

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ,
ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА СВІТЛОТЕХНІКИ І ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

**ПРОЄКТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ
ВУЛИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Ігор МАКСИМЕНКОВ

гр. СДС 2023-1у

Керівник:

Віталій ГЕРАСИМЕНКО

к.т.н., доцент

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури

Кафедра світлотехніки і джерел світла

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма Світлотехніка та дизайн світлового середовища

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СДС

Віталій ГЕРАСИМЕНКО

«20» червня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Максименков Ігор Володимирович

1 Тема роботи: Проектування енергоефективної системи вуличного освітлення

керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Герасименко В. А., к.т.н., доцент кафедри СДС

затверджені наказом університету № 440-03 від «22» травня 2026 р.

2 Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи:
18.06.2026 р.

3 Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Матеріали переддипломної практики. Технічні характеристики відновлюваних джерел енергії.

4 Зміст бакалаврської кваліфікаційної роботи (перелік питань, які потрібно розробити):

4.1 Аналітична частина (огляд, аналіз, оцінка) Аналіз гібридних комплексів зовнішнього освітлення. Перспективи інтеграції відновлюваних джерел енергії в Україні. Глобальні виклики при проектуванні систем освітлення.

4.2 Світлотехнічна частина (вибір параметрів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення) Енергетичний розрахунок освітлювального навантаження. Вибір топології накопичення та зберігання енергії. Проектування комбінованої системи зовнішнього освітлення. Алгоритм керування гібридною системою.

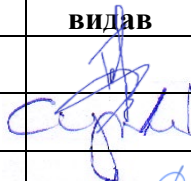
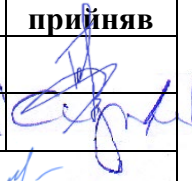
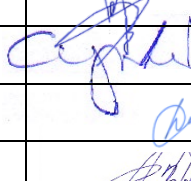
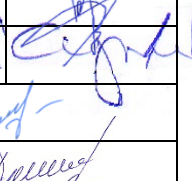
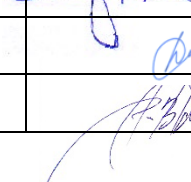
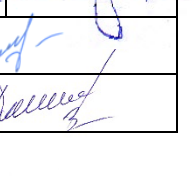
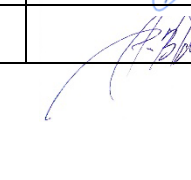
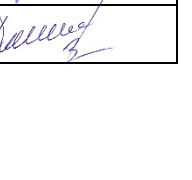
4.3 Аналіз результатів і рекомендації щодо застосування (напрями удосконалення, результати проведеної роботи) Практична реалізація та пріоритетні напрями застосування.

4.4 Охорона праці.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових слайдів):

Актуальність, мета та задачі роботи. Аналіз гібридних систем освітлення.
Вибір оптимальних параметрів сонячних панелей. Алгоритм керування гібридною системою. Технічна реалізація проєкту гібридної системи вуличного освітлення. Висновки проведеної роботи.

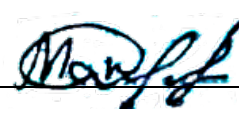
6 Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Віталій ГЕРАСИМЕНКО, доцент		
Охорона праці	Яків СЕРІКОВ, доцент		
Антиплагіат	Олена ДІДЕНКО, ст. викладач		
Нормоконтроль	Роман ВОРОНОВ, доцент		

7. Дата видачі завдання 11.05.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітична частина	11.05.26 – 23.05.26	
2	Світлотехнічна частина	24.05.26 – 07.05.26	
3	Електротехнічна частина	01.06.26 – 10.06.26	
4	Охорона праці	08.06.26 – 15.06.26	
5	Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	15.06.26 – 18.06.26	
6	Підготовка доповіді та презентації	15.06.26 – 18.06.26	

Здобувач  Ігор МАКСИМЕНКОВ

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи  Віталій ГЕРАСИМЕНКО

АНОТАЦІЯ

У даній бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянуто процес проєктування енергоефективної системи вуличного освітлення.

У першій частині роботи проведено аналітичний огляд глобальних тенденцій та нормативно-правової бази розвитку енергоефективного зовнішнього освітлення. Розглянуто архітектуру гібридних комплексів, фізико-технічні основи генерації енергії та сучасну парадигму переходу до технологій інтелектуального керування та людино-орієнтованого освітлення.

У другій частині роботи здійснено світлотехнічний та енергетичний розрахунки системи. Обґрунтовано методологію проєктування, виконано розрахунок необхідної встановленої потужності фотоелектричних модулів, параметрів вітроенергетичної установки та ємності підсистеми накопичення енергії.

У третій частині роботи наведено практичні рекомендації щодо інсталяції та визначено пріоритетні сфери застосування розробленої системи.

У розділі «Охорона праці» ідентифіковано специфічні ризики при роботі з низьковольтними мережами постійного струму, висотним обладнанням та літійовими акумуляторами, а також розроблено заходи для безпечної експлуатації комплексу.

Основними результатами роботи є комплексно спроектована та техніко-економічно обґрунтована модель автономної гібридної системи вуличного освітлення, що гарантує повну енергетичну незалежність об'єкта, зниження експлуатаційних витрат та відповідність актуальним екологічним і світлотехнічним стандартам.

Ключові слова (5-6 слів): гібридне освітлення, відновлювана енергетика, фотомодуль, вітрогенератор, енергоефективність, розумне місто.

Загальний обсяг бакалаврської кваліфікаційної роботи становить: сторінок – 81; формул – 18; рисунків – 20; таблиць – 4; літературних джерел – 30; слайдів – 13.

ЗМІСТ

ВСТУП_____	7
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА _____	9
1.1 Аналіз гібридних комплексів зовнішнього освітлення _____	9
1.2 Нормативно-правові засади та перспективи інтеграції відновлюваних джерел енергії в Україні _____	12
1.3 Порівняльна характеристика фотоелектричних перетворювачів для гібридних освітлювальних комплексів _____	17
1.4 Фізико-технічні принципи генерації електроенергії у фотоелектричних модулях _____	20
1.5 Аеродинамічні та електромеханічні аспекти застосування вітрогенераторів у гібридних комплексах освітлення _____	26
1.6 Глобальні виклики та зміна парадигми проектування систем міського освітлення _____	30
2 СВІТЛОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА _____	35
2.1 Обґрунтування техніко-економічної доцільності застосування гібридних комплексів освітлення _____	35
2.2 Методологічні засади проектування комбінованих систем зовнішнього освітлення _____	37
2.3 Параметричний вибір та енергетичний розрахунок освітлювального навантаження _____	40
2.4 Розрахунок встановленої потужності фотоелектричної підсистеми _____	42
2.5 Розрахунок параметрів вітроенергетичної установки _____	45
2.6 Обґрунтування вибору технологій накопичення та зберігання енергії _____	48
2.7 Обґрунтування та вибір гібридного контролера керування _____	53
3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ І РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ _____	56

3.1 Технічні аспекти практичної реалізації комплексів зовнішнього освітлення на базі відновлюваної енергетики _____	56
3.2 Пріоритетні напрями застосування _____	60
4 ОХОРОНА ПРАЦІ _____	64
4.1 Нормативно-правове та організаційне забезпечення охорони праці _____	64
4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів під час монтажу та експлуатації системи _____	65
4.3 Організаційно-технічні заходи безпеки _____	68
4.4 Забезпечення електробезпеки _____	70
4.5 Забезпечення пожежної безпеки _____	72
4.6 Висновки до розділу _____	75
ВИСНОВКИ _____	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ _____	78

ВСТУП

Сучасний етап розвитку урбанізованих територій характеризується глобальним переходом до концепцій сталого розвитку, декарбонізації економіки та впровадження технологій «Розумного міста». В умовах постійного зростання вартості традиційних енергоносіїв та викликів, пов'язаних із нестабільністю централізованих енергосистем (що є особливо критичним фактором для України сьогодні), забезпечення енергетичної автономності муніципальної інфраструктури стає питанням національної безпеки.

Зовнішнє освітлення відіграє фундаментальну роль у формуванні безпечного та комфортного міського середовища. Однак класичні підходи, орієнтовані на енергоємні газорозрядні джерела світла та стовідсоткову залежність від магістральних електромереж, вичерпали свій техніко-економічний потенціал. Відповідно до сучасної індустріальної філософії «Light. Design. IoT.», система освітлення має бути не лише енергоефективною, але й інтелектуальною, адаптивною та екологічно нейтральною. Саме тому використання гібридних (вітро-сонячних) комплексів, що працюють у синергії з високоефективними світлодіодними (LED) модулями, цифровими протоколами керування та сучасними літєвими системами накопичення енергії, є найбільш перспективним вектором розвитку світлотехнічної галузі. Все це зумовлює високу актуальність обраної теми бакалаврської кваліфікаційної роботи.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю впровадження високоефективних світлотехнічних рішень, що гарантують безперебійну роботу освітлення, підвищений рівень енергетичної незалежності та відповідність сучасним стандартам безпеки.

Мета бакалаврської кваліфікаційної роботи полягає у проектуванні технічного рішення гібридної системи вуличного освітлення, що забезпечує підвищену енергоефективність, автономність та відповідність нормативним вимогам світлотехнічної якості.

Об'єкт роботи: системи вуличного освітлення.

Предмет дослідження: принципи побудови, технічні характеристики, структурні компоненти та алгоритми функціонування гібридних систем освітлення.

Задачі бакалаврської кваліфікаційної роботи:

1. Провести аналіз сучасних систем вуличного освітлення, їх енергетичних та світлотехнічних параметрів.
2. Розробити структурну схему гібридної системи та обґрунтувати вибір основних її компонентів.
3. Надати рекомендації щодо практичного впровадження та масштабування гібридної системи освітлення в реальних умовах.
4. Розробити комплекс заходів з охорони праці та забезпечення безпечних умов праці.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз гібридних комплексів зовнішнього освітлення

У контексті сучасних вимог до енергетичної незалежності та стійкості функціонування міської інфраструктури, використання комбінованих (гібридних) систем освітлення набуває критичного значення. Подібні комплекси здійснюють генерацію електроенергії шляхом поєднання кількох відновлюваних джерел (переважно сонячного випромінювання та вітрових потоків) із сучасними акумуляторними накопичувачами.

Ключовим недоліком класичних автономних світильників, що працюють виключно на базі фотоелектричних панелей, є виражений сезонний дисбаланс: у зимовий період, на який припадає максимальна тривалість темної пори доби, рівень сонячної інсоляції сягає мінімуму. Впровадження гібридної архітектури ефективно нівелює цей недолік завдяки природній комплементарності кліматичних ресурсів. Зокрема, за умов суцільної хмарності та в осінньо-зимовий сезон спостерігається інтенсифікація вітрових потоків, що компенсує дефіцит генерації від PV-модулів. Наукові та експлуатаційні дослідження доводять, що такий комбінований підхід гарантує стабілізацію графіка заряду акумуляторних батарей та радикально зменшує ймовірність втрати електропостачання.

На сьогодні технологічним стандартом є застосування високоефективних монокристалічних кремнієвих елементів із коефіцієнтом корисної дії понад 21 %. Перспективним інженерним рішенням виступає безпосередня інтеграція фотомодулів у конструкцію несучої опори (вертикальне компонування) або застосування гнучких циліндричних панелей, які монтуються навколо стовпа. Незважаючи на те, що вертикальне розміщення дещо знижує пікову продуктивність порівняно з оптимальним нахилом площини панелі, такий підхід усуває проблеми накопичення снігового покриву, пилового забруднення та біологічних відкладень, а також оптимізує загальне вітрове навантаження на конструкцію (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Інтеграція вертикальних фотоелектричних модулів
в опору зовнішнього освітлення

Для потреб зовнішнього освітлення здебільшого застосовують мікротурбінні установки потужністю від 200 до 600 Вт. Визначальним фактором ефективності є підбір оптимальної аеродинамічної конфігурації (рис. 1.2), яка концептуально поділяється на дві категорії:

- **горизонтально-осьові вітрогенератори (HAWT)** – характеризуються високим коефіцієнтом використання енергії вітрового потоку, проте потребують механізмів орієнтації за вітром. Вони генерують відчутний акустичний шум і вібрації, що є обмежуючим фактором для їх застосування в межах щільної житлової забудови;
- **вертикально-осьові турбіни (VAWT)** – здатні функціонувати незалежно від напрямку вітрового потоку, відрізняються нижчим порогом стартової швидкості вітру, є малошумними та екологічно безпечнішими для орнітофауни. В урбаністичному дизайні громадських просторів пріоритет зазвичай надається саме установкам типу VAWT з огляду на їхні високі естетичні та габаритні переваги.

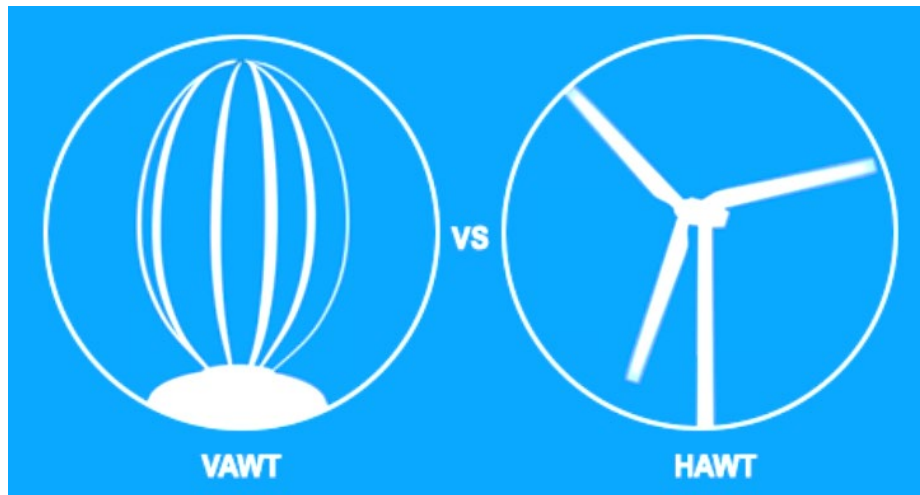


Рисунок 1.2 – Класифікація вітрогенераторних установок малого класу за просторовою орієнтацією осі обертання ротора

З метою забезпечення максимальної безвідмовності в умовах міста, раціональним є впровадження мережових гібридних систем. Їхня логіка керування ґрунтується на пріоритетному споживанні генерованої «зеленої» енергії, тоді як централізована електромережа виконує функцію гарячого резерву. Перехід на живлення від мережі ініціюється виключно у випадках, коли рівень заряду акумуляторної батареї знижується до критичного порогу (зазвичай 20–30 %). Це запобігає глибокому розряду накопичувачів, що суттєво подовжує їхній експлуатаційний ресурс. Додатково такі сучасні системи інтегруються в екосистему Інтернету речей (IoT) з використанням бездротових протоколів передачі даних (наприклад, LoRaWAN) та оснащуються цифровими інтерфейсами DALI-2 для можливості віддаленого моніторингу та адаптивного димування світильників залежно від рівня заряду акумуляторів [1].

Проектування будь-яких освітлювальних комплексів на території України має здійснюватися в суворій відповідності до державних будівельних норм, які наразі перебувають у процесі гармонізації з директивами ЄС. Базовим нормативним документом у цій сфері є ДБН В.2.5-28:2018 [2]. Для об'єктів благоустрою та громадських просторів він регламентує такі ключові параметри:

- норми освітленості – для пішохідних алей, паркових зон та бульварів середній рівень горизонтальної освітленості (E_{cp}) повинен становити від 6 до 10 лк;
- показник загальної рівномірності (U_o) – відношення мінімального значення освітленості до середнього не може бути меншим за 0,4. Це вимагає високоточних світлотехнічних розрахунків розташування опор та підбору вторинної оптики світильників, що є особливо критичним в автономних сонячних системах із жорстким лімітом енергоспоживання;
- освітлення пішохідних переходів – виділяється як зона підвищеної небезпеки, що потребує контрастного освітлення з акцентом на вертикальну складову (не менше 20–30 лк) для забезпечення надійного розпізнавання силуету пішохода.

Важливим вектором розвитку є імплементація в Україні європейських стандартів серії EN 13201 «Road Lighting» [3]. Особлива увага приділяється класифікації освітлюваних зон (класи Р для пішохідних територій) та розрахунку індексів енергоефективності (АЕСІ та PDI). Норматив EN 13201-5 стимулює впровадження інтелектуальних адаптивних систем керування освітленням. Вони дають змогу автоматично знижувати клас освітлення (наприклад, з рівня Р2 до Р4) у години мінімальної пішохідної активності, що узгоджується з філософією енергозбереження гібридних систем з обмеженою ємністю акумуляторів.

1.2 Нормативно-правові засади та перспективи інтеграції відновлюваних джерел енергії в Україні

Вітчизняна нормативно-правова база визначає розвиток сектору відновлюваної енергетики як один із ключових пріоритетів забезпечення національної енергетичної безпеки. Для ефективної інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) до об'єднаної енергосистеми, окрім традиційного механізму «зеленого» тарифу, активно впроваджуються новітні моделі

взаємодії з електромережею, які відіграють вирішальну роль у функціонуванні гібридних систем.

Згідно з цільовими показниками Енергетичної стратегії України до 2050 року [4], заплановано планомірне збільшення питомої ваги екологічно чистої генерації: вихід на рівень 12 % за підсумками 2025 року із подальшим зростанням до 25 % до 2035 року. Така прогнозована динаміка формує сприятливе середовище для розгортання автономних і гібридних освітлювальних комплексів у межах міської інфраструктури.

Окремої уваги заслуговує той факт, що з 2023 року, відповідно до Закону України № 3220-IX [5], законодавчо закріплено статус «активного споживача» та запроваджено механізм самовиробництва електроенергії (Net Billing). Ця система дозволяє муніципальним об'єктам використовувати зовнішню електромережу як своєрідний віртуальний акумулятор, що суттєво підвищує техніко-економічну привабливість гібридних систем освітлення. Максимальна ефективність такого підходу розкривається в рамках концепції «Light. Design. IoT.», коли вуличне освітлення інтегрується з цифровими протоколами розумного керування (зокрема DALI або системами автоматизації на базі KNX). Цифровізація дозволяє автоматизовано балансувати споживання та віддачу електроенергії залежно від погодних умов, поточного рівня заряду локальних батарей та стану зовнішньої мережі.

Прогнозована динаміка розвитку генеруючих потужностей у розрізі окремих видів ВДЕ до 2050 року представлена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Прогнозні показники встановленої потужності об’єктів відновлюваної енергетики, ГВт

Види ВДЕ	Роки						
	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Малі ГЕС (до 10 МВт)	0,15	0,20	0,25	0,30	0,33	0,34	0,34
Вітрові електростанції	1,5	6,0	10,0	15,0	18,0	21,0	23,0
Фотоелектростанції	2,0	3,0	4,5	6,0	8,0	11,0	14,0
Геотермальна енергія	0,02	0,1	0,5	0,8	1,0	1,1	1,2
Біомаса	1,0	1,2	1,6	2,1	2,4	2,6	2,7
ЗАГАЛОМ	4,6	10,5	16,9	24,2	29,7	36,0	41,2

Ретроспективний аналіз свідчить про інтенсивне нарощування потужностей альтернативної енергетики, що розпочалося у 2019 році (рис. 1.3). За статистикою Держенергоефективності [6], лише впродовж першого кварталу 2019 року в експлуатацію було введено 862 МВт нових об’єктів, серед яких домінували потужні промислові сонячні електростанції (684 МВт).

Однак, станом на початок 2024 року, сумарна встановлена потужність ВДЕ в Україні (без урахування тимчасово окупованих територій) перетнула позначку в 10 ГВт. Незважаючи на пошкодження та втрату частини енергетичної інфраструктури внаслідок бойових дій, чітко простежується тренд на децентралізацію генеруючих потужностей. У контексті проєктування систем вуличного освітлення це означає концептуальний зсув від залежності від великих централізованих станцій до впровадження локальних гібридних модулів. Такий підхід гарантує високий рівень автономності та стійкості громадських просторів за умов нестабільності в магістральних мережах.



Рисунок 1.3 – Динаміка зміни встановленої потужності об'єктів відновлюваної енергетики (МВт)

Сучасний вектор розвитку глобального енергетичного сектору орієнтований на розбудову децентралізованих архітектур та імплементацію систем розподіленої генерації, що є фундаментальною умовою безперебійного життєзабезпечення сучасних міст. Світовий курс на декарбонізацію економіки, імplementований у межах Паризької кліматичної угоди [7], стимулює планомірну відмову від традиційних видів викопного палива, насамперед вугілля.

При цьому швидкість розгортання «зелених» технологій суттєво перевищує попередні аналітичні очікування. Для порівняння, у 2018 році Міжнародне енергетичне агентство (IEA) прогнозувало [8], що ВДЕ досягнуть частки 40 % лише до 2040 року. Проте в оновленому аналітичному звіті «World Energy Outlook 2023» [8] зазначається, що в межах сценарію нульових викидів (Net Zero Emissions) частка відновлюваних джерел у світовому виробництві електроенергії здатна перетнути межу в 60 % вже до 2030 року. Це беззаперечно підтверджує доцільність використання гібридних систем освітлення як невід'ємного елемента глобальної парадигми енергоефективності. Зростаюча роль розподіленої генерації змінює

пріоритети: від масштабного будівництва зміщується акцент на користь компактних автономних інженерних рішень, що розвантажують централізовану енергосистему.

Детальне дослідження енергетичного профілю Харківської області зафіксувало доволі специфічну ситуацію станом на 2020 рік. Попри те, що регіон зосереджує близько 6 % загальнонаціонального технічно досяжного потенціалу ВДЕ (відповідно до розрахунків Інституту відновлюваної енергетики [9]), рівень практичного використання екологічно чистої електроенергії складав ледь 0,4 % від сумарного обсягу споживання (рис. 1.4). На противагу цьому, у сфері теплопостачання цей індикатор досягав 35,1 %, що демонструє високі темпи впровадження біопаливних рішень, але водночас підкреслює стагнацію у розвитку вітрової та сонячної генерації, які є базовими для живлення зовнішнього освітлення. Відповідно до «Стратегії розвитку Харківської області на період 2021–2027 років» [10], посилення енергоефективності та підтримка розподіленої генерації визначені як пріоритетні завдання, що робить розробку місцевих гібридних комплексів надзвичайно актуальним інструментом.

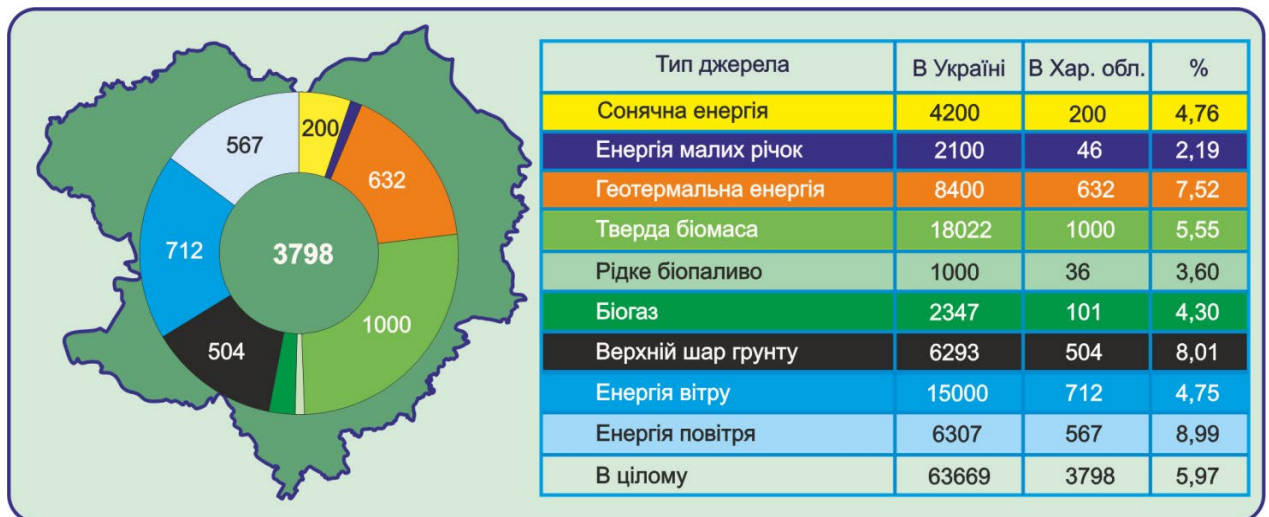


Рисунок 1.4 – Оцінка річного технічно досяжного потенціалу альтернативних джерел енергії на території Харківської області (тис. т.н.е./рік)

Вітровий потенціал Харківщини, який оцінюється на рівні 712 тис. т.н.е./рік, до сьогодні залишається недовикористаним у промислових

масштабах. І хоча північна частина Кегичівського району розглядається як перспективна локація для розбудови ВЕС, розвиток галузі не має обмежуватися виключно станціями великої потужності.

Повна заміна централізованого енергопостачання на автономні джерела наразі стикається з низкою бар'єрів, ключовим з яких є висока капітальна вартість систем накопичення енергії. У цьому контексті гібридні системи вуличного освітлення є ідеальним компромісним рішенням: вони локально акумулюють вітровий і сонячний потенціал для власних потреб і при цьому не генерують дисбалансів для загальної електромережі.

1.3 Порівняльна характеристика фотоелектричних перетворювачів для гібридних освітлювальних комплексів

Проектування енергоефективної системи зовнішнього освітлення вимагає ретельного та обґрунтованого підбору генеруючих потужностей. Вибір оптимального типу фотоелектричного модуля спирається на багатокритеріальний аналіз. Головними параметрами виступають коефіцієнт корисної дії (ККД), питома вартість генерації одного вата потужності, габаритні обмеження для монтажу на опорі, а також можливість естетичної інтеграції в архітектурний ансамбль міста. Окрім того, обов'язковою сучасною вимогою є сумісність генеруючого та акумулюючого вузлів з інтелектуальними контролерами, які підтримують протоколи цифрового димування та керування (зокрема DALI або DMX512) для повноцінної інтеграції в міські IoT-мережі.

Сучасний ринок фотовольтаїки, що застосовується для інфраструктурних об'єктів, концептуально поділяється за технологією формування активного шару на дві базові категорії:

1. Кристалічні кремнієві перетворювачі (домінуюча технологія, що охоплює понад 90 % ринку).
2. Тонкоплівкові (гнучкі) фотомодулі.

Принцип функціонування усіх зазначених пристроїв ґрунтується на внутрішньому фотоелектричному ефекті в $p-n$ переході напівпровідникової структури, яка генерує електрорушійну силу під впливом фотонів сонячного світла. Незважаючи на наявність перспективних наукових розробок на базі телуриду кадмію або селеніду міді-індію-галію, що відрізняються високим коефіцієнтом оптичного поглинання, їх масове впровадження у міську інфраструктуру залишається вкрай обмеженим. Основними стримуючими факторами виступають висока токсичність кадмію, дефіцит сировинної бази (насамперед індію) та складна і вартісна процедура утилізації, що прямо суперечить базовим принципам сталого розвитку.

Саме тому беззаперечне лідерство на ринку зберігають модулі на основі кремнію, які технічно класифікуються на два підтипи (рис. 1.5).

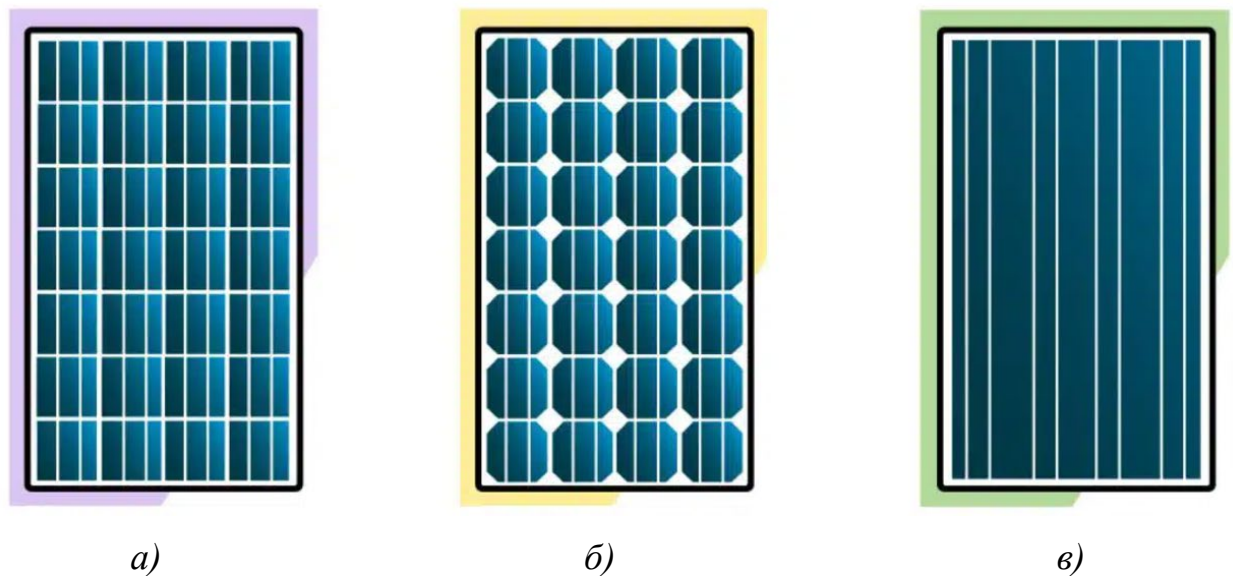


Рисунок 1.5 – Візуальне порівняння конструкцій монокристалічних (а), полікристалічних (б) кремнієвих та гнучких тонкоплівкових (в) фотоелектричних модулів

Монокристалічні елементи створюються шляхом вирощування єдиного суцільного кристала кремнію. Вони вирізняються абсолютно однорідною структурою, характерним темно-синім або глибоким чорним забарвленням та найвищим показником продуктивності серед серійних зразків. Завдяки імплементації новітніх напівпровідникових архітектур їхня ефективність

наразі суттєво зростає. Це робить їх безальтернативним вибором для гібридних опор освітлення, де корисна площа інсталяції жорстко лімітована габаритами стовпа.

Полікристалічні панелі виготовляються з розплаву, що містить значну кількість різноорієнтованих кристалів кремнію. Наявність структурних меж між зернами створює додатковий електричний опір для руху носіїв заряду, що пропорційно знижує загальний ККД. Однак менш енергоємний і технологічно простіший виробничий цикл гарантує їм нижчу собівартість.

Обидві кремнієві технології забезпечують тривалий експлуатаційний ресурс (понад 25 років) із мінімальним прогнозованим рівнем деградації потужності – зазвичай не більше 0,5 % на рік. Оновлені порівняльні характеристики з урахуванням сучасного стану ринку наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Актуалізовані робочі характеристики сучасних кремнієвих фотоелементів

Характеристики	Монокристалічні панелі	Полікристалічні панелі
Середня ефективність	20-24 %	16-18 %
Питома площа	0,14-0,18 м ² /Вт	0,17-0,23 м ² /Вт
Орієнтовна вартість	0,20-0,40 \$/Вт	0,15-0,30 \$/Вт

Технологічною альтернативою традиційним жорстким конструкціям виступають тонкоплівкові модулі. Їхній активний шар (найчастіше на базі аморфного кремнію) наноситься на гнучку підкладку надтонким мікронним шаром. Беззаперечними перевагами таких інженерних рішень є мінімальна вага, висока пластичність та знижена чутливість до температурних перегрівів у літній період. Це дає змогу органічно інтегрувати їх безпосередньо у дизайн круглих або багатограних опор у форматі суцільного обгортання стовпа. Однак через об'єктивно нижчий ККД вони потребують значно більшої робочої площі для забезпечення необхідної генерації, що нерідко робить неможливим їх застосування в надкомпактних автономних системах.

Фотоелектричні модулі малої та середньої потужності відіграють фундаментальну роль у розбудові локальних мереж автономного енергозабезпечення. Їхнє значення є критичним в умовах географічної віддаленості від централізованих електромереж або у випадку їхньої нестабільної роботи. Практична імплементація таких рішень гарантує енергетичну незалежність та надійне безперебійне живлення вузлів міської інфраструктури, паркових зон та об'єктів благоустрою [11].

Попри стартові капіталовкладення та певні технологічні ліміти ККД, динаміка розвитку галузі демонструє винятково позитивні тренди. Постійне вдосконалення архітектури напівпровідникових комірок забезпечує стійке зниження нормованої вартості електроенергії (LCOE) поряд зі зростанням генерації з одиниці площі. Такі економічні передумови відкривають шлях для масового розгортання гібридного вуличного освітлення навіть за умов жорсткого дефіциту муніципальних бюджетів. Окрім прямої економічної вигоди, імплементація сонячної генерації забезпечує потужний позитивний вплив на довкілля. Заміщення традиційної викопної енергетики відновлюваними джерелами сприяє активній декарбонізації урбанізованих територій та формуванню екологічного простору з мінімальним вуглецевим слідом, що повністю відповідає міжнародним кліматичним угодам.

1.4 Фізико-технічні принципи генерації електроенергії у фотоелектричних модулях

Фундаментальною базою традиційних фотоелектричних перетворювачів на основі кремнію є напівпровідникова структура. Вона формується шляхом цілеспрямованого легування матеріалу, що дозволяє створити дві зони з відмінними типами провідності: електронною (n -типу, з надлишком вільних електронів) та дірковою (p -типу, з надлишком дірок). У місці їхнього фізичного контакту виникає просторовий заряд і утворюється потенційний бар'єр – електронно-дірковий перехід (p - n перехід), наявність

якого є ключовою умовою для просторової сепарації згенерованих носіїв заряду.

Процес фотогенерації електроенергії розпочинається в момент поглинання активною поверхнею модуля квантів світла (фотонів). Якщо енергетичний потенціал фотона є більшим за ширину забороненої зони напівпровідникового матеріалу, відбувається розрив ковалентних зв'язків кристалічної ґратки. Це явище супроводжується масовою генерацією пар нерівноважних носіїв заряду «електрон-дірка».

Під дією внутрішнього електричного поля p - n переходу відбувається просторове розділення цих носіїв: вільні електрони дрейфують до n -області, а дірки переміщуються до p -області (рис. 1.6). Накопичення різнойменних зарядів на протилежних полюсах структури індукує виникнення різниці потенціалів, відомої як фотоелектрорушійна сила. У разі замикання зовнішнього електричного кола цей процес забезпечує стабільне протікання постійного струму та формування робочої напруги на вихідних клеммах пристрою.

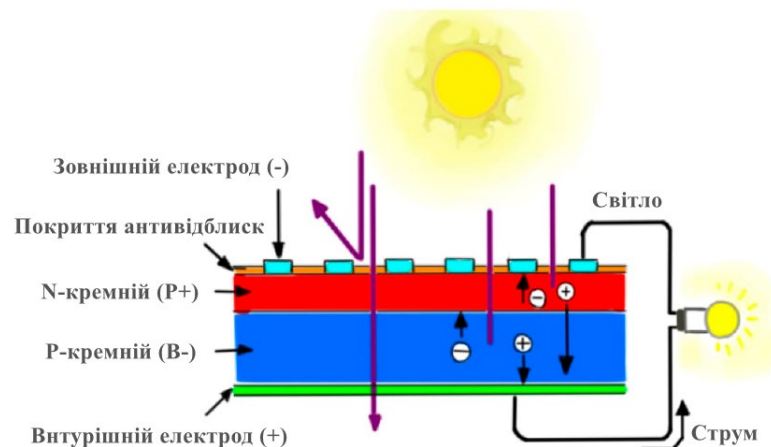


Рисунок 1.6 – Фізико-хімічний механізм сепарації носіїв заряду в p - n переході фотоперетворювача

Комплексний аналіз енергетичної ефективності сонячної панелі ґрунтується на оцінці базових електротехнічних параметрів: струму короткого замикання ($I_{кз}$), напруги холостого ходу ($U_{хх}$) та пікової вихідної потужності

(P_{max}). Функціональний взаємозв'язок цих показників описується вольт-амперною характеристикою (ВАХ), графічну інтерпретацію якої представлено на рис. 1.7.

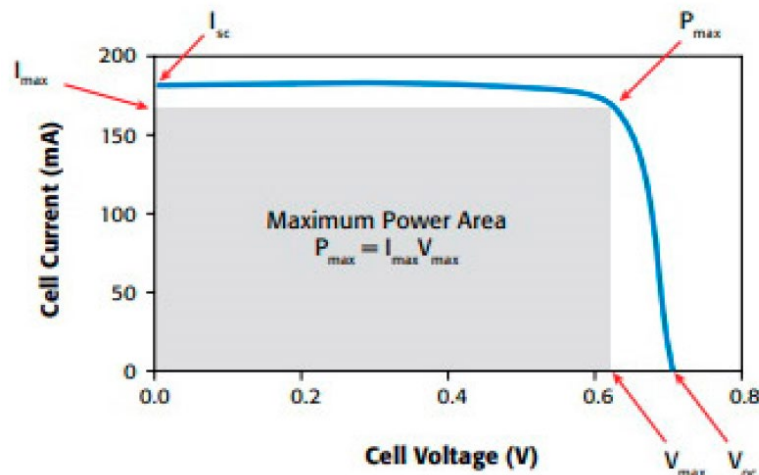


Рисунок 1.7 – Типова вольт-амперна характеристика (ВАХ) напівпровідникового фотоелемента

Відповідно до наведеної кривої, точка максимальної потужності (МРР) локалізується на ділянці перегину ВАХ. З математичної точки зору, абсолютна величина максимальної потужності (P_{max} , Вт) розраховується як добуток струму (I_{max}) та напруги (U_{max}) саме в цій координаті, де функція потужності набуває екстремального значення. Цей показник ідентифікується як номінальна (паспортна) потужність модуля та є базовим критерієм для обчислення енергетичного балансу будь-якої гібридної системи освітлення.

$$P_{max} = I_{max} \cdot U_{max} = I_{кз} \cdot U_{хх} \cdot FF \quad (1.1)$$

Важливим індикатором якості фотоелектричного перетворення є коефіцієнт заповнення вольт-амперної характеристики (FF). Він демонструє ступінь наближення реального модуля до характеристик ідеального джерела струму. Це безрозмірна величина (яка часто наводиться у відсотках), що визначає форму («прямокутність») кривої ВАХ. Розраховується як відношення фактичної максимальної потужності до її теоретичного максимуму:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{кз} \cdot U_{xx}} \quad (1.2)$$

Ще одним критичним параметром енергетичної ефективності є струм у точці максимальної потужності (I_{max}). Загальний струм, що генерується напівпровідниковим перетворювачем під навантаженням, описується модифікованим рівнянням Шоклі:

$$I = I_{\phi} - I_3 \left(\exp \left(\frac{qU}{kT_c} \right) - 1 \right), \quad (1.3)$$

де q – заряд електрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл);

k – стала Больцмана;

T_c – абсолютна температура кристала;

I_3 – струм зворотного насичення;

I_{ϕ} – фотострум.

Напруга в точці максимальної потужності (U_{max}) фіксує різницю потенціалів на клемі під час генерації пікової енергії для поточних умов інсоляції. Її розрахункове значення базується на трансцендентному рівнянні:

$$U_{max} = \frac{kT_c}{q} \cdot \ln \left(1 + \frac{I_{\phi} - I_{max}}{I_3} \right) \quad (1.4)$$

Граничним показником напруги є напруга холостого ходу (U_{xx}). Це максимально можлива різниця потенціалів, яка реєструється на клемі при розімкненому ланцюзі (коли струм $I = 0$). Для ідеалізованого p - n переходу вона визначається як:

$$U_{xx} = \frac{kT_c}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{кз}}{I_3} + 1 \right) \quad (1.5)$$

Максимальним енергетичним параметром за струмом є струм короткого замикання ($I_{кз}$). Він протікає через клемі за умови нульового опору зовнішнього навантаження ($U = 0$). Фізично $I_{кз}$ майже повністю відповідає згенерованому фотоструму, маючи пряму лінійну залежність від рівня інсоляції та площі фотоелемента (S_{cn}). Цей показник є базовим для розрахунку захисної автоматики в колах постійного струму:

$$I_{\text{кз}} = S_{\text{сп}} \cdot \int_0^{\lambda_k} q \cdot \Phi(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda \quad (1.6)$$

де λ_k – червона межа фотоефекту (для кремнію близько 1,1 мкм);

$\Phi(\lambda)$ – спектральна густина потоку фотонів;

$Q(\lambda)$ – квантовий вихід.

Щільність загального струму залежить від сумарного внеску носіїв заряду з різних областей структури:

$$j_{\Phi}(\lambda) = j_n(\lambda) + j_p(\lambda) + j_{\omega}(\lambda) \quad (1.7)$$

де $j_n(\lambda)$ – щільність струму електронів у p -області;

$j_p(\lambda)$ – щільність струму дірок у n -області;

$j_{\omega}(\lambda)$ – щільність струму в об'єднаній зоні (шарі об'ємного заряду).

Внутрішні фізичні процеси неминуче супроводжуються паразитною складовою – струмом зворотного насичення (I_z або I_s). Хоча його величина для кремнію є мізерною, він фундаментально впливає на напругу холостого ходу. Його залежність від температури та матеріалу має вигляд:

$$I_z = A \cdot T_c^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{kT_c}\right) \quad (1.8)$$

де E_g – ширина забороненої зони;

A – константа, що залежить від параметрів напівпровідника.

Інтегральним критерієм ефективності виступає коефіцієнт корисної дії (η), який визначає частку перетвореної сонячної енергії:

$$\eta = \frac{P_{\text{max}}}{E \cdot S_{\text{сп}}} \cdot 100\% \quad (1.9)$$

де E – енергетична освітленість (інсоляція), Вт/м²

У реальних умовах експлуатації вуличного освітлення суттєвий вплив на параметри генерації мають температурні коливання. Для їхнього кількісного врахування використовують температурні коефіцієнти:

- температурний коефіцієнт максимальної потужності (K_p) фіксує падіння продуктивності модуля під час нагрівання. Для сучасних панелей цей показник становить від -0,25 % до -0,45 % на кожний градус вище 25°C.

Відповідно, у літню спеку при нагріванні комірки до 65°C модуль втрачає 10–15 % своєї номінальної потужності;

- температурний коефіцієнт напруги холостого ходу (K_u) має чітко виражене від’ємне значення (близько $-0,25 \dots -0,35 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$). Значне падіння напруги при перегріві здатне дестабілізувати роботу контролера заряду;
- температурний коефіцієнт струму короткого замикання (K_i) на відміну від попередніх показників, є позитивним. Зростання температури звужує заборонену зону напівпровідника, що дещо збільшує струм. У загальних енергетичних розрахунках цим приростом часто нехтують, проте його обов’язково враховують під час вибору номіналів захисної автоматики.

Варто додати, що у сучасному урбанізованому середовищі на ефективність фотоперетворення критично впливають фактори затінення від дерев та висотної забудови. Для мінімізації цих втрат у новітніх проєктах гібридного зовнішнього освітлення масово імплементується технологія розділених комірок (Half-Cut) та застосовуються інтелектуальні контролери з алгоритмами MPPT. Ці пристрої в мілісекундному такті розв’язують рівняння (1.1), безперервно відстежуючи точку максимальної потужності, що дозволяє оптимізувати зарядний струм акумулятора навіть за умов динамічної та нерівномірної освітленості.

Окрім електротехнічних параметрів, інтеграція сонячних панелей в інфраструктуру потребує врахування низки експлуатаційних критеріїв [12]:

- масо-габаритні параметри та форм-фактор – площа та маса модуля безпосередньо впливають на статичні й динамічні (вітрове навантаження) напруження в опорі освітлення. Помилка у розрахунку парусності може призвести до порушення стійкості конструкції під час шквалів;
- технологічне виконання – вибір між жорсткими кристалічними та гнучкими тонкоплівковими модулями диктується балансом між необхідною питомою потужністю ($\text{Вт}/\text{м}^2$) та архітектурною інтеграцією у простір міста;
- експлуатаційний ресурс та гарантійні умови – економічна доцільність проєкту визначається прогнозованим життєвим циклом

обладнання, який підкріплюється 10–12 роками гарантії на матеріали та 25-річною гарантією на лінійну генерацію (деградація потужності не більше 15–20 % за весь термін).

1.5 Аеродинамічні та електромеханічні аспекти застосування вітрогенераторів у гібридних комплексах освітлення

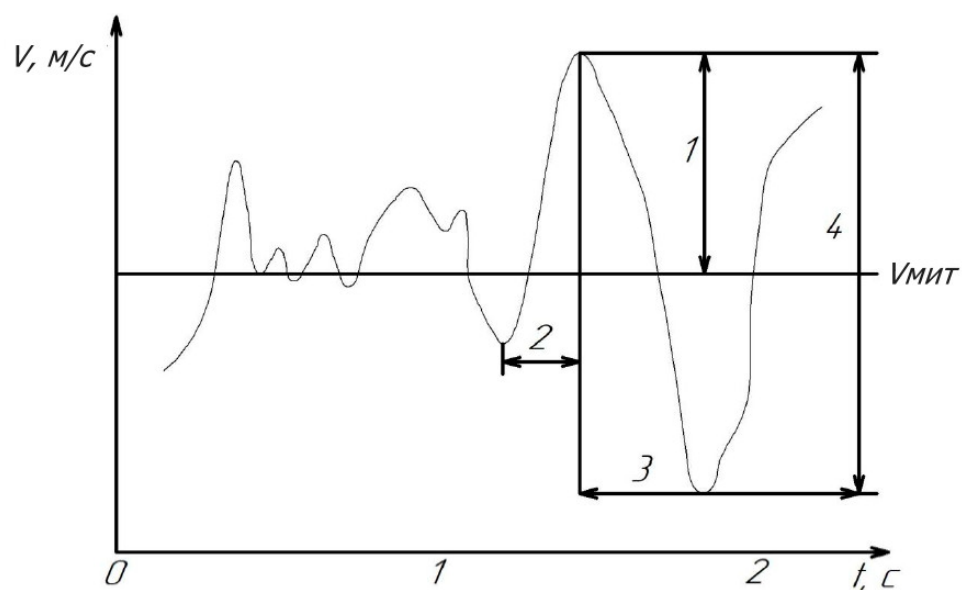
Енергія вітрових потоків є вторинним проявом сонячної активності та класифікується як одне з наймасштабніших відновлюваних джерел на Землі. Її першопричиною виступає термодинамічний дисбаланс – нерівномірне прогрівання земної поверхні сонячною радіацією, що ініціює конвективний рух повітряних мас. За сучасними експертними оцінками, сукупний енергетичний потенціал вітру, технічно доступний для конверсії, корелює із загальним обсягом надходження сонячної енергії (перевищуючи 10^{11} ГВт). Теоретично цей ресурс здатний забезпечувати щорічну генерацію на рівні $1,18 \cdot 10^{13}$ кВт·год, що в десятки разів перекидає поточні глобальні потреби людства в електроенергії.

Базовим параметром, який детермінує продуктивність будь-якої вітроенергетичної установки (ВЕУ), є швидкість навігаючого повітряного потоку (V). Це пов'язано з тим, що потужність генерації має кубічну залежність від швидкості. Проте вітер як метеорологічне явище відрізняється високим ступенем стохастичності. Його кінематичні параметри формуються під впливом комплексу факторів:

- макрокліматичні та глобальні метеорологічні умови (активність циклонів та антициклонів, градієнт атмосферного тиску);
- циклічні зміни сонячної інсоляції (добові та сезонні температурні коливання);
- мікрокліматичні та орографічні особливості локації (характер рельєфу, щільність міської забудови, наявність зелених насаджень та аеродинамічних труб у щільній забудові).

Зважаючи на високу турбулентність та нестабільність первинного енергоносія, короткострокове прогнозування миттєвої генерації ВЕУ є складним математичним завданням. Натомість інтегральні характеристики (загальний обсяг виробленої енергії за місяць чи рік) піддаються достатньо точному моделюванню, оскільки статистичний розподіл середніх швидкостей вітру (зазвичай описується розподілом Вейбулла) для конкретного географічного регіону залишається стабільним протягом тривалого періоду.

Динамічний профіль вітрового потоку формується не лише із середніх швидкостей, а й містить турбулентні флуктуації – різкі пориви (рис. 1.8).



*1 – амплітуда пориву, 2 – час формування пориву, 3 – час падіння швидкості,
4 – максимальна величина зміни швидкості вітру*

Рисунок 1.8 – Хронограма та кінематичні фази розвитку вітрового пориву

Виникнення пориву є високодинамічним перехідним процесом: тривалість наростання швидкості до пікового значення (яке здатне у 2–3 рази перевищувати середню миттєву швидкість потоку) зазвичай вимірюється частками секунди, а фаза утримання максимальної швидкості триває лише кілька секунд. Такі екстремальні аеродинамічні удари генерують критичні механічні напруження в лопатях та опорних вузлах ротора, що є обов’язковим

критерієм при проєктуванні несучих конструкцій та виборі типу вітрогенератора для урбанізованого середовища.

Інтеграція мікро-ВЕУ до складу гібридної освітлювальної системи спирається на принцип синергії та комплементарності відновлюваних ресурсів. Як підтверджує багаторічна метеорологічна статистика, періоди критичного дефіциту сонячної інсоляції (зимові місяці, темна пора доби, суцільна хмарність) здебільшого супроводжуються інтенсифікацією вітрових потоків. Це дає змогу ефективно згладжувати загальний графік генерації електроенергії та суттєво оптимізувати (зменшити) необхідну розрахункову ємність акумуляторного блоку.

Фундаментальною основою для проєктування робочих органів ВЕУ слугують закони прикладної аеродинаміки. Цей розділ фізики описує механіку взаємодії профілю лопаті турбіни з набігаючим повітряним середовищем, аналізуючи поля тиску та вектори швидкостей.

Фізична природа функціонування турбіни зводиться до екстракції кінетичної енергії рухомої повітряної маси та її подальшої конверсії в механічний крутний момент на валу генератора. Повна кінетична потужність повітряного потоку, що перетинає площу ометання ротора, описується базовим рівнянням газодинаміки:

$$P_{\text{вітру}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3, \quad (1.10)$$

де ρ – густина повітря (за нормальних умов $\approx 1,225 \text{ кг/м}^3$);

S – площа поперечного перерізу потоку, м^2 ;

V – швидкість набігаючого потоку, м/с .

Аналіз рівняння (1.10) підтверджує кубічну залежність доступної енергії від швидкості. Це означає, що навіть маргінальне послаблення вітру провокує експоненційне падіння генерації. Водночас закони збереження енергії та маси унеможливають стовідсоткове перетворення кінетичної енергії струменя на корисну роботу, адже загальмоване повітря має безперервно відводитися за межі площі ротора. Аеродинамічна досконалість турбіни оцінюється

коефіцієнтом використання енергії вітру (C_p), який дорівнює співвідношенню фактично отриманої механічної потужності до повної потужності потоку:

$$C_p = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{вітру}}} \quad (1.11)$$

Згідно з законом Беца, теоретична межа цього коефіцієнта для ідеального вітроколеса не може перевищувати 0,593 (або 59,3 %). Відповідно, корисна механічна потужність на валу генератора обчислюється за такою залежністю:

$$P_{\text{мех}} = \rho \cdot V^3 \cdot S \cdot \frac{C_p}{2} \quad (1.12)$$

Низька питома густина повітря (яка майже у 800 разів поступається густині води) створює серйозні інженерні виклики. Щоб отримати достатню електричну потужність, конструкторам доводиться збільшувати площу ометання (S), що автоматично підвищує масо-габаритні параметри та парусність (вітрове навантаження на стовп освітлення).

Для безпосередньої конверсії крутного моменту в електроенергію в малогабаритних ВЕУ застосовується різноманітна номенклатура електричних машин. У сегменті інфраструктурної мікрогенерації домінують:

1. Синхронні генератори на постійних магнітах (PMSG). Завдяки потужним неодимовим магнітам вони не потребують витрат енергії на збудження, відрізняються максимальним ККД та стабільно працюють на низьких обертах. Це дозволяє реалізувати схему прямого приводу без використання редукторів (мультиплікаторів), що кардинально підвищує надійність системи.

2. Асинхронні генератори. Знаходять застосування переважно в On-Grid (мережевих) конфігураціях. Вони потребують споживання реактивної потужності з мережі для ініціалізації магнітного поля, після чого починають віддавати активну потужність. Хоча вони легко синхронізуються з магістральною частотою, їх використання у повністю автономних вуличних ліхтарях є недоцільним через високу складність керування.

Специфічним, але критичним аспектом експлуатації ВЕУ в межах громадських просторів є віброакустична безпека. Робота будь-якої турбіни супроводжується емісією аеродинамічного (шелест лопатей) та структурного (вібрація підшипників) шуму. Для дотримання жорстких санітарних норм у житлових масивах проєктування гібридного ліхтаря вимагає застосування виключно вертикально-осьових турбін (VAWT), інтеграції пружних демпферних прокладок у вузли кріплення генератора до опори, а в преміальних моделях – використання інноваційних підшипників на базі магнітної левітації, які практично зводять нанівець механічне тертя та резонансні шуми.

1.6 Глобальні виклики та зміна парадигми проєктування систем міського освітлення

Сучасна урбаністика перебуває на етапі глибокого переосмислення функціональної ролі штучного освітлення в екосистемі міста. У третьому десятилітті XXI століття домінує комплексна парадигма – світло позиціонується як потужний інструмент формування безпечного соціального середовища, підвищення загального рівня комфорту життя та невід’ємний компонент екологічної стійкості урбанізованих територій.

Актуальність таких досліджень експоненційно зростає на тлі глобальних енергетичних криз та кліматичних змін. Стрімке подорожчання традиційних енергоносіїв і загальносвітовий курс на декарбонізацію змушують муніципальні органи та інженерні бюро масово відмовлятися від застарілих газорозрядних технологій (натрієвих ламп високого тиску, металогалогенних ламп). На зміну їм приходять високоефективні напівпровідникові системи та рішення на базі відновлюваної енергетики. Відповідно до актуальних аналітичних звітів [8], глобальний ринок світлотехніки демонструє стабільний ріст. Прогнозується, що до 2033 року його обсяг сягне 219,7 млрд доларів (рис. 1.9). Ця позитивна динаміка стимулюється не лише розбудовою нових інфраструктурних об’єктів, а й глибокою модернізацією наявних мереж.

Ключовим каталізатором цих процесів виступає концепція «Light. Design. IoT.» – органічне поєднання сучасного дизайну світильників із технологіями «Розумного міста» та Інтернету речей (IoT).

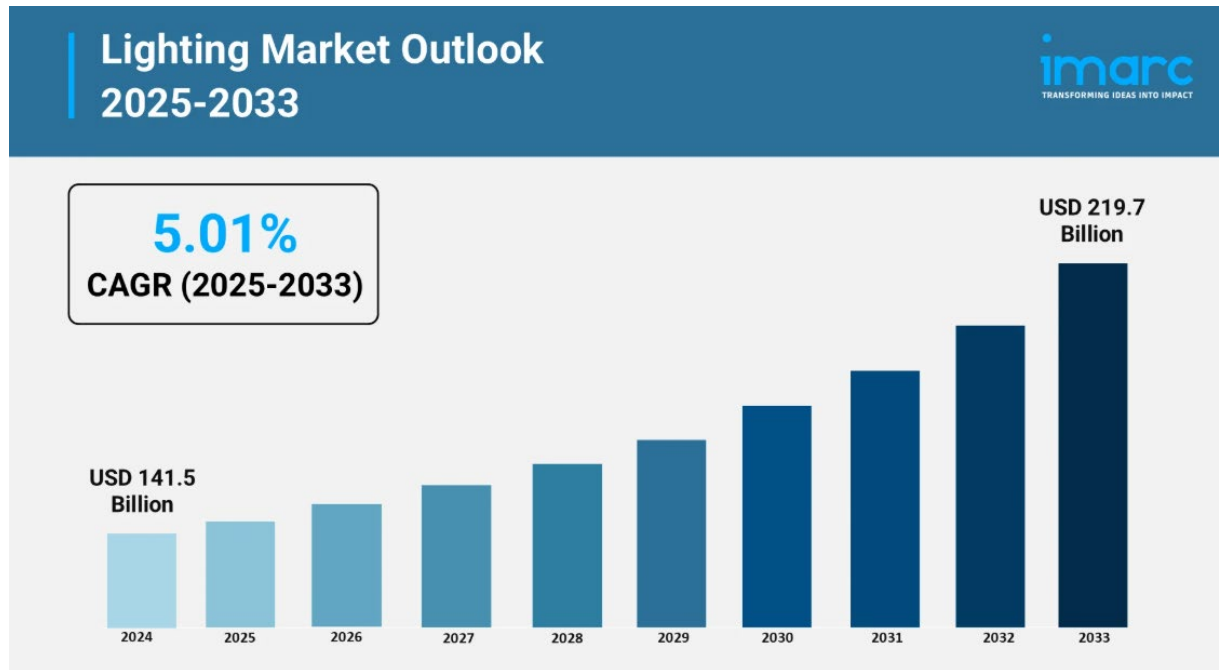


Рисунок 1.9 – Прогноз розвитку світового ринку зовнішнього освітлення на період до 2033 року

Зовнішнє освітлення рекреаційних зон, пішохідних алей, скверів та транспортних вузлів більше не розглядається як автономна, ізольована система. Воно трансформується у цифровий «хребет» міста. Сучасна опора освітлення виконує роль універсального фізичного хаба, на якому розміщуються сенсори екологічного моніторингу (якості повітря), камери відеоаналітики, модулі зарядки електротранспорту та телекомунікаційні передавачі стандарту 5G або LoRaWAN. Паралельно з цим еволюція медичних знань щодо впливу оптичного випромінювання на нейрофізіологію людини зумовила формування концепції людино-орієнтованого освітлення (Human-Centric Lighting). Цей підхід зобов'язує проєктувальників враховувати не лише стандартні зорові ефекти, але й глибокий невізуальний (циркадний) вплив світла на організм.

Перехід від технологій теплового випромінювання та газового розряду до твердотільної електролюмінесценції став визначальною віхою в розвитку світлотехніки. За підсумками 2024–2025 років світлодіодні джерела є абсолютним та безальтернативним технічним стандартом для будь-яких нових муніципальних проєктів.

Базовим критерієм енергоефективності виступає світлова віддача приладів. Найновіші комерційні генерації LED-модулів для вуличних світильників демонструють параметри, які ще десятиліття тому вважалися недосяжними. У передових гібридних комплексах масово використовуються SMD-світлодіоди (наприклад, у форм-факторі 5050), чия світлова віддача впевнено перевищує 180 лм/Вт, а в окремих преміальних серіях (зокрема завдяки технології CSP) наближається до 260 лм/Вт. Якщо порівнювати їх із традиційними лампами ДНаТ (які в ідеальних умовах генерують 100–130 лм/Вт), то з урахуванням втрат у пускорегулювальних апаратах (ПРА) та низького оптичного ККД старих світильників реальна експлуатаційна ефективність LED-систем виявляється вищою на 40–70 %.

Окрім енергоефективності, фундаментальною перевагою є життєвий цикл обладнання. Процес деградації напівпровідникового кристала відбувається надзвичайно повільно. Загальноприйнятим стандартом завершення експлуатації (стандарт L70) є падіння світлового потоку до 70 % від початкового паспортного значення. Для сучасних вуличних LED-модулів цей ресурс варіюється в межах 50 000 – 100 000 годин, що відповідає 12–25 рокам безперервної роботи в нічному режимі. Ця обставина докорінно трансформує економічну стратегію обслуговування міських електромереж, оскільки практично зводить нанівець регулярні витрати на заміну перегорілих ламп.

Фактична ефективність вуличного LED-світильника критично залежить від вторинної оптики – полімерних лінз та мікрорефлекторів, які відповідають за формування кривої сили світла (КСС). Новітні оптичні системи забезпечують високу рівномірність освітленості дорожнього полотна. Вони

здатні розширити корисну зону покриття одного приладу на 30 % і паралельно покращити показник загальної рівномірності на 15 % (порівняно зі старими зразками). Це дозволяє проєктувальникам збільшувати відстань між опорами, що радикально скорочує капітальні витрати на закупівлю стовпів, прокладку траншей та кабельних ліній.

Окремим і надзвичайно важливим параметром є якість світлового середовища. Класичні натрієві джерела генерують монохроматичне жовте світло з критично низьким індексом передачі кольору ($CRI < 25$), що майже повністю унеможливорює правильну ідентифікацію кольорів уночі. Це створює пряму загрозу безпеці, оскільки пішоходам і водіям важко розпізнати колір одягу людини, марку автомобіля чи деталі ландшафту. Сучасні світлодіодні системи легко забезпечують індекс $CRI > 70$ для магістрального освітлення, а для паркових і пішохідних зон нормальним стандартом є $CRI > 80$ або навіть понад 90. Висока якість передачі кольору є критично необхідною умовою для формування психологічно комфортного простору, де мешканці почуваються в безпеці та здатні адекватно сприймати архітектурні форми міста.

Впровадження HCL в інфраструктуру вуличного освітлення здійснюється за допомогою технології Tunable White (динамічного білого світла), яка керується за протоколом DALI-2 (частина 209) або бездротовими стандартами (рис. 1.10). Цей підхід дає можливість автоматично адаптувати колірну температуру (CCT) та яскравість відповідно до часу доби та сценарію використання простору:



Рисунок 1.10 – Функціонування динамічного освітлення за принципами HCL у громадських просторах

- ранкові та пікові режими – у години ранкового пробудження або під час інтенсивного вечірнього трафіку (особливо в зимовий період) система активує нейтральне або холодне біле світло (4000 K – 5000 K). Воно стимулює секрецію кортизолу, підвищує рівень бадьорості, покращує концентрацію уваги водіїв і пришвидшує реакцію;
- вечірні та нічні режими – у міру зниження міської активності пізнього вечора система плавно димується та переходить у теплий спектральний діапазон (2200 K – 3000 K). Тепле (бурштинове) світло має мінімальний вплив на циркадні ритми та створює релаксуючу атмосферу, що є оптимальним рішенням для паркових зон і спальних мікрорайонів. Крім того, тепле світло значно скорочує час зорової адаптації людини при переході від яскраво освітленої ділянки до темряви.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що сучасні комплекси освітлення міського середовища остаточно вийшли за рамки банальної утилітарної інфраструктури. Сьогодні це високотехнологічні, багатофункціональні екосистеми, що будуються на перетині інженерії Інтернету речей (IoT), нейробіології, екологічного урбанізму та соціальної відповідальності.

2 СВІЛОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Обґрунтування техніко-економічної доцільності застосування гібридних комплексів освітлення

Детальне дослідження кліматичних умов більшості територій виявляє стійку зворотну залежність між рівнем сонячної інсоляції та кінетичною енергією вітру. Метеорологічна статистика свідчить, що періоди максимального надходження сонячної радіації (ясна та безхмарна погода) здебільшого супроводжуються повним або частковим штилем. Натомість посилення вітрових потоків найчастіше відбувається на тлі активної циклонічної діяльності та щільної хмарності, що пропорційно знижує продуктивність фотоелектричної генерації.

Ця природна взаємодоповнюваність кліматичних ресурсів є фундаментальною передумовою для проєктування комбінованих електроустановок. Синергетична інтеграція двох різних джерел відновлюваної енергії дає змогу:

- гарантувати високий рівень надійності та безперебійності живлення автономного інфраструктурного вузла;
- раціонально оптимізувати встановлену розрахункову потужність вітрогенератора та загальну площу сонячних панелей;
- суттєво знизити вимоги до номінальної ємності акумуляторного парку, оскільки часові проміжки з повною відсутністю генерації зводяться до мінімуму.

Найбільш яскраво ефективність гібридних електростанцій ілюструється протягом річного експлуатаційного циклу. У літній сезон домінуючий обсяг генерації забезпечують фотоелектричні модулі, тоді як у зимові місяці – в умовах скороченого світлового дня та низького кута падіння сонячних променів – енергетичний дефіцит успішно компенсується завдяки підвищеному вітровому потенціалу.

Архітектурно-апаратна конфігурація сучасної гібридної системи освітлення формується з таких базових функціональних модулів (рис. 2.1) [13]:

1. Вітроенергетична установка (ВЕУ) – об'єднує в собі електромеханічний генератор, несучу щоглу, контролер турбіни та блок баластного опору для безпечної розсіювання надлишків енергії під час шквальних поривів вітру.

2. Фотоелектричний сегмент – масив сонячних панелей із відповідними апаратами комутації та захисту від струмів короткого замикання.

3. Інтелектуальна система керування зарядом та навантаженням – спеціалізований гібридний контролер. У сучасних інсталяціях цей пристрій не лише узгоджує роботу обох джерел генерації, а й апаратно підтримує стандартизовані цифрові протоколи (зокрема DALI, KNX або DMX512 для складніших сценаріїв). Це забезпечує глибоку інтеграцію кожної опори освітлення в єдину інформаційну мережу та на практиці реалізує концептуальний підхід «Light. Design. IoT.».

4. Система накопичення енергії – акумуляторний блок (у сучасних проєктах дедалі частіше застосовують літій-залізо-фосфатні акумулятори замість традиційних свинцево-кислотних завдяки їхньому більшому ресурсу циклювання).

5. Інвертор напруги (DC/AC) – електронний перетворювач постійного струму у змінний, який застосовується опціонально у випадках, коли до системи підключаються стандартизовані мережеві споживачі.

6. Кабельно-провідникова продукція – забезпечує надійне електричне з'єднання всіх перелічених компонентів із мінімізацією втрат на активному опорі.

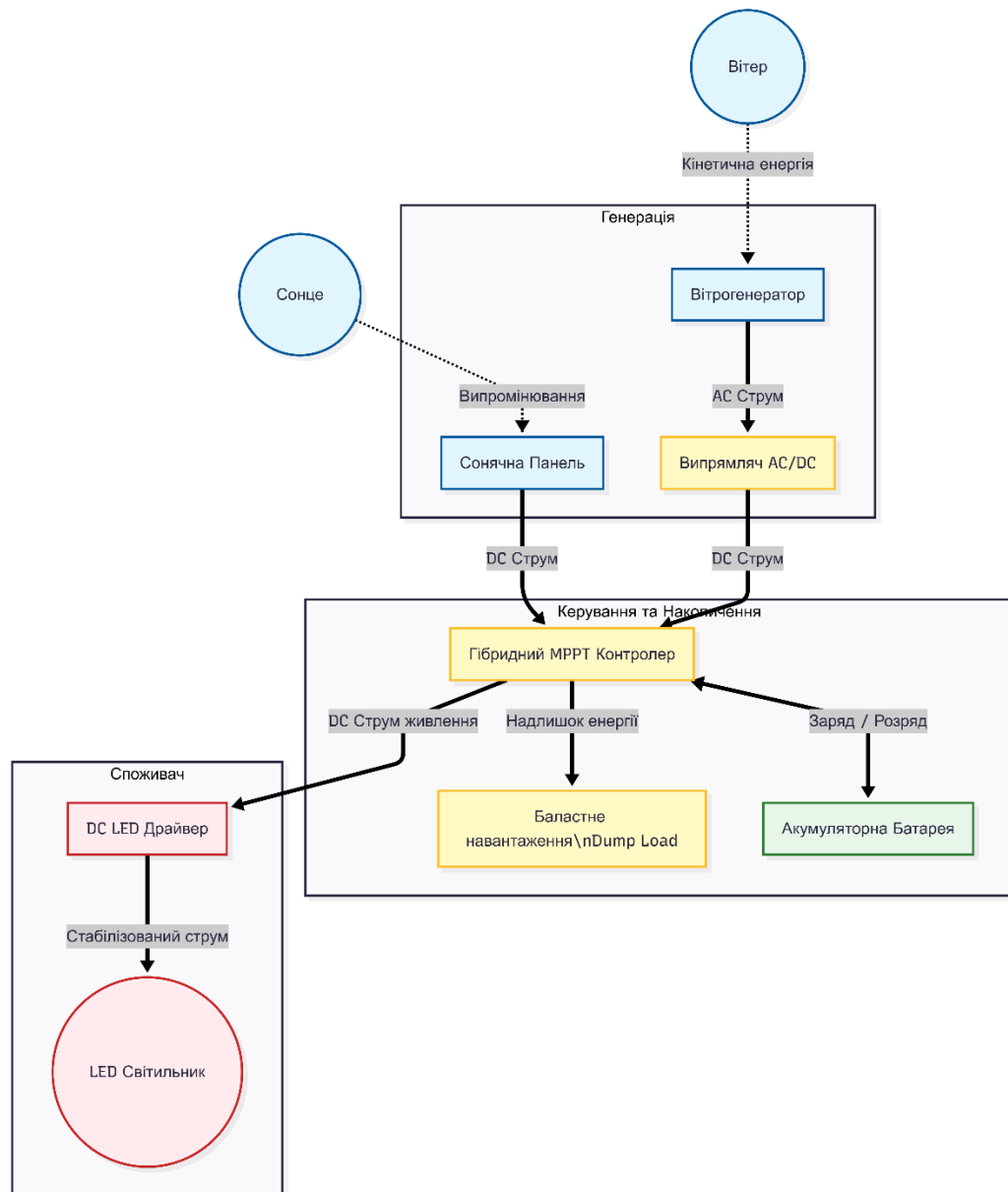


Рисунок 2.1 – Принципова структурна схема функціональних блоків автономної гібридної системи зовнішнього освітлення

2.2 Методологічні засади проєктування комбінованих систем зовнішнього освітлення

У парадигмі сталого розвитку урбанізованих територій та глобальної декарбонізації муніципальної інфраструктури гібридні комплекси зовнішнього освітлення набувають статусу пріоритетних технологій. Залучення вітрогенератора як комплементарного джерела до фотоелектричної системи дає змогу ефективно нівелювати сезонні коливання сонячної радіації,

тим самим радикально підвищуючи надійність автономного електропостачання в критичний осінньо-зимовий період.

Методологія проектування такого багатокомпонентного енергетичного комплексу відрізняється значною алгоритмічною складністю порівняно з розрахунком класичних моносистем і потребує комплексного аналізу розширеного спектра взаємопов'язаних параметрів:

1. Енергоспоживання – точний розрахунок номінальної потужності світлодіодних модулів та визначення сценарних профілів їхнього функціонування протягом темної пори доби.
2. Фотоелектрична генерація – визначення необхідної пікової потужності сонячних батарей, їхньої спектральної чутливості, а також розрахунок оптимальних кутів нахилу та азимутальної просторової орієнтації площин.
3. Вітроенергетична конверсія – підбір аеродинамічних характеристик ротора турбіни, врахування стартової швидкості страгування та вихідної номінальної електричної потужності генератора, скоригованої на локальний розподіл середньорічних швидкостей вітру.
4. Акумуляування та інтелектуальне керування – розрахунок робочої ємності блоку акумуляторних батарей (АКБ) та вибір алгоритмічної бази гібридного контролера заряду. Система керування має безперешкодно інтегруватися з цифровими протоколами комутації для забезпечення адаптивного димування та віддаленого телеметричного моніторингу.

Фундаментальним завданням проектного розрахунку є забезпечення стійкого позитивного енергетичного балансу комплексу. Математична модель повинна гарантувати, що сумарна добова генерація від сонячного та вітрового сегментів буде перекивати добові витрати електроенергії на живлення світильника та роботу телекомунікаційного обладнання (з обов'язковим урахуванням коефіцієнтів втрат в інверторах та лініях передачі). У цій архітектурі вітрогенератор виконує функцію базового стабілізатора: за умов суцільної хмарності або вночі, коли генерація PV-модулів зведена до нуля,

вітрова турбіна продовжує підтримувати необхідний рівень заряду накопичувачів шляхом утилізації кінетичної енергії повітряних потоків.

Помилки на етапі параметричного синтезу компонентної бази гібридної системи генерують критичні експлуатаційні ризики. Найбільш поширеними помилками проєктування є [14]:

1. Аеродинамічна невідповідність (слабка турбіна) – вибір вітроколеса із завищеним порогом стартової швидкості призводить до того, що в умовах слабких міських вітрів воно залишатиметься нерухомим. Турбіна перетворюється на статичний баласт, який не лише не генерує енергію, а й створює небезпечне механічне та вітрове навантаження на несучу опору.

2. Генераційний дисбаланс – надлишкова встановлена потужність обох джерел генерації може спричинити систематичний перезаряд батарей у ясні та вітряні літні дні. Це призводить до постійного спрацьовування захисних алгоритмів контролера, розсіювання енергії на баластних резисторах та загальної економічної неефективності залучених капітальних інвестицій.

3. Дефіцит ємності акумуляторів – недостатній об'єм АКБ повністю нівелює технологічні переваги гібридної архітектури. Система втрачає здатність запасати надлишки згенерованої енергії під час сильного вітру для її безпечного використання у подальші періоди тривалого штилю.

Структурно-функціональна логіка взаємодії елементів у межах гібридної системи освітлення наочно відображена на рис. 2.2.

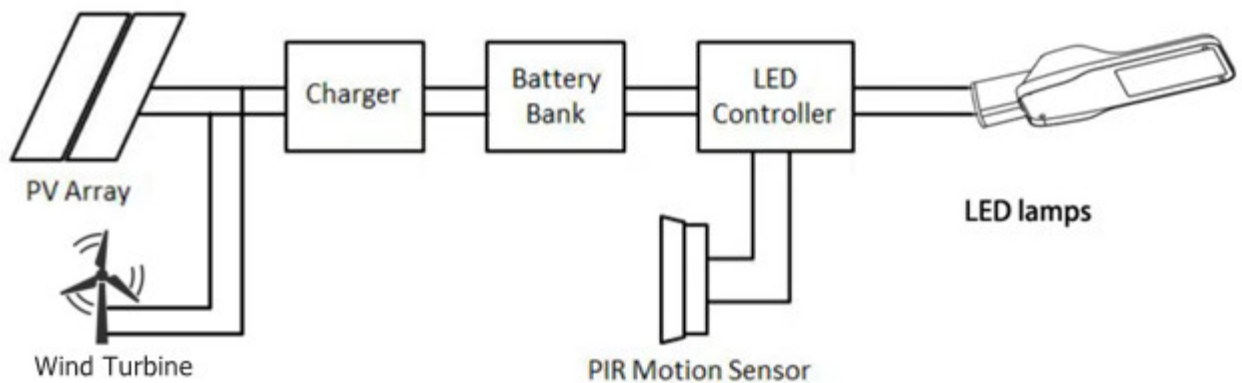


Рисунок 2.2 – Концептуальна схема взаємодії функціональних вузлів гібридного комплексу зовнішнього освітлення

Академічно виважена методологія проєктування вимагає глибокого ретроспективного аналізу регіональних метеорологічних баз даних (побудови локальних роз вітрів та матриць сонячної інсоляції). Лише такий багатовимірний підхід гарантує створення надійної автономної інфраструктури, здатної забезпечувати безпечне та безперебійне освітлення громадських просторів за будь-яких погодних сценаріїв.

2.3 Параметричний вибір та енергетичний розрахунок освітлювального навантаження

Проектування збалансованої енергетичної моделі гібридної системи розпочинається з комплексного аудиту всіх потенційних споживачів. Сучасна інфраструктура виходить за межі виключно генерації світла: керуючись концепцією «Light. Design. IoT.», опора освітлення перетворюється на багатофункціональний хаб. Відповідно, до складу загального навантаження, окрім основного світлодіодного (LED) модуля, необхідно закладати споживання допоміжних інтелектуальних вузлів: контролерів бездротового зв'язку, камер відеоаналітики, метеорологічних датчиків або сенсорів моніторингу якості повітря.

Класичний алгоритм розрахунку електричного навантаження реалізується у два послідовні етапи:

1. Визначення необхідного сумарного світлового потоку (лм) та відповідної електричної потужності світильника (Вт), що гарантуватиме досягнення нормованих показників освітленості на заданій ділянці.
2. Розрахунок загального добового енергоспоживання (W_{load} , Вт·год) з обов'язковим урахуванням сценарних графіків роботи (циклів димування).

Визначальним критерієм підбору джерела світла для автономних і гібридних установок виступає світлова віддача – фізичний показник, що характеризує ефективність конверсії спожитої електричної енергії у корисне видиме випромінювання.

При специфікації обладнання технічно хибним є орієнтування виключно на номінальну потужність приладу. Головним пріоритетом має бути максимізація відношення згенерованого потоку до витраченої енергії. Сучасні промислові LED-матриці масового сегмента стабільно демонструють світлову віддачу на рівні 150–170 лм/Вт. Для порівняння: інноваційний світильник потужністю всього 5 Вт із ефективністю 150 лм/Вт продукує світловий потік $\Phi = 7500$ лм, що є еквівалентом роботи застарілої лампи розжарювання потужністю понад 500 Вт.

З метою запобігання ефекту світлового забруднення та оптимізації загальних витрат енергії, точний підбір потужності здійснюється шляхом побудови 3D-моделі у спеціалізованих програмних комплексах (наприклад, DIALux evo [15]). Комп'ютерне моделювання дає змогу вийти на нормативні показники освітленості (лк) і рівномірності без закладання надлишкової потужності. Цей етап є критично важливим, оскільки кожен «зайвий» ват навантаження експоненційно збільшує капітальну вартість необхідних сонячних панелей та акумуляторних батарей (АКБ).

Фундаментальним інструментом оптимізації роботи гібридної системи є впровадження адаптивних алгоритмів освітлення. Завдяки інтеграції цифрових протоколів керування, світильник функціонує на 100 % номінальної потужності лише в години пікового пішохідного або автомобільного трафіку. У період глибокої ночі система автоматично переходить в енергоощадний режим, знижуючи яскравість до мінімально допустимого рівня безпеки.

Для прикладу розглянемо експлуатаційний сценарій рекреаційної паркової зони. LED-світильник номінальною потужністю 100 Вт працює за таким алгоритмом: 6 годин (активний вечір) на рівні 100 % потужності, та наступні 6 годин (нічний час) зі зниженням світлового потоку до рівня 50 % від номіналу.

Математично сумарне добове енергоспоживання ($E_{\text{щод}}$) для багаторежимного графіка обчислюється за формулою:

$$E_{\text{щод}} = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot t_i), \quad (2.1)$$

де P_i – електрична потужність світильника в i -му робочому режимі (Вт);
 t_i – тривалість функціонування в цьому режимі (год);
 n – загальна кількість визначених режимів протягом доби.

Виконуючи розрахунок за заданими умовами, отримуємо:

$$E_{\text{щод}} = (100 \cdot 6) + (50 \cdot 6) = 900 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

Саме обчислене значення у 900 Вт·год стає базовою розрахунковою величиною для подальшого проектування необхідної ємності акумуляторного парку та сумарної потужності генеруючого обладнання (сонячних панелей і вітрогенератора).

Окрім енергетичних показників, під час вибору світлодіодної матриці особливу увагу слід приділяти корельованій колірній температурі (CCT). Попри те, що джерела холодного світла (5000–6000 K) технологічно мають дещо вищу енергоефективність, для освітлення паркових зон і громадських просторів наполегливо рекомендується імплементація модулів нейтрального або теплого білого спектра (3000–4000 K). Такий спектр створює відчутно вищий рівень візуального комфорту та мінімізує деструктивний вплив на циркадні ритми людини і локальне біорізноманіття. Додатково, для максимізації оптичного ККД установки, слід використовувати лінзи із широким асиметричним світлорозподілом. Це технічне рішення дозволяє максимізувати крок монтажу між опорами, гарантуючи при цьому відсутність темних (провальних) зон на площині доріжки.

2.4 Розрахунок встановленої потужності фотоелектричної підсистеми

Визначення необхідної розрахункової потужності сонячного масиву (P_{pv}) є критичним етапом проектування, який ґрунтується на забезпеченні стійкого позитивного енергетичного балансу всієї системи. Цей розрахунок обов'язково враховує регіональну кліматологію та загальні технічні втрати під час конверсії енергії. Математична модель спирається на два базові вихідні параметри:

1. Добове енергоспоживання навантаження ($E_{\text{щод}}, \text{Вт} \cdot \text{год}$) – сумарний обсяг електроенергії, необхідної для повноцінного функціонування LED-світильника, драйвера живлення, гібридного контролера та периферійного обладнання протягом 24 годин. З огляду на імплементацію концепції «Light. Design. IoT.», до цього показника обов’язково слід включати паразитно-робочі енерговитрати інтелектуальних систем.

2. Рівень сонячної інсоляції (PSH) – еквівалентна кількість годин активного сонячного сяйва з еталонною інтенсивністю випромінювання 1000 Вт/м^2 . Цей кліматичний індикатор є динамічним і жорстко залежить від географічної широти розташування об’єкта та поточної пори року.

Аналітична формула для розрахунку мінімально необхідної потужності фотоелектричного модуля має такий вигляд:

$$P_{PV} = \frac{E_{\text{щод}} \cdot k_z}{PSH}, \quad (2.2)$$

де k_z – комплексний коефіцієнт запасу. Він враховує неминучі втрати на перетворення в контролері заряду, падіння напруги в кабельних трасах, оптичне запилення поверхні модуля та поступову температурну деградацію кристалів (на практиці зазвичай приймається в діапазоні 1,3–1,4).

Для ілюстрації методики розглянемо гібридну систему з раніше обчисленим добовим споживанням на рівні $900 \text{ Вт} \cdot \text{год}$. З метою забезпечення максимальної безвідмовності енергетичний аудит проводиться для двох граничних метеорологічних станів:

1. Літній період (максимальна інсоляція).

Припустимо, що середній статистичний показник інсоляції для умовного ясного літнього дня становить $10 PSH$. Підставляючи значення у формулу, отримуємо розрахункову потужність:

$$P_{PV(\text{літо})} = \frac{900 \cdot 1,3}{10} = 117 \text{ Вт.}$$

2. Зимовий період (мінімальна інсоляція).

При сезонному падінні рівня інсоляції до критичного показника $5 PSH$, потреба у встановленій потужності генерації різко зростає:

$$P_{PV(\text{зима})} = \frac{900 \cdot 1,3}{5} = 234 \text{ Вт.}$$

Слід зазначити, що наведені в прикладі дані є усередненими. Для максимізації фотогенерації саме в осінньо-зимовий період (коли сонце перебуває низько над горизонтом), панелі автономних ліхтарів слід монтувати під кутом, що дорівнює географічній широті місцевості з додаванням $10\text{--}15^\circ$. Для міста Харкова оптимальний кут зимового нахилу становить $60\text{--}65^\circ$. Додатковим ефективним інженерним рішенням є вертикальне розташування двосторонніх панелей безпосередньо на стовпі – це не лише запобігає накопиченню снігового покриву на активній поверхні, а й дозволяє ефективно акумулювати відбите від снігу розсіяне світло (показник альбедо).

Результати розрахунків демонструють чітку обернено пропорційну залежність – для гарантування енергетичної стабільності впродовж усього року номінальна потужність сонячної генерації має бути як мінімум удвічі вищою, ніж фактична потреба для літнього сезону.

Знайдене за формулою розрахункове значення є виключно мінімально допустимою межею. У реальному проєктуванні завжди здійснюється округлення в більшу сторону до найближчого промислового номіналу зі стандартного ряду потужностей (наприклад, замість розрахункових 234 Вт обирається серійний модуль потужністю 250–280 Вт).

Введення в математичну модель коефіцієнта запасу потужності гарантує системі низку стратегічних експлуатаційних переваг:

- енергетична стійкість – забезпечується стабільний зарядний струм для акумуляторів навіть в умовах затяжної похмурої погоди або часткового затінення;
- подовження ресурсу накопичувачів – мінімізується кількість руйнівних циклів глибокого розряду (DOD), оскільки розширений масив

панелей встигає повністю відновити ємність батареї навіть за короткий світловий день;

- інфраструктурна масштабованість – формується енергетичний резерв для потенційного підключення додаткових Smart-споживачів.

Ігнорування цього принципу та вибір фотомодуля «впритул» до споживаного навантаження генерує високі ризики хронічного недозаряду акумуляторного блоку. Для традиційних свинцево-кислотних (GEL/AGM) батарей це неминуче призводить до незворотної сульфатації пластин, а для сучасних літієвих рішень – до втрати загального ресурсу, що в кінцевому підсумку спричиняє передчасну відмову системи та аварійне знеструмлення освітлення.

2.5 Розрахунок параметрів вітроенергетичної установки

Інтеграція вітрогенератора до апаратної структури гібридної системи вуличного освітлення зумовлена критичною необхідністю компенсації генераційного дефіциту сонячної підсистеми в осінньо-зимовий період. Як було доведено в попередніх підрозділах, за умов сезонної депресії сонячної інсоляції (особливо у грудні–січні) фотоелектричний масив здатний покрити лише незначну частку загальної добової потреби підключеного навантаження.

Методологія проєктування та вибору вітроенергетичної установки ґрунтується на фундаментальному принципі безперервного покриття енергетичного дефіциту. Відповідно до концепції інтелектуальних мереж («Light. Design. IoT.»), розрахункові параметри також мають враховувати резерв потужності для безперебійного живлення телеметричних контролерів, які продовжують працювати навіть під час димування основного джерела світла.

Аналітичний алгоритм розрахунку реалізується у два послідовні етапи:

1. Визначення енергетичного дефіциту (ΔE) – розраховується як математична різниця між сумарним добовим споживанням усієї інфраструктури опори та фактичною добовою генерацією фотоелектричних панелей у метеорологічно найгірший місяць року:

$$\Delta E = E_{\text{щод}} - E_{PV(\text{зима})}. \quad (2.3)$$

де $E_{\text{щод}}$ – загальне добове споживання енергії (Вт·год);

$E_{PV(\text{зима})}$ – розрахункова генерація сонячної панелі в умовах мінімальної зимової інсоляції (Вт·год).

За нашими попередніми розрахунками, для компенсації зимового дефіциту ця величина становить $\Delta E = 680$ Вт·год.

2. Визначення необхідної середньої потужності турбіни – на цьому етапі обчислюється робоча потужність, яку повинен безперервно генерувати вітрогенератор при локальній середній швидкості вітру для повного покриття знайденого дефіциту протягом доби (24 години):

$$P_{\text{сер}} = \frac{\Delta E}{24 \cdot k_w}, \quad (2.4)$$

де k_w – коефіцієнт вітрової активності (імовірність стабільної наявності вітру), який для відкритої міської місцевості або рекреаційних зон зазвичай приймається в діапазоні 0,6 ... 0,8.

Виходячи з отриманого дефіциту у 680 Вт·год, необхідна середня генеруюча потужність турбіни (за умови роботи протягом 24 годин) становитиме близько 28 Вт.

3. Приведення до номінальної потужності генератора – метеорологічна статистика свідчить, що середня швидкість вітру в зимовий період для аналізованого регіону (на робочій висоті розміщення турбіни 6–8 м) становить $V_{\text{сер}} \approx 4,5$ м/с. Для коректного вибору моделі ВЕУ необхідно врахувати кубічну залежність механічної енергії від швидкості потоку за такою формулою:

$$P_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{сер}}}{\left(\frac{V_{\text{сер}}}{V_{\text{ном}}}\right)^3} \quad (2.5)$$

де $P_{\text{ном}}$ – паспортна номінальна потужність вітрогенератора (Вт);

$V_{\text{ном}}$ – номінальна швидкість вітру, за якої турбіна видає паспортну потужність (м/с).

Абсолютна більшість серійних мікро-ВЕУ виходить на свою номінальну потужність при шквальних швидкостях вітру близько 11 ... 12 м/с. При середньостатистичній міській швидкості 4,5 м/с їхня енергетична віддача експоненційно падає згідно із законами аеродинаміки.

Зокрема, відношення швидкостей у кубі становить:

$$\left(\frac{4,5}{11}\right)^3 \approx 0,068.$$

Це означає, що при середньому фоновому вітрі інфраструктурна турбіна здатна генерувати лише 7 % від свого заявленого номіналу. Оскільки необхідна середня потужність для покриття розрахункового дефіциту становить 28 Вт, номінальна (паспортна) потужність вітрогенератора має складати:

$$P_{\text{ном}} = \frac{28}{0,068} \approx 411 \text{ Вт.}$$

Для надійної компенсації зимового енергетичного дефіциту в розмірі 680 Вт·год до апаратної специфікації необхідно закласти вітрогенератор (бажано вертикально-осьового типу VAWT для зниження вібрацій) із паспортною номінальною потужністю не менше 400–500 Вт. Вибір компактнішої або менш потужної турбіни є критичною інженерною помилкою: у реальних міських умовах така система фізично не зможе підтримувати заряд батарей на рівні, достатньому для безперебійного живлення LED-ліхтаря та цифрових шин керування протягом усієї зимової ночі.

2.6 Обґрунтування вибору технологій накопичення та зберігання енергії

Підсистема накопичення електроенергії (СНЕ) об'єктивно є найбільш технологічно вразливим вузлом будь-якої автономної установки. Саме її характеристики визначають загальний експлуатаційний ресурс і сукупну вартість володіння всім інфраструктурним комплексом (рис. 2.3). Специфіка функціонування вуличного освітлення диктує вкрай жорсткий циклічний режим роботи: щоденний глибокий розряд накопичувачів у темну пору доби та подальший заряд стохастичними струмами від сонячних панелей та вітрогенератора протягом світлового дня.

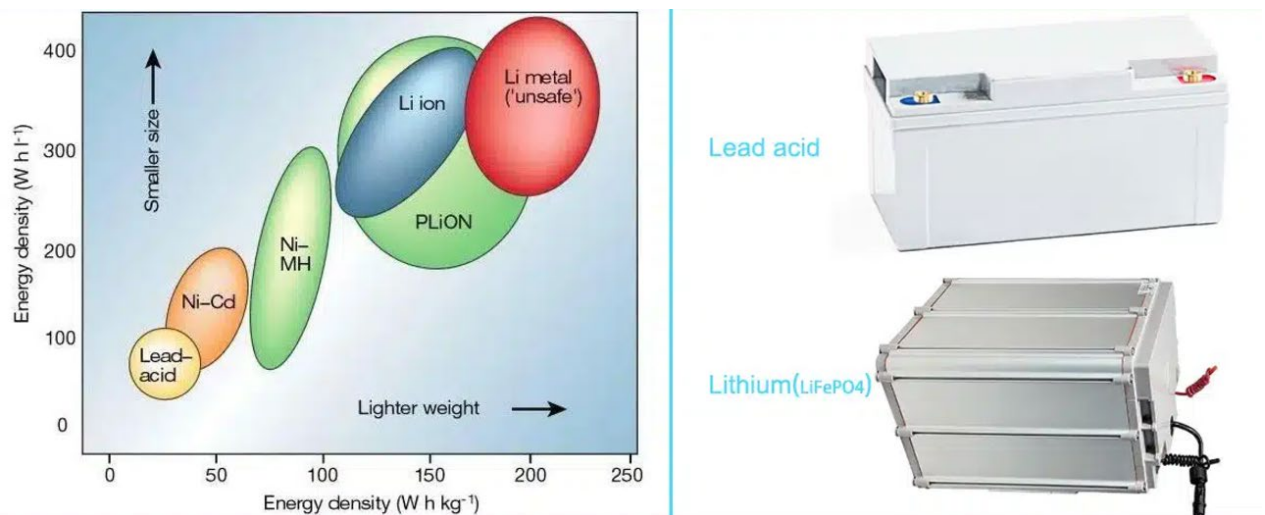


Рисунок 2.3 – Класифікація сучасних технологій та систем акумулювання електроенергії

Для гарантування високої надійності роботи до акумуляторного блоку висувається низка критичних інженерних вимог:

1. Стійкість до глибокого розряду (DOD) – здатність хімічного джерела струму віддавати до 80 % своєї номінальної ємності без ризику незворотної структурної деградації внутрішніх електродів.
2. Високий циклічний ресурс – забезпечення щонайменше 2000–3000 повних циклів «заряд-розряд», що еквівалентно 5–8 рокам безперервної щоденної експлуатації.

3. Висока ефективність прийому заряду – фізична здатність акумулятора швидко і без втрат засвоювати згенеровану енергію в моменти короткочасної активності сонця або різких поривів вітру.

На сучасному ринку автономної енергетики домінують дві концептуально різні електрохімічні технології (порівняльний аналіз представлено у табл. 2.1):

1. Свинцево-кислотні накопичувачі (AGM, GEL) – класична технологія, де в ролі електроліту використовується зв'язана у скловолокні (AGM) або згущена до стану гелю (GEL) сірчана кислота. Основні переваги – низька стартова капітальна вартість та здатність приймати заряд за помірних від'ємних температур. Головні недоліки – жорстко обмежений ресурс (лише 300–600 циклів за умови глибокого розряду 80 %), критична схильність до незворотної сульфатації пластин у стані хронічного недозаряду (що є типовою проблемою взимку), а також значні масо-габаритні показники.

2. Літієві технології (Li-ion / LiFePO₄) – передова електрохімічна архітектура, що наразі активно витісняє свинцеві аналоги із сегмента відновлюваної енергетики. Переваги – екстремально високий життєвий ресурс (від 3000 до 6000 циклів), стабільна полиця напруги під час розряду, висока питома густина енергії та здатність швидко приймати заряд великими струмами. Недоліки – вища первинна вартість та суворі необхідності інтеграції інтелектуальної плати керування балансуванням BMS.

Таблиця 2.1 – Порівняльна техніко-експлуатаційна характеристика сучасних акумуляторних елементів

Тип накопичувача	Питома густина енергії	Питома потужність	Ефективність заряду	Розрахунок кількості циклів	Діапазон робочих температур
	<i>Вт·год/кг</i>	<i>Вт/кг</i>	%	—	°C
Свинцево-кислотний (GEL /AGM)	30-40	180	70-92	500-800	–20...+60
Li-ion	160	1800	99,9	~ 1200	–20...+60
LiFePO ₄	80-120	1400	99,9	2000–6000	–45...+80
Супер конденсатори	< 10	> 10000	90-98	> 1000000	–40...+70

Попри те, що стартові капіталовкладення в LiFePO₄ вищі у 2–3 рази, розрахунок сукупної вартості володіння безпеліційно доводить їхню економічну ефективність. Протягом життєвого циклу однієї літєвої збірки (близько 10 років) експлуатаційній службі доведеться замінити 3–4 комплекти важких свинцевих батарей. З урахуванням супутніх витрат на логістику та висотні монтажні роботи, свинцева технологія виявляється значно дорожчою в довгостроковій перспективі.

Крім того, застосування літєвих рішень ідеально узгоджується з концептуальним підходом «Light. Design. IoT.». Сучасні модулі BMS підтримують цифрові інтерфейси та здатні передавати телеметрію (рівень заряду, температуру осередків, струми) безпосередньо на гібридний контролер для подальшої ретрансляції на муніципальний сервер.

Водночас під час проектування слід враховувати критичне обмеження літій-залізо-фосфатної хімії: процес заряду за температури нижче 0°C є недопустимим через ризик металізації (осадження) літію на аноді, що провокує пробій сепаратора та коротке замикання.

Для вуличних інсталяцій ця проблема вирішується одним із таких апаратних методів:

1. Розміщення АКБ у теплоізовьованому антивандальному боксі на опорі, оснащеному системою активного підігріву (внутрішні термомати активуються від енергії ранкового сонця перед тим, як BMS дозволить пропускати зарядний струм на комірки).
2. Використання спеціалізованих літєвих комірок із легуванням ітрієм (LiFeYPO_4), хімія яких дозволяє безпечно приймати зарядні струми за температури до -20°C .
3. Підземний монтаж акумуляторного кесона біля основи опори (нижче географічної глибини промерзання ґрунту), де цілорічно зберігається позитивний температурний фон.

Новітнім вектором еволюції систем автономного живлення є усунення технологічного компромісу між питомою енергоємністю та питомою потужністю. Вирішенням цього завдання є впровадження електричних двошарових конденсаторів, також відомих як іоністори або суперконденсатори. Вони займають проміжну ланку між традиційними електролітичними конденсаторами та батареями, маючи унікальні властивості:

- надвисока густина потужності – здатність блискавично приймати та віддавати екстремальні струми (час повного заряду вимірюється секундами);
- необмежений ресурс – відсутність руйнівних хімічних реакцій забезпечує стійкість до мільйонів циклів;
- температурна толерантність – безперебійна робота в найсуворіших зимових умовах.

Проте через вкрай низьку густину енергії вони не здатні забезпечувати тривале живлення навантаження. Тому найперспективнішим рішенням для смарт-інфраструктури є архітектура гібридної системи накопичення енергії

(HESS). У такій топології літєва збірка працює паралельно з блоком суперконденсаторів, які виконують функцію «динамічного буфера»:

- демпфують пікові пускові струми;
- миттєво поглинають енергетичні сплески від шквальних поривів вітру (які літєва хімія не встигає швидко засвоїти через внутрішній опір);
- радикально знижують мікроцикування основної батареї, збільшуючи її життєвий цикл.

Необхідну енергетичну ємність акумуляторного блоку ($E_{бат}$, Вт·год) обчислюють за формулою:

$$E_{акум} = \frac{E_{денна} \cdot D}{\eta \cdot DOD}, \quad (2.6)$$

де $E_{денна}$ – сумарне добове споживання електроенергії комплексом (Вт·год);
 D – резервна кількість днів автономної роботи (днів без сонця та вітру);
 η – загальний коефіцієнт електричної ефективності (ККД) перетворювачів системи (зазвичай приймається на рівні 0,95);
 DOD – максимально допустима глибина розряду комірок (для $LiFePO_4$ – 0,8–0,9).

У нашому проєктному розрахунку прожектор споживає 900 Вт·год на добу, а система проєктується на забезпечення автономності протягом 2 безгенераційних днів. За умови застосування літій-залізо-фосфатної батареї:

$$E_{бат} = \frac{900 \cdot 2}{0,95 \cdot 0,9} \approx 2105 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

Для переходу до стандартної ампер-годинної ємності ($C_{АКБ}$) при використанні базової 12-вольтової архітектури виконується розрахунок:

$$C_{АКБ} = \frac{2105}{12} \approx 175,4 \text{ А} \cdot \text{год}.$$

Отримана величина 175,4 А·год є жорстким математичним мінімумом. Однак інженерна практика вимагає врахування неминучої експлуатаційної деградації літєвих комірок з часом та тимчасового падіння віддачі ємності при зниженні температури середовища. Тому під час складання кінцевої

специфікації до розрахункового значення застосовується коефіцієнт надійності (зазвичай $\times 2$). З огляду на це для даного об'єкта обґрунтованим є вибір акумуляторної збірки номінальною ємністю 350–400 А·год (при 12 В). Це створить глибокий резерв міцності, компенсує температурні просадки та гарантує безвідмовну роботу автономної опори протягом усього розрахункового терміну експлуатації.

2.7 Обґрунтування та вибір гібридного контролера керування

Функціональним ядром та головним обчислювальним центром автономного освітлювального комплексу виступає контролер заряду-розряду. Цей електронний модуль виконує роль інтелектуального диспетчера, який у режимі реального часу синхронізує та оптимізує енергетичні потоки між джерелами генерації (фотоелектрична матриця, вітроенергетична установка), системою накопичення (АКБ) та кінцевим споживачем (світлодіодним навантаженням).

Спектр функціональних завдань сучасного контролера охоплює три фундаментальні напрями:

1. Керування процесом заряду – апаратна реалізація складних багатостадійних алгоритмів заряджання для забезпечення максимальної електрохімічної ефективності та подовження життєвого циклу акумуляторного блоку.

2. Багаторівнева система захисту (інтеграція з BMS) – превентивне блокування аварійних та позаштатних режимів роботи. Сюди входить захист від критичного перезаряду та глибокого розряду, апаратне блокування зворотних струмів на сонячні панелі у нічний час, а також захист від струмів короткого замикання та термозахист.

3. Керування навантаженням та телеметрія – прецизійна стабілізація вихідної напруги і струму для живлення LED-драйвера. У парадигмі «Light. Design. IoT.», сучасний контролер також відповідає за реалізацію адаптивних сценаріїв димування за цифровим протоколом DALI-2, обробку сигналів від

мікрохвильових або інфрачервоних датчиків руху та передачу телеметрії на муніципальні сервери через вбудовані шлюзи LoRaWAN або NB-IoT.

Залежно від застосованої схемотехніки та математичного апарату конверсії енергії, контролери класифікуються на дві технологічні групи:

1. Широтно-імпульсні модулятори (ШІМ / PWM) – пристрої базового рівня, що функціонують за принципом швидкодіючого електронного ключа, який фактично замикає контур сонячної панелі безпосередньо на клемі акумулятора. У результаті робоча напруга фотомодуля примусово «просідає» до поточного рівня напруги АКБ. Ця технологічна особливість призводить до безповоротної втрати значної частки потенційної генеруючої потужності панелі.

2. Контролери з відстеженням точки максимальної потужності (MPPT) – високотехнологічні апарати, побудовані на базі високочастотного DC-DC перетворювача. Їхній мікропроцесор за допомогою спеціалізованих алгоритмів безперервно сканує вольт-амперну характеристику сонячної панелі. Знаходячи динамічну точку максимальної потужності, контролер без втрат трансформує надлишкову напругу первинного джерела у пропорційно збільшений зарядний струм. Технологія MPPT гарантує приріст загальної генерації на 15–30 % порівняно зі звичайними ШІМ-системами, що має критичне значення в умовах низької освітленості (зимовий період, щільна хмарність) або при негативних температурах довкілля.

Для розроблюваної комбінованої системи безальтернативним інженерним рішенням є застосування спеціалізованого гібридного контролера, що містить фізично ізольовані вхідні каскади для сонячної матриці та генератора вітрової турбіни.

Критичною відмінністю гібридної архітектури є наявність обов'язкового каналу керування баластним опором. Специфіка експлуатації вітрогенератора полягає в тому, що його неможливо просто електрично відключити від мережі у момент повного заряду батарей. Зникнення електромагнітного опору на валу турбіни під час сильного вітру призведе до її миттєвого аеродинамічного

розгону та подальшого катастрофічного механічного руйнування відцентровими силами. Тому при досягненні 100 % заряду АКБ гібридний контролер миттєво перекомутує надлишкову енергію вітру на спеціальний тепловий баласт, забезпечуючи надійне електромагнітне гальмування ротора.

Оскільки даний електронний модуль монтується безпосередньо в ревізійному люку біля основи опори освітлення або в зовнішньому комутаційному боксі, до його корпусу висувуються жорсткі вимоги. Контролер повинен мати клас індустриального захисту не нижче IP67. Внутрішня плата (PCB) має бути суцільно залита теплопровідним епоксидним компаундом, що повністю виключає вплив конденсату та захищає електронні компоненти від руйнівних вібрацій, які передаються по щоглі від вітрогенератора.

З огляду на необхідність максимізації енергетичної віддачі в дефіцитний зимовий період та вимоги до інтелектуального керування, для реалізації даного проєкту затверджено використання гібридного контролера з інтегрованою технологією MPPT та підтримкою цифрових інтерфейсів диспетчеризації.

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ І РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ

3.1 Технічні аспекти практичної реалізації комплексів зовнішнього освітлення на базі відновлюваної енергетики

Інженерно-технічне впровадження фотоелектричних та гібридних установок для систем автономного життєзабезпечення міст передбачає розробку стійкої просторової та конструктивної конфігурації. Залежно від специфіки об'єкта та ландшафтних умов (наприклад, при проектуванні лінійного витягнутих просторів або за умов децентралізованого освітлення приміських чи сільських територій), монтаж обладнання може реалізовуватися на щоглах різної висоти (аж до лінійних опор висотою до 20 метрів).

Важливим аспектом є координація параметрів джерела світла. Якщо у ранніх прототипах або спеціалізованих локальних системах безпеки використовувалися світлодіодні прожектори з базовою світловою віддачею на рівні 70–100 лм/Вт, то сучасні стандарти енергоефективності вимагають інтеграції оптичних блоків нового покоління. Твердотільні джерела світла з ефективністю понад 150–180 лм/Вт дозволяють досягати нормативних показників яскравості при значно меншому навантаженні на акумуляторний парк. Для забезпечення тривалої безвідмовної експлуатації в несприятливих погодних умовах світлодіодний прожектор повинен мати високий індустріальний клас захисту від вологи та пилу (не нижче IP66/IP67). Це гарантує стабільність фотометричних та електричних характеристик у широкому температурному діапазоні – від екстремальних зимових заморозків ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) до літнього нагрівання ($+50\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Генерація електричної енергії в таких комплексах покладається на високоефективні кремнієві фотомодулі монокристалічного типу, сучасний коефіцієнт перетворення (ККД) яких сягає 23 % і більше. Матеріали та конструкція цих панелей адаптовані до тривалого життєвого циклу із розрахунковим терміном корисної експлуатації до 25 років (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Загальний вид просторового компонування автономної освітлювальної установки з інтегрованими фотоелектричними модулями

Максимальна системна ефективність досягається завдяки координації роботи фотоелектричних масивів із високотехнологічними мікропроцесорними контролерами, що реалізують алгоритм відстеження точки максимальної потужності (MPPT), та прогресивними буферними накопичувачами. Використання літій-залізо-фосфатних акумуляторних батарей (технологія LiFePO_4 зі стандартним терміном служби до 8–10 років та високим ресурсом циклювання) забезпечує стабільну автономну роботу комплексу, мінімізуючи сукупні витрати на обслуговування інфраструктури (рис. 3.2 – 3.4).



Рисунок 3.2 – Конструктивне розміщення буферної літій-залізо-фосфатної батареї та мікропроцесорного контролера керування в герметичному антивандальному боксі

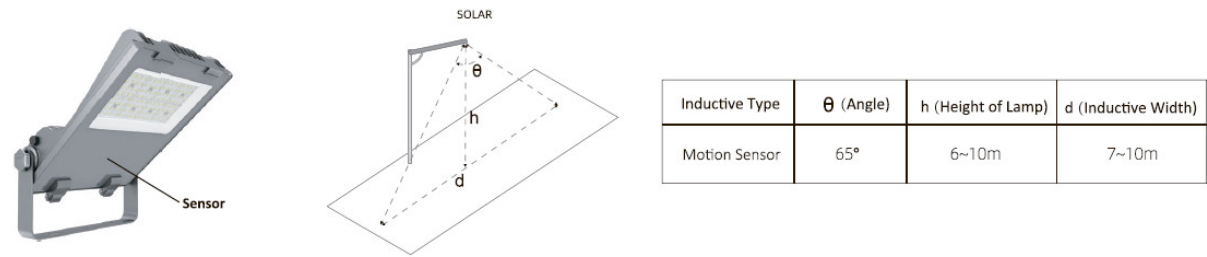


Рисунок 3.3 – Схема інтеграції високочутливого датчика присутності до загальної системи інтелектуального керування навантаженням

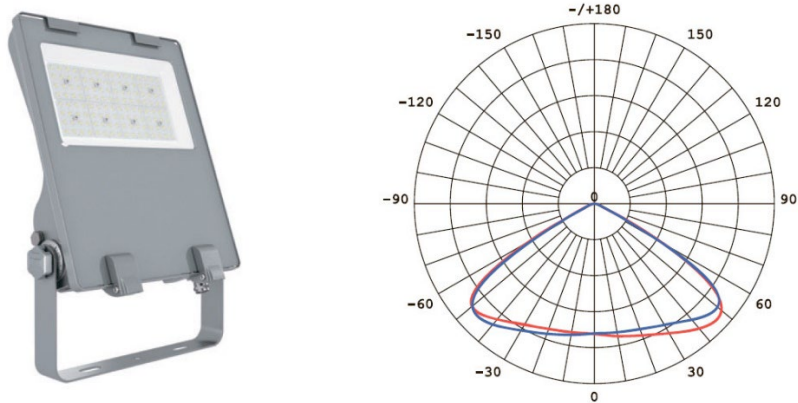


Рисунок 3.4 – Просторовий розподіл світлового потоку (крива сили світла) оптичної системи енергоефективного світильника

У географічних регіонах або міських зонах із вираженим дефіцитом сонячної інсоляції в зимовий період доцільно впроваджувати мережеву гібридну архітектуру, яка повністю відповідає концепції концептуального проектування «Light. Design. IoT.» (рис. 3.5). За такої схеми, у випадку падіння рівня заряду акумуляторного блоку нижче встановленої критичної межі, інтелектуальний контролер автоматично перемикає живлення світлодіодного драйвера на зовнішню магістральну електромережу. Після відновлення автономної генерації або досягнення акумулятором безпечного рівня заряду система миттєво повертається до пріоритетного споживання «зеленої» енергії.

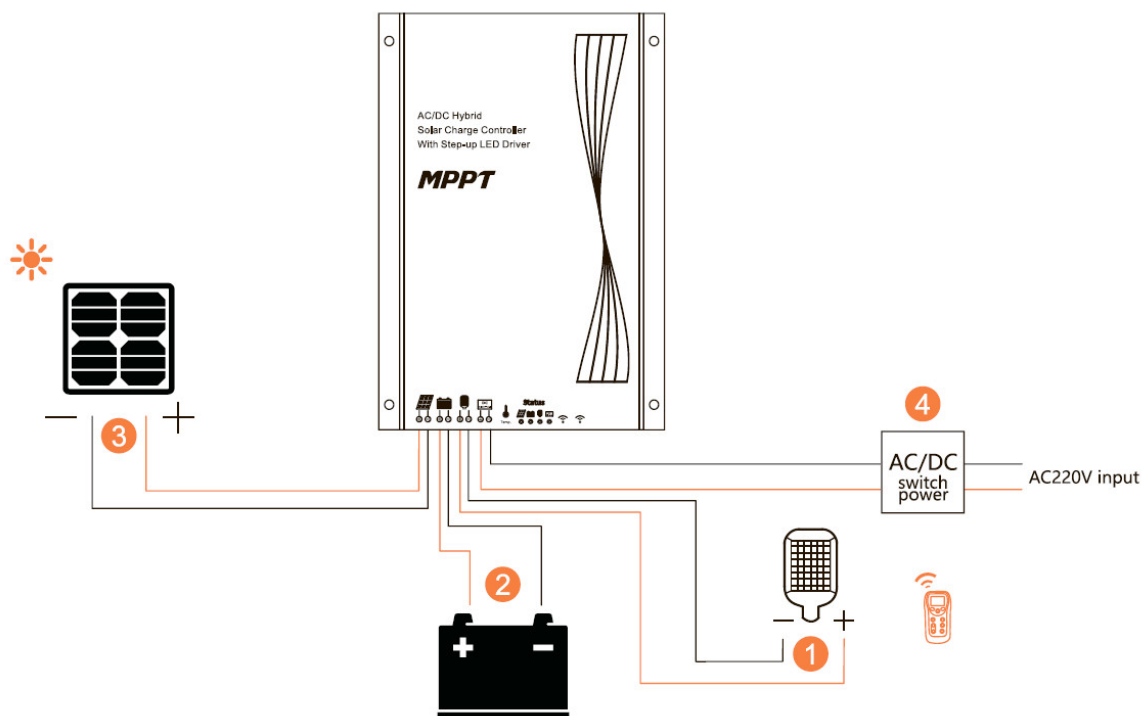


Рисунок 3.5 – Комутаційно-функціональна схема сполучення елементів гібридного освітлювального комплексу з можливістю резервування від мережі

Впровадження таких комплексних рішень на основі відновлюваних джерел енергії та цифрових протоколів автоматизації є найбільш перспективним та економічно обґрунтованим вектором розвитку сучасної муніципальної світлотехніки.

3.2 Пріоритетні напрями застосування

Глибокий аналіз успішних світових кейсів розгортання гібридних вітросонячних систем (зокрема, досвід провідних індустріальних інтеграторів) дає змогу чітко окреслити найбільш перспективні сфери застосування розробленого комплексу. Фундаментальною конкурентною перевагою спроєктованої моделі є її абсолютна енергетична незалежність та здатність до безперебійного функціонування в кліматичних умовах із вираженою зимовою депресією інсоляції, але стабільним помірним вітровим потенціалом (що є географічною особливістю переважної частини території України).

Пріоритетні та економічно обґрунтовані вектори застосування системи:

1. Транспортні магістралі та розв'язки – відкритий ландшафт навколо міжміських трас створює ідеальні аеродинамічні умови для стабільної роботи вітрових турбін. Відмова від традиційного прокладання високовольтних кабельних трас та монтажу трансформаторних підстанцій уздовж дороги дозволяє інвесторам скоротити до 40 % стартових капіталовкладень на етапі будівництва.

2. Прибережні рекреаційні зони та мостові переходи – у локаціях поблизу великих водойм спостерігається безперервна циркуляція повітряних мас. Це оптимальне середовище для гібридної архітектури, де турбіна здатна генерувати до 60–70 % загального обсягу електроенергії, значно розвантажуючи акумуляторний блок.

3. Паркові ансамблі та громадські простори – інсталяція автономних стовпів освітлення не потребує масштабних земляних робіт, що є критично важливим для збереження наявного ландшафтного дизайну та захисту кореневих систем багаторічних насаджень. Окрім того, урбаністичний футуристичний дизайн вертикально-осьових турбін (VAWT) підвищує загальну архітектурну та естетичну цінність міського парку.

4. Об'єкти критичної інфраструктури та режимні периметри – розгортання надійного охоронного освітлення на територіях, де підключення

до магістральних електромереж є технічно неможливим, економічно недоцільним або несе високі ризики диверсійного знеструмлення.

Практична реалізація проєкту автономного освітлення (рис. 3.6 – 3.7) є складним технологічним процесом, який вимагає суворого поетапного виконання робіт з урахуванням специфіки низьковольтного обладнання постійного струму (DC).

Етап 1: Геодезичні вишукування та облаштування фундаменту.

Оскільки несуча опора зазнає значних додаткових динамічних і статичних навантажень від вітрогенератора та сонячної панелі, застосування стандартних методів фіксації є неприпустимим. Для забезпечення стійкості необхідно заливати масивний залізобетонний фундамент із попередньо встановленою анкерною групою. Глибина закладання має перевищувати точку сезонного промерзання ґрунту (зазвичай не менше 1,0–1,2 м). Анкерна група суворо позиціонується таким чином, щоб після монтажу опори площа сонячної панелі була чітко орієнтована на географічний південь (азимут 180°).

Етап 2: Механічний монтаж та внутрішня комутація.

Комплексне збирання опори в горизонтальному положенні здійснюється за такою технологічною картою:

- монтаж кронштейнів – на верхньому фланці опори закріплюється несуча трубостійка турбіни та поворотний вузол для PV-модуля. Для максимізації зимової генерації кут нахилу панелі жорстко фіксується в діапазоні 45–60°;
- інсталяція ВЕУ – на найвищій точці монтується статор генератора турбіни. Балансування та фіксація лопатей ротора виконуються виключно після надійного закріплення основного блоку;
- монтаж освітлювального блоку – LED-прожектор встановлюється на виносному кронштейні на висоті 6–8 метрів, обов’язково нижче площини обертання лопатей. Це конструктивне правило унеможливорює виникнення негативного стробоскопічного ефекту від тіней лопатей, що миготять, на дорожньому покритті;

- кабельний менеджмент – прокладання силових і телеметричних ліній здійснюється виключно у внутрішній порожнині опори з використанням захисних гофротруб.

Етап 3: Алгоритм пусконаладжувальних робіт.

Фундаментально важливою вимогою є суворе дотримання апаратної послідовності підключення модулів до гібридного контролера для уникнення його термічного пробою.

- першим до контролера підключається акумуляторний блок (LiFePO₄). Пристрій повинен ініціалізуватися та автоматично визначити базову напругу системи;

- другим кроком комутується навантаження (світлодіодний модуль та датчики). На цьому етапі також здійснюється програмування DALI-драйвера;

- третім підключається фотоелектричний модуль (який на момент підключення має бути закритий щільним непрозорим чохлом для відсутності генерації);

- останнім до клем підключається вітрогенератор (обов'язково за умови механічно загальмованого ротора турбіни).

Спроектована установка є самодостатнім інтелектуальним енергетичним хабом (рис. 3.6). На спеціалізованій оцинкованій щоглі висотою 8 метрів компактно змонтовано:

- турбіну мікрогенератора, що генерує енергію за умов низьких стартових швидкостей вітру;

- високоефективний монокристалічний фотомодуль (площею близько 1 м²), просторово зорієнтований на південь;

- посилений антивандальний ревізійний бокс (кліматичного виконання не нижче IP65), у якому розміщено гібридний контролер та літєву буферну батарею;

- на окремій консолі – енергоефективний LED-прожектор, роботу якого модулюють мікрохвильові датчики присутності.

Запропонована комплексна архітектура (рис. 3.7) гарантує безкомпромісне дотримання вимог державних будівельних норм (зокрема ДБН В.2.5-28:2018 [2]) щодо нормованої яскравості та рівномірності освітлення дорожнього полотна за умови абсолютно нульових витрат на експлуатацію муніципальних електромереж.



Рисунок 3.6 – Просторове компонування та структура елементів гібридного вуличного ліхтаря



Рисунок 3.7 – Інтеграція додаткових телеметричних функцій та периферійних IoT-компонентів в архітектуру автономної опори

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Нормативно-правове та організаційне забезпечення охорони праці

Охорона праці становить собою комплексну систему правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, які спрямовані на збереження життя, здоров'я і працездатності людини безпосередньо у процесі її трудової діяльності. У контексті сучасного інфраструктурного будівництва вона передбачає неухильне дотримання регламентів техніки безпеки, суворих норм пожежної охорони, правил експлуатації спеціалізованого висотного обладнання та електроустановок, а також формування ергономічних і безпечних умов праці.

Системний підхід до організації охорони праці охоплює три фундаментальні складові:

1. Нормативно-правовий аспект – включає законодавчі акти, державні стандарти (ДСТУ) та соціально-економічні гарантії, передбачені Кодексом законів про працю та чинною системою охорони праці, яка наразі активно гармонізується з нормами та директивами Європейського агентства з безпеки та здоров'я на роботі (EU-OSHA).

2. Санітарно-гігієнічний аспект – охоплює комплекс організаційних, медичних та профілактичних заходів, спрямованих на моніторинг шкідливих виробничих факторів та параметрів навколишнього середовища з метою створення мікроклімату, що відповідає актуальним санітарно-гігієнічним нормам.

3. Інженерно-технічний аспект: являє собою сукупність технічних рішень та апаратних засобів, покликаних механізувати та автоматизувати небезпечні процеси, усунути вплив шкідливих факторів та забезпечити фізичну безпеку персоналу під час монтажу й обслуговування обладнання.

Базовим нормативно-правовим документом у цій сфері виступає Закон України «Про охорону праці» [16]. Він визначає фундаментальні правові

засади реалізації конституційного права громадян на належні, безпечні та здорові умови праці. Цей закон суворо регламентує взаємовідносини між найманими працівниками та роботодавцями (або їхніми уповноваженими представниками) за обов'язкової участі органів державного нагляду. Він встановлює єдиний порядок організації охорони праці та гігієни виробничого середовища на території держави.

Державна політика в галузі охорони праці ґрунтується на Конституції України [17] та має на меті повну пріоритетність життя і здоров'я працівників над результатами виробничої діяльності підприємства. Її головним завданням є превентивне запобігання нещасним випадкам, виробничим аваріям та професійним захворюванням. Відповідно, безпека праці розглядається як неперервний процес впровадження законодавчих і практичних механізмів, що гарантують комфортні та безпечні умови на робочому місці.

Критично важливим і невід'ємним елементом загальної безпеки виступає пожежна безпека, яка є складовою національної стратегії захисту населення і територій. Відповідно до Кодексу цивільного захисту України [18], забезпечення пожежної безпеки є обов'язком керівників усіх підприємств, установ та організацій незалежно від форм власності, а також персональною відповідальністю кожного громадянина.

Оскільки предметом даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка, проектування та практична реалізація гібридної системи вуличного освітлення, у наступних підрозділах цього розділу головний акцент буде зроблено на специфічних питаннях безпеки під час інсталяції та експлуатації такого обладнання.

4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів під час монтажу та експлуатації системи

Експлуатаційна надійність та загальна тривалість безпечного функціонування сучасних освітлювальних систем детермінуються

комплексом факторів, які класифікуються за чотирма базовими категоріями: виробничі, монтажні, експлуатаційні та проектно-конструктивні [19].

Процес імплементації гібридної системи освітлення є складним інженерно-технічним завданням, що значно виходить за межі стандартного розведення електропроводки. Роботи з монтажу, пусконаладження та подальшого технічного обслуговування комплексів, що використовують відновлювані джерела енергії, включають такі критичні етапи:

- монтаж висотних опор освітлення та несучих щогл для вітрогенераторів із залученням спецтехніки;
- висотне (верхолазне) встановлення та просторове юстирування важких фотоелектричних модулів і роторів вітрових турбін;
- комутація високоємних систем накопичення енергії (зокрема літій-залізо-фосфатних акумуляторних батарей – LiFePO_4);
- прокладання кабельно-провідникових трас та електромонтажні роботи у специфічних умовах низьковольтних мереж постійного струму (DC);
- виконання робіт на відкритому просторі під впливом нестабільних метеорологічних умов.

Виробниче середовище на таких об'єктах становить собою складну суперпозицію технічних, технологічних та організаційних чинників. Ця взаємодія безпосередньо впливає на рівень енерговитрат організму, психофізіологічний стан персоналу, загальний рівень професійного здоров'я та ефективність виконання робочих завдань. Згідно з чинною класифікацією [20], серед шкідливих факторів виробничого середовища виокремлюють фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні.

Під час розгортання гібридного освітлення домінуючими за ступенем ризику є впливи фізичного та психофізіологічного характеру, до яких додаються специфічні загрози від новітнього обладнання:

1. Фізичні небезпечні фактори:

- мікрокліматичні та погодні умови – робота просто неба зумовлює вплив екстремальних температурних коливань, підвищеної вологості, поривів вітру та атмосферних опадів;
- електробезпека в мережах постійного струму – на відміну від класичних мереж змінного струму, контури сонячних панелей та акумуляторів генерують постійний струм. Він характеризується відсутністю «переходу через нуль», що створює екстремально високий ризик виникнення стійкої електричної дуги під час розриву ланцюга під навантаженням;
- віброакустичний вплив – пусконаладжувальні роботи поблизу вітрогенератора можуть супроводжуватися впливом аеродинамічного шуму та механічних вібрацій від обертання турбіни;
- фотобіологічна небезпека – тестування сучасних потужних LED-матриць без спеціальних засобів захисту зору несе ризик пошкодження сітківки інтенсивним короткохвильовим випромінюванням, що регламентується стандартами фотобіологічної безпеки.

2. Хімічні фактори:

- хоча сучасні літій-залізо-фосфатні акумулятори є значно безпечнішими за інші літійові аналоги, залишається ризик термічного розгону у випадку глибокого механічного пошкодження або жорсткого короткого замикання. Розгерметизація таких комірок призводить до викиду високотоксичних газів (зокрема парів електроліту та сполук фтору), що вимагає використання специфічних засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) дихальних шляхів.

3. Психофізіологічні фактори:

- монтаж масивних вітрогенераторів та сонячних панелей на висоті понад 5–8 метрів класифікується як роботи з підвищеною небезпекою. Це генерує високий рівень емоційно-нервового напруження, статичну втому м'язів, а також створює значне навантаження на зоровий і вестибулярний апарати працівника.

4.3 Організаційно-технічні заходи безпеки

Сучасні системи вуличного освітлення, особливо ті, що інтегрують відновлювані джерела енергії, повинні постійно підтримуватися в належному технічному стані. Це є базовою гарантією створення безпечних і комфортних умов праці для експлуатаційного персоналу. У будь-якій електроустановці, а особливо в комбінованих мережах, має бути реалізований вичерпний комплекс захисних заходів. Їхня головна мета – абсолютне запобігання аварійним ситуаціям, виробничому травматизму та летальним наслідкам ураження електричним струмом.

Забезпечення електробезпеки є фундаментальним аспектом системи охорони праці. Базовим нормативно-правовим актом, що суворо регламентує порядок безпечного виконання робіт, є НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (ПБЕЕС) [21], а також галузеві інструкції щодо роботи з обладнанням відновлюваної енергетики.

До обов'язкових організаційних заходів, що формують безпечне середовище для виконання електромонтажних та експлуатаційних робіт, належать:

- офіційне призначення осіб, відповідальних за безпечну організацію та безпосереднє керівництво роботами;
- оформлення наряду-допуску, розпорядження або затвердження переліку робіт, що виконуються в порядку поточної експлуатації;
- проведення цільових інструктажів з охорони праці на робочому місці;
- перевірка кваліфікаційних груп з електробезпеки та допуск бригади до роботи;
- безперервний нагляд за діями членів бригади під час виконання завдань;
- регламентація графіка робіт, оформлення перерв, переведення на інші робочі місця та офіційне закінчення робіт.

Під час безпосередньої підготовки робочого місця для монтажу або технічного обслуговування гібридної опори освітлення бригада зобов'язана виконати такий комплекс технічних заходів безпеки:

- провести необхідні відключення струмопровідних частин та вжити заходів, що унеможливляють помилкову або самовільну подачу напруги;
- на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційною апаратурою вивісити заборонні плакати («Не вмикати! Працюють люди»);
- перевірити відсутність напруги на всіх струмопровідних ділянках (як фазних, так і полюсних), де планується виконання робіт;
- накласти переносні захисні заземлення та вивісити вказівний плакат «Заземлено»;
- огородити робочу зону (особливо при роботі автовишки на проїжджій частині) та встановити попереджувальні знаки.

У низьковольтних електроустановках (до 1000 В) перевірка відсутності напруги виконується виключно справним і повіреним двополюсним показчиком напруги. У випадку падіння приладу або підозри на його пошкодження перевірку слід негайно припинити, замінити прилад і повторити процедуру. Заземлення струмопровідних частин дозволяється здійснювати лише після стовідсоткового підтвердження відсутності на них небезпечного потенціалу.

Монтаж комплексів на базі сонячної та вітрової генерації має критичні відмінності від класичних мереж:

1. Небезпека мереж постійного струму (DC) – фотоелектричні модулі генерують небезпечну напругу безперервно, поки на них потрапляє світло. Відключення контролера не знімає напругу з клем самої панелі. Крім того, розрив DC-контурів під навантаженням провокує виникнення потужної електричної дуги. Тому перед комутацією панелей їх необхідно фізично закривати щільним світлонепроникним матеріалом.

2. Безпека при роботі з вітрогенераторами – перед будь-якими маніпуляціями з електричною частиною ВЕУ ротор турбіни має бути примусово зупинений та надійно зафіксований, щоб унеможливити його випадковий розгін.

3. Експлуатація літєвих батарей – дані акумулятори здатні видавати колосальні струми короткого замикання, що миттєво плавить металеві інструменти та спричиняє опіки. Будь-які роботи в акумуляторному боксі виконуються виключно ізольованим інструментом (діелектричним, класу 0).

4. Висотні роботи – встановлення ВЕУ та сонячних панелей на висоті 6–8 метрів класифікується як роботи з підвищеною небезпекою. Персонал зобов'язаний використовувати сертифіковані пояси запобіжні лямкові (ПЗЛ) із стропами, що мають амортизатори ривка, та захисні каски з підборідним ремінцем.

Перед безпосереднім початком монтажу персонал зобов'язаний одягнути спецодяг, спецвзуття (діелектричні боти) та застосувати відповідні засоби індивідуального захисту (ЗІЗ), такі як діелектричні рукавички, захисні окуляри або щитки (для захисту від дуги). Робоче місце має бути очищене від сторонніх предметів та мати належний рівень освітленості.

4.4 Забезпечення електробезпеки

Електробезпека становить собою фундаментальну складову комплексної системи охорони праці, яка спрямована на захист персоналу від деструктивного впливу електричної енергії. Вона забезпечується суворо регламентованою сукупністю організаційних і технічних заходів, а також застосуванням сертифікованих засобів, призначених для захисту працівників від прямого ураження електричним струмом, впливу електричної дуги, електромагнітного полів та електростатичних розрядів.

Усі превентивні та захисні заходи мають неухильно відповідати чинним нормативно-правовим актам, міжнародним стандартам та технічним регламентам безпеки. З огляду на специфіку сучасних комплексів зовнішнього

освітлення, які поєднують низьковольтні кола управління та потужні контури генерації постійного струму від фотомодулів і акумуляторів, система електробезпеки вимагає особливої уваги. Вона повинна гарантувати такий рівень ізоляції та захисту, який повністю унеможливило проходження через тіло людини струмів, що перевищують фізіологічно допустимі межі.

Негативний вплив електричного струму на біологічні тканини є комплексним і може проявлятися у формі електротравм (опіків, металізації шкіри, електроофтальмії), електричних ударів, а також специфічних професійних захворювань.

Тяжкість ураження та сила впливу електричного струму на організм людини не є статичною величиною і залежить від низки критичних факторів:

- роду і виду струму (постійний чи змінний), його номінальних характеристик (сила струму та напруга дотику);
- частоти коливань (для змінного струму);
- вектора (шляху) протікання струму крізь тіло (найнебезпечнішими є шляхи, що проходять через серце, легені та головний мозок, наприклад «рука – рука» або «рука – нога»);
- тривалості контакту зі струмопровідними частинами;
- індивідуального електричного опору тіла людини, який динамічно змінюється залежно від умов навколишнього середовища (вологості, запиленості), стану шкірного покриву та психоемоційного напруження працівника.

З фізіологічної точки зору, електричний струм здатний уражати тканини організму двома шляхами. Перший – пряма (безпосередня) дія: термічний, електролітичний та біологічний вплив безпосередньо на шляху протікання заряду. Другий – опосередкована (рефлекторна) дія: порушення нормального функціонування центральної нервової системи, що може призвести до збоїв у роботі серцево-судинної та дихальної систем навіть за умови, що струм не проходив через ці органи напряду.

Кількісні та якісні показники впливу змінного та постійного струмів різної величини наведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Фізіологічний вплив та вражаюча дія електричного струму на організм людини

Ступінь впливу	Сила струму, мА	Вражаюча дія електричного струму	
		Змінний струм із частотою 50-60 Гц	Постійний струм
Відчутний струм	2-3	Сильне тремтіння пальців рук	Практично не відчувається
	5-10	Судоми м'язів	Свербіж, відчуття нагрівання, легке посмикування
	12-15	Інтенсивний біль у руках, руки важко відірвати від струмопровідних частин. Стан терпимий 5–10 с	Посилення відчуття теплового впливу
Невідпускний струм	20-50	Руки паралізуються, самостійно відірвати їх від струмопровідних частин неможливо. Дихання значно ускладнене. Стан терпимий не більше 5 с	Відчутний нагрів. Присутнє значне мимовільне скорочення м'язів рук
Фібриляційний (смертельний) струм	50-80	Параліч дихальних м'язів	Значний нагрів. Сильне скорочення м'язів рук. Судоми. Дихання вкрай ускладнене
	90-110	Параліч дихання. При контакті понад 3 с – фібриляція та параліч серця	Параліч дихання
	300 та вище	Миттєвий параліч дихання та серця (при контакті понад 1 с)	Миттєвий параліч дихання та серця (при контакті понад 1 с)

4.5 Забезпечення пожежної безпеки

Згідно з офіційною статистикою Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС) [22], понад чверть усіх пожеж щорічно

виникає внаслідок порушення правил облаштування та експлуатації електрообладнання. Домінуючою причиною (понад 50 % від усіх випадків загорянь в електроустановках) залишається неправильний монтаж та експлуатація кабельно-провідникової продукції (використання скруток, перевантаження ліній, пошкодження ізоляції).

Для мінімізації ризиків виникнення пожеж на етапі проєктування та монтажу гібридних систем необхідно здійснювати жорсткий інженерний контроль за двома ключовими аспектами:

1. Відповідність ступеня захисту (IP) корпусів обладнання умовам навколишнього середовища (для вуличних інсталяцій – не нижче IP65).
2. Прецизійний розрахунок перерізу провідників і правильний вибір номіналів апаратури захисту (автоматичних вимикачів, запобіжників) відповідно до максимальних струмових навантажень. Особливо критичним це є для DC-контурів між сонячними панелями, контролером та акумулятором, де струми можуть сягати десятків ампер.

Ігнорування експлуатаційних вимог до освітлювального обладнання є прямим шляхом до його термічного перегріву та подальшого займання. Головними каталізаторами пожежонебезпечних ситуацій виступають:

- тепловий або електричний пробій ізоляції провідників;
- високий перехідний опір у місцях неякісних контактних з'єднань (ослаблення гвинтових клем, відсутність опресування багатодротових жил наконечниками);
- іскріння та дугові розряди між струмопровідними елементами через окислення контактних груп;
- грубе порушення температурного режиму роботи обладнання через недостатнє тепловідведення від радіаторів світлодіодних матриць або контролерів.

Сучасні світлодіодні (LED) модулі та гібридні контролери підлягають обов'язковій сертифікації на відповідність жорстким вимогам пожежної та електротехнічної безпеки як у штатному (робочому) режимі, так і в режимах

ймовірних апаратних відмов. Базові протипожежні вимоги до компонентів системи:

- зовнішній корпус приладу та його внутрішні радіатори не повинні нагріватися до температур, що перевищують температуру спалаху суміжних матеріалів або пилових відкладень;
- в електричних колах (особливо на виході з акумуляторної батареї) повинні бути інтегровані швидкодіючі плавкі запобіжники або DC-автомати для гарантованого відсікання струмів короткого замикання;
- кабелі, що прокладаються в зонах потенційного нагріву (поблизу радіаторів світильника або баластного опору вітрогенератора), повинні мати спеціальне термостійке покриття (наприклад, із силіконової гуми або зшитого поліетилену XLPE), що не підтримує горіння (маркування "нг", "нг-LS");
- драйвери живлення світильників мають бути оснащені інтегрованим електронним термозахистом, який автоматично знижує вихідний струм (димуює світлодіод) у разі критичного перегріву матриці;
- усі електричні з'єднання всередині опор та комутаційних боксів повинні виконуватися виключно за допомогою сертифікованих клемних колодок або методом надійного опресування.

Варто відзначити, що з точки зору пожежної безпеки світлодіодні освітлювальні прилади є значно безпечнішими за традиційні газорозрядні або люмінесцентні аналоги, оскільки вони не генерують екстремальних температур і не містять пожежонебезпечних пускорегулювальних апаратів.

Особа, яка наказом по підприємству (організації) призначена відповідальною за пожежну безпеку, зобов'язана організувати та контролювати [19]:

- проведення регулярних технічних оглядів та планово-попереджувальних ремонтів (ППР) електрообладнання, щитів керування та акумуляторних боксів;
- підтримання електроустановок у стані, що гарантує їхню безпечну та надійну експлуатацію;

- своєчасну перевірку та технічне обслуговування первинних засобів пожежогасіння (для гасіння електроустановок під напругою допускається застосування виключно вуглекислотних або спеціальних порошкових вогнегасників);
- ведення нормативної документації (журналів інструктажів), організацію протипожежних тренувань і перевірку знань персоналу з питань пожежної безпеки;
- постійну готовність до використання пожежного інвентарю.

Усі матеріали, комплектувальні вироби, інструменти та засоби індивідуального захисту, що застосовуються під час монтажу й обслуговування гібридних систем, повинні мати відповідні сертифікати якості та бути технічно справними.

Організаційно-технічні заходи з пожежної безпеки мають формувати комплексну систему, яка охоплює не лише апаратний захист інфраструктури, а й високий рівень кваліфікації та обізнаності персоналу. Тільки такий синергетичний підхід дозволяє звести до мінімуму ризики виникнення пожеж на об'єктах енергетики та міського благоустрою.

4.6 Висновки до розділу

У даному розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи було проведено комплексний аудит умов праці під час монтажу та експлуатації гібридної системи вуличного освітлення та розроблено систему заходів, спрямованих на забезпечення безпеки персоналу.

У межах проведеної роботи було:

- визначено основні потенційні загрози для здоров'я та безпеки працівників;
- надано практичні рекомендації для мінімізації виробничих ризиків;
- розглянуто питання електробезпеки;

- проаналізовано систему пожежної безпеки та заходи реагування на нештатні або аварійні ситуації.

Також увагу приділено створенню ефективної системи попередження виробничого травматизму, організації безпечного виконання висотних робіт, захисту інтелектуальних складових системи, а також алгоритмам дій персоналу після кризових подій.

Усі запропоновані заходи мають на меті формування безпечного та надійного робочого середовища, яке дозволяє своєчасно виявляти загрози, ефективно на них реагувати та мінімізувати потенційні наслідки для здоров'я, життя та працездатності працівників.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній бакалаврській роботі вирішено важливе науково-практичне завдання, яке полягає у розробці та техніко-економічному обґрунтуванні автономної гібридної системи зовнішнього освітлення. В умовах сучасних енергетичних викликів та курсу на декарбонізацію міської інфраструктури, перехід до енергонезалежних смарт-рішень є критично необхідним. За результатами проведеної роботи сформульовано такі висновки:

1. Підтверджено синергетичну ефективність гібридної генерації. На основі комплексного кліматичного аналізу доведено високу ефективність поєднання фотоелектричної та вітрової генерації.

2. Обґрунтовано перехід до концепції інтелектуального міського освітлення. Впровадження принципів «Light. Design. IoT.» та людино-орієнтованого освітлення визначено як безальтернативний галузевий стандарт.

3. Розроблено методологію параметричного та енергетичного розрахунку. Створена модель дозволила обґрунтувати вибір ключових компонентів системи. Розрахунки довели необхідність застосування високочастотних гібридних MPPT-контролерів із виділеним каналом для баластного гальмування турбіни. Техніко-економічно обґрунтовано перехід на літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4) системи накопичення енергії.

4. Визначено пріоритетні сфери просторового застосування.

5. Сформовано систему заходів з охорони праці та пожежної безпеки. Запропонований комплекс організаційно-технічних заходів повністю відповідає чинному законодавству та гарантує безпеку експлуатаційного персоналу на всіх етапах життєвого циклу інфраструктури.

Спроектована гібридна система вуличного освітлення є технологічно довершеним, екологічно нейтральним та економічно обґрунтованим рішенням. Її практичне впровадження сприятиме підвищенню енергетичної стійкості територіальних громад та розбудові сучасної інтелектуальної інфраструктури міст.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Al-Aani A. [та ін.]. Design and Implementation of an Off-Grid Smart Street Lighting System Using LoRaWAN and Hybrid Renewable Energy for Energy-Efficient Urban Infrastructure. *Sensors*. 2025. Vol. 25, № 17. P. 5579. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/17/5579>.
2. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. Будстандарт. Сервіс документів. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885 (дата звернення: 12.05.2026).
3. Dynamic Light. Handbook about interpretation of EN 13201. URL: <https://programme2014-20.interreg-central.eu/Content.Node/Dynamic-Light/04-DL-Handbook-about-interpretation-of-EN-13201.pdf> (date of access: 12.05.2026).
4. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року. Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text> (дата звернення: 13.05.2026).
5. Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та зеленої трансформації енергетичної системи України: Закон України від 30.06.2023 р. № 3220-IX. Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-20> (дата звернення: 13.05.2026).
6. Офіційний сайт Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України. URL: <https://saee.gov.ua/> (дата звернення: 14.05.2026).
7. Паризька угода. Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_161#Text (дата звернення: 15.05.2026).
8. IEA. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/> (date of access: 15.05.2026).
9. Офіційний сайт Інституту відновлювальної енергетики НАН України. URL: <https://www.ive.org.ua/language/uk/> (дата звернення: 15.05.2026).

10. Стратегія розвитку Харківської області на 2021-2027 роки. URL: <https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1026/102538/files/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D1%96%D1%8F.pdf> (дата звернення: 15.05.2026).
11. Asfour, Ahmed & Nassar, Yasser & Shaheen, Saleh & El-Zaety, Mahmoud & El-Khozondar, Rifa & Khaleel, Mohamed & Ali Ahmed, Abdussalam & Alsharif, Abdulgader & El-Khozondar, H. & Asfour, A & Nassar, Yasser & Shaheen, S & El-Zaety, M & El-Khozondra, Rifa & Khaleel, M & Hafez, Ahmed & Alsharif, A. (2024). Photovoltaic Solar Energy for Street Lighting: A Case Study at Kuwaiti Roundabout, Gaza Strip, Palestine. Power Engineering and Engineering Thermophysics. 3. 77–91. 10.56578/peet030201.
12. Simanjuntak, Imelda & Heryanto, & Dani, Akhmad & Salamah, Ketty & Silalahi, Lukman & Marsuki. (2024). Analysis of solar power public street lighting optimization with Pvsyst software in a residential complex area. International Journal of Electronics and Telecommunications. vol. 70. 743-749. 10.24425/ijet.2024.149604.
13. Mouaadh, Yaichi & Bouchiba, Bousmaha & M'Hamed, Rebhi. (2024). IoT-Based Smart Street Lighting System and Enhanced Energy Saving Using ESP-NOW Protocol. Light & Engineering. 32. 76-84. 10.33383/2024-044.
14. Said. Diaf, Djamila Diaf, Mayouf Belhamel, Mourad Haddadi, Alain Louche. A methodology for optimalsizing of autonomous hybrid PV/wind system. Energy Policy, 2007, 35, pp. 5708-5718.
15. DIALux lighting design software. URL: <https://www.dialux.com/en-GB/download> (date of access: 30.05.2026).
16. Закон України «Про охорону праці». Рада. Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> (дата звернення: 06.06.2026).
17. Конституція України : Закон України від 28.06.1996 № 254к/96-ВР. Редакція від 01.01.2020. URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80>

(дата звернення: 06.06.2026).

18. Кодекс цивільного захисту України. Рада. Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> (дата звернення: 07.06.2026).
19. Я. О. Серіков, І. В. Білецький, Д. М. Калюжний «Охорона праці в галузі електроенергетики» (специфічні питання охорони праці в електроенергетичних установках). – Харків, ХНУРЕ, 2021. 247 с.
20. Наказ МОЗ України № 248 від 08.04.2014 «Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища». Рада. Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#Text> (дата звернення: 10.06.2026).
21. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів: НПАОП 40.1-1.21-98. Затв. Наказом Держнаглядохоронпраці від 09.01.1998 р. № 4. *Верховна Рада України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98> (дата звернення: 11.06.2026).
22. Офіційний вебсайт. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. URL: <https://dsns.gov.ua/> (дата звернення: 11.06.2026).
23. Правила пожежної безпеки в Україні : Затверджено Наказом Міністерства внутрішніх справ України від 30.12.2014 № 1417. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 05.03.2015 за № 252/26697. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15> (дата звернення: 12.06.2026).
24. Наукова концепція законодавчого стимулювання розвитку малої генерації з відновлюваних джерел енергії в Україні у повоєнний період – Дослідницька служба Верховної Ради України. URL: <https://research.rada.gov.ua/uploads/documents/33289.pdf> (дата звернення: 14.06.2026).

25. Шавьолкін О. О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: навч. посібник / О. О. Шавьолкін; Харків, над. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. 403 с.
26. Потенціал розвитку нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії України / С.О. Кудря // Навчальний модуль 23. – 2015. – Київ. – Інститут відновлюваної енергетики НАН України. – 48 с.
27. Дячук О. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року / О. Дячук, М. Чепелев, Р. Подолець та ін. // К: Вид-во ТОВ «АРТ КНИГА», 2017. – 88 с.
28. Human-Centric Lighting Design: Considering Health and Wellbeing. URL: <https://www.kaarwan.com/blog/architecture/human-centric-lighting-design-considering-health-and-wellbeing?id=942> (date of access: 15.06.2026).
29. Назаренко Л. А. Штучне зовнішнє освітлення: навч. посібник / Л. А. Назаренко, К. І. Іоффе; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 88 с.
30. К. І. Іоффе, О. Л. Черкашина. Конспект лекцій з дисципліни «Системи керування світлотехнічними пристроями». Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. 2018. 56 с.