УДК 621.311:004.77:628.9

ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ У СИСТЕМИ РОЗУМНОГО ОСВІТЛЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНУ ІНФРАСТРУКТУРУ МІСТА

Владислав Федькович

Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, Україна

Науковий керівник: Л. О. Борян,
старший викладач Миколаївський національний аграрний університет

Глобальна перебудова енергетичного сектору, стрімка урбанізація та постійне зростання вартості енергоресурсів висувають фундаментальні вимоги до модернізації комунальної та промислової інфраструктури. Традиційні системи зовнішнього та внутрішнього освітлення створюють колосальне навантаження на розподільчі електромережі, вимагаючи суттєвих фінансових витрат на оплату електроенергії та технічне обслуговування.

Значна частина наявного освітлювального обладнання працює в статичних режимах із постійною максимальною потужністю, що призводить до невиправданого перевитрачання ресурсів у періоди мінімальної активності громадян та транспортних засобів у нічний час. Перехід до концепції розумного міста (Smart City) передбачає глибинну цифровізацію мережевих елементів та створення динамічно керованих середовищ штучного освітлення.

Застосування технологій Інтернету речей (IoT) виступає базовим інструментом для побудови адаптивних освітлювальних комплексів нового покоління. Розумне освітлення дає змогу реалізувати концепцію освітлення за вимогою (Lighting on Demand), оптимізуючи енергоспоживання залежно від наявності рухомих об'єктів, рівня природної освітленості, погодних умов та часу доби.

Крім того, застарілі системи штучного освітлення вимагають регулярних планових обходів та ручного виявлення вихідних з ладу джерел світла, що створює додаткові витрати для комунальних служб та суттєво уповільнену реакцію на аварійні ситуації.

Метою дослідження є комплексне техніко-економічне та інженерне обґрунтування застосування бездротових сенсорних мереж, хмарних обчислень та інтелектуальних контролерів димування в системах розумного освітлення для забезпечення максимізації енергоефективності, підвищення надійності та оптимізації експлуатаційних витрат.

Структурно система розумного освітлення на базі технологій Інтернету речей являє собою багаторівневу комп'ютерно-інтегровану інфраструктуру. Вона складається з низького рівня фізичних пристроїв, мережевого транспорту даних та верхнього рівня хмарної аналітичної платформи управління.

Первинний рівень включає світлодіодні світильники (LED), інтегровані з датчиками руху, присутності, фотодатчиками, аналізаторами якості повітря та смарт-драйверами. Кожен такий світильник стає автономним вимірювально-управляючим вузлом із власною закладеною логікою роботи.

Для забезпечення безперебійного та завадостійкого обміну даними між просторово розподіленими світильниками використовуються сучасні протоколи бездротового зв'язку. В умовах щільної міської забудови найбільш ефективними є технології LoRaWAN, NB-IoT, Zigbee та самовідновлювальні Mesh-мережі.

Технологія LoRaWAN забезпечує покриття великих радіусів з мінімальним енергоспоживанням контролерів, що робить її оптимальною для магістрального та вулично-шляхового освітлення. Завдяки високій проникній здатності сигналу дані від тисяч світильників можуть передаватися на єдиний базовий концентратор.

Мережевий транспорт передає розширену телеметричну інформацію (напруга, струм, температура драйвера, коефіцієнт потужності) на центральний диспетчерський сервер. Це забезпечує повний контроль за станом кожної світлоточки в режимі реального часу та виключає потребу у фізичних обстеженнях території.

Використання протоколу DALI (Digital Addressable Lighting Interface) у поєднанні з IoT-контролерами дає змогу індивідуально адресувати кожен світильник або групу пристроїв, реалізуючи складні сценарії плавного димування (dimming) від 0% до 100% потужності [1].

Інтеграція алгоритмів машинного навчання та нейронних мереж у програмні платформи керування освітленням відкриває нові можливості для автоматизації прийняття рішень. Замість жорстко запрограмованих часових таймерів інтелектуальна система аналізує великі масиви історичних даних та прогнозує рівень необхідної освітленості.

Алгоритми штучного інтелекту враховують інтенсивність транспортних і пішохідних потоків, прогноз погоди, фази місяця та наявність туману чи опадів. Це дозволяє динамічно підлаштовувати рівень яскравості світла під конкретні умови навколишнього середовища.

Застосування граничних обчислень (Edge Computing) безпосередньо у контролерах опори освітлення дозволяє локально обробляти відеопотік з мікрокамер або сигналів сенсорів руху. Це дає змогу змінювати яскравість освітлення за мілісекунди при наближенні транспортного засобу та повертатися в режим енергозбереження.

Предиктивний аналіз стану обладнання (Predictive Maintenance) забезпечується безперервним моніторингом електричних параметрів. Алгоритми фіксують мікроколивання напруги та пульсації струму, що свідчать про прихований знос світлодіодного модуля або пускорегулювальної апаратури.

Автоматичне формування заявок для ремонтних бригад із зазначенням точних географічних координат та характеру несправності скорочує середній час відновлення функціонування системи (MTTR) та оптимізує складський запас комплектуючих деталей.

Крім того, системи машинного навчання здатні самостійно класифікувати види несправностей та відрізняти пошкодження кабельної лінії від виходу з ладу окремого світлодіодного модуля, що суттєво спрощує діагностику.

Впровадження інтелектуальних систем керування освітленням забезпечує високий техніко-економічний ефект за рахунок прямого скорочення витрат на електричну енергію та зниження операційних витрат на експлуатацію. Завдяки реалізації алгоритмів адаптивного димування загальне споживання електроенергії зменшується на 50–70% порівняно з базовими мережами.

Додатковий економічний виграш досягається за рахунок суттєвого продовження терміну служби світлодіодних модулів. Працюючи в зниженому режимі потужності протягом нічного часу (коли інтенсивність руху мінімальна), світлодіоди зазнають меншого термічного навантаження, що продовжує їх ресурс на 30–40% [1, 8].

Завдяки зниженню пікових навантажень на розподільчі трансформаторні підстанції зменшуються технологічні втрати в кабельних лініях. Це покращує показники якості електроенергії та підвищує загальну надійність електропостачання всього комунального або промислового сектора.

Упорядкування графіка роботи системи освітлення дозволяє уникнути передчасного зносу комутаційної апаратури та силових трансформаторів, що знижує капітальні витрати на реконструкцію мереж.

Період окупності проєктів повного переоснащення системи вуличного освітлення на базі IoT-технологій становить від 2 до 4 років, що робить їх привабливими для залучення приватних інвестицій через механізми енергосервісних контрактів (ЕСКО) [2, 10].

Ефективність функціонування розумного освітлення значною мірою залежить від чіткої організації матеріально-технічного забезпечення та диспетчерського керування. Інтеграція IoT-контролерів із геоінформаційними системами (ГІС) створює детальний цифровий двійник (Digital Twin) усієї освітлювальної інфраструктури об'єкта.

На цифровій карті диспетчера відображається оперативний статус кожного світильника, кабельної лінії та шафи управління. У разі виникнення короткого замикання або перевантаження система миттєво локалізує аварійну ділянку та відключає лише пошкоджений сегмент, зберігаючи працездатність мережі.

Автоматична логістична система на основі даних про фактичний знос обладнання формує графіки планово-запобіжних робіт і оптимізує маршрути руху аварійних бригад. Завдяки GPS-

моніторингу транспорту диспетчер направляє на об'єкт найближчу автовежу з необхідним комплектом деталей.

Такий підхід повністю усуває холості прогони спецтехніки, зменшує витрати пального та забезпечує безперервну безпеку пішоходів і автотранспорту в нічний час доби.

Аналіз ефективності використання матеріальних ресурсів дає змогу оптимізувати обсяги аварійного запасу обладнання на складах, зменшуючи заморожування обігових коштів підприємств.

Побудова цифрової інфраструктури розумного освітлення вимагає чіткого дотримання нормативно-правових норм України та міжнародних технічних стандартів. Правове регулювання у сфері комерційного обліку та енергоефективності визначається Законом України «Про ринок електричної енергії» та галузевими будівельними нормами [4].

Усі інтелектуальні пристрої вимірювання та керування повинні проходити обов'язкову процедуру оцінки відповідності та сертифікації для забезпечення безпечної експлуатації та захисту прав власності згідно з Цивільним кодексом України [4,6].

Захист недоторканності матеріальних та цифрових активів є необхідною умовою для безпечного функціонування критичної та муніципальної інфраструктури. Чіткий розподіл відповідальності спрощує процедури залучення інвестицій та укладання договорів [6].

Важливим аспектом функціонування IoT-мереж освітлення є забезпечення високого рівня кібербезпеки. Враховуючи, що опори освітлення є частиною критичної міської інфраструктури, несанкціонований доступ до мережі керування може призвести до масштабних збоїв у системі життєдіяльності міста.

Для захисту каналів зв'язку застосовується наскрізне шифрування даних (AES-128/256), двофакторна автентифікація пристроїв та ізоляція трафіку у віртуальних приватних мережах (VPN). Це унеможливлює перехоплення управління та підробку телеметричних даних.

Застосування розумного освітлення відіграє вагому роль у досягненні цілей сталого розвитку та декарбонізації економіки. Пряме зменшення споживання електричної енергії супроводжується відповідним скороченням викидів парникових газів (CO_2, SO_2, NO_x) на теплових електростанціях.

Крім того, адаптивне керування світловим потоком дає змогу ефективно боротися з явищем світлового забруднення (Light Pollution) у міських агломераціях. Напрямлений та регульований світловий потік зменшує паразитне розсіювання світла у верхню півсферу, знижуючи негативний вплив на нічну екосистему та біоритми людини.

Сучасні світлодіодні світильники, що використовуються у смарт-системах, виготовляються без використання токсичних сполук ртуті та важких металів, що спрощує їх подальшу утилізацію та повторну переробку матеріалів.

Зменшення нагріву корпусу та відсутність ультрафіолетового випромінювання запобігає негативному впливу на флору та фауну в паркових і рекреаційних зонах міст.

Системне впровадження Smart Lighting є важливим практичним кроком на шляху до створення екологічно чистого, комфортного та безпечного урбанізованого середовища.

Список використаних джерел

1. Система «Розумне освітлення» («Smart Lighting»). Корпорація «Ватра». URL: http://vatra.ua/download/PDF_VATRA/VATRA-2021-UKR_Smart_Lighting.pdf (дата звернення: 12.10.2026).

2. Розумне освітлення українських міст: тенденції, технології та перспективи. Радій LED. 2025. URL: https://radiyled.com/ua/blog/suchasne-osvitlennya-mist-v-ukrayini-tendenciyi-tehnologiyi-ta-perspektivi/ (дата звернення: 12.10.2026).

3. Трубчанінова К. А. Система «розумного» освітлення на базі бінарних дерев рішень. Український державний університет залізничного транспорту. URL: http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/16237/1/Trubchaninova.pdf (дата звернення: 12.10.2026).

4. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII : станом на 1 жовт. 2026 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text (дата звернення: 12.10.2026).

5. Семененко Ю. Використання інтернету речей у виробництві та логістиці. Наукові інновації та передові технології. 2024. № 4(32). URL: https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-4(32)-814-826 (дата звернення: 12.10.2026).

6. Цивільний кодекс України : Кодекс України від 16.01.2003 № 435-IV : станом на 5 серп. 2026 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/435-15#Text (дата звернення: 12.10.2026).

7. Bunke O., Novikov P. Тенденції розвитку інтернету речей в енергетиці. Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production. 2024. № 54. С. 53–59. URL: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-54-07 (дата звернення: 12.10.2026).

8. Sapozhnyk D. O., Plechystyi D. D. Using the Internet of Things for Energy Resource Conservation. Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute. 2023. Т. 169, № 4. С. 39–45. URL: https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-169-4-39-45 (дата звернення: 12.10.2026).

9. Застосування інтелектуальних систем для підвищення надійності та ефективності функціонування електроенергетичних мереж / М. Стаднік та ін. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2025. Т. 347, № 1. С. 291–299. URL: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-38 (дата звернення: 12.10.2026).

10. Інтернет речей в енергетиці: у чому користь? Kyivstar Business Hub. URL: https://hub.kyivstar.ua/articles/internet-rechej-v-energeticzi-u-chomu-koristi (дата звернення: 12.10.2026).