, and lamp. The simulation model is implemented in Scilab/Xcos using an industrial PID controller and accounting for the inertia of actuating elements. Simulation results confirm stable system operation under varying natural lighting conditions and demonstrate effective maintenance of the specified illuminance level.

Keywords: LED lighting, simulation model, Scilab/Xcos, PID controller, automatic control system, feedback.

Вступ

У сучасних системах енергоефективного управління будівлями особливе місце посідають системи автоматичного регулювання освітленням. Застосування LED-технологій у поєднанні з алгоритмами автоматичного керування дозволяє суттєво знизити споживання електроенергії, забезпечуючи при цьому комфортне та нормативно визначене освітлення робочих просторів.

Дослідження та налаштування таких систем ускладнюється необхідністю врахування нелінійних характеристик джерел світла, інерційності вимірювальних датчиків та змінного характеру природного освітлення. Імітаційне моделювання дозволяє досліджувати поведінку системи без фізичного прототипу, що суттєво спрощує процес проектування та оптимізації [1, 2].

При цьому застосування спеціалізованих програмних середовищ, зокрема відкритої платформи Scilab/Xcos, дозволяє ефективно досліджувати динамічні процеси в замкнених системах керування [3].

Метою роботи є розробка комплексу моделей системи автоматичного керування освітленням на основі LED-ламп, що включає вербальну, структурну, функціональні та імітаційну моделі, а також дослідження поведінки системи при змінному природному освітленні засобами середовища Scilab/Xcos.

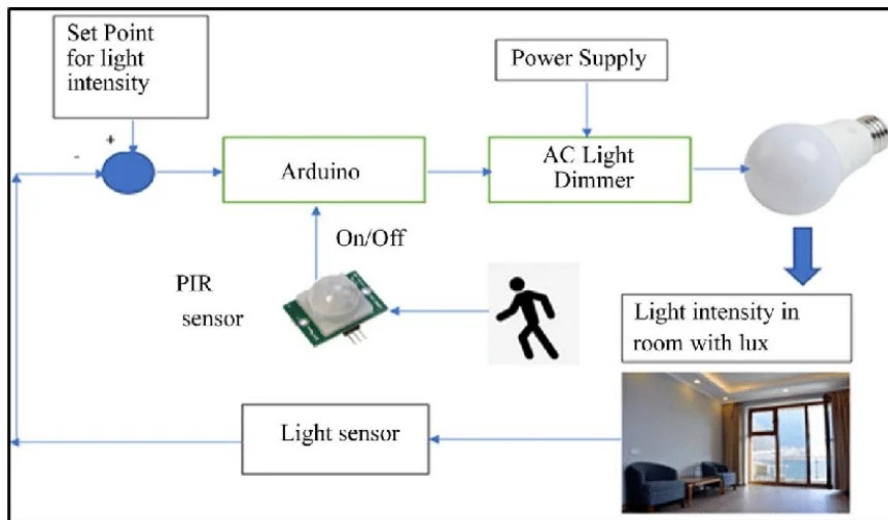


Рисунок 1 – Основні компоненти системи керування LED-освітленням [4]

Вербальна модель

Система автоматичного керування LED-освітленням — це замкнена система автоматичного регулювання, призначена для підтримання заданого рівня освітленості в приміщенні на рівні еталонного значення (400 лк) в умовах змінного природного освітлення.

Система складається з таких функціональних блоків: джерело природного освітлення, ПІД-регулятор, виконавчий механізм (LED-лампа), датчик освітленості та лічильник електроенергії.

Джерело природного освітлення моделює зміну зовнішнього освітлення протягом доби у вигляді синусоїдальної функції ("Сонце") з повільними коливаннями (амплітуда 500, частота 0,05) та накладеними швидкими завадами ("Хмари", амплітуда 40, частота 2), обмеженими знизу нулем для виключення від'ємних значень освітленості.

ПІД-регулятор — основний керуючий блок системи, який обчислює помилку між еталонним значенням освітленості (400 лк) і поточним вимірним значенням та формує відповідний керуючий вплив на виконавчий механізм. Забезпечує швидку реакцію на відхилення з мінімальним перерегулюванням.

Виконавчий механізм (LED-лампа) — динамічний блок із передавальною функцією аперіодичної ланки першого порядку $W(s) = 1/(0.5s + 1)$, що описує інерцію розгоряння лампи (стала часу 0,5 с). Обмежений по виходу в межах [0; 600] лк.

Датчик освітленості — динамічний інерційний вимірювальний блок із передавальною функцією $W(s) = 1/(0.1s + 1)$, що враховує затримку реакції сенсора (стала часу 0,1 с). Забезпечує зворотний зв'язок у системі керування.

Лічильник електроенергії — інтегруючий блок, що накопичує значення потужності лампи в часі, відображаючи сумарне споживання електроенергії у відносних одиницях (за результатами моделювання: 20166,8 ум. од.).

Процес функціонування системи характеризується двома основними режимами: режим компенсації нічного освітлення — коли природне освітлення є мінімальним або відсутнім, лампа виходить на максимальну потужність; режим доповнення денного освітлення — коли природне освітлення наближається до норми або перевищує її, лампа автоматично знижує потужність або вимикається.

Структурна модель (граф)

Взаємозв'язки між інформаційними та енергетичними потоками системи автоматичного керування LED-освітленням представлено у вигляді орієнтованого графа структури об'єкта (рис. 2).

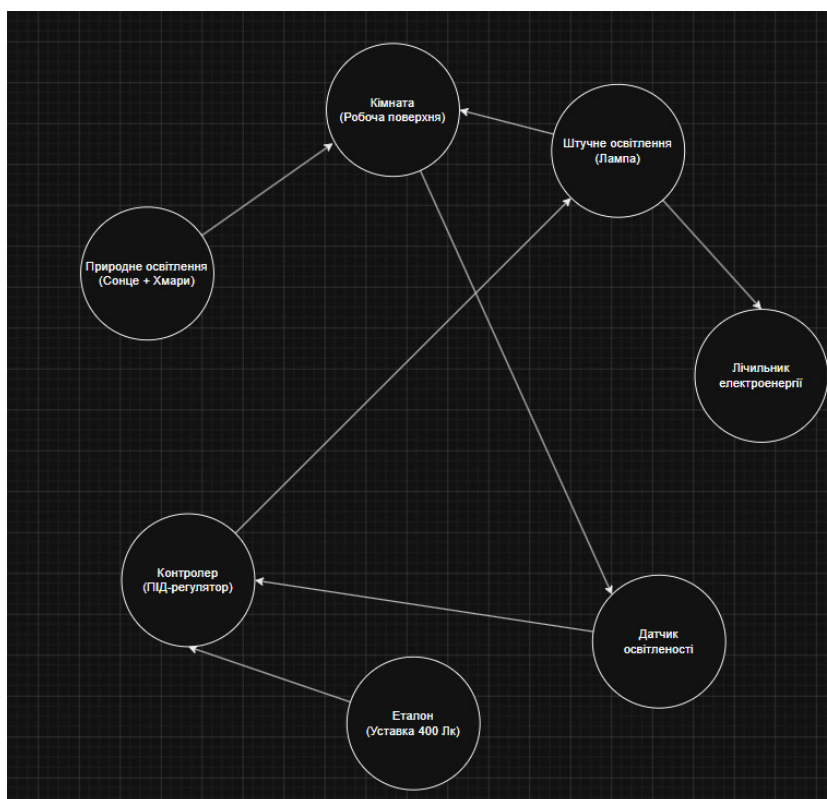


Рисунок 2 — Граф структурної моделі системи керування LED-освітленням

Граф містить такі вершини: Еталон (норма освітленості 400 лк), ПІД-регулятор, LED-лампа, Датчик освітленості, Природне середовище (Сонце + Хмари) та Освітленість приміщення. Дуги графа відображають передачу сигналів: помилки регулювання, керуючого впливу, вимірюваного та природного освітлення.

Функціональні моделі блоків

Для кожного функціонального блока системи визначено його тип (статичний чи динамічний) та сформовано відповідне математичне підґрунтя.

ПІД-регулятор є нелінійним статичним елементом, що обчислює помилку регулювання та формує безперервний керуючий сигнал:

$$e(t) = E_{\text{ref}} - E_{\text{meas}}(t)$$

де $E_{\text{ref}} = 400$ лк — еталонне значення освітленості; $E_{\text{meas}}(t)$ — поточне виміряне значення освітленості.

Передавальна функція ПІД-регулятора у загальному вигляді:

$$W_{\text{PID}}(s) = K_p + K_i/s + K_d \cdot s$$

де для стандартних налаштувань: $K_p = 1$, $K_i = 1$, $K_d = 0$ (ПІ-режим за замовчуванням).

LED-лампа (виконавчий механізм) розглядається як динамічний блок першого порядку, теплова та оптична інерція якого апроксимується передавальною функцією аперіодичної ланки:

$$W_{\text{лампи}}(s) = 1 / (0.5 \cdot s + 1)$$

де 0,5 с — стала часу розгоряння LED-лампи.

Датчик освітленості також описується аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{\text{датчика}}(s) = 1 / (0.1 \cdot s + 1)$$

де 0,1 с — стала часу реакції фотодатчика.

Природне середовище моделюється як суперпозиція двох гармонічних сигналів з обмеженням:

$$E_{\text{прир}}(t) = \max(0, 500 \cdot \sin(2\pi \cdot 0.05 \cdot t) - 40 \cdot \sin(2\pi \cdot 2 \cdot t))$$

Лічильник електроенергії реалізований як інтегруючий блок:

$$W = \int U_{\text{лампи}}(t) dt$$

де $U_{\text{лампи}}(t)$ — потужність керуючого сигналу на вході LED-лампи.

Імітаційна модель у середовищі Scilab/Xcos

Імітаційну модель системи автоматичного керування LED-освітленням реалізовано за допомогою блоків бібліотеки графічного візуального моделювання Xcos пакету Scilab (рис. 3).

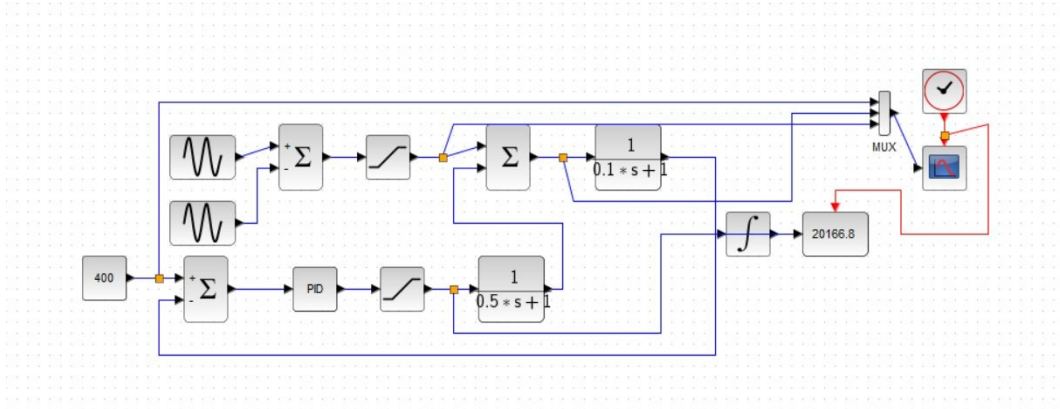


Рисунок 3 — Схема імітаційної моделі системи керування LED-освітленням у середовищі Scilab/Xcos

Структура моделі інтегрує три головні контури. Контур природного освітлення реалізовано двома генераторами синусоїдальних сигналів (Сонце та Хмари), які через суматор і обмежник формують реалістичну модель зовнішнього освітлення. Контур керування містить блок порівняння з еталоном (400 лк), промисловий ПІД-регулятор, обмежник потужності лампи [0; 600] та аперіодичну ланку лампи $W(s) = 1/(0.5s+1)$. Контур зворотного зв'язку реалізований через аперіодичну ланку датчика $W(s) = 1/(0.1s+1)$, що передає вимірне значення освітленості до входу порівняння.

Додатково підключено інтегруючий блок для обліку споживаної електроенергії з цифровим табло (показало 20166,8 ум. од. за 100 с моделювання). Для спостереження за трьома сигналами одночасно (еталон 400 лк, сумарне освітлення приміщення, природне освітлення) використано мультиплексор MUX та осцилограф CSCOPE.

Параметри моделювання: кінцевий час інтегрування $T = 100$ с, крок $CLOCK_c = 0,1$ с.

Результати комп'ютерного моделювання тривалістю 100 секунд представлено на рис. 4.

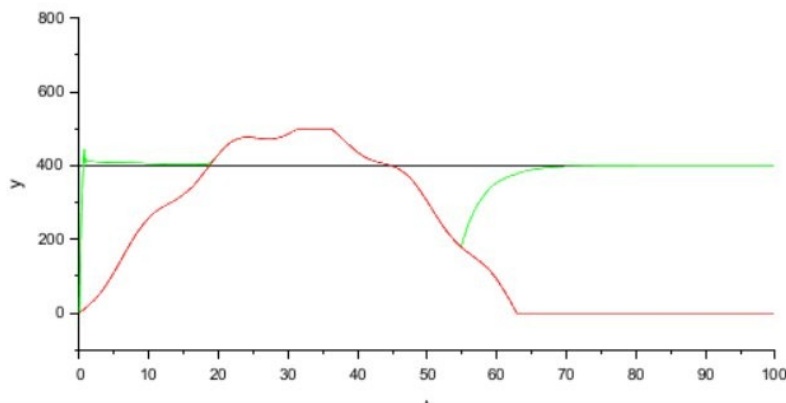


Рисунок 4 — Графік перехідного процесу системи керування LED-освітленням

Аналіз графіка (рис. 4) дозволяє виокремити характерні режими роботи системи. На початковому етапі ($t = 0-10$ с) спостерігається швидкий перехідний процес виходу на еталонний рівень із незначним початковим відхиленням, зумовленим інерційністю ПІД-регулятора та лампи.

У проміжку $t \approx 10-60$ с природне освітлення (червона крива) зростає від нуля до максимального значення ~ 500 лк, перевищуючи еталон. У цей час система автоматично знижує потужність лампи, а сумарна освітленість приміщення (зелена крива) підтримується поблизу значення 400 лк (чорна горизонтальна лінія). При $t \approx 60-65$ с природне освітлення різко спадає до нуля (моделювання ночі), і система оперативно компенсує нестачу, вмикаючи лампу на повну потужність.

Після $t \approx 65$ с система повертається до стабільного режиму підтримання еталонного освітлення за рахунок лампи, що підтверджує ефективність замкненого контуру керування з ПІД-регулятором.

Висновки

У роботі розроблено комплекс моделей системи автоматичного керування LED-освітленням у середовищі Scilab/Xcos. Побудовано вербальну модель, що описує принципи функціонування системи, та структурну модель у вигляді графа взаємозв'язків між компонентами. Для кожного функціонального блока визначено тип моделі та отримано відповідні математичні описи, які інтегровано в єдину імітаційну систему.

Комп'ютерне моделювання підтвердило адекватність побудованої структури: графіки наочно продемонстрували ефективне підтримання заданого рівня освітленості 400 лк в умовах змінного природного освітлення. Система забезпечує автоматичну компенсацію як нестачі (ніч), так і надлишку (день) природного освітлення. Вбудований лічильник електроенергії дозволяє оцінювати енергоефективність системи.

Розроблений комплекс моделей може бути використаний для проектування та налаштування реальних систем керування освітленням без створення фізичного прототипу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Моделювання та оптимізація систем : підручник / [Дубової В. М., Кветний Р. Н., Михальов О. І., Усов А. В.]. – Вінниця : ПП «ТД «Едельвейс», 2017. – 804 с.
2. Дубової В. М. Моделювання процесів і систем керування : навчальний посібник / В. М. Дубової, С. М. Москвіна, О. Д. Никитенко. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 202 с.
3. Зайцев М. О. Моделювання динамічних систем у середовищі Scilab/Xcos : метод. вказівки / М. О. Зайцев. – Дніпро : НТУ «ДП», 2020. – 88 с.
4. LED освітлення та системи керування ним. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Світлодіод> (дата звернення: 07.06.2026).

Шелепало Денис Олегович — студент групи 1Акітр-24Б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: dinisshelepalo@gmail.com

Науковий керівник: Дубовий Володимир Михайлович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютерних систем управління, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Shelepalo Denys Olehovych — student of group 1AKITR-24b, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: dinisshelepalo@gmail.com

Supervisor: Dubovoy Volodymyr Mykhailovych — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Control Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia