

## ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 628.971.6:004.891:510.644:681.516.42

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.205-217](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.205-217)

**О.М. Сінчук**, проф., д-р техн. наук, **О.Ю. Михайленко**, доц., канд. техн. наук,  
*Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна*  
*e-mail: mykhailenko@knu.edu.ua*

**В.В. Горшков**  
*ВСП «Гірничо-електромеханічний фаховий коледж Криворізького національного університету», м. Кривий Ріг, Україна*

### Нечітка система керування електротехнічним комплексом вуличного освітлення населених пунктів

У статті розглядається питання підвищення енергоефективності електротехнічних комплексів, що забезпечують комфортні умови життєдіяльності для населення міст та населених пунктів, а саме вуличного освітлення. Створена нечітка система керування групою LED-світильників ділянки дороги, що регулює потужність освітлювальних приладів і, відповідно, їх яскравість та керує підключенням до джерела живлення (або до електромережі, або до акумулятора) залежно від рівня освітленості, інтенсивності руху автотранспорту і тарифу на електроенергію. Встановлено, що більш ефективною є керована система з комбінованим живленням. Вона дозволяє знизити споживання електроенергії в типову літню ніч на 75,31% і 74,93%, в зимову – на 80,4% і 77,68% якщо співставляти з традиційним варіантом вуличного освітлення, коли освітлювальна мережа на ніч або відключається повністю, або працює тільки на 50% потужності, відповідно.

**вуличне освітлення, енергоефективність, керування, нечіткий логічний вивод, моделювання**

**Постановка проблеми.** На теперішній час керування вуличним освітленням вулиць здійснюється з використанням достатньо простих алгоритмів. Після початку заходу сонця з настанням сутінок включаються освітлювальні прилади на 50% потужності, з приходом ночі світлоточки починають працювати на повну потужність. Після цього зовнішнє освітлення працює без зміни режиму роботи до 23 години після чого відключається до початку світанку. Разом з тим, це узагальнений режим, який може змінюватися залежно від міста або селища, інтенсивності руху автотранспорту та пішоходів тощо [1].

Наприклад, у м. Києві здійснюється 50% відключення світлоточок між 23.00 і 6.00 [2]. Таке неповне відключення пояснюється високим темпом життя в цьому місті. У полтавській громаді з 23.00 до 00.00 освітлюються вулиці вздовж тролейбусних маршрутів після чого зовнішнє освітлення вимикається до ранку [3]. У м. Кривий Ріг з 23.00 до 05.00 освітлювальна мережа відключається практично повністю, а о 5 годині знову вмикається до початку світанку [4]. Це пояснюється тим, що місто є промисловим і завершення нічної зміни або початок денної на виробництвах починаються дуже рано, тобто працівникам потрібно дістатися на робочого місця або повернутися додому. Звісно, усі вищеописані графіки роботи відповідають мирному часу, під час військового стану вони, як правило, не дотримуються зі зрозумілих причин.

© О.М. Сінчук, О.Ю. Михайленко, В.В. Горшков, 2024

Такий підхід до керування вуличним освітленням можна вважати ручним. Спеціальні засоби, як-то дистанційне керування тощо, при цьому використовуються тільки під час включення/відключення освітлювальних установок, а регулювання енергоспоживання як такого не відбувається.

Автоматизація керування вуличним освітленням може забезпечити адаптування рівня освітленості освітлювальних приладів до змінних умов у яких вони повинні працювати, таких як час доби, погодні особливості та рух пішоходів або автотранспорту. Керування рівнем освітленості знижує споживання електроенергії, що є важливим аспектом сталого розвитку міст та селищ.

Не слід відкидати також і соціальну складову. Автоматизованого керування освітлювальними приладами дозволяє використовувати світлоточки тільки коли в цьому є потреба, тобто навіть в ті години, коли раніше зовнішнє освітлення відключалося повністю, що призводить до підвищення рівня комфортності міста та підвищує його привабливість для населення. При чому на рівень споживання електроенергії таке включення не можливо не матиме суттєвого впливу через низьку інтенсивність автомобільного та пішохідного руху у темний час доби, а також можливості створити достатню освітленість при потужності нижче номінальної. Це твердження потребує підтвердження, що є одним із завдань цієї статті.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Значний розвиток систем збору даних [5–7], інформаційних технологій, зокрема, інтернету речей (IoT) [8, 9], засобів дистанційного й автоматизованого керування призвів до створення нових підходів до керування вуличним освітленням, які прийнято називати інтелектуальними (smart). Їх застосування дозволяє суттєво знизити рівень споживання електроенергії обладнанням освітлювальних мереж [10].

Наприклад, масштабний огляд smart-методів керування вуличним освітленням наведений у роботі [11]. Серед них особливо виділяються ті, що використовують методологічний апарат нечіткої логіки [12–18], керування з прогнозуючими моделями [19] або машинного навчання [20, 21] через високу ефективність.

Разом з тим, системи нечіткого логічного виводу отримали найбільше поширення зважаючи на свою простоту. Проте ці системи мають і свої особливості.

У роботі [12] нечітка система керування окремою освітлювальною установкою складається з двох нечітких підсистем. Одна, з них регулює яскравість LED-світильника, залежно від освітленості та світлового шуму. Інша – тривалість включення залежно швидкості автомобіля. У [13] автори приводять практичну реалізацію системи.

Нечітка система керування вуличною світлоточкою також запропонована у [14]. Входами в ній виступають рівень сонячного освітлення і присутність об'єкта в районі дії освітлювальної установки, виходом – рівень яскравості LED-світильника.

У статті [15] авторами розроблена інтелектуальна нечітка система керування вуличними ліхтарями, що базується на інформації з датчиків швидкості транспортних засобів та освітленості, яка дозволяє заздалегідь регулювати кількість ввімкнених ліхтарів перед транспортним засобом, а також рівень освітленості LED-світильників. Система дозволяє динамічно керувати традиційними вуличними ліхтарями відповідно до конкретних умов на дорозі в нічний час.

Відзначимо роботу [16]. У ній запропонована нечітка система динамічного регулювання яскравості штучного вуличного освітлення, враховуючи різні фактори, такі як інтенсивність природнього освітлення, інтенсивність світлового шуму та швидкість руху автотранспорту. Запропонований алгоритм нечіткого керування значно знижує енергоспоживання освітлювального пристрою.

У [17] пропонується ще одна система керування вуличними ліхтарями, заснована на теорії нечіткого керування. Яскравість кожного LED-світильника можна регулювати відповідно до рівня природного освітлення. Авторами встановлено, що метод дозволяє досягнути енергозбереження. Проте зазначимо, система керування не враховує наявність автотранспорту або пішоходів.

Стаття [18] присвячена розробці концепції енергозбереження в системах вуличного освітлення в шляхом керування яскравістю світлодіодних освітлювальних приладів. Пропонована система оснащена датчиками визначення інтенсивності природного освітлення, руху транспортного засобу по дорозі, а також фіксації дощу. Вихідною величиною для системи є яскравість освітлення.

Проведений аналіз літератури вказує на те, що системи керування електротехнічним комплексом вуличного освітлення, котрі використовують методи нечіткої логіки сфокусовані тільки на рівні освітленості (як основної величини) та інтенсивності руху автотранспорту, проте не враховують тариф на електроенергію при генерації величини керуючої дії за напругою або струмом (залежно від типу LED-драйвера). Також жодна з розглянутих систем не надає рекомендації щодо вибору джерела живлення для освітлювальної установки. Незважаючи, що деякі мають сонячні панелі з акумуляторами.

**Постановка завдання.** Враховуючи, що задача керування зовнішнім освітленням має враховувати складні нечіткі зв'язки між вхідними та вихідними змінними й представляти висновки системи в термінах нечітких значень, то в такому варіанті розбудові системи потрібно застосувати нечіткий логічний вивід Мамдані (НЛВМ). Це дає можливість вираження нечітких правил у вигляді «ЯКЩО – ТО», при чому вихідні лінгвістичні змінні в НЛВМ описуються нечіткими множинами на відміну від нечіткого висновку Такагі-Сугено-Канга або Цукамото, де виходом є, відповідно, лінійні або монотонні функції.

Загальне завдання роботи полягає в створенні системи керування електротехнічним комплексом вуличного освітлення на базі алгоритму нечіткого логічного виводу Мамдані з багатьма входами і виходами, котра, по-перше враховували би поміж інших величину тарифу на електроенергію при генерації керування, а також надавала рекомендацію щодо вибору джерела живлення освітлювальних установок для досягнення зниження рівня споживання електричної енергії обладнанням освітлювальних мереж.

**Викладення основного матеріалу.** Аналізувати роботу нечіткої системи керування будемо на прикладі блоку освітлення дорожнього покриття для проїзду автотранспорту по вулиці Костенко між перехрестями вулиць Костенко – Героїв АТО і Костенко – проспект Університетський у м. Кривий Ріг (рис. 1).

Блок містить 10 освітлювальних установок вздовж вулиці. Така ділянка дороги типова для міст. Вдень рух по ній достатньо жвавий, а вночі – поодинокий. Обабіч цієї дороги вже встановлені консольні LED-світильники з двома СОВ-матрицями сумарною потужністю 100 Вт. Напруга живлення складає 230 В. Струм номінальний освітлювального пристрою  $I_{LED} = \frac{P}{U} = \frac{100 \text{ Вт}}{230 \text{ В}} = 0,435 \text{ А}$ . Зовнішнє освітлення дороги, а

не пішохідної зони або двору, є більш вагомим ураховуючи більшу потужність і кількість освітлювальних установок на одиницю площі вулично-дорожніх мереж. Зважаючи на аналіз літератури входами системи НЛВМ будуть освітленість і рух автотранспорту до яких додається ще тариф на електроенергію.

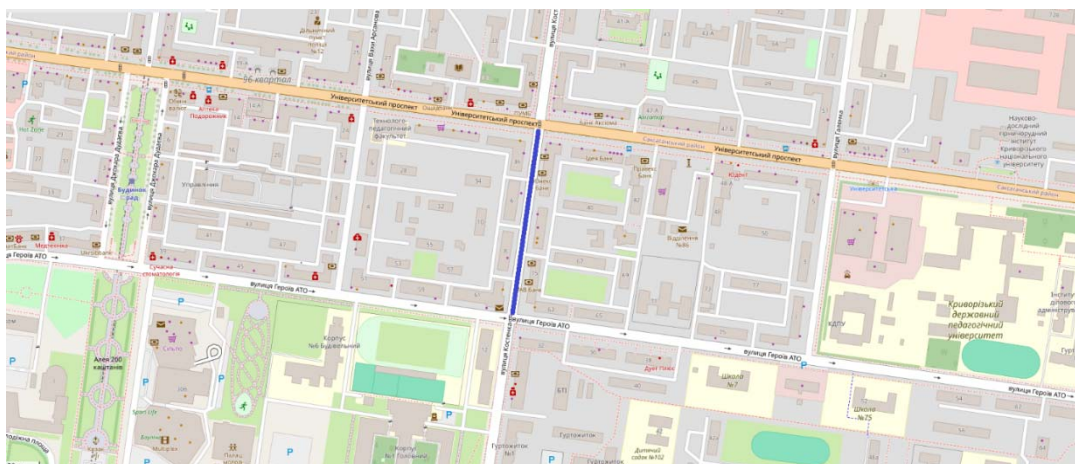


Рисунок 1 – Ділянка дорожнього покриття м. Кривого Рогу, яка освітлюється LED-світильниками  
Джерело: Google Maps

Керування джерелами світла реалізується LED-драйвером, який підтримує постійний струм на світлодіодах і регулює освітленість широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) напруги. Так як драйвер LED-світильника регулює освітленість ШІМ напруги, то першим виходом нечіткої системи керування буде «шпаруватість ШІМ». Ураховуючи, що живлення освітлювальної установки можна здійснювати або від електромережі або від акумуляторів, які зберігають енергію вироблену сонячною панеллю вдень, тому система має визначати, яке джерело живлення раціонально використовувати в даний момент. Тому другим виходом буде «джерело живлення».

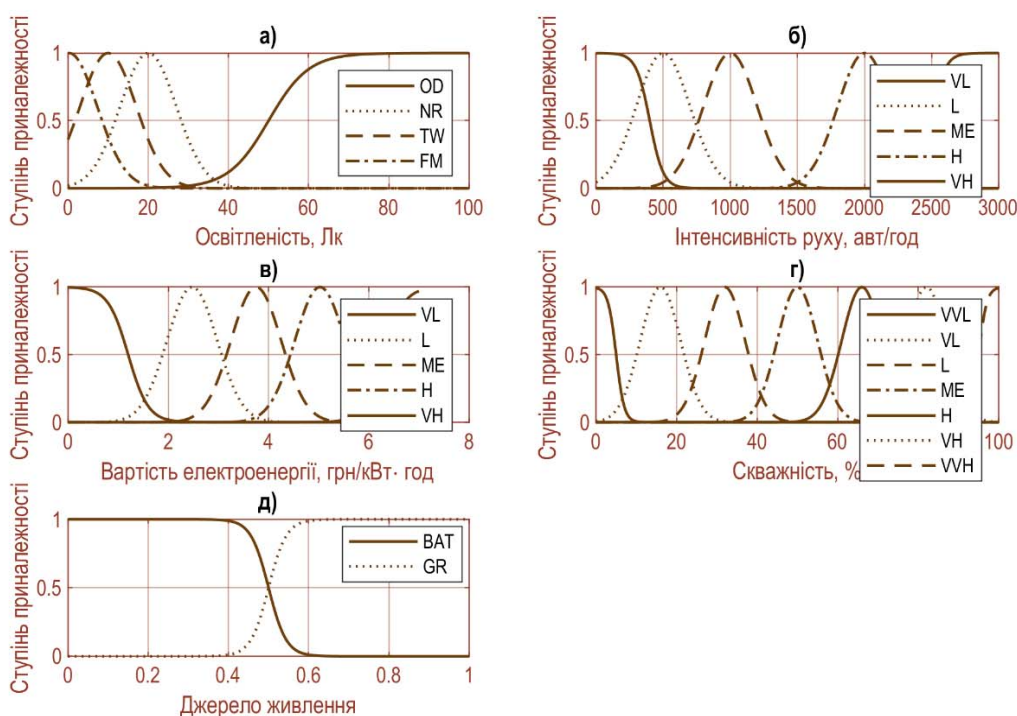
Розробимо систему НЛВМ для керування електротехнічним комплексом вуличного освітлення.

Фазифікація функцій приналежності до множин лінгвістичної змінної «освітленість» ( $E$ ) провадиться таким чином. Під час розробки нечіткої системи керування вуличним освітленням недоцільно брати до уваги рівні освітленості, котрі відповідають ясному або похмурому дню. Так як у такому варіанті в застосуванні освітлювальних установок немає потреби. Включати вуличне освітлення потрібно з настанням сутінок. У [22] показані значення освітленості для різних часів доби. Сутінкам відповідає значення 10 лк, а дуже похмурому дню – 100 лк. Освітленість при якій потрібно освітлювати дороги повинно бути десь між цими двома значеннями, тому прийнято 50 лк. З іншого боку, освітленість може бути близькою до нуля, проте не може бути від'ємною. Отже обмежимо кінцеву множину  $E$  значеннями  $0 \leq e \leq 100$  лк. Виділимо тут чотири нечіткі множини: «дуже похмурий день», «нормована освітленість», «сутінки», «повний місяць». Середні значення для функцій приналежності до цих множин взяті з [22] і становлять 50, 20, 10, 0,267 лк, відповідно. Нормована освітленість для доріг прийнята за вимогами ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» [23]. Графіки функцій приналежності наведені на рис. 2 а.

Використовувати додатково значення освітленості з [22], а саме такі як-то «глибокі сутінки» (1 лк) або «зоряне саяво» ( $2 \cdot 10^{-3}$  лк), недоцільно через практично повне співпадіння середніх значень функцій приналежності, що у розглянутих межах освітленості призводить до їх незначної відмінності та може викликати неоднозначність у встановленні приналежності результатів вимірювання до нечітких множин при нечіткому виводі.

При керуванні освітленням потрібно враховувати наявність транспорту або людей в області дії освітлювальної установки. Достатньо поширеним є підхід, коли проводять індивідуальне керування світильниками, коли фіксується присутність

об'єктів. Разом з тим, при такому підході можлива часта зміна рівня освітленості світлоточками через постійну появу або зникнення об'єктів. У випадку транспортної магістралі це може викликати зоровий дискомфорт, перенапруження водіїв та призвести до аварії. Тому більш доцільним буде використовувати як керуючу дію інтенсивність руху автотранспорту між двома світлофорами або двома перехрестями. Тобто проводити блочне керування освітлювальними установками. При фазифікації лінгвістичної змінної «інтенсивність руху автотранспорту» ( $T$ ) скористаємося вимогами до освітлення вулиць і доріг із регулярним рухом з ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» [23]. Кінцеву множину  $T$  обмежимо значеннями  $0 \leq t \leq 3000$  авто/годину. Вона буде описана п'ятьма нечіткими множинами: «дуже висока інтенсивність» (VL), «висока інтенсивність» (L), «середня інтенсивність» (ME), «низька інтенсивність» (H), «дуже низька інтенсивність» (VH). Їх середні значення становлять 400, 500, 1000, 2000, 2500 авто/годину. Графіки функцій приналежності наведені рис. 2 б.



а) «освітленість»; б) «інтенсивність руху автотранспорту»; в) «тариф на електричну енергію»; г) «шпаруватість ШІМ-контролера» д) «джерело живлення»

Рисунок 2 – Функції приналежності до множин змінних:

Джерело: розроблено авторами

Для фазифікації лінгвістичної змінної «тариф на електричну енергію» проаналізуємо сучасний стан питання розрахунків між електропостачальними компаніями та споживачами. На сьогодні діє система погодинної зміни тарифу на електричну енергію. Підприємство попередньо за добу робить замовлення на обсяг потужностей, які протягом наступного дня будуть споживатися. Це відрізняється від того, як розрахунки проводились раніше. Тоді тарифи хоча і були диференційованими за періодами доби, але практично не змінювалися день від дня. Тільки в моменти їх перегляду. Розглянувши дані про тарифи на електричну енергію виділяються різні рівні, як-то коли він дуже високий, високий, середній, низький або дуже низький. Тому лінгвістичну змінну «тариф на електричну енергію» опишемо п'ятьма аналогічними

нечіткими множинами з середніми значеннями 1,2, 2,475, 3,75, 5,025 і 6,3 грн/кВт·год. Сама її кінцева множина вона буде обмежена значеннями  $0 \leq p \leq 7$  грн/кВт·год. Графіки функцій приналежності наведені рис. 2 в.

Шпаруватість ШІМ може змінюватися від 0 до 100 %, тобто від значення, котрі відповідають з одного боку відсутності напруги, з іншого максимально можливого рівню напруги, тому кінцеву множину **D** для такої вихідної лінгвістичної змінної обмежимо так:  $0 \leq d \leq 100$  %. Для більш точного регулювання освітленості лінгвістична змінна «шпаруватість ШІМ-контролера» під час фазифікації буде описана сімома нечіткими множинами: «дуже-дуже низька» (VVL), «дуже низька» (VL), «низька» (L), «середня» (ME), «висока» (H), «дуже висока» (VH), «дуже-дуже висока» (VVH). Графіки функцій приналежності наведені рис. 2 г. Усі вони є функціями гладкими. Середні значення для них становлять 5, 16, 32, 50, 66, 82 і 95 %, відповідно.

Лінгвістична змінна «джерело живлення» містить тільки дві нечіткі множини – «електрична мережа» і «акумулятор». У принципі, для цей вихід системи описується чіткою логікою – або жити від акумуляторної батареї, або ні. Проте для того, щоб не гібридувати систему нечіткого виводу також її фазифікуємо. Кінцеву множину **S** обмежимо значеннями  $0 \leq s \leq 1$ . Параметри функції підібрані таким чином (див. рис. 2 д), щоб гладкі функції приналежності були максимально подібні до чіткого логічного представлення. Значення 0,5 є своєрідним пороговим значенням в такому випадку. Якщо НЛВМ встановлює на виході число, що вище або дорівнює 0,5, то живлення здійснюється від електромережі міста, якщо менше – то від акумулятора.

Розглянемо принципи створення бази правил нечіткої системи керування вуличним освітленням.

При прийнятті рішення про джерело живлення береться до уваги висновок нечіткої системи керування вуличного освітлення, проте підключення акумуляторної батареї здійснюється за умови наявності достатнього рівня заряду. Тобто нечітка логіка поєднується з класичною. Якщо рівень освітленості й інтенсивність руху низькі, то потужність освітлювального пристрою залишаємо низькою.

Нечіткий висновок про вибір джерела живлення проводиться на основі оцінки тарифу на електроенергію, коли вона середня, висока і дуже висока, то дається рекомендація на підключення акумулятора, коли низька і дуже низька – на живлення від електромережі міста.

Завжди при високій освітленості дорожнього покриття, котра відповідає дуже похмурому дню, тобто від 50 лк і більше, шпаруватість ШІМ дуже дуже низька. Тариф на електроенергію та інтенсивність руху автотранспорту тут до уваги не беруться, тому що згідно норм [23] освітленість має бути 20 лк або нижче. Також враховуючи низький рівень енергоспоживання освітлювальним приладом у цьому випадку живлення може здійснюватися від акумулятора і тільки коли вартість електроенергії дуже низька можна переключитися на мережу.

При низькому рівні освітленості «повний місяць» і трафіку вище середнього, якщо є можливість жити освітлювальний пристрій від акумуляторної батареї то це потрібно робити, так як у цьому випадку буде найвище енергоспоживання і тому жити від електромережі недоцільно через високі витрати на покупку електроенергії.

Від мережі живлення відбувається коли середня вартість електроенергії. Якщо вартість електроенергії або електроспоживання високі тоді доцільно вводити в дію акумулятори.

Вихідні поверхні для НЛВМ наведені на рис. 3.

Для оцінки енергоефективності нечіткого керування вуличним освітленням потрібно змоделювати роботу створеної системи. Здійснено генерування тестових сигналів, які будуть відповідати фактичним умовам роботи.

Вхідний тестовий сигнал за освітленістю складається з трьох частин. Перша і третя частини відповідають природнім сутінкам, котрі наступають під час заходу або сходу сонця. Ці дві ділянки мають експоненціальні форми.

Вночі освітленість дорівнює 20 лк, що відповідає нормованому значенню штучного зовнішнього освітлення для дорожніх покриттів. Зміна освітленості покриття, наприклад, від світла фар автомобілів, імітується додаванням випадкової величини, як описано нижче.

Для генерації основної форми сигналу в літню та зимову пори року взяті дані по схід і захід сонця за періоди 14.01.2024 – 15.01.2024 і 14.07.2024 – 15.07.2024. 15.01.2024 сутінки починаються о 16.55 і тривають до настання ночі о 17.34, тобто 39 хвилин. Сама ніч триває до 06.19, тобто 765 хвилину. Потім починається світанок, який триває 38 хвилин до повного сходу сонця о 06.57. 15.07.2024 сутінки починаються о 21.21 і тривають до настання ночі о 22.14, тобто 52 хвилини. Сама ніч триває до 03.32, тобто 318 хвилину. Потім починається світанок, який триває 53 хвилини до повного сходу сонця о 04.25. До основного сигналу додається випадкова величина зі стандартним відхиленням 20 лк, яка змінює значення на кожному системному дискретному відліку. Мінімальне значення сумарного сигналу обмежується 0 лк, так як освітленість негативною бути не може. Приклад тестового сигналу для зимового часу наведений на рис. 4 а.

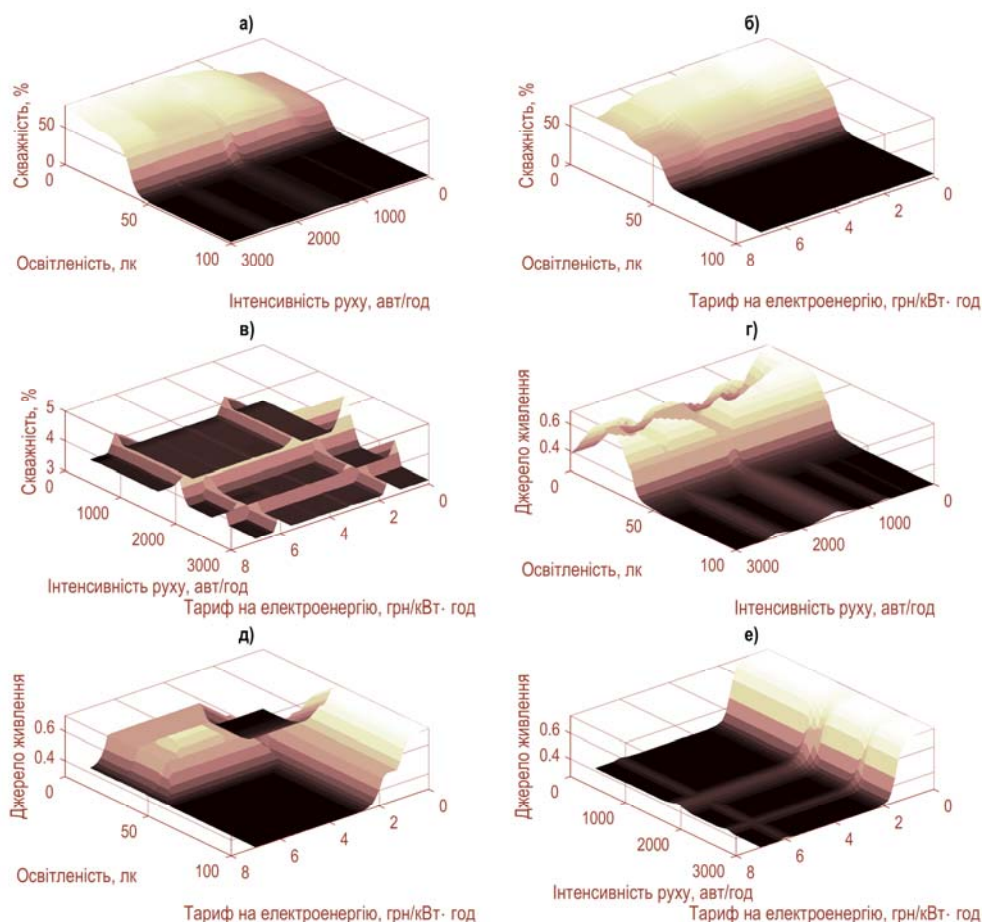


Рисунок 3 – Вихідні поверхні НЛВМ

Джерело: розроблено авторами

Як показують дослідження [24–26] у нічний період доби дорожній трафік являє собою опуклу функцію. Приблизно о 19-20 годині кількість автотранспорту на дорогах починає знижуватись і досягає мінімуму десь в середині ночі, а потім збільшується до 6-8 години. Це пов'язано з необхідністю ввечері та зранку добиратися з роботи додому і навпаки, а також відсутністю робочих переїздів у нічний час. Така залежність спостерігається для доріг у різних містах і країнах. При цьому графіки інтенсивності руху автотранспорту не демонструють сезонного характеру. І це очікувано, так як дорожній рух прямо корелює з робочими годинами [25], а вони завжди постійні не дивлячись на зиму або літо. Інтенсивність трафіку буде мати більший вплив на роботу системи у тих сезонах, коли тривалість ночі більша, тому що в цьому випадку буде охоплювати як періоди з високою так і низькою інтенсивністю руху. У інший час, особливо влітку, освітлення буде більше працювати в час з низькою інтенсивністю руху. Для моделювання вхідного сигналу за автотрафіком використовуємо параболічну залежність [27] до якої додаємо випадкові величини. Приклад тестового сигналу для зимового часу наведений на рис. 4 б.

Вхідний тестовий сигнал за тарифом на електричну енергію генеруємо беручи за основу ринкові дані до яких додаємо випадкову величину розподілену за нормальним законом зі стандартним відхиленням 0,5 грн/кВт·год. Для аналізу роботи зовнішнього освітлення в зимовий період взято дані про тарифи з 17:00 14.02.2024 по 08:00 15.02.2024, в літній період – з 21:00 17.04.2024 по 08:00 18.04.2024. У останньому варіанті взята інформація за квітень 2024, так як брати за 2023 вже не дуже актуально, а реальні тарифи для дати 15.07.2024 на момент виконання дослідження ще не відома. Приклад тестового сигналу для зимового часу наведений на рис. 4 в.

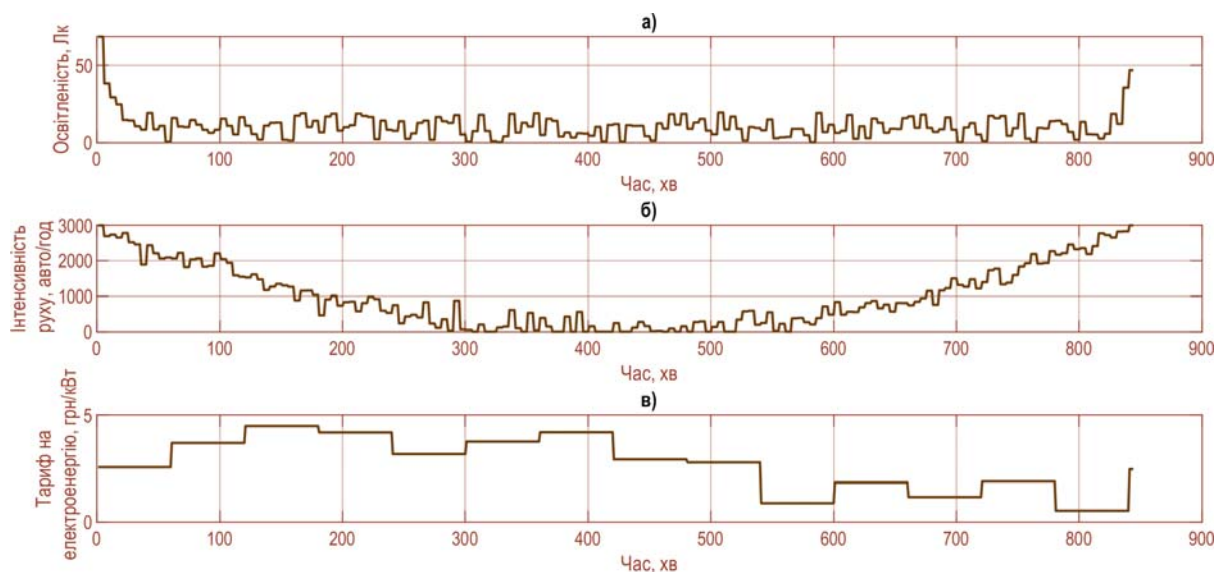


Рисунок 4 – Тестові сигнали для моделювання роботи нечіткої системи керування вуличним освітленням

Джерело: розроблено авторами

Розглянемо результати моделювання роботи системи.

У зимовий час споживання електроенергії в системі без керування обчислюється за графіком роботи вуличного освітлення в місті Кривий Ріг. Тобто з урахуванням того, що з моменту заходу сонця і до 23.00 та після 05.00 і до повного світанку освітлення працює на повну потужність, а між 23.00 і 05.00 освітлювальні установки або споживають 50% від загальної потужності, або освітлювальна мережа не працює. Для

літного часу прийнято, що зважаючи на те, що початкова стадія сутінок починається вже о 02.19 (дані за 15.07.2024) і повністю світає вже о 04.25, час відключення зовнішнього освітлення становить 3 години: з 23.00 по 02.00, так як до 05.00 потреби в зовнішньому освітленні вже немає. Аналізуємо два випадки роботи освітлення без керування у нічний час: освітлювальні установки споживають 50% від загальної потужності; освітлювальна мережа не працює.

Обчислення електроспоживання при залученні нечіткої системи керування провадилося для декількох варіантів налаштування дискретного кроку (5 і 10 хвилин) між вимірюваннями освітленості та інтенсивністю руху автомобільного транспорту і джерел живлення освітлювальних установок (тільки від електромережі та від електромережі або акумулятора). Прийнято, що акумулятор має достатній заряд для живлення освітлювальної установки протягом того часу, коли нечітка система рекомендує отримувати енергію від неї. У реальному випадку це, звісно, не так, але для оцінки енергоефективності цього достатньо.

Проаналізуємо результати моделювання роботи нечіткої системи керування електротехнічним комплексом вуличного освітлення для літньої та зимової ночі і десятих LED-світильників, наведені у табл. 1. Графіки роботи системи НЛВМ взимку показані на рис. 5.

Таблиця 1 – Результати моделювання роботи систем керування вуличним освітленням

Крок, хв	Конфігурація системи	Споживання електроенергії, Вт·год	
		Взимку	Влітку
-	Без керування / 50% потужності	11033.3	5533.33
-	Без керування / Відключено	8033.33	4033.33
10	Нечітка система керування з живленням від електромережі	7959.55	2613.57
5	Нечітка система керування з живленням від електромережі	7936.19	2571.66
10	Нечітка система керування з живленням від електромережі /акумулятора	2162.34	1365.95
5	Нечітка система керування з живленням від електромережі /акумулятора	2462.89	1387.04

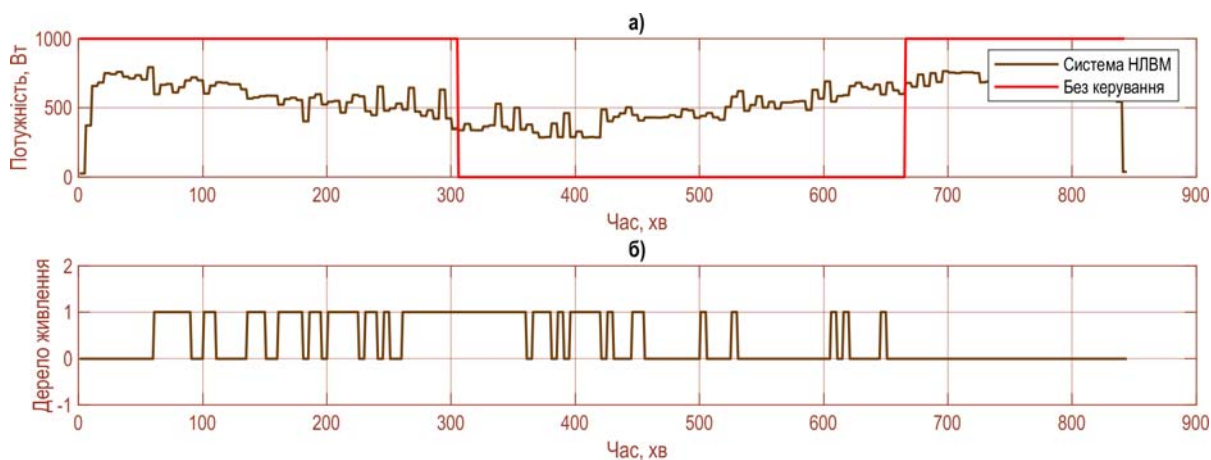


Рисунок 5 – Моделювання системи НЛВМ керування 10 LED-світильниками вуличного освітлення

Джерело: розроблено авторами

Як і очікувалося електропостачання освітлювальних установок від двох джерел живлення зменшує споживання електричної енергії більш значно. Так, у зимову ніч при живленні тільки від електромережі споживання скорочується на 0.92% і 1.21%, для дискретних кроків 10 і 5 хвилин, якщо співставляти з системою без керування коли освітлювальна мережа відключається на 6 годин, якщо ж вночі протягом 6 годин споживається тільки 50% потужності освітлювальним установками, то ці відсотки дорівнюють 27.85% і 28.07%. Якщо дивитися на живлення від електромережі або акумулятора, то має місце скорочення на 73.08% і 69.34% та на 80.4% і 77.68%, відповідно. Для літньої ночі ситуація така сама. Живлення керованої системи тільки від електромережі дає скорочення споживання на 35.2% і 36.24%, якщо співставляти з системою без керування і відключенням освітлювальної мережі на 3 години, якщо співставляти з 50% споживанням потужності, то на 52.77% і 53.52%. Якщо дивитися на живлення від електромережі або акумулятора, то має місце скорочення на 66.13% і 65.61% та на 75.31% і 74.93%, відповідно.

Звернемо увагу на те, що скорочення споживання електроенергії в зимову ніч, в системі з нечітким керування і живленням тільки від електромережі не дуже велике, якщо співставляти з системою без керування і повним відключенням вуличного освітлення, тобто тільки 0.92% або 1.21% залежно від дискретного кроку. Це зумовлюється більшим часом нульового енергоспоживання освітлювальними приладами взимку ніж влітку. Проте економія невелика, але вона є, і тому сама система може використовуватися.

Дискретний крок практично не має впливу, у більшій частині змодельованих варіантів роботи нечіткої системи, на споживання електроенергії. Так, наприклад, при живленні тільки від електромережі різниця становить лише 0.29% для освітлення в зимову ніч та 1.04% в літню. При живленні від акумулятора або електромережі для літньої ночі різниця для різних дискретних кроків становила 0.52%. Тільки, коли було розглянуто живлення від акумулятора або електромережі для зимової ночі, різниця між налаштуваннями дискретного кроку 5 і 10 хвилин була значнішою – 3.72%. Це дані якщо порівнювати розглянуті системи з системою без керування і нульовим споживанням освітлювальною мережею протягом 6 годин ночі. Для системи без керування з 50% споживанням вночі відсотки не дуже різняться. Така ситуація виникає, тому що за такі кроки освітленість та інтенсивність руху автотранспорту дуже кардинально не міняється.

**Висновок.** Можна констатувати, що нечітка система керування електротехнічним комплексом вуличного освітлення є енергоефективною. Також рекомендується спеціалізованим підприємствам населених пунктів, у сфері відповідальності яких знаходиться освітлювальна мережа, більше уваги приділяти не тільки заміні джерел світла на нові більш енергоефективні, а й впровадженню альтернативних джерел живлення освітлювальних установок, котрі дозволяють заряджати акумулятори в світлий час, як-то, наприклад, сонячних панелей. Це, разом з залученням розглянутої нечіткої системи керування, дасть можливість ще більше зекономити на витратах на електроенергію, що дуже актуально в сучасних умовах.

## Список літератури

1. Салтиков В.О. Освітлення міст: навч. посібник. Харків: ХНАМГ, 2009. 221 с.
2. Зовнішнє освітлення. *Офіційний портал Києва* : веб-сайт. URL: [https://kyivcity.gov.ua/navkolnyshnie\\_seredovyshche\\_mista/vulychne\\_osvitlennia/zovnishnie\\_osvitlennia/](https://kyivcity.gov.ua/navkolnyshnie_seredovyshche_mista/vulychne_osvitlennia/zovnishnie_osvitlennia/) (дата звернення: 10.03.2024).

3. У Полтавській громаді змінили графік зовнішнього освітлення. *Суспільне Полтава* : веб-сайт. URL: <https://suspilne.media/poltava/540495-v-poltavskij-gromadi-zminili-grafik-zovnisnogo-osvitlenna/> (дата звернення: 10.03.2024).
4. З 1 жовтня у Кривому Розі змінять графік зовнішнього освітлення вулиць. *Рудана* : веб-сайт. URL: <https://rudana.com.ua/news/z-1-zhovtnya-u-kryvomu-rozi-zminyat-grafik-zovnishnogo-osvitlennya-vulyc> (дата звернення: 10.03.2024).
5. Alhamwi A., Unaichi C., Medjroubi W. Modeling Urban Street Lighting Infrastructure Using Open Source Data Sets. ETG Congress 2021. 2021. P. 1–6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9469640>
6. Kumar S., Deshpande A., Ho S. S., Ku J. S., Sarma S. E. Urban Street Lighting Infrastructure Monitoring Using a Mobile Sensor Platform. *IEEE Sensors Journal*. 2016. Vol. 16, No 12. P. 4981–4994. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2552249>
7. Liu Y. Research on the Innovation of Urban Street Visualization Light Monitoring System based on GIS Technology. 2017 4th International Conference on Machinery, Materials and Computer (MACMC 2017). 2018. P. 19–22. <https://doi.org/10.2991/macmc-17.2018.5>
8. Omar A., AlMaeni S., Attia H., Takruri M., Altunajji A., Sanduleanu M., Shubair R., Ashhab M. S., Al Ali M., Al Hebsi G. Smart City: Recent Advances in Intelligent Street Lighting Systems Based on IoT. *Journal of Sensors*. 2022. e5249187. <https://doi.org/10.1155/2022/5249187>
9. Kabir M. H., Al Noman A., Al Afiq A., Raju R. H., Hasan M. N., Ahmad. Design and Implement IoT-Based Intelligent Manageable Smart Street Lighting Systems for Future Smart City. *Engineering Proceedings*. 2023. Vol. 56, No 1. Article 1. <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15535>
10. Balázs L., Braun F., Lengyel J. Energy Saving Potential of Traffic-Regulated Street Lighting. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No 8. Article 8. <https://doi.org/10.3390/su15086750>
11. Agramelal F., Sadik M., Moubarak Y., Abouzahir S. Smart Street Light Control: A Review on Methods, Innovations, and Extended Applications. *Energies*. 2023. Vol. 16, No 21. Article 21. <https://doi.org/10.3390/en16217415>
12. Yan P., Wang J. Intelligent Street Light Control System Based on Fuzzy Control Technology. *Academic Journal of Computing & Information Science*. 2022. Vol. 5, No 4. P. 35–40. <https://doi.org/10.25236/AJCIS.2022.050406>
13. Wang J., Yan P. Intelligent Street Light Control System Based on Fuzzy Control Algorithm. *Academic Journal of Computing & Information Science*. 2022. Vol. 5, No 7. P. 27–32. <https://doi.org/10.25236/AJCIS.2022.050705>
14. Satam I. A. Fuzzy-based smart system for controlling road lights. *Vojnotehnički Glasnik*. 2022. Vol. 70, No 2. P. 297–313. <https://doi.org/10.5937/vojtehg70-36670>
15. Zeng J., Ni W., Zhang R., Shi L., Guo C., Chen Y. Intelligent Street Lamp Control System with Dynamic Light Control Function. 2018 17th International Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering and Science (DCABES). 2018. P. 181–183. <https://doi.org/10.1109/DCABES.2018.00054>
16. Wu H., Li C., Duan G. Research on a fuzzy algorithm for intelligent power-saving control of urban street lamps. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*. 2024. Vol. 177, No 1. P. 3–14. <https://doi.org/10.1680/jsmic.23.00010>
17. Ai M., Wang P., Ma W. Research and application of smart streetlamp based on fuzzy control method. *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 183. P. 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.02.069>
18. Shadli A. A. A., Hanafi D. Development of An Intelligence Street Light Using Fuzzy Logic in Control System. *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*. 2020. Vol. 1, No 1. Article 1.
19. Shaheen H. I., Gapit M., Martinović A., Lešić V. Street Lighting Optimal Dimming with Model Predictive Control. 2023 62nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC). 2023. P. 8864–8869. <https://doi.org/10.1109/CDC49753.2023.10383919>
20. Kolasa M. The concept of intelligent system for street lighting control using artificial neural networks. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2016. Vol. 1, No 7. P. 34–39. <https://doi.org/10.15199/48.2016.07.05>
21. Moretti F., Pizzuti S., Annunziato M., Panzieri S. Advanced Street Lighting Control through Neural Network Ensembling. *SMART 2013, The Second International Conference on Smart Systems, Devices and Technologies*. 2013. 76–81.
22. Radiometry and photometry in astronomy. URL: <https://www.stjarnhimlen.se/comp/radfaq.html> (дата звернення: 10.04.2024).
23. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/DBN00078> (дата звернення: 10.03.2024).
24. He H., Wang J., Wei H., Ye C., Ding Y. Fractal behavior of traffic volume on urban expressway through adaptive fractal analysis. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 2016. Vol. 443. P. 518–525. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.10.004>

25. Venkatanarayana R., Smith B. L., Demetsky M. J. Quantum-Frequency Algorithm for Automated Identification of Traffic Patterns. *Transportation Research Record*. 2007. Vol. 2024, No 1. P. 8–17. <https://doi.org/10.3141/2024-02>
26. Järv O., Ahas R., Saluveer E., Derudder B., Witlox F. Mobile Phones in a Traffic Flow: A Geographical Perspective to Evening Rush Hour Traffic Analysis Using Call Detail Records. *PLOS ONE*. 2012. Vol. 7, No 11. e49171. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049171>
27. Zambrano-Martinez J. L., Calafate C. T., Soler D., Cano J.-C., Manzoni P. Modeling and Characterization of Traffic Flows in Urban Environments. *Sensors*. 2018. Vol. 18, No 7. Article 7. <https://doi.org/10.3390/s18072020>

## References

1. Saltykov, V.O. (2009). *Osvitlennia mist: navch. posibnyk*. [Lighting of cities: a textbook]. Kharkiv: KhNAMH [in Ukrainian].
2. Zovnishnie osvittennia. Ofitsijnyj portal Kyieva : veb-sajt. [Outdoor lighting. Official portal of Kyiv: website]. Retrieved from: [https://kyivcity.gov.ua/navkolyshnie\\_seredovyshe\\_mista/vulychne\\_osvittennia/zovnishnie\\_osvittennia/](https://kyivcity.gov.ua/navkolyshnie_seredovyshe_mista/vulychne_osvittennia/zovnishnie_osvittennia/) [in Ukrainian].
3. U Poltavskij hromadi zminyly hrafik zovnishn'oho osvittennia: veb-sajt. [Outdoor lighting schedule changed in Poltava community]. (2024, April 10). *Suspil'ne Poltava*. Retrieved from: <https://suspilne.media/poltava/540495-v-poltavskij-gromadi-zminili-grafik-zovnishnogo-osvittennia/> [in Ukrainian].
4. Z 1 zhovtnia u Kryvomu Rozi zminiat' hrafik zovnishn'oho osvittennia vulyts'. Rudana : veb-sajt. [Starting October 1, Kryvyi Rih will change its street lighting schedule] (2024, April 10). Rudana. Retrieved from: <https://rudana.com.ua/news/z-1-zhovtnya-u-kryvomu-rozi-zminyvat-grafik-zovnishnogo-osvittennia-vulyc> [in Ukrainian].
5. Alhamwi, A., Unaichi, C., & Medjroubi, W. (2021). Modeling Urban Street Lighting Infrastructure Using Open Source Data Sets. *ETG Congress 2021*, 1–6. Retrieved from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9469640> [in English].
6. Kumar, S., Deshpande, A., Ho, S. S., Ku, J. S., & Sarma, S. E. (2016). Urban Street Lighting Infrastructure Monitoring Using a Mobile Sensor Platform. *IEEE Sensors Journal*, 16(12), 4981–4994. Retrieved from: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2552249> [in English].
7. Liu, Y. (2018). Research on the Innovation of Urban Street Visualization Light Monitoring System based on GIS Technology. *2017 4th International Conference on Machinery, Materials and Computer (MACMC 2017)*, 19–22. <https://doi.org/10.2991/macmc-17.2018.5> [in English].
8. Omar, A., AlMaeni, S., Attia, H., Takruri, M., Altunajji, A., Sanduleanu, M., Shubair, R., Ashhab, M. S., Al Ali, M., & Al Hebsi, G. (2022). Smart City: Recent Advances in Intelligent Street Lighting Systems Based on IoT. *Journal of Sensors*, 2022, e5249187. <https://doi.org/10.1155/2022/5249187> [in English].
9. Kabir, M. H., Al Noman, A., Al Afiq, A., Raju, R. H., Hasan, M. N., & Ahmad. (2023). Design and Implement IoT-Based Intelligent Manageable Smart Street Lighting Systems for Future Smart City. *Engineering Proceedings*, 56(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15535> [in English].
10. Balázs, L., Braun, F., & Lengyel, J. (2023). Energy Saving Potential of Traffic-Regulated Street Lighting. *Sustainability*, 15(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/su15086750> [in English].
11. Agramelal, F., Sadik, M., Moubarak, Y., & Abouzahir, S. (2023). Smart Street Light Control: A Review on Methods, Innovations, and Extended Applications. *Energies*, 16(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/en16217415> [in English].
12. Yan, P., & Wang, J. (2022). Intelligent Street Light Control System Based on Fuzzy Control Technology. *Academic Journal of Computing & Information Science*, 5(4), 35–40. <https://doi.org/10.25236/AJCIS.2022.050406> [in English].
13. Wang, J., & Yan, P. (2022). Intelligent Street Light Control System Based on Fuzzy Control Algorithm. *Academic Journal of Computing & Information Science*, 5(7), 27–32. <https://doi.org/10.25236/AJCIS.2022.050705> [in English].
14. Satam, I. A. (2022). Fuzzy-based smart system for controlling road lights. *Vojnotehnički Glasnik*, 70(2), 297–313. <https://doi.org/10.5937/vojtehg70-36670> [in English].
15. Zeng, J., Ni, W., Zhang, R., Shi, L., Guo, C., & Chen, Y. (2018). Intelligent Street Lamp Control System with Dynamic Light Control Function. *2018 17th International Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering and Science (DCABES)*, 181–183. <https://doi.org/10.1109/DCABES.2018.00054> [in English].

16. Wu, H., Li, C., & Duan, G. (2024). Research on a fuzzy algorithm for intelligent power-saving control of urban street lamps. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, 177(1), 3–14. <https://doi.org/10.1680/jsmic.23.00010> [in English].
17. Ai, M., Wang, P., & Ma, W. (2021). Research and application of smart streetlamp based on fuzzy control method. *Procedia Computer Science*, 183, 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.02.069> [in English].
18. Shadli, A. A. A., & Hanafi, D. (2020). Development of An Intelligence Street Light Using Fuzzy Logic in Control System. *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*, 1(1), Article 1 [in English].
19. Shaheen, H. I., Gapit, M., Martinović, A., & Lešić, V. (2023). Street Lighting Optimal Dimming with Model Predictive Control. *2023 62nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 8864–8869. <https://doi.org/10.1109/CDC49753.2023.10383919>
20. Kolasa, M. (2016). The concept of intelligent system for street lighting control using artificial neural networks. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1(7), 34–39. <https://doi.org/10.15199/48.2016.07.05>
21. Moretti, F., Pizzuti, S., Annunziato, M., & Panzieri, S. (2013). Advanced Street Lighting Control through Neural Network Ensembling. *SMART 2013, The Second International Conference on Smart Systems, Devices and Technologies*, 76–81.
22. Radiometry and photometry in astronomy. *stjarnhimlen.se*. Retrieved from: <https://www.stjarnhimlen.se/comp/radfaq.html> (Last accessed: 10.04.2024).
23. DBN V.2.5-28:2018 Pryrodne i shtuchne osvittlennia [DBN V.2.5-28:2018 Natural and artificial lighting]. Retrieved from: <https://ips.ligazakon.net/document/DBN00078> [in Ukrainian].
24. He, H., Wang, J., Wei, H., Ye, C., & Ding, Y. (2016). Fractal behavior of traffic volume on urban expressway through adaptive fractal analysis. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 443, 518–525. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.10.004> [in English].
25. Venkatanarayana, R., Smith, B. L., & Demetsky, M. J. (2007). Quantum-Frequency Algorithm for Automated Identification of Traffic Patterns. *Transportation Research Record*, 2024(1), 8–17. <https://doi.org/10.3141/2024-02> [in English].
26. Järvi, O., Ahas, R., Saluveer, E., Derudder, B., & Witlox, F. (2012). Mobile Phones in a Traffic Flow: A Geographical Perspective to Evening Rush Hour Traffic Analysis Using Call Detail Records. *PLOS ONE*, 7(11), e49171. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049171> [in English].
27. Zambrano-Martinez, J. L., Calafate, C. T., Soler, D., Cano, J.-C., & Manzoni, P. (2018). Modeling and Characterization of Traffic Flows in Urban Environments. *Sensors*, 18(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/s18072020> [in English].

**Oleh Sinchuk**, DSc (tech.), Professor, **Oleksii Mykhailenko**, PhD, Associate Professor,  
*Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine*

**Viktor Horshkov**

*Mining and Electromechanical College of Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine*

### **Fuzzy control system for the electrical complex of street lighting in settlements**

The article deals with the issue of improving the energy efficiency of electrical systems that provide comfortable living conditions for the population of cities and towns, namely street lighting.

A fuzzy control system for a group of LED luminaires of a road section is created that regulates the power of the lighting devices and, accordingly, their brightness and controls the connection to a power source (either to the grid or to a battery) depending on the level of illumination, traffic intensity and electricity tariff. It was found that a controlled system with combined power supply is more efficient. It reduces electricity consumption on a typical summer night by 75.31% and 74.93%, and on a winter night by 80.4% and 77.68% compared to the traditional street lighting option, when the lighting network is either completely shut down at night or operates at only 50% of capacity, respectively.

It can be stated that the fuzzy control system for the electrical complex of street lighting is energy efficient. It is also recommended that specialized enterprises in settlements responsible for the lighting network pay more attention not only to replacing light sources with new, more energy-efficient ones, but also to introducing alternative power sources for lighting installations that allow charging batteries during daylight hours, such as solar panels. This, along with the use of the fuzzy control system under consideration, will make it possible to save even more on electricity costs, which is very important in today's environment.

**street lighting, energy efficiency, control, fuzzy inference, modeling**

*Одержано (Received) 18.03.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 22.03.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*