

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему: «АВТОНОМНІ ОСВІТЛЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ НА
ОСНОВІ ІОТ ДЛЯ ПАРКІВ З АЛЬТЕРНАТИВНИМИ
ДЖЕРЕЛАМИ ЖИВЛЕННЯ»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 123 Комп'ютерної інженерії
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Комп'ютерні системи та мережі
(назва)

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело*

(підпис)

Максим КОЗЛОВСЬКИЙ
Ім'я, ПРИЗВИЩЕ здобувача

Виконав:	здобувач(ка) вищої освіти гр. <u>КСДМ-62</u> <u>Максим КОЗЛОВСЬКИЙ</u> Ім'я, ПРИЗВИЩЕ
Керівник: науковий ступінь, вчене звання	<u>Людмила АСЄЄВА</u> Ім'я, ПРИЗВИЩЕ
Рецензент: науковий ступінь, вчене звання	_____ Ім'я, ПРИЗВИЩЕ

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра Комп'ютерної інженерії

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Освітньо-професійна програма Комп'ютерні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Наталія ЛАЩЕВСЬКА

_____ Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
«_____» _____ 2024р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Козловський Максим Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автономні освітлювальні системи на основі IoT для парків з альтернативними джерелами живлення»

Людмила АСЕСВА, PhD (доктор філософії), доцент

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «15» жовтня 2024р. №320,

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «29» грудня 2024р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: Науково-технічна література, норми і правила систем громадського освітлення, робочі параметри пристроїв і протоколів IoT, принципи систем відновлюваної енергії, вимоги до взаємодії з користувачем і моніторингу системи, критерії оптимізації та масштабованості.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Огляд технологій автономних освітлювальних систем

2. Проектування автономної освітлювальної системи на основі IoT

3. Розробка та застосування автономної освітлювальної системи

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація

1. Мета, об'єкт, предмет дослідження

2. Актуальність роботи

3. Потреба у впровадженні автономних освітлювальних систем з інтеграцією IoT-технологій

4. Компоненти запропонованої автономної освітлювальної системи

5. Архітектура автономної освітлювальної системи з елементами IoT

6. Алгоритми резервування в автономній системі

7. Алгоритми управління в автономній системі

8. Алгоритм передачі даних в автономній системі

9. Методи енергозбереження та оптимізації споживання енергії

10. Порівняння запропонованого рішення з існуючими системами

11. Орієнтовний кошторис запропонованого рішення
 12. Висновки
 13. Продовження висновків
 14. Публікації та апробація роботи
6. Дата видачі завдання «01» вересня 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір даних	10.10-12.10.2024	
2	Обробка матеріалу	12.10-15.10.2024	
3	Розробка теоретичної частини	15.10-18.10.2024	
4	Проектування автономної освітлювальної системи на основі IoT	18.10-22.10.2024	
5	Розробка та впровадження автономної освітлювальної системи	22.10-26.11.2024	
6	Висновки за результатами аналізу	29.11-30.11.2024	
7	Розробка презентації	30.11-08.12.2024	
8	Передзахист	09.12-11.12.2024	
9	Здача в деканат	20.12-29.12.2024	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Максим КОЗЛОВСЬКИЙ

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Людмила АССЕВА

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістр: 122 стор., 53 рис., 4 табл., 43 джерела.

Мета роботи – розробити ефективну автономну освітлювальну систему на основі IoT для парків, яка використовує альтернативні джерела живлення для зменшення енергоспоживання та екологічного впливу.

Об'єкт дослідження – автономні освітлювальні системи для парків.

Предмет дослідження – технічні й технологічні особливості розробки та функціонування IoT-систем освітлення з альтернативними джерелами живлення.

Короткий зміст роботи: У роботі досліджується розробка та впровадження автономних освітлювальних систем для парків і громадських просторів, що базуються на сучасних технологіях Інтернету речей (IoT). Особливу увагу приділено оптимізації енергоспоживання, використанню сенсорів для моніторингу умов навколишнього середовища та забезпеченню стабільної роботи систем за допомогою акумуляторних технологій.

Розглядаються підходи до централізованого управління освітленням на великих територіях із використанням безпроводних технологій. Досліджено можливості інтеграції алгоритмів роботи у систему для прогнозування енергоспоживання та адаптації роботи систем до зовнішніх умов, а також перспективи їх включення до розумної міської інфраструктури.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АВТОНОМНІ ОСВІТЛЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (IOT), АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ, СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ, ВІТРОГЕНЕРАТОРИ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, СВІТЛОДІОДНІ ЛАМПИ, АКУМУЛЯТОРНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СТАБІЛЬНА РОБОТА, ПЕРЕБОЇ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ДАТЧИКИ ОСВІТЛЕНOSTІ, АВТОМАТИЧНЕ УПРАВЛІННЯ ОСВІТЛЕННЯМ, БЕЗПЕКА, ЕНЕРГОРЕСУРСИ.

ABSTRACT

The text part of the qualification work for obtaining a master's degree: 122 pages, 63 figures, 4 tables, 43 sources.

The purpose of the work is to develop an efficient autonomous IoT-based lighting system for parks that uses alternative power sources to reduce energy consumption and environmental impact.

The object of the research is autonomous lighting systems for parks.

The subject of research is the technical and technological features of the development and operation of IoT lighting systems with alternative power sources.

Summary of the work: The work explores the development and implementation of autonomous lighting systems for parks and public spaces based on modern Internet of Things (IoT) technologies. Special attention is paid to optimizing energy consumption, using sensors to monitor environmental conditions, and ensuring stable operation of systems using battery technology.

Approaches to centralized control of lighting in large areas using wireless technologies are considered. The possibilities of integrating work algorithms into the system for forecasting energy consumption and adapting the systems to external conditions, as well as the prospects of their inclusion in the smart urban infrastructure, were studied.

KEY WORDS: AUTONOMOUS LIGHTING SYSTEMS, INTERNET OF THINGS (IOT), ALTERNATIVE POWER SOURCES, SOLAR PANELS, WIND GENERATORS, ENERGY EFFICIENCY, LED LAMPS, BATTERY TECHNOLOGIES, SUSTAINABLE OPERATION, POWER SUPPLY INTERRUPTIONS, LIGHTING SENSORS, AUTOMATIC LIGHTING CONTROL, SECURITY, ENERGY RESOURCES.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ АВТОНОМНИХ ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ	10
1.1 Сучасні освітлювальні системи для громадських просторів.....	10
1.2 Технології Інтернету речей (IoT) у системах управління освітленням.....	18
1.3 Використання альтернативних джерел живлення	21
1.4 Аналіз існуючих рішень в освітлювальних системах	34
РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ АВТОНОМНОЇ ОСВІТЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ІОТ	41
2.1 Ключові компоненти освітлювальної системи	41
2.2 Архітектура освітлювальної системи.....	54
2.3 Програмне забезпечення для моніторингу та управління	60
2.4 Алгоритми управління та передачі даних в автономній системі	65
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОНОМНОЇ ОСВІТЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ.....	75
3.1 Вибір компонентів для автономної системи.	75
3.2 Інтеграція з існуючою інфраструктурою.....	99
3.3 Перспективи розвитку та інноваційні технології	102
ВИСНОВКИ.....	108
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	109
Додаток А. Порівняння трьох типів безпроводних технологій (Wi-Fi, ZigBee та LoRa) за кількома ключовими характеристиками.....	113
Додаток Б. ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація).....	114

ВСТУП

Нинішнє становище в енергетичній сфері, пов'язані зі зростанням споживання електроенергії та дефіцитом її виробництва, вимагають впровадження енергоефективних рішень. Зростання навантаження на енергосистему, особливо у періоди пікового попиту, часто призводить до перевантажень і відключень, що створює значні труднощі для забезпечення освітлення громадських просторів. Це спонукає до пошуку інноваційних технологій, здатних забезпечити стабільність роботи освітлювальних систем за умов дефіциту енергії.

Ефективним шляхом вирішення цієї проблеми є впровадження сучасних технологій освітлення, таких як світлодіодні лампи, які відрізняються низьким енергоспоживанням і тривалим терміном експлуатації. У поєднанні з альтернативними джерелами енергії, такими як сонячні панелі та акумулятори, ці системи дозволяють зменшити залежність від централізованого електропостачання, забезпечуючи автономність і надійність роботи.

Системи автоматизації та Інтернету речей (IoT) відкривають нові можливості для підвищення ефективності освітлення. Інтеграція датчиків руху, освітленості та інших сенсорів дозволяє адаптувати роботу освітлювальних приладів до умов навколишнього середовища, зменшуючи споживання енергії без шкоди для якості освітлення. Використання бездротових технологій передачі даних забезпечує віддалений моніторинг і управління, що особливо актуально для великих територій.

Розробка автономних систем освітлення на основі IoT із використанням альтернативних джерел енергії є перспективним напрямом, який сприяє підвищенню енергоефективності, зменшенню впливу на довкілля та забезпеченню безпеки в громадських просторах. Це рішення є не лише актуальним, але й необхідним кроком у розвитку сучасних міст.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ АВТОНОМНИХ ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

1.1 Сучасні освітлювальні системи для громадських просторів

Зараз спостерігається масовий перехід на більш енергоефективні рішення для зниження витрат електроенергії та підвищення продуктивності. У багатьох країнах Європи, Заходу, а також Азії активно впроваджуються нові технології, які зменшують навантаження на «забрудненість» світу, що стосуються не тільки освітлювальних систем, але й загального підходу до виробництва електроенергії.

Основною тенденцією є поступовий відхід від традиційних методів виробництва енергії, які передбачають викиди в атмосферу. Натомість основна увага приділяється екологічно чистим методам виробництва енергії, таким як сонячні панелі, вітрогенератори та гідроелектростанції. Ці технології використовують природні ресурси без шкоди для екосистеми та без утворення парникових газів, які є однією з головних причин глобального потепління. Після переходу на такі екологічні джерела енергії, багато країн зменшують залежність від теплових електростанцій, які спричиняють забруднення (див. рис. 1.1) [1].

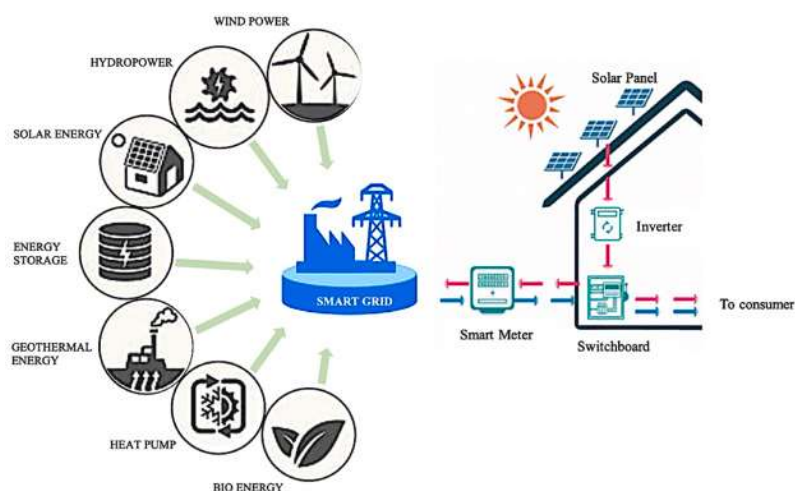


Рисунок 1.1 – Підготовка до промислової революції: Індустрія 4.0

Атомна енергетика стає важливою складовою енергетичного балансу, адже вона забезпечує велику кількість енергії без шкідливих викидів. Важливими також є цілі ферми сонячних панелей та вітрових електростанцій, які здатні генерувати електроенергію за допомогою природи, не забруднюючи повітря і не створюючи загрозу для клімату (див. рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Генерація зеленої енергетики:
Сонячні панелі та вітрогенератори

Однією з ключових складових цього переходу є впровадження міжнародних стандартів енергоефективності (див. рис. 1.3) [2].



Рисунок 1.3 – Класифікація енергоефективності обладнання:
за шкалою від A+++ до G

Система класифікує енергоефективність обладнання за категоріями:

- A+++ (дуже висока ефективність, до 30% від стандартного споживання);
- A++ (висока ефективність, 30-42% від стандартного споживання);
- A+ (помірно висока ефективність, 42-55% від стандартного споживання);
- A (стандартна ефективність, 55-75% від стандартного споживання);
- B (помірно низька ефективність, 75-90% від стандартного споживання);
- C (низька ефективність, 90-100% від стандартного споживання);
- D (дуже низька ефективність, 100-110% від стандартного споживання);
- E (високе споживання, 110-125% від стандартного);
- F (дуже високе споживання, 125-150% від стандартного);
- G (максимальне споживання, понад 150% від стандартного).

Прикладом можуть бути старі будинки або системи освітлення, де досі використовуються лампи розжарювання, які споживають багато електроенергії. Заміна таких ламп на сучасні LED-світильники могла б значно скоротити енергоспоживання. Енергоспоживання сучасних світлодіодних ламп у будинку може бути настільки низьким, що воно дорівнює лише витратам електроенергії однієї лампи розжарювання, встановленої на вуличному ліхтарі (див. рис. 1.4) [3, 4].

Незважаючи на це, наша країна ще не повністю перейшла на альтернативні джерела енергії (сонячні панелі та вітрогенератори). Атомні електростанції вже активно використовуються, тоді як теплові електростанції працюють меншими темпами через складні умови в країні. Багато факторів, що впливають на енергетичний сектор, вимагають швидкого розвитку альтернативної енергетики для забезпечення стабільного постачання електроенергії (див. рис. 1.2) [5].



Рисунок 1.4 – Різниця енергоефективності та довговічності
лампи розжарювання та світлодіодних (LED)

В умовах, коли ми бачимо будинки чи вулиці зі застарілими освітлювальними системами, необхідно терміново вживати заходів для їхньої заміни. Старі лампи розжарювання або люмінесцентні лампи споживають надто багато електроенергії, а сучасні світлодіодні (LED) рішення є значно ефективнішими – LED-лампи не лише дають більше світла, але й споживають у рази менше електроенергії, і тому вкрай важливо звертатися до відповідальних служб або власників територій, щоб замінювати застарілі системи на сучасні енергоефективні технології, що значно покращить якість життя ліхтарі (див. рис. 1.4) [3, 4].

Ситуація з освітленням змінюється: якщо раніше світлодіодні лампи були значно дорожчими за лампи розжарювання, то тепер ціна на LED-лампи стала доступною, а традиційні лампи розжарювання навпаки подорожчали, що свідчить про те, що суспільство вже починає усвідомлювати необхідність переходу на енергоефективні технології, які є вигіднішими як з економічної, так і з екологічної точки зору. Використання LED-технологій в освітленні не лише робить наше середовище сучаснішим, але й значно зменшує витрати електроенергії – дане питання зараз є надзвичайно актуальним, і ми повинні активно працювати над тим, щоб усі аспекти нашого життя ставали більш енергоефективними та комфортними.

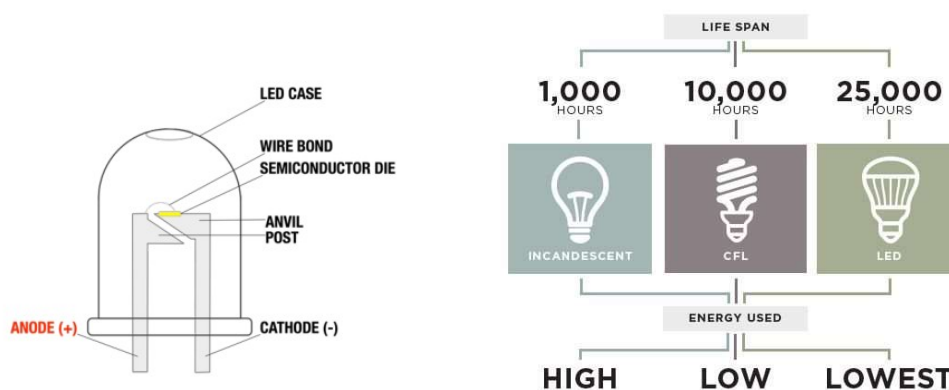


Рисунок 1.5 – Будова світлодіода та різниця у довговічності

Технологія освітлення на основі світлодіодів (LED) є не тільки енергоефективною, але й надзвичайно довговічною. Світлодіодні лампи мають значно більший ресурс у порівнянні з традиційними лампами розжарювання чи люмінесцентними. Наприклад, середній термін служби LED-лампи становить від 20 000 до 30 000 годин, тоді як лампи розжарювання служать лише близько 1 000 годин, а на практиці цей показник може бути навіть меншим, часто не перевищуючи 100 годин. Хоча для вуличного освітлення лампи розжарювання зазвичай не використовуються, їх замінюють люмінесцентними лампами, які мають дещо кращі показники енергоефективності (див. рис. 1.5) [3, 4].

Ресурс люмінесцентних ламп коливається від 6 000 до 20 000 годин, що перевищує термін служби ламп розжарювання, однак за показниками енергоефективності вони значно поступаються світлодіодним лампам. LED-технології є більш економічними та ефективними, що робить їх переважним вибором для освітлення в сучасних умовах (див. рис. 1.5) [3, 4].

У багатьох сучасних містах, особливо в центральних районах, вже використовують LED-освітлення для зменшення споживання електроенергії та збільшення терміну експлуатації освітлювальних систем. Світлодіодні лампи потребують рідшої заміни, що робить їх ідеальним рішенням для тривалого використання, що особливо важливо для громадських місць, де освітлення необхідне для безпеки та комфорту. LED-освітлення активно застосовують в місцях з високою прохідністю (див. рис. 1.6) [3, 4]:

- на вулицях;
- у парках;
- скверах;
- аеропортах;
- на парковках.



Рисунок 1.6 – Штучне освітлення у вечірній час

Увечері або вночі освітлені вулиці роблять пересування комфортнішим і безпечнішим, що стосується як пішоходів, так і водіїв. Хоча автомобілі мають власні фари, додаткове вуличне освітлення допомагає уникнути небезпечних ситуацій, таких як недостатнє освітлення пішохідних переходів, що підвищує безпеку на дорогах.

Для забезпечення безпеки пішоходів у віддалених місцях, де освітлювальні системи є рідкісними або взагалі відсутніми, створюють спеціальні освітлювальні системи на пішохідних переходах. Такі системи акцентують увагу водіїв на присутність пішоходів, особливо в умовах поганої видимості або в темний час доби, що є дуже важливим, оскільки недостатнє освітлення може призвести до трагічних аварій, коли водії просто не встигають помітити людей, які переходять

дорогу. Окрім традиційних джерел живлення, пішохідні освітлювальні системи все частіше використовують альтернативні енергоносії, такі як сонячні панелі (див. рис. 1.7) [6, 7].

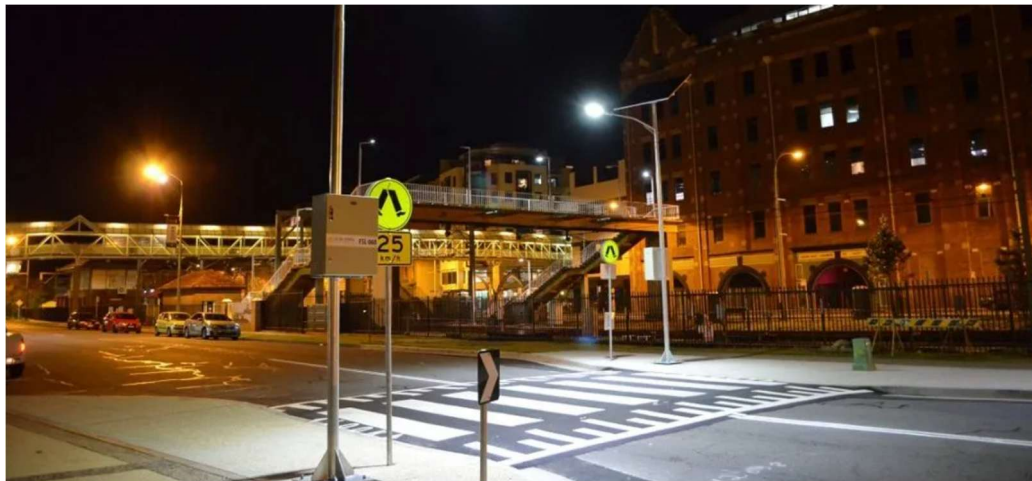


Рисунок 1.7 – Штучне освітлення зі вбудованими сонячними панелями для забезпечення безпеки пішоходів у вечірний час та у разі відключень світла

Маленька сонячна панель забезпечує живлення для системи разом з акумулятором, який виконує роль «буфера», накопичуючи енергію протягом дня. Такі системи зазвичай оснащуються датчиками освітлення, які вмикають світло тільки тоді, коли настає темрява, автоматично керуючи процесом. Світло працює від акумулятора, який забезпечує безперервне живлення навіть в умовах відсутності електромережі. Ці системи є надзвичайно енергоефективними завдяки використанню літій-іонних (Li-ion) акумуляторів, які під час дня накопичують сонячну енергію, а вночі передають її для освітлення пішохідних переходів. З настанням дня процес повторюється: система заряджає акумулятор для подальшої роботи в нічний час (див. рис. 1.8) [6, 7].

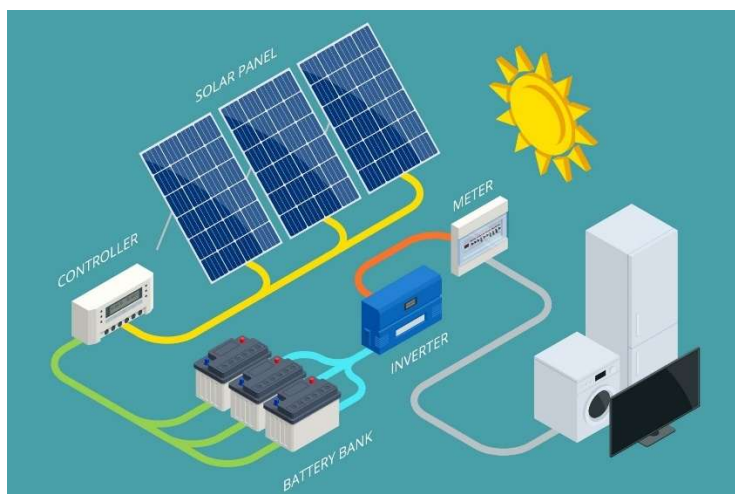


Рисунок 1.8 – Система накопичення та збереження сонячної енергії для її подальшого споживання використання

Сучасні освітлювальні системи оснащені датчиками, що робить їх ще більш ефективними. Ці датчики не лише реагують на інтенсивність світла, але й можуть регулювати яскравість освітлення відповідно до присутності чи відсутності людей: вони можуть автоматично приглушати світло, коли немає пішохідного руху, щоб заощадити енергію, і яскравіше освітлювати, коли пішоходи з'являються, щоб поліпшити видимість і підвищити безпеку. Такі автономні освітлювальні системи є ідеальним прикладом того, як можна поєднати сучасні технології та енергоефективність для покращення умов життя, безпеки та збереження енергії (див. рис. 1.9) [6, 7, 8].



Рисунок 1.9 – Використання датчиків освітленості та руху для зниження енерговитрат у часи простою

1.2 Технології Інтернету речей (IoT) у системах управління освітленням

Сучасні технології дозволяють значно покращити роботу освітлювальних систем, зробивши їх ще більш енергоефективними та забезпечивши їхню стабільну і безперебійну роботу. Наприклад, можна порівняти це з концепцією «розумного міста», де використовуються різноманітні датчики та інші інноваційні технології для автоматизованого управління.

Одним із таких прикладів є «розумні» ліхтарі, які можуть підключатися до мережі Інтернет як через провідне з'єднання, так і безпроводними способами, такими як Wi-Fi. Завдяки цьому можна дистанційно керувати освітленням, вмикати та вимикати його (див. рис. 1.10) [9].

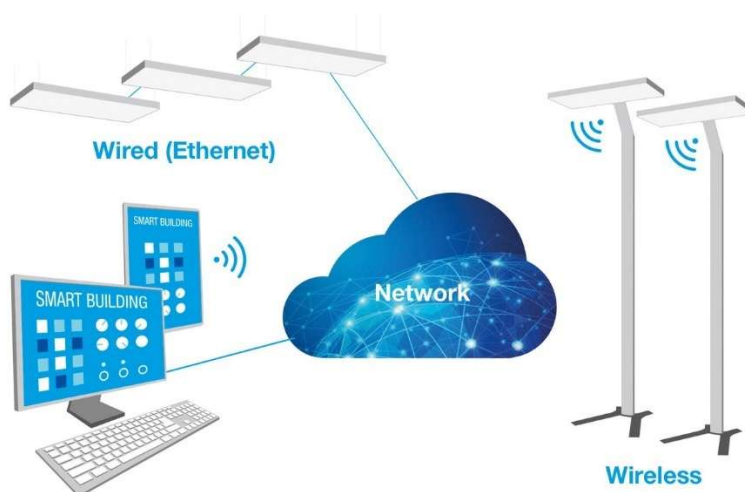


Рисунок 1.10 – Інтеграція IoT в системи освітлення.

Цей тип освітлення дозволяє регулювати інтенсивність світла відповідно до часу доби та кількості людей, що проходять повз, що робить більш ефективним використання енергії. Освітлення зменшується, коли на вулиці немає пішоходів, і, навпаки, автоматично збільшується, коли з'являються люди або транспортні засоби. Дане рішення є ефективнішим, ніж традиційні системи освітлення, які працюють лише за допомогою датчиків світла і просто вмикаються або вимикаються залежно від того, настає день чи ніч [8, 9].

Освітлювальні системи для пішоходів можуть використовувати сонячні панелі та акумулятори для автономного живлення. Якщо система не підключена до мережі, вона заряджається від сонця вдень, а вночі використовує накопичену енергію для освітлення, що досить важливо для безпеки, оскільки такі системи забезпечують стабільне освітлення навіть у разі відсутності зовнішнього джерела електроенергії [6].

Інтеграція «розумності» системам освітлення – це крок, який уможливить автоматизацію освітлення, а також централізоване управління. Наприклад, оператор у центрі управління містом може контролювати всі вуличні ліхтарі через єдину мережу, віддалено вмикаючи або вимикаючи їх залежно від ситуації. Такі системи можуть адаптуватися до погодних умов, інтенсивності руху або навіть до комендантської години, коли вночі освітлення може бути вимкнено для економії енергії. Дане рішення значно відрізняється від традиційних освітлювальних систем, де ліхтарі просто вмикаються і працюють до тих пір, поки не розрядиться батарея або поки не настане світанок (див. рис. 1.11) [9, 10].

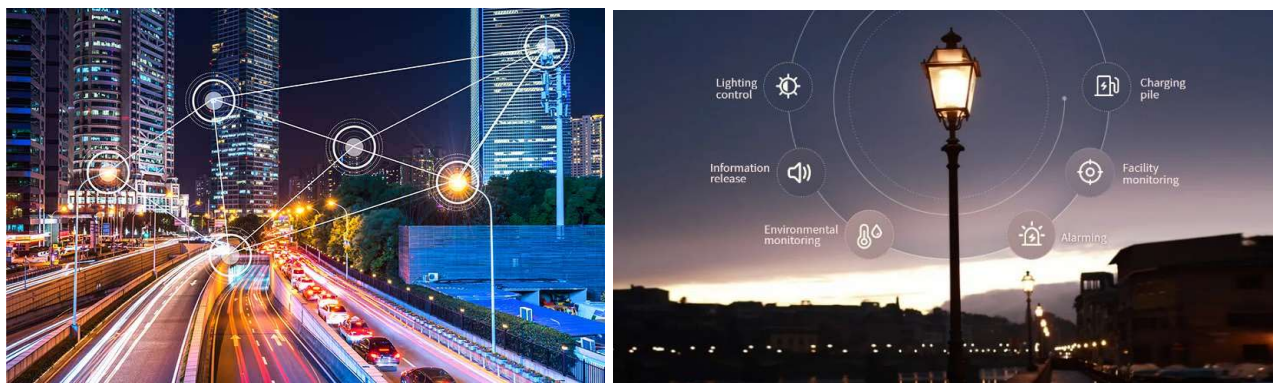


Рисунок 1.11 – Використання «розумних» систем освітлення

Завдяки інноваційним рішенням розумного міста, системи освітлення можуть працювати більш ефективно і безперебійно, забезпечуючи оптимальне освітлення, коли і де це необхідно.

Одним із ключових переваг IoT є можливість автоматизувати процеси, які раніше вимагали фізичної присутності людини. Наприклад, для керування системами освітлення в місті більше не потрібно виїжджати на місце, щоб

вимкнути конкретну лінію або систему – завдяки підключенню до Інтернету речей, оператор може дистанційно контролювати освітлення з контрольного пункту, навіть перебуваючи за десятки або сотні кілометрів від об'єкта [10].

Відеонагляд, який також може підключений до IoT, дозволяє перевірити стан освітлення та інші системи в реальному часі, що значно підвищує ефективність управління містом. Хоча розумне місто ще не повністю впроваджене, його розвиток продовжується, і все більше уваги приділяється автоматизації рутинних процесів. Такі рішення зменшують потребу в людській участі в таких завданнях, як вмикання та вимикання світла, що раніше вимагало фізичної присутності на місці. Завдяки розумним системам освітлення всі ці дії можуть виконуватися автоматично або віддалено, що підвищує загальну ефективність інфраструктури [11].

Окрім автоматизації, технології IoT дозволяють створювати резервні рішення для систем освітлення. Наприклад, якщо в LED-системі перегорить один із світлодіодів або лампа вийде з ладу, можна налаштувати систему так, щоб вона автоматично перемикалася на резервне джерело світла, що особливо корисно для критичних інфраструктур, де неполадки в освітленні можуть створити небезпеку – заміна основного джерела освітлення може здійснюватися без переривання роботи системи, що гарантує постійну доступність світла.

Світлодіодні технології, на сьогодні, дозволяють робити освітлення надзвичайно ефективним і довговічним. Світлодіоди, хоч і є маленькими компонентами, можуть забезпечувати високу яскравість завдяки їхній кількості. Наприклад, у світлодіодних стрічках використовуються сотні таких елементів на метр, що дає можливість створювати яскраве і рівномірне освітлення. Така ж технологія застосовується в телевізорах, освітлювальних пристроях і вуличних системах [2, 3, 4, 5].

Технології Інтернету речей не лише роблять ці процеси автоматизованими, але й дають можливість інтегрувати різні системи в єдину мережу, що дозволить швидко реагувати на зміни і ефективно керувати ресурсами, що робить міста розумнішими і більш технологічно просунутими.

1.3 Використання альтернативних джерел енергії

Освітлювальні системи, такі як ліхтарні стовпи чи послідовно підключені мережі ліхтарів, не можуть функціонувати автономно без зовнішнього живлення. Зазвичай вони живляться електроенергією, яка генерується на електростанціях і подається через міські мережі.

В умовах нашої країни, зважаючи на нестабільну ситуацію, виникає потреба у використанні альтернативних підходів. Одним із таких рішень є впровадження систем, які можуть підтримувати або автоматично перемикають живлення на альтернативні джерела у випадку перебоїв в основному постачанні електроенергії [5].

Коли мова йде про альтернативні джерела живлення, найбільш поширеними та популярними є сонячні панелі та вітрові генератори (див. рис. 1.12). Вони часто використовуються, оскільки забезпечують надійне і стабільне джерело енергії. Інші джерела, такі як ядерні реактори або гідроелектростанції, є менш доступними для приватних домогосподарств або окремих установ, оскільки їх встановлення потребує особливих умов, наприклад, річкового русла для гідроелектростанцій, або значних інвестицій і дозволів для ядерної енергетики.



Рисунок 1.12 – Три основні альтернативні джерела живлення

Найбільш екологічними альтернативними джерелами є ті, що використовують відновлювані ресурси, такі як сонце та вітер. Сонячні панелі, або сонячні батареї, працюють на основі фотогальванічного ефекту, який дозволяє перетворювати сонячну енергію в електричну – цей процес відбувається завдяки напівпровідникам, що використовуються в конструкції панелей (див. рис. 1.13) [12].

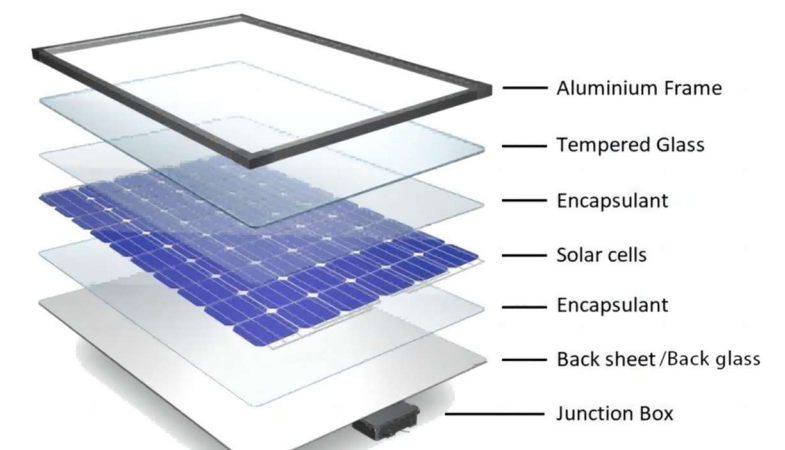


Рисунок 1.13 – Складові (компоненти) сонячної панелі

Сонячні панелі складаються з декількох основних компонентів [12]:

- фотоелементи (основний компонент, що втілює енергію Сонця в електричну, утворюється з кремнієвих пластин, які генерують електричний струм під впливом сонячного світла);
- захисне скло (міцне скло, яке захищає фотоелементи від механічних пошкоджень, впливу погодних умов і ультрафіолетового випромінювання);
- антивідбивне покриття (шар, який знижує втрати світла через відбиття, покращуючи ефективність панелі);
- ева (EVA) ламінат (полімерний матеріал, який закріплює та захищає фотоелементи від вологи та забруднень);
- задня пластина (захисний шар на звороті панелі, який ізолює та підтримує структуру панелі);

- алюмінієва рамка (обрамлення панелі, яке додає жорсткість конструкції та полегшує монтаж на кріплення);
- розподільна коробка (місце з'єднання елементів панелі з електричними контактами, забезпечує безпечне підключення до системи та захист від перенапруг);
- діоди обхідні (елементи у розподільній коробці, що дозволяють фотоелементам працювати ефективно навіть при частковому затіненні).

Сонячна панель може ефективно працювати в денний час, коли вона отримує достатню кількість прямих сонячних променів. Однак, у нічний час, через відсутність освітлення, її робота припиняється, оскільки немає джерела для генерації енергії. У випадках, коли сонце закрите хмарами, рівень генерації також суттєво знижується. Навіть якщо сама панель велика, кількість енергії, яку вона може виробити при хмарній погоді, є дуже незначною.

З огляду на це, сонячні панелі зазвичай встановлюють не поодиночі, а в групах, що може налічувати кілька десятків панелей, в залежності від потреби у генерації енергії та розміщення. Така система з кількох панелей дозволяє компенсувати низький рівень освітлення і забезпечити певний рівень генерації навіть у несприятливих умовах – ця енергія може бути використана для зарядки акумуляторних батарей, які згодом забезпечуватимуть живлення в нічний час або під час перерв у генерації через погану погоду. Використання кількох сонячних панелей створює більш стабільну систему енергозабезпечення, що дозволяє ефективніше використовувати доступну енергію навіть у умовах недостатнього сонячного світла (див. рис. 1.14) [13].



Рисунок 1.14 – Система енергонезалежності зі сонячними панелями та сонячним інвентором

Сонячні панелі здатні виробляти електроенергію, проте для ефективного використання цієї енергії необхідно контролювати її перетворення. Оскільки енергія, яку генерують сонячні панелі, є нестабільною і залежить від різних факторів, таких як погодні умови, кут нахилу сонця, присутність хмар або інших перешкод, що можуть блокувати сонячні промені, необхідно застосовувати спеціальні контролери для стабілізації струму та напруги, що важливо, щоб запобігти значним коливанням напруги, адже без регулювання вона могла б постійно змінюватись, що негативно впливало б на працездатність електропристроїв.

Контролери виконують функцію «бар'єра» [13], який вирівнює напругу, утримуючи її на заданому рівні, наприклад, 12, 20 або 5 вольт. Вони також не дозволяють напрузі підніматися вище цього рівня, забезпечуючи стабільну роботу системи. Але якщо сонячного світла буде занадто мало, панель може підтримувати напругу на заданому рівні лише за відсутності підключених пристроїв. Як тільки підключається навантаження, наприклад, телефон для зарядки, рівень енергії може різко впасти, і панель перестане генерувати достатньо електрики для підтримки процесу зарядки. Як приклад, можна розглянути туристичну сонячну панель потужністю 10-15 або 20 Вт, яка має вбудований контролер і USB порти. Якщо підключити до неї телефон, то під час прямого сонячного освітлення зарядка відбувається, хоча й повільно [13, 14].

Варто лише частково закрити панель (рукою, хмарою чи іншим предметом), як генерація різко зменшиться або зовсім припиниться. Більш дешеві сонячні панелі можуть повністю припинити роботу при навіть незначному перекритті, тоді як більш сучасні моделі просто знижують рівень генерації, але все одно значно втрачають продуктивність (див. рис. 1.15) [15, 16].



Рисунок 1.15 – Система енергонезалежності зі сонячними панелями та сонячним інвентором

Контролери відіграють ключову роль у запобіганні перегріву чи виходу системи з ладу – вони обмежують напругу на безпечному рівні і можуть активувати захисний режим, коли напруга падає до критично низького рівня, наприклад, з 5 до 4 вольт. Такий захисний механізм автоматично припиняє процес зарядки, запобігаючи можливим пошкодженням як самої панелі, так і підключених пристроїв [14].

Контролери є важливим елементом систем альтернативного живлення, але без акумуляторів не обходиться жодна сонячна панель чи вітрогенератор. Акумулятори виконують роль «буферу», накопичуючи енергію, яка згодом може бути використана в потрібний момент. Їх можна порівняти зі звичайними батареями для смартфонів: для роботи вони спершу повинні бути заряджені. Проте, на відміну від телефонів, тут потрібен не лише контролер для регулювання напруги, але й спеціальний інвертор [7, 13].

Інвертор відповідає за ефективне перетворення та використання накопиченої енергії, зокрема для зарядки акумуляторів і постачання енергії до будівель або інших об'єктів. Наприклад, маленькі туристичні сонячні панелі оснащені компактними контролерами, які займають мінімум місця (розміром з коробку від сірників) і мають USB-виходи для зручного підключення пристроїв (див. рис. 1.16).



Рисунок 1.16 – Портативна (туристична) сонячна панель від Allpowers

Однак, коли мова йде про великі сонячні системи, потужністю 200, 400 або навіть 800 Вт, вони використовують інші типи з'єднань. Такі системи мають спеціальні кабелі MC4, які дозволяють підключати кілька сонячних панелей між собою та передавати енергію через кабелі XT60 до інвертора. Інвертор потім забезпечує електрикою певну територію, будівлю або інший об'єкт, підключений до системи (див. рис. 1.17).



Рисунок 1.17 – Інтерфейс підключення сонячних панелей та інвертора (MC4-XT60)

Ще однією важливою функцією інвертора є управління зарядкою акумуляторів – він дозволяє використовувати енергію, накопичену в батареях, замість тієї, яка генерується сонячними панелями в реальному часі. Тобто, навіть коли сонця недостатньо для генерації, система продовжує працювати завдяки енергії, збереженій в акумуляторах, а сонячні панелі тим часом знову починають їх заряджати, коли з'являється сонячне світло [7, 12].

Для освітлювальних систем не потрібні громіздкі конструкції з кількох великих сонячних панелей, розміром приблизно метр на пів метра. Для нормальної генерації енергії, зазвичай, достатньо площі близько 70 на 43 см. Такої площі вистачає, щоб вдень заряджати акумулятор, який виконує роль «буфера» для енергозабезпечення вночі [13].

Освітлювальна система, яка працює вночі, не вимагає використання інверторів – достатньо невеликого контролера, який регулюватиме заряджання акумулятора, а також контролера на самому акумуляторі для правильного живлення світлодіодних стрічок. Але є нюанс – сонячна генерація не є постійною. Протягом дня, наприклад, генерація досягає свого піку, коли сонце знаходиться під вдалим кутом або в зеніті. Якби сонячні панелі були встановлені на екваторі без нахилу, генерація могла б бути максимальною на 100%, за умов максимального ККД панелей, який зазвичай складає близько 23% [7, 17].

У випадку, коли сонце знаходиться під певним кутом, максимальна генерація відбувається в той момент, коли сонячні промені падають перпендикулярно до поверхні панелей, зазвичай в середині дня. Зранку і ввечері генерація енергії менша, а вночі вона зовсім відсутня, оскільки відбитого світла від Місяця недостатньо для генерації енергії [13].

Щоб компенсувати цей недолік, використовують акумулятори – вони накопичують енергію, що генерується протягом дня, і забезпечують живлення систем вночі. Тобто, коли сонце вже не світить, система може працювати за рахунок накопиченої енергії. Для невеликих освітлювальних систем достатньо контролера для регулювання зарядки акумулятора і контролера живлення для

світлодіодних стрічок. Як тільки настає ніч, ці системи автоматично вмикаються і використовують енергію, накопичену протягом дня [7].

Вітрова генерація також популярна, хоча менш поширена, ніж використання сонячних панелей – це пов’язано з тим, що для ефективного використання вітряків потрібно мати достатньо простору для їх встановлення. Вітряк має бути потужним, щоб виробляти необхідну кількість енергії.

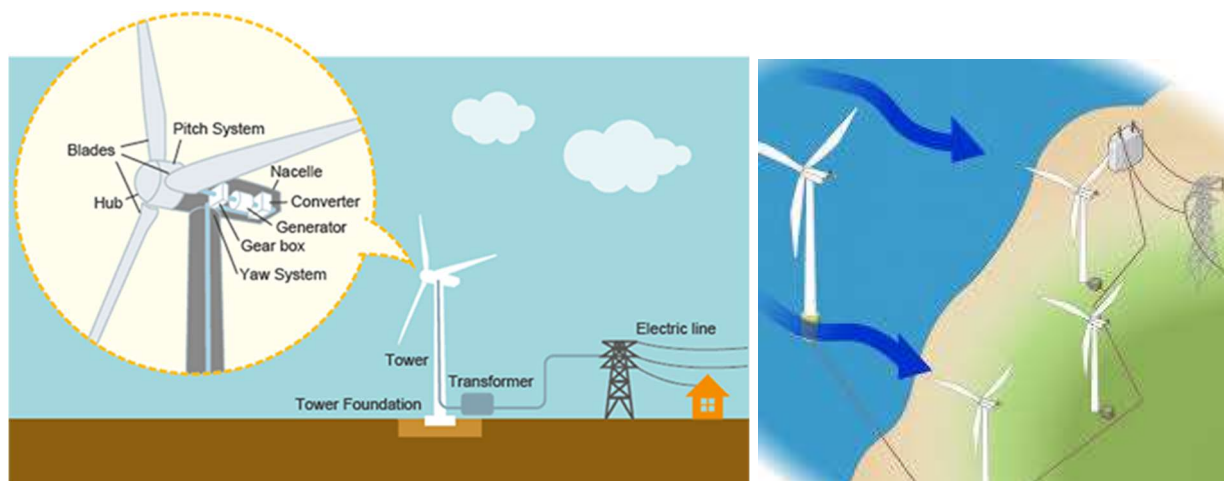


Рисунок 1.18 – Складові (компоненти) вітряка (або вітрогенератора)

Компонентами вітряка є (див. рис. 1.18) [18]:

- 1) Лопаті: аеродинамічні елементи, що обертаються під дією вітру та передають енергію на ротор.
- 2) Ротор: частина, до якої прикріплені лопаті; перетворює кінетичну енергію вітру в обертальний рух.
- 3) Гондола: корпус, що містить основні компоненти генератора, захищає їх від погодних умов.
- 4) Генератор: пристрій, який перетворює обертальну механічну енергію в електричну.
- 5) Редуктор: передає та збільшує швидкість обертання від ротора до генератора (необхідний у більшості великих вітрогенераторів).
- 6) Механізм повороту: система, що орієнтує турбіну у напрямку вітру для максимальної ефективності.

7) Анемометр та флюгер: датчики для вимірювання швидкості та напрямку вітру; передають дані механізму повороту.

8) Турмова башта: висока конструкція, що підтримує гондолу з генератором і лопатями, дозволяючи захоплювати стабільний потік вітру.

9) Система гальмування: безпекова система для зупинки ротора в разі надмірно сильного вітру або аварійної ситуації.

Принцип дії вітрогенератора (див. рис. 1.17) [18]:

1) Захоплення вітру: лопаті вітрогенератора, спроєктовані як крила, захоплюють енергію вітру. Коли вітер «дме» на лопаті, він створює підйомну силу, яка обертає їх навколо ротора.

2) Обертовий рух: під впливом вітру ротор обертається, передаючи кінетичну енергію вітру в обертальний рух.

3) Передача енергії до генератора: обертальний рух ротора через редуктор (при необхідності) передається генератору. Редуктор підвищує швидкість обертання до потрібного рівня для роботи генератора.

4) Генерація електрики: генератор перетворює обертальний рух в електричну енергію за допомогою магнітного поля, що виникає під час обертання внутрішнього вала генератора.

5) Регулювання напрямку: анемометр і флюгер вимірюють швидкість та напрямок вітру. Якщо вітер змінює напрямок, механізм повороту автоматично орієнтує турбіну у бік вітру для максимального захоплення енергії.

6) Контроль швидкості: система гальмування активується у разі надто сильного вітру, щоб уникнути пошкоджень. Система може зупинити лопаті або зменшити їхню швидкість обертання.

7) Передача електроенергії в мережу: електроенергія з генератора надходить до трансформатора, де її перетворюють у параметри, сумісні з мережею, і передають у систему електропостачання для споживачів.

Вітрові системи можуть бути хорошою альтернативою сонячним панелям, особливо у вечірній час або взимку, коли сонця мало, але є достатньо вітру для виробництва енергії. Проте для освітлювальних систем ця технологія менш

доцільна та пов'язано з тим, що для розміщення вітряка потрібен певний простір, і його розміри можуть бути непридатними для компактних рішень.

Існують конструкції вітряків, які призначені для компактного використання і можуть генерувати деяку кількість енергії навіть при слабких вітрах, але такі системи, як правило, значно більші та дорожчі, ніж сонячні панелі, які можна легко інтегрувати в освітлювальні системи, наприклад, для садових гірлянд або маленьких нічників. Сонячні панелі значно зручніші для таких застосувань, оскільки вони компактні та можуть працювати в будь-якому місці. До того ж, у подібних освітлювальних системах зазвичай використовуються слабкі акумулятори, яких достатньо для живлення підсвітки, що вмикається після настання темряви [7, 19].

Говорячи про альтернативні джерела енергії, як-от сонячні панелі або вітрові турбіни, важливо також враховувати роль акумуляторів як джерела живлення, що використовується як «буфер». Вони зберігають енергію для використання у моменти, коли генерація відсутня, і забезпечують стабільне електропостачання.

Найчастіше для таких систем використовуються два типи акумуляторів :

- свинцево-кислотні акумулятори (гелеві та AGM акумулятори);
- літій-іонні акумулятори (Li-ion);
- літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO₄).

Свинцево-кислотні акумулятори, зокрема гелеві або AGM (Absorbent Glass Mat), широко застосовуються в системах безперебійного живлення (UPS), в автомобілях та великих вантажівках (див. рис. 1.19) [20].

Їх популярність пояснюється відносною дешевизною та можливістю обслуговування, але AGM-акумулятори мають певні недоліки [20]:

- вони не обслуговуються;
- не переносять глибокий розряд (якщо їхня напруга падає нижче 10 вольт, відновити їх стає складно).



Рисунок 1.19 – Свинцево-кислотні акумулятори:
Absorbent Glass Mat, AGM та гелеві акумулятори

Для автомобілей і вантажівок ці акумулятори «цінуються» за здатність забезпечувати високий пусковий струм для старту двигуна, після чого заряджаються від генератора транспортного засобу. Такі акумулятори також використовуються в системах резервного живлення, наприклад, у поєднанні з сонячними панелями [7, 13, 20]. Вони заряджаються від мережі або від сонячної генерації і забезпечують енергію під час відсутності основного джерела живлення.

Літєві батареї набувають все більшої популярності завдяки довговічності та надійності. Вони включають кілька різновидів (див. рис. 1.20):

- літій-іонні (Li-ion);
- літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄).



Рисунок 1.20 – Літєві акумулятори:
Літій-іонні (Li-ion) та літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄)

Літієві акумулятори відрізняються тим, що вони розроблені для великої кількості циклів «заряд-розряд», що робить їх ідеальними для систем, які потребують постійного заряджання і використання. Особливо популярними стали літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4) акумулятори через їх тривалий термін служби, високу стабільність і безпеку – вони витримують більше циклів і краще підходять для використання у високоефективних системах, таких як сучасні сонячні установки чи інші альтернативні джерела живлення [21].

Літій-полімерні акумулятори (Li-Po) зазвичай використовуються в наших смартфонах, планшетах, ноутбуках та інших компактних електронних пристроях. Його головна перевага – «пласка» форма, що дозволяє легко інтегрувати його в тонкі та невеликі пристрої. Завдяки цій компактності їх встановлюють у пристроях, котрі мають обмежені габарити, але їх не використовують як «буфер» від сонячної чи вітрякової генерації.

Літій-іонні (Li-ion) акумулятори, навпаки, використовуються в ширшому спектрі пристроїв. Наприклад, вони є популярними у портативних зарядних пристроях, таких як павербанки, та в зарядних станціях. Раніше вони широко застосовувалися у цих пристроях, хоча зараз спостерігається перехід до інших хімічних складів, таких як літій-залізо-фосфат (LiFePO_4), що є сучаснішою і більш ефективною технологією [21, 22, 23].

Літій-іонні (Li-ion) акумулятори стали часто використовуватися в електроінструментах, таких як шуруповерти та дрелі, де раніше застосовувалися свинцево-кислотні акумулятори через їх здатність забезпечувати великий пусковий струм, але все більше інструментів переходять на літій-іонні (Li-ion) акумулятори, оскільки вони теж можуть надавати високу потужність та стабільність при стартовому пуску та більший ресурс, порівняно з свинцево-кислотними [20, 21].

Високовольтні або високострумні літій-іонні (Li-ion) батареї здатні забезпечувати достатньо енергії для запуску потужних пристроїв – це робить їх ідеальними для інструментів, що потребують значного пускового струму. Хоча в попередніх моделях ноутбуків раніше також використовували літій-іонні батареї,

сьогодні частіше застосовуються літій-полімерні (Li-Po) акумулятори через їхню компактність.

Літій-іонні (Li-ion) та літій-полімерні (Li-Po) акумулятори використовуються в системах безперебійного живлення (UPS) та для зберігання енергії у сонячних інверторах. Хоча літєві акумулятори дорожчі порівняно зі свинцево-кислотними, вони мають значно більший ресурс. Вони витримують більший розряд без істотного пошкодження, хоча це все ж впливає на їх довговічність. Щодо циклів зарядки, літій-іонні (Li-ion) та літій-полімерні (Li-Po) акумулятори зазвичай мають цикл життя від 500 до 800 циклів заряд-розряд. Після цього акумулятори починають деградувати: внутрішні хімічні процеси сповільнюються, іони рухаються менш активно, що з часом може призвести до зниження ємності акумулятора – у деяких випадках акумулятор може навіть набрякнути і втратити здатність зберігати енергію [21, 22].

Літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) акумулятори стали вельми популярними в останні роки, і їх комерційне використання активно зростає. Вони застосовуються в різноманітних портативних зарядних станціях, системах безперебійного живлення (ДБЖ), а також у системах для зберігання енергії, отриманої від альтернативних джерел, таких як сонячні панелі або вітряки. Хоча їхня конструкція та вигляд подібні до літій-іонних (Li-ion) акумуляторів, LiFePO₄ дещо більші за розмірами – нагадують великі конденсатори і можуть зберігати менше енергії в порівнянні з літій-іонними (Li-ion) батареями аналогічного розміру [21, 23].

Основна перевага літій-залізо-фосфатних (LiFePO₄) акумуляторів полягає в їхньому тривалому життєвому циклі. Завдяки своїй хімічній структурі, ці акумулятори здатні витримати до 3500 і більше циклів зарядки та розрядки або іншими словами – протягом 10 років використання таких батарей їхня ємність може знизитися лише на 20%, що є винятковим показником. Через це – LiFePO₄ стають ідеальним рішенням для систем, що потребують тривалого і стабільного джерела живлення [23].

Літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) акумулятори часто використовуються у зарядних станціях, які підключаються до сонячних панелей або вітряків. Вони

також можуть бути швидко перезаряджені від міської електромережі, що робить їх зручними для автономних систем живлення. Їхня швидкість зарядки значно перевищує швидкість зарядки літій-іонних (Li-ion) або літій-полімерних (Li-Po) акумуляторів. Однак, варто зазначити, що такі акумулятори коштують дорожче через складніший процес виробництва, але це виправдано їхньою надійністю та довговічністю [7, 12, 18, 23].

Літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) акумулятори стають все більш популярними для створення домашніх систем безперебійного живлення, де вони можуть забезпечувати стабільну роботу протягом багатьох років. Наприклад, акумуляторні батареї, зібрані з LiFePO₄, здатні витримати щоденне використання протягом 10 років, зберігаючи більшу частину своєї початкової ємності. Ці характеристики роблять їх ідеальними для будинків, які потребують живлення більш потужних систем, а також менших пристроїв, таких як світлодіодні лампи [23].

Порівняно з літій-іонними (Li-ion) або літій-полімерними (Li-Po) акумуляторами, LiFePO₄ є більш стійкими до зносу, особливо при частому розряді та зарядці. Наприклад, звичайні акумулятори в смартфонах або ноутбуках мають набагато коротший життєвий цикл – близько 2-3 років, після чого користувачі помічають суттєву деградацію ємності. Навіть якщо такі пристрої постійно підключені до зарядки, їхні акумулятори швидко зношуються, тоді як літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) батареї мають набагато довший термін служби та кращу стійкість до деградації [21, 23, 23].

1.4 Аналіз існуючих рішень в освітлювальних системах

Аналізуючи існуючі рішення та їхні недоліки в освітлювальних системах, можна дійти висновку, що більшість таких систем є дуже залежними від погодних умов. Окрім цього, значна частина з них не використовує сучасні технології, такі

як Інтернет речей (IoT), що дозволило б централізовано керувати системами освітлення [6, 7, 9].

Розглянемо приклад: для освітлення невеликих ділянок, таких як подвір'я чи сад, часто використовують малогабаритні сонячні панелі з акумуляторами – ці системи зазвичай виглядають привабливо, проте мають суттєві обмеження.

Основною проблемою є використання застарілих типів акумуляторів, таких як нікель-кадмієві (NiCd) та нікель-метал-гідридні (NiMH) (див. рис. 1.21).



Рисунок 1.21 – Нікелеві акумулятори:

Нікель-кадмієві (NiCd) та нікель-метал-гідридні (NiMH)

Вони мають набагато гірші характеристики в порівнянні з сучасними літійовими акумуляторами – вразливі до неправильного процесу зарядки. Якщо їх перевантажити або допустити розряд до нуля, це може значно скоротити їхній термін служби або навіть повністю вивести з ладу. Наприклад, один неправильний цикл заряджання може повністю знищити акумулятор, і він більше не піддаватиметься відновленню. Такі системи неефективні, адже сучасні літій-іонні (Li-ion) або літій-полімерні (Li-Po) акумулятори набагато надійніші, довговічніші та стійкіші до циклів глибокого розряду, що робить їх кращим вибором для автономного освітлення [22, 24].

У більшості невеликих освітлювальних систем використовуються невеликі акумулятори, зазвичай нікель-кадмієві (NiCd) або нікель-метал-гідридні (NiMH). Нікель-кадмієві акумулятори відомі своїм «ефектом пам'яті», тобто якщо їх не повністю розрядити перед зарядкою, вони «запам'ятовують» цей рівень і надалі

будуть заряджатися лише до того ж рівня, що знижує їхню ефективність (див. рис. 1.20) [24].

Нікель-метал-гідридні акумулятори є вдосконаленою версією нікель-кадмієвих, оскільки в них немає цього ефекту пам'яті, проте вони все ще схильні до втрати ресурсу при надмірній зарядці або розрядці. Характерною особливістю використання таких акумуляторів в якості освітлювальних «буферів» є відсутність повного контролю над циклом заряду батареї. Незалежно від типу батареї – нікель-метал-гідридна, свинцево-кислотна чи літій-іонна – батареї постійно піддаються неконтрольованим циклам заряду, що може призвести до швидкої деградації [22, 24].

Розглядаючи використання сучасніших і ефективніших літієво-залізо-фосфатних (LiFePO_4) акумуляторів, то, незважаючи на їхні очевидні переваги [21, 22, 23, 24]:

1) Висока безпека: LiFePO_4 хімічно стабільніші та мають менший ризик загоряння або вибуху порівняно з іншими літієвими акумуляторами. Вони менш схильні до перегріву, що робить їх безпечнішими для тривалого використання в домашніх та промислових умовах.

2) Тривалий термін служби: такі акумулятори можуть витримати до 2000–5000 циклів заряджання-розряджання без значної втрати ємності, що може забезпечити 10–20 років експлуатації за регулярного використання.

3) Глибокий розряд: LiFePO_4 акумулятори мають високу стійкість до глибокого розряду, що дозволяє ефективно використовувати до 80–90% їхньої номінальної ємності без шкоди для терміну служби.

4) Швидка зарядка: завдяки низькому внутрішньому опору такі акумулятори швидко заряджаються, що особливо важливо для систем, де швидка підзарядка необхідна для зберігання енергії від сонячної чи вітрової генерації.

5) Широкий діапазон робочих температур: Пристрій стійкий до температурних коливань і підходить для використання в різних кліматичних зонах, працюючи при температурі від -20°C до $+60^\circ\text{C}$.

6) Малий рівень саморозряду: Акумулятори LiFePO_4 мають низький рівень саморозряду, що дозволяє їм зберігати енергію на довгі часи без значних втрат, коли вони не використовуються.

7) Екологічність: порівняно з іншими літєвими акумуляторами, LiFePO_4 акумулятори більш екологічні, оскільки в їх складі немає токсичних металів, таких як кобальт, що робить їх менш шкідливими для навколишнього середовища.

Недоліками літєво-залізо-фосфатних (LiFePO_4) акумуляторів є [20, 21]:

1) Вища вартість: LiFePO_4 акумулятори є дорогими на момент покупки порівняно з традиційними свинцево-кислотними або нікель-кадмієвими акумуляторами. Хоча тривалий термін служби компенсує початкові витрати, стартові інвестиції можуть бути високими.

2) Менша енергоємність: зазвичай LiFePO_4 акумулятори мають меншу ємність на одиницю ваги або об'єму порівняно з літій-іонними (Li-ion) акумуляторами, що робить їх менш енергоефективними в деяких компактних пристроях, де потрібно максимізувати енергомісткість.

3) Обмеження при низьких температурах: при дуже низьких температурах (нижче -10°C) продуктивність LiFePO_4 акумуляторів знижується, і вони можуть втрачати ефективність, що потребує додаткового обігріву або захисту для використання в холодних кліматах.

4) Вимоги до спеціального зарядного обладнання: для тривалого терміну служби LiFePO_4 акумулятори потребують спеціального зарядного пристрою, який підходить саме для їхньої хімії. Звичайні зарядні пристрої можуть негативно вплинути на їхню продуктивність і безпеку.

5) Більший обсяг та вага в порівнянні з Li-ion : оскільки щільність енергії у LiFePO_4 дещо нижча, вони можуть займати більше місця і важити більше в порівнянні з іншими літєвими акумуляторами при однаковій ємності.

Незважаючи на ці недоліки, LiFePO_4 акумулятори є надійним вибором для багатьох застосувань завдяки їхній безпеці, довговічності та стійкості до глибоких розрядів, що робить їх оптимальними для систем зберігання енергії від відновлюваних джерел.

Часто такі системи з автономним живленням (збіркою із акумуляторів) комбінуються: освітлення працює як від сонячної енергії, так і від загальної електромережі – це робиться через те, що в похмурі дні, коли сонячного світла недостатньо для повного зарядження акумуляторів, вони можуть не працювати ефективно або взагалі вимкнутися протягом короткого часу. Особливо це критично для освітлення таких місць, як пішохідні переходи на трасах або магістралях, де відсутність належного освітлення може призвести до небезпечних ситуацій [6].

Для освітлення пішохідних переходів потрібне не просто слабке світло, а сильне і рівномірне, яке надійно освітлює всю проїжджу частину. Недостатній заряд батареї через несприятливі погодні умови може призвести до недостатнього освітлення, що може призвести до того, що водії не зможуть розпізнати пішоходів на пішохідних переходах, особливо в місцях з поганою видимістю, що може призвести до смертельних аварій.

У більшості випадків освітлювальні системи, встановлені в містах або інших населених пунктах, не мають альтернативних джерел живлення на випадок відключень електроенергії чи аварійного знеструмлення – вони підключені до загальної міської електромережі і тому втрачають свою функціональність під час таких відключень. Хоча є можливість забезпечити їх окремим резервним живленням, більшість систем не оснащені подібними рішеннями [25].

Варто уточнити, що багато з цих систем використовують застарілі типи освітлювальних «приладів», як-от люмінесцентні лампи або лампи розжарювання, які неефективні в умовах використання альтернативних джерел енергії. Такі типи освітлювальних приладів споживають більше енергії і, як наслідок, потребують більше ресурсів для підтримки свого світіння [2, 3, 4].

Постачання електроенергії альтернативними системами, такими як сонячні батареї, є недоцільним через великі потреби в енергії. Саме тому більшість сучасних освітлювальних систем повинні переходити на світлодіодні (LED) технології, оскільки світлодіоди є набагато ефективнішими в контексті енергозбереження та тривалості експлуатації. Навіть у випадках, коли встановлено

світлодіодні системи, існує проблема зі стабільністю енергопостачання – це можна порівняти з роботою мобільних операторів та їхніх вишок зв'язку.

Як показує практика – навіть мобільні оператори, незважаючи на використання резервних акумуляторів, не завжди можуть забезпечити безперебійну роботу своїх станцій під час тривалих відключень електроенергії, що свідчить про загальну проблему надійності енергопостачання, яка стосується не лише зв'язку, але й систем зовнішнього освітлення [26].

Отже, можна зробити висновок, що освітлювальні системи також потребують надійного резервного живлення. Одним із рішень може бути встановлення акумуляторів, які накопичують енергію з міської електромережі і забезпечують освітлення в разі відключення електроенергії. Навіть за несприятливих погодних умов такі акумулятори змогли б підтримувати роботу систем освітлення у вечірній час. Однак у випадках довготривалих відключень або екстрених ситуацій, коли доступ до енергії з міської мережі обмежений, необхідно передбачити альтернативні варіанти живлення, як-от сонячні панелі [7, 19].

Сучасні сонячні панелі не є надто дорогими, і навіть невеликі установки можуть забезпечити певний рівень генерації електроенергії, але варто пам'ятати – чим менша площа панелі, тим менше енергії вона здатна генерувати.

Для ефективної роботи освітлювальних систем необхідно правильно розраховувати площу сонячних панелей та їхню здатність перетворювати сонячну енергію на електричну. Застосування додаткових рішень, таких як покращені акумулятори або гібридні системи живлення, може значно підвищити надійність освітлення навіть в умовах відсутності стабільного енергопостачання [6].

Треба розуміти, що сучасні освітлювальні системи, навіть якщо вони оснащені датчиками, не можуть бути настільки ефективними, як ті, що використовують технології Інтернету речей (IoT). Наприклад, прості датчики руху часто реагують на будь-який рух — пил, листя чи тварин — що призводить до частого спрацьовування. Вони не здатні точно ідентифікувати, чи рухається людина, тварина, або навіть просто вітер «підніс» пил.

Таке неконтрольоване увімкнення світла призводить до надмірного використання енергії і швидкого розряду акумуляторів, які забезпечують резервне живлення, що може призвести до серйозних наслідків, коли в критичний момент, наприклад, пізно ввечері, коли на дорогах все ще є ті, хто їздить або ходить, освітлення може несподівано вимкнутися через розряджені акумулятори. Хоча на даний час є комендантська година, необхідність надійної роботи таких освітлювальних систем залишається, оскільки на дорогах можуть бути транспортні засоби, або пішоходи, які все ще потребують безпечного пересування.

Окрім проблеми з датчиками руху, варто враховувати й інші аспекти. Наприклад, якщо освітлювальні системи використовують дешеві сонячні панелі, їхня ефективність може значно знизитися через забруднення поверхні панелей: дощ, бруд або пил можуть перекрити доступ до сонячних променів, що знизить здатність панелі генерувати енергію для заряджання акумуляторів.

Сонячні панелі не можуть самоочищатися, що призводить до зниження їхньої продуктивності, а це, в свою чергу, негативно впливає на загальну роботу освітлювальної системи [7, 13]. Використання альтернативних джерел живлення, таких як сонячні панелі, є доцільним і важливим для забезпечення енергоефективності, але ці рішення мають свої обмеження. Невеликі вітряки, хоча і розробляються для застосування у деяких системах, також не можуть бути використані скрізь через їхні обмежені можливості та високу вартість.

З іншого боку, використання технологій Інтернету речей могло б значно підвищити ефективність роботи таких освітлювальних систем. За допомогою IoT можна було б налаштувати більш точні сенсори, які реагували б лише на відповідні події, що зменшило б непотрібні витрати енергії. Такі системи могли б також краще управляти ресурсами, моніторити стан акумуляторів і панелей, а також своєчасно виявляти необхідність обслуговування, що дозволило б знизити ризики, пов'язані з поломками або неефективною роботою [3, 5, 7, 9, 10].

РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ АВТОНОМНОЇ ОСВІТЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ІОТ

2.1 Ключові компоненти освітлювальної системи

Прийшов час розпочати проєктування системи освітлення, яка включатиме ключові елементи, такі як датчики, контролери, комунікаційні модулі, і головна її мета – забезпечити роботу в умовах дефіциту електроенергії – це передбачає, що система буде ефективно працювати навіть у випадках, коли основної електроенергії не вистачає, і вона повинна автоматично перемикатися на резервне живлення.

Проєктування такої системи потребує врахування специфічних умов її експлуатації – система повинна бути розрахована на мінімальне енергоспоживання, а її компоненти мають бути надійними та стійкими до можливих перебоїв у подачі електрики.

Важливо забезпечити можливість автономної роботи, тобто система має функціонувати незалежно від основної електромережі, використовуючи акумуляторні батареї. Якщо основна мережа доступна, система зможе отримувати живлення з неї для підзарядки або підключатися до неї для підтримки роботи [6].

Незважаючи на це, головний акцент залишається на автономності: у разі відсутності електроенергії освітлювальна система повинна функціонувати за рахунок резервних джерел живлення: для цього важливо правильно підібрати датчики, контролери та модулі зв'язку, які будуть надійно працювати навіть при обмеженій або відсутній подачі електроенергії.

Датчики. Детально розглядаючи сенсори, необхідні для функціонування освітлювальної системи в умовах дефіциту електроенергії, слід зосередитися на трьох ключових типах:

— датчики руху;

- датчики освітленості;
- датчики температури і вологості;
- датчики напруги та струму.



Рисунок 2.1 – Датчики руху, або PIR-сенсори (пасивні інфрачервоні сенсори)

Датчики руху, або PIR-сенсори (пасивні інфрачервоні сенсори) (див. рис. 2.1), відіграють важливу роль в оптимізації енергоспоживання – вони спрацьовують, коли виявляють рух, активуючи освітлення тільки за потреби, що дозволяє значно економити електроенергію, що особливо важливо для систем, які працюють від акумуляторів чи сонячних панелей. PIR-сенсори, вбудовані в лампи, наприклад, у коридорах або на вулицях, забезпечують освітлення лише тоді, коли це необхідно, тим самим – система не витрачає ресурси на освітлення в моменти, коли простір порожній, що продовжує термін роботи без підзарядки [27].

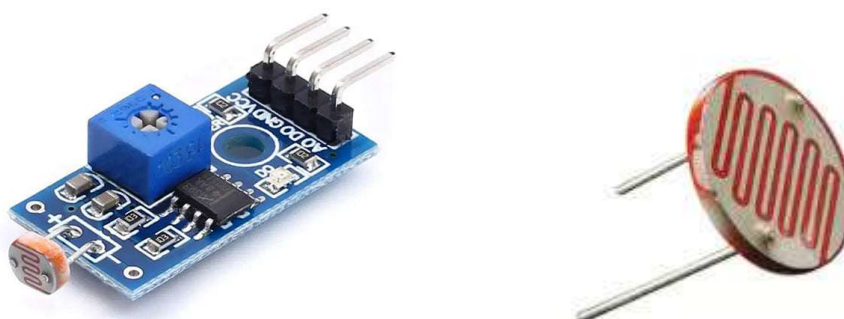


Рисунок 2.2 – Датчики освітленості, або LDR (Light Dependent Resistor) сенсори

Датчики світлозалежного резистора (LDR) (див. рис. 2.2), також відомі як датчики освітленості або фотодіоди, дають можливість системі автоматично налаштовувати рівень освітлення відповідно до природного освітлення довкола. У випадках, коли є перебої в електропостачанні і необхідно заощаджувати заряд акумулятора, LDR сенсори можуть знижувати яскравість або вимикати освітлення вдень. Наприклад, вдень ці сенсори можуть вимкнути світло повністю, якщо приміщення достатньо освітлене природним чином, або ж автоматично включати освітлення тільки в сутінках або в темних зонах, де світла недостатньо, що допомагає економити енергію, що критично важливо для тривалої автономної роботи системи [28].



Рисунок 2.3 – Датчики температури та вологості (Temperature and Humidity)

Датчики температури та вологості (див. рис. 2.3) – ще один важливий тип датчиків, які контролюють зовнішнє середовище і особливо корисні, коли компоненти системи, такі як батареї та контролери, перегріваються або працюють у суворих умовах. Наприклад, в умовах високої температури в літній період, коли акумулятори можуть перегріватися, ці сенсори можуть повідомляти про ризик і вживати заходів для запобігання перегріву, таких як припинення заряджання або активація системи охолодження, тим самим – підтримують стабільну роботу системи навіть у несприятливих кліматичних умовах [29].

Датчики напруги і струму (див. рис. 2.4) також є важливим компонентом для моніторингу енергоспоживання та стану системи. Вони забезпечують точне

вимірювання напруги та сили струму в реальному часі, що дозволяє відстежувати споживання енергії різними компонентами системи. Ці дані можуть використовуватися для оптимізації роботи системи, виявлення несправностей або перевантажень, а також для забезпечення безперебійного живлення, і такий датчик має високу точність і низьке енергоспоживання, що робить його ідеальним вибором для автономних систем, які працюють від акумуляторів.

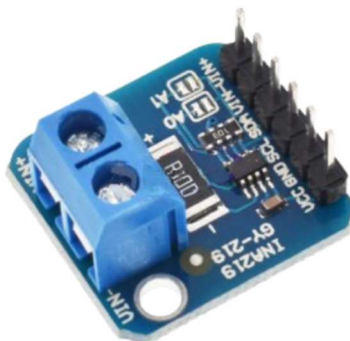


Рисунок 2.4 – Датчики напруги та струму (Voltage and Current)

Наприклад, цей сенсор може використовуватися для моніторингу стану зарядки акумуляторів, фіксуючи рівень напруги та струму, які надходять від сонячних панелей або міської мережі. У разі виявлення аномалій, система може автоматично перемикається на інше джерело живлення або надсилати аварійний сигнал до центру керування.

Контролери. Окрім датчиків, важливо розуміти, що вони забезпечують лише часткову автономність освітлювальної системи. Для того, щоб зробити таку систему більш сучасною, інтегрувати її в міське середовище, надати можливість віддаленого керування та забезпечити масштабування на великі території, необхідно використовувати не лише сенсори, але й контролери.

Контролери виступають своєрідним «мозком» системи, який обробляє сигнали від датчиків та приймає рішення про ввімкнення або вимкнення освітлення та забезпечує оптимальну роботу системи під час «блекаутів» або відключень електроенергії.

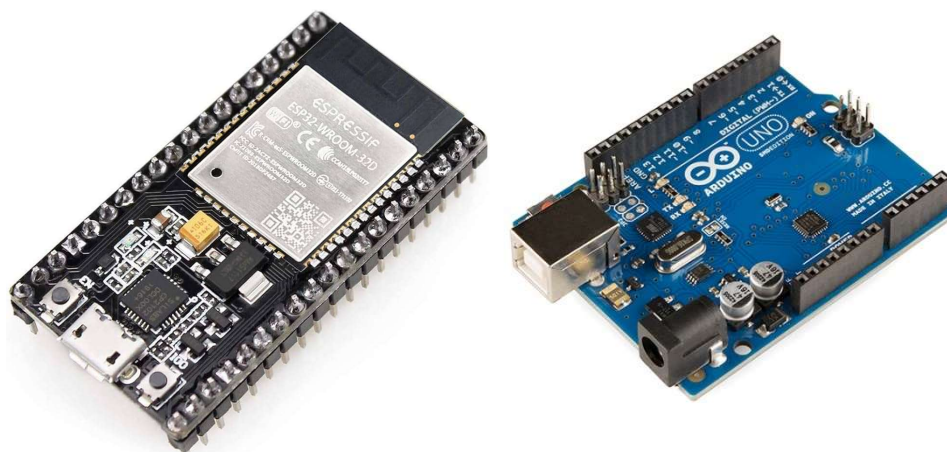


Рисунок 2.5 – Контролери ESP32 та Arduino

Серед найбільш ефективних контролерів, що здатні працювати при низькому енергоспоживанні, варто відзначити ESP32 та Arduino (див. рис. 2.5). Ці мікроконтролери є енергоощадними і можуть забезпечувати безперервну роботу освітлювальних систем навіть при обмеженій кількості електроенергії. Зокрема, ESP32 має вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth, що дозволяє підключати систему до інших пристроїв і здійснювати віддалене управління, що особливо корисно для автоматизованих сценаріїв, таких як динамічне регулювання яскравості або активація режиму сну при тривалій відсутності руху. Наприклад, у нічний час, коли відсутня активність, система може вимкнутися, що дозволяє економити заряд акумулятора [34].

Якщо ж потрібна більш складна обробка даних або інтеграція з іншими пристроями, можна використовувати мініатюрні ПК на базі Raspberry Pi – вони дозволяють виконувати більші обчислювальні задачі на локальному рівні, наприклад, обробляти дані від кількох датчиків одночасно, але Raspberry Pi – споживає значно більше електроенергії порівняно з мікроконтролерами ESP32 або Arduino (див. рис. 2.6) [30].



Рисунок 2.6 – Мініатюрний ПК на базі Raspberry Pi

Джерело безперебійного живлення. У разі переведення системи на резервне живлення це може швидко вичерпати заряд акумуляторів, що критично для освітлювальних систем, які повинні працювати в темну пору доби.

Для забезпечення повної автономності освітлювальної системи в разі перебоїв з електропостачанням, важливу роль відіграватимуть акумуляторні батареї. Основною технологією, яку ми використовуватимемо для живлення контролерів та інших компонентів, будуть літій-іонні (Li-ion) та літій-залізофосфатні акумулятори. Вони є одними з найбільш ефективних рішень завдяки своєму довгому життєвому циклу та високій кількості циклів заряд-розряд (приблизно 500-800 циклів для першої та 3500 і більше – для другої) – цього вистачить для довготривалої роботи в освітлювальній системі (див. рис. 2.7) [22, 23].



Рисунок 2.7 – Тестування та збірка власного блоку з акумуляторів

Живлення системи повинно бути інтегроване з міською електромережею, яка буде основним джерелом електроенергії [5]. Якщо в електромережі немає перебоїв, система працюватиме від неї, заряджаючи акумулятори. Але в разі відключень електрики, освітлювальна система має автоматично перемикатися на резервне живлення, зокрема від акумуляторів, що заряджаються за допомогою сонячних панелей, що дозволить такій системі зберігати працездатність навіть під час тривалих відключень електроенергії [6].

Модулі зв'язку. Для того, щоб система була справді «розумною», вона повинна не лише реагувати на зміни в середовищі (наприклад, на рух чи рівень освітлення), але й мати можливість дистанційного керування та моніторингу – до її складу необхідно включити не лише датчики, контролери та акумулятори, але й комунікаційні модулі, які забезпечать з'єднання між елементами системи. Такі модулі дозволять пристроям обмінюватися інформацією між собою, що, зокрема, може допомогти в масштабуванні системи на більші території.

Завдяки комунікаційному модулю система може поширювати свій сигнал на більшу територію, а також забезпечує дистанційне керування, що дозволяє здійснювати моніторинг системи в режимі реального часу та швидко реагувати на потенційні проблеми. Наприклад, якщо заряд акумуляторів буде на критичному рівні, система зможе передати інформацію про це, що дозволить вчасно вжити заходів для її підтримки. Завдяки такій інтеграції з віддаленим моніторингом можна не лише забезпечувати стабільну роботу системи, а й робити її більш енергоефективною та надійною в довготривалій перспективі.

Існує кілька типів безпроводних протоколів зв'язку, які можуть використовуватися для взаємодії між компонентами освітлювальних систем, що ми проєктуємо. Найбільш поширені та надійні серед них [31]:

- Wi-Fi: для невеликих приміщень; висока пропускна спроможність; низька енергоефективність.
- Zigbee: для середніх та великих приміщень; низька пропускна спроможність (до 250 Кб/с); висока енергоефективність.

— LoRa: для великих просторів (радіус 2 км і більше); низька пропускна спроможність (до 50 Кб/с); висока енергоефективність.

Кожен з цих протоколів має свої сильні та слабкі сторони, які потрібно враховувати при виборі рішення для конкретного середовища.

Протокол безпроводного зв'язку – Wi-Fi. Чудовим варіант для невеликих приміщень, таких як будинки чи офіси, де є постійне джерело електроенергії та дозволяє швидко та ефективно передавати дані між пристроями та мережею Інтернет, що робить його зручним для моніторингу та керування (див. рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Wi-Fi модуль та пристрої

Однак, він має кілька суттєвих недоліків, що обмежують його використання для автономних освітлювальних систем [31]:

1) Високе енергоспоживання: Wi-Fi модулі споживають значно більше енергії, ніж ZigBee та LoRa, що робить їх менш ефективними для пристроїв з автономним живленням, таких як сенсори та розумні домашні гаджети.

2) Обмежений радіус дії: стандартний діапазон дії Wi-Fi становить приблизно 30-50 метрів у приміщенні, що обмежує його застосування у великих просторах або у віддалених локаціях без повторювачів.

3) Перешкоди та перевантаження мережі: Wi-Fi працює на популярних частотах 2.4 та 5 ГГц, де працюють також інші безпроводні пристрої, що створює загрозу для швидкості та стабільності з'єднання через перешкоди.

4) Безпека та загрози хакерських атак: через широке поширення Wi-Fi існує багато відомих способів зламу, тому для забезпечення безпеки потрібні додаткові заходи, такі як шифрування та постійне оновлення безпеки.

Протокол безпроводного зв'язку – Zigbee. Набагато більш енергоефективний протокол порівняно з Wi-Fi, що робить його ідеальним для освітлювальних систем, які повинні функціонувати автономно протягом тривалого часу (див. рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – Zigbee модуль та пристрої

Zigbee підтримує роботу в мережах, де є велика кількість пристроїв, розташованих на значних відстанях, і споживає мінімальну кількість електроенергії, що дозволяє системам працювати без підключення до електромережі або Інтернету, що особливо важливо в умовах, коли електропостачання може бути перервано.

Пристрої Zigbee можуть функціонувати як повторювачі сигналу, створюючи так звану «зіркоподібну» топологію мережі, яка забезпечує стабільний зв'язок між системами на великих територіях. Незважаючи на те, Zigbee має ряд недоліків [31]:

1) Обмежений радіус дії: радіус дії ZigBee зазвичай становить 10-20 метрів у приміщенні без додаткових ретрансляторів, що може бути недостатньо для великих об'єктів або будівель з товстими стінами.

2) Обмежена пропускна здатність: ZigBee має низьку швидкість передачі даних (до 250 Кбіт/с), що робить його непридатним для передачі великої кількості даних, наприклад, відео чи великих файлів.

3) Сумісність пристроїв: пристрої різних виробників не завжди можуть працювати разом, навіть якщо вони підтримують стандарт ZigBee, що може вимагати використання спеціальних хабів або шлюзів для об'єднання всіх пристроїв у єдину мережу.

4) Уразливість до перешкод: ZigBee працює на частоті 2.4 ГГц, де працюють також Wi-Fi, Bluetooth, мікрохвильові печі та інші пристрої, що може спричиняти перешкоди та зниження якості зв'язку.

Протокол безпроводного зв'язку – LoRa. Протокол зв'язку, створений спеціально для роботи на великих відстанях і у віддалених місцях, де доступ до Інтернету може бути обмеженим або відсутнім (див. рис. 2.10).



Рисунок 2.10 – LoRa модуль та пристрої

LoRa дозволяє забезпечити зв'язок між освітлювальними системами на відстанях до кількох кілометрів, при цьому споживаючи мінімальну кількість електроенергії – це робить LoRa ідеальним для використання у парках, на вулицях або інших великих просторах, де потрібно забезпечити автономне освітлення протягом тривалого часу без доступу до мережі електропостачання.

Швидкість передачі даних у LoRa досить низька (до 50 Кбіт/с), але цього цілком достатньо для освітлювальних систем, які передають невеликі обсяги інформації. LoRa працює на нижчих частотах порівняно з Wi-Fi та Zigbee, що забезпечує кращу проникність сигналу та можливість зв'язку на більших відстанях.

До недоліків LoRa можна віднести [31]:

1) Низька пропускна здатність: LoRa створений для передавання невеликих обсягів інформації із швидкістю до кількох кілобіт на секунду, що обмежує його використання лише для передачі коротких повідомлень, таких як дані сенсорів.

2) Затримка передачі даних: LoRa використовує повільні швидкості передачі для досягнення великого діапазону дії, що може призвести до значної затримки в отриманні інформації, особливо в мережах із багатьма пристроями.

3) Відсутність стандартної мережевої інфраструктури: LoRa вимагає використання спеціальних шлюзів і серверів, що ускладнює її інтеграцію з традиційною мережею Інтернет, особливо у віддалених місцях.

4) Перешкоди від інших пристроїв та мереж LoRa: LoRa працює в незахищеному діапазоні ISM, де можуть функціонувати також інші пристрої, що створює потенційні перешкоди та перевантаження мережі при значній кількості підключень у певному районі.

Порівнюючи ці три типи протоколів [31], можна зробити висновок, що Wi-Fi найменш підходить для автономних освітлювальних систем через його високе енергоспоживання і необхідність використання додаткового обладнання. Zigbee є більш енергоефективним рішенням, яке може працювати автономно та надає стабільний зв'язок між пристроями в міських умовах. Проте, якщо мова йде про дуже великі простори або віддалені райони, LoRa є найкращим вибором, оскільки цей протокол забезпечує надзвичайно низьке енергоспоживання та можливість зв'язку на відстані до кількох кілометрів. (Додаток А)

Контролери заряду та сонячні панелі. Вони є досить важливими для автономних освітлювальних систем, що працюють за рахунок акумуляторів під час відключень електроенергії (див.рис. 2.11).

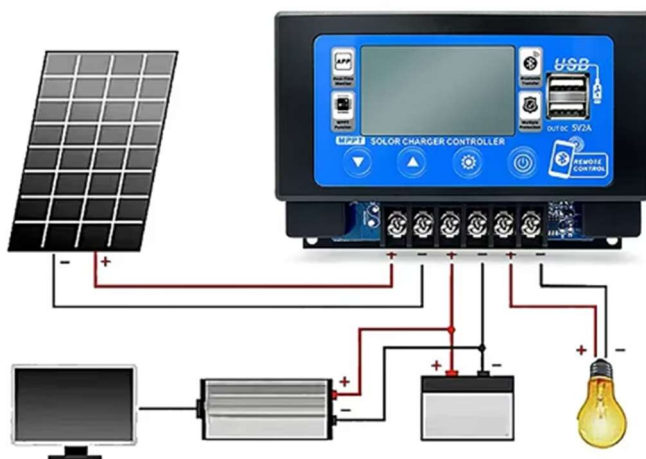


Рисунок 2.11 – Контролер заряду та сонячна панель

Сонячні панелі у цьому контексті служать як альтернативне джерело живлення, дозволяючи акумуляторам заряджатися від сонячної енергії. Щоб уникнути пошкодження акумуляторів, необхідно використовувати контролери заряду, які слідкують за тим, щоб напруга не перевищувала 4,2 В і не знижувалась нижче 2,55 В – ці межі є стандартом для літій-іонних (Li-ion) та літій-полімерних (Li-Po) акумуляторів, що дозволяє їм оптимально працювати протягом численних циклів заряду та розряду, не втрачаючи своєї ефективності [14, 21, 22, 23].

Джерелом світла для штучного освітлення є світлодіодне освітлення. Окрім акумуляторів та сонячних батарей, для ефективних систем освітлення потрібні також світлодіодні технології: Світлодіодні лампи та світлодіодні стрічки мають низьке енергоспоживання і забезпечують достатню освітленість. (див. рис. 2.12) [3].



Рисунок 2.12 – Світлодіодне освітлювання

Правильний вибір світлодіодів є важливим для забезпечення ефективної роботи системи, оскільки ці компоненти повинні витримувати тривалу роботу без надмірного енергоспоживання. Якщо ж обрані LED-стрічки будуть споживати більше енергії, ніж виробляється сонячними панелями, то вони швидко розряджатимуть акумулятори, особливо у вечірній час.

Щоб уникнути надвитрат енергії, можна використовувати датчики, які допомагатимуть контролювати інтенсивність освітлення в залежності від потреби, що дозволить ефективно регулювати освітлення та продовжити час роботи системи, зберігаючи енергію. Датчики можуть автоматично знижувати яскравість освітлення, коли повне освітлення не є необхідним, що значно підвищує загальну енергоефективність системи.

Оскільки йдеться про велику кількість освітлювальних систем, важливо обирати LED-стрічки з відповідними характеристиками, щоб забезпечити стабільне та достатнє освітлення, а також економне енергоспоживання. У довгостроковій перспективі світлодіодні лампи набагато ефективніші та довговічніші, ніж звичайні лампи розжарювання та люмінесцентні лампи [2, 3, 4].

2.2 Архітектура освітлювальної системи

Якщо говорити про архітектуру системи освітлення на основі Інтернету речей (IoT), розроблену з урахуванням можливих відключень електроенергії, то така система повинна бути багаторівневою та здатною забезпечувати безперервну роботу навіть при відсутності зовнішнього електропостачання.

Основою такої системи є акумулятори, які забезпечують живлення у випадку зникнення зовнішньої електроенергії. Окрім цього, архітектура повинна включати фізичні компоненти, що забезпечують передачу даних між елементами системи, а також хмарні платформи для моніторингу та управління.

Головна мета такої архітектури – забезпечення автономності, мінімізації енергоспоживання та підвищенні надійності роботи системи, іншими словами – освітлювальна система повинна функціонувати безперервно, адаптуючись до умов, коли зовнішня електромережа недоступна.

Розглядаючи основні компоненти архітектури, варто звернути увагу на сенсори, контролери та інші пристрої, які є ключовими для цієї системи. Їх роль полягає не лише в тому, щоб бути обраними на основі енергоефективності чи надійності, а й у тому, як вони взаємодіють та забезпечують роботу системи.

Датчики (сенсори). Розглядаючи основні компоненти архітектури, перш за все, звернемо увагу на сенсори та контролери, які є важливими елементами для забезпечення збору даних і управління системою освітлення. Сенсори відіграють ключову роль у моніторингу навколишнього середовища, а контролери — в обробці цих даних і керуванні освітленням (див. рис. 2.1, 2.2, 2.3) [32].

Сенсори виконують функцію збору даних про стан освітлення, рівень енергоспоживання та зовнішні умови (наприклад, освітленість, наявність руху тощо), після чого ці дані передаються на контролери, які обробляють інформацію та приймають рішення щодо коригування параметрів роботи системи.

Починаючи з датчиків руху та освітленості – ці датчики або сенсори часто називають PIR-сенсорами (сенсорами інфрачервоного випромінювання) для

фіксації руху або LDR-сенсорами для визначення рівня освітленості (датчиками освітленості). Вони функціонують як «очі» системи освітлення, постійно збираючи інформацію про зміни у навколишньому середовищі. Наприклад, датчик руху реєструє наявність об'єкта в певній зоні і передає сигнал на контролер для активації освітлення, що забезпечує автоматичне ввімкнення світла лише тоді, коли це необхідно (див. рис. 2.1) [32].

Датчик освітленості, в свою чергу, регулює рівень штучного освітлення в залежності від наявності природного світла – це є важливим для енергоефективності, оскільки в умовах достатнього денного світла інтенсивність штучного освітлення зменшується. Така логіка схожа на функціонал авторежиму яскравості в смартфонах. Наприклад, якщо смартфон виявляє, що користувач перебуває на вулиці під яскравим сонцем, він автоматично підвищує яскравість екрану для комфортного перегляду. Якщо ж смартфон знаходиться у приміщенні, він знижує яскравість, економлячи енергію (див. рис. 2.2) [32].

«Міски» системи – контролери. Контролери відіграють вирішальну роль у забезпеченні оптимального функціонування освітлення, адаптуючи його роботу в реальному часі залежно від потреб і зовнішніх умов. Вони можуть змінювати інтенсивність світла, вмикати або вимикати окремі елементи системи для економії енергії або реагувати на сигнали з сенсорів про зміну умов .

Arduino або ESP32 (див. рис. 2.5) [33], є основними обчислювальними елементами системи – у випадку проектування освітлювальної системи, ймовірніше за все, буде використовуватися Arduino через його доступність і легкість інтеграції.

Принцип їх роботи: контролери отримують сигнали від сенсорів і приймають рішення про ввімкнення чи вимкнення освітлення. Наприклад, коли PIR-сенсор фіксує рух, контролер активує освітлення. Якщо руху немає протягом певного часу, контролер вимикає світло, що дозволяє економити енергію [32].

Ці контролери здатні працювати в автономному режимі і мають низьке енергоспоживання, що робить їх ідеальними для систем, які живляться від акумуляторів. Завдяки такій ефективності, система може функціонувати протягом

тривалого часу без необхідності постійного підключення до зовнішнього електропостачання [2, 33].

Протоколи передачі даних. Розглядаючи протоколи передачі даних для освітлювальних систем, то надійність обміну інформацією між компонентами є критично важливою для їхньої ефективної роботи.

В залежності від масштабу системи та умов експлуатації, можуть використовуватися різні технології зв'язку, у нашому випадку – вирішили використовувати безпроводний протокол LoRa, оскільки він ідеально підходить для систем, які потребують передачі даних на великі відстані з мінімальним енергоспоживанням. Однак, варто також розглянути інші можливі протоколи, щоб зрозуміти, чому LoRa є найбільш оптимальним рішенням для нашого проєкту [31].

Для локальних мереж найчастіше використовують технології Wi-Fi або ZigBee, особливо в домашніх або офісних середовищах, де пристрої розташовані на невеликій відстані – Wi-Fi добре підходить для підключення до хмарних платформ, забезпечуючи віддалений моніторинг та управління, але він споживає більше енергії [31].

З іншого боку, ZigBee є більш енергоефективним і чудово підходить для побудови розподілених мереж з великою кількістю пристроїв. Однією з основних переваг ZigBee є здатність створювати Mesh-мережі, де кожен пристрій може передавати дані через інші вузли, що дозволяє ефективно передавати інформацію на короткі відстані між пристроями, що робить ZigBee чудовим варіантом для невеликих, але щільно населених систем. Однак для глобальних мереж, особливо для систем освітлення, що охоплюють великі відкриті простори, такі як парки чи вуличне освітлення, краще використовувати безпроводні протоколи, такі як LoRa або мобільні технології на кшталт 4G чи 5G. У таких випадках система може використовувати гібридний підхід: поєднувати LoRa для передачі даних на великі відстані з мінімальними витратами енергії, а також мобільні мережі для швидкого обміну інформацією в реальному часі через 4G або 5G модеми. Дане рішення дозволяє створювати надійні системи з високим рівнем автономності, що працюють навіть у віддалених або слабо покритих інфраструктурою зонах.

Використання LoRa разом з мобільними технологіями дозволяє системі бути більш гнучкою і ефективною, оскільки LoRa забезпечує довготривалу автономну роботу, а 4G/5G забезпечує швидкий доступ до даних, коли це необхідно [31].

Локальний центр обробки. Одним із ключових компонентів архітектури системи освітлення є локальний сервер або шлюз. Даний елемент є досить важливим для забезпечення безперебійної роботи системи в умовах можливих відключень електроенергії. Локальний сервер або шлюз може об'єднувати всі мережі й пристрої, забезпечуючи централізоване управління. Наприклад, сервер або шлюз може виконувати такі функції, як збір даних від сенсорів і контролерів, обробка команд та забезпечення зв'язку з хмарною платформою.

У якості локального шлюзу можна використовувати, наприклад, Raspberry Pi або спеціалізовані пристрої. Такий шлюз здатен збирати дані з усіх сенсорів і передавати їх до хмарної платформи, якщо є доступ до Інтернету, або керувати пристроями на місцевому рівні для забезпечення автономної роботи системи. Якщо доступ до Інтернету відсутній, шлюз може зберігати дані локально і забезпечувати обмежене управління пристроями, що дозволить системі функціонувати навіть за відсутності підключення до Інтернету, що особливо важливо в умовах тривалих відключень електроенергії [10, 30, 32].

Такі локальні рішення, як Raspberry Pi (див. рис. 2.5) [33], найкраще підходять для менших систем освітлення. Якщо ж система освітлення має значні масштаби, наприклад, протяжність на кілька кілометрів (як у випадку вуличного освітлення або великих парків), один шлюз може бути перевантажений через обмежені ресурси. У таких випадках хмарні платформи стають необхідними для моніторингу, аналізу даних і гнучкого управління системою.

Хмарні платформи. Хмарна платформа відіграє ключову роль у моніторингу та управлінні всією системою в режимі реального часу, дозволяючи операторам віддалено контролювати ефективність освітлення, відстежувати стан компонентів, ідентифікувати проблеми на початкових етапах і застосовувати необхідні коригувальні дії. Хмарні сервіси, такі як Amazon AWS, Microsoft Azure, Google

Cloud (див. рис. 2.13) дозволяють зберігати і аналізувати дані, що надходять від сенсорів та контролерів, оптимізуючи роботу системи [5, 6, 34].



Рисунок 2.13 – Хмарні сервіси для роботи з Інтернетом речей (IoT)

Під час відключень електроенергії система повинна працювати автономно, зберігаючи дані на локальному сервері або шлюзі – як тільки доступ до Інтернету відновиться, ці дані будуть синхронізовані з хмарною платформою. Використання хмарних платформ також дозволяє проводити аналіз ефективності роботи освітлювальної системи, відслідковувати споживання енергії, виявляти проблеми та автоматично налаштовувати параметри освітлення для підвищення енергоефективності, до того ж, застосування алгоритмів машинного навчання допоможе прогнозувати потреби в освітленні та оптимізувати роботу системи на основі аналізу поведінки користувачів [5, 6, 34].

Резервне джерело живлення. Іншим важливим компонентом архітектури є «буфер» для зберігання енергії – для забезпечення безперервної роботи системи під час відключень електроенергії необхідно інтегрувати надійні акумуляторні системи, що здатні заряджатися від сонячних панелей чи інших джерел живлення, що дозволить системі функціонувати навіть уночі та під час тривалих відключень світла (див. рис. 2.6) [22, 23].

Збірка з акумуляторів повинна мати достатню ємність для забезпечення автономної роботи системи на кілька днів, особливо в умовах частих або тривалих відключень електроенергії. Важливо враховувати, що сонячні панелі повинні бути достатньо потужними для повної зарядки акумуляторів протягом дня, аби забезпечити безперебійну роботу вночі, до того ж, акумулятори можуть заряджатися не лише від сонячних батарей, а й від міської електромережі, що

забезпечує додаткову надійність у випадках, коли сонячної енергії буде недостатньо.

Керування системою за допомогою ПЗ. Останнім важливим компонентом архітектури є інтерфейс користувача, що забезпечує управління системою. Для невеликих систем, таких як освітлення парку чи будівлі, достатньо використовувати мобільні додатки на кшталт Smart Life (Tuuya) (див. рис. 2.14).



Рисунок 2.14 – Мобільний додаток Smart Life (Tuuya) для керування пристроями Інтернету речей (IoT)

Вони (додатки) дозволяють зручно контролювати роботу системи з мобільного пристрою. Проте для великих систем, наприклад, для вуличного освітлення в межах цілого міста, більш доцільно використовувати веб-додатки, які забезпечують централізоване управління та моніторинг. Веб-додаток на кшталт Home Assistant (див. рис. 2.15) дозволяє отримувати сповіщення про несправності, аналізувати дані сенсорів і оптимізувати роботу освітлення [35, 36].



Рисунок 2.15 – Веб- / мобільний додаток Home Assistant для керування пристроями Інтернету речей (IoT)

2.3 Програмне забезпечення для моніторингу та управління

Програмне забезпечення для моніторингу та управління є ключовим елементом будь-якої системи, зокрема, систем освітлення, особливо в умовах можливих відключень електроенергії. Воно дозволяє здійснювати віддалений контроль, автоматизувати процеси та оптимізувати енергоспоживання, що забезпечує автономну роботу системи. Важливо розглянути компоненти такого програмного забезпечення, яке буде керувати всіма процесами, приймаючи дані від вбудованих у систему пристроїв, зокрема освітлювальних елементів.

Моніторинг та візуалізація даних. Одним із основних компонентів програмного забезпечення є система моніторингу та візуалізації даних. Для забезпечення ефективної роботи системи освітлення в разі відключення електроенергії потрібен доступ до даних про стан системи в реальному часі.

Програмне забезпечення для моніторингу зазвичай включає такі функції [35]:

- відстеження стану компонентів системи;
- візуалізація даних;
- оповіщення про несправності.

Відстеження стану компонентів системи. Програма дозволяє моніторити стан всіх елементів, таких як датчики, контролери, акумулятори, сонячні панелі та освітлювальні пристрої. Користувачі можуть бачити статус кожного з цих пристроїв, його активність, заряд батареї, поточне навантаження на систему, що дає змогу приймати своєчасні рішення щодо оптимізації роботи системи або необхідності втручання.

Візуалізація даних. Програмне забезпечення надає зручні інтерфейси для користувачів у вигляді вебдодатків або мобільних додатків. Візуальні панелі, такі як дашборди з графіками, таблицями та інтерактивними картами, дозволяють бачити в реальному часі рівень освітленості, споживання енергії та стан акумуляторів, що нагадує функціонал таких систем, як Home Assistant або openHAB, які інтегрують дані від сенсорів та дозволяють користувачам взаємодіяти з різними частинами системи.

Оповіщення про несправності. У разі виявлення перевищення допустимих параметрів, збоїв у зв'язку або проблем з живленням, програмне забезпечення може надсилати сповіщення через мобільні додатки, електронну пошту або СМС, що дозволить користувачам швидко реагувати на проблеми та мінімізувати їх наслідки під час відключень електроенергії.

Автоматизація. Окрім моніторингу та візуалізації даних, автоматизація є ще одним критично важливим компонентом програмного забезпечення для освітлювальних систем.

Вона дозволяє автоматизувати роботу системи на основі даних, які надходять від сенсорів і контролерів, що особливо актуально під час відключень електроенергії, коли мінімізація втручання людини стає вирішальним фактором для забезпечення безперебійної роботи системи та економії енергії.

Автоматизація зазвичай включає такі функції [36]:

- правила та сценарії автоматизації;
- таймери та графіки роботи;
- інтеграція з іншими системами.

Правила та сценарії автоматизації. Однією з ключових функцій програмного забезпечення є можливість створення сценаріїв автоматизації, які налаштовуються за допомогою веб-застосунку або мобільного додатку. Наприклад, система може автоматично вмикати освітлення, якщо рівень освітленості знижується до певного порогу, зафіксованого сенсорами LDR (світлові датчики).

У випадку, коли сенсори руху виявляють активність у певній зоні, система може вмикати світильники лише в цьому секторі, а після певного часу без руху — вимикати їх, і це особливо корисно для пішоходів, які проходять повз освітлену територію. Система вимірює час, необхідний для їх пересування, і після цього автоматично вимикає освітлення, на подібні роботи світлофорів, коли пішохід отримує певний час для переходу дороги.

Такий підхід дозволяє не лише зекономити енергію, а й забезпечити ефективне управління системою в умовах обмеженого доступу до ресурсів, таких як стабільне електроживлення або Інтернет-з'єднання. Навіть за відсутності можливості віддаленого управління, система продовжує функціонувати автономно.

Таймери та графіки роботи. Крім сценаріїв автоматизації, програмне забезпечення дозволяє налаштовувати графіки роботи освітлення. Наприклад, освітлення може вмикатися і вимикатися за часом доби, прогнозом погоди або іншими факторами. Наприклад, світло може автоматично вмикатися після заходу сонця і вимикатися під час світанку. Також можна встановлювати індивідуальні графіки для різних зон, щоб зменшити зайве енергоспоживання.

Інтеграція з іншими системами. Програмне забезпечення також дозволяє інтегрувати систему освітлення з іншими IoT-системами, такими як системи безпеки, контролю доступу або «розумного будинку», що надає можливість створювати складні сценарії автоматизації, де освітлення реагує на події в інших системах, наприклад, на сигналізацію або виклики аварійних служб. Така інтеграція дозволяє будувати комплексні рішення для ефективного управління освітленням і підвищення загальної безпеки.

Аналітика і прогнозування. Окрім автоматизації, моніторингу та візуалізації даних, ще одним важливим компонентом програмного забезпечення є аналітика та прогнозування, що дозволяє системі освітлення, яку ми проектуємо, не лише збирати та аналізувати дані, а й робити прогнози, що допоможуть оптимізувати її роботу.

Аналітика і прогнозування зазвичай включає такі функції [36]:

- збір та аналіз даних;
- використання алгоритмів машинного навчання;
- оптимізація енергоспоживання.

Збір та аналіз даних. Програмне забезпечення здатне збирати інформацію про роботу системи за тривалий період і використовувати ці дані для аналізу ефективності. Наприклад, можна відстежити, в яких умовах система споживає найбільше енергії, і внести відповідні коригування для зниження навантаження. Також аналіз дозволяє виявити зони з найбільшим навантаженням або частими збоями, що допомагає оптимізувати роботу освітлювальної системи в майбутньому.

Використання алгоритмів машинного навчання. Алгоритми машинного навчання можуть бути задіяні для більш складних прогнозів. Наприклад, вони можуть прогнозувати потреби в освітленні на основі даних про минулі відключення електроенергії або поведінки користувачів та, в свою чергу, дозволить завчасно розподілити енергетичні ресурси для збереження заряду акумуляторів і налаштувати рівень освітленості відповідно до майбутніх умов.

Програмне забезпечення може, наприклад, прогнозувати пікові періоди споживання енергії та автоматично налаштовувати роботу системи, що забезпечить оптимізацію енергоспоживання, особливо в умовах обмеженого ресурсу, коли система використовує акумуляторне живлення від батарей або сонячних панелей.

Оптимізація енергоспоживання. Однією з важливих функцій аналітики є можливість оптимізації енергоспоживання. Програмне забезпечення дозволяє автоматично регулювати яскравість освітлення або вимикати певні зони для збереження енергії.

Під час тривалих відключень електроенергії система може переходити в режим економії, при якому освітлення вмикається тільки в стратегічно важливих зонах, надасть змогу знизити навантаження на акумулятори та забезпечити роботу системи якомога довше. Наприклад, на довгій дорозі з кількома десятками освітлювальних стовпів можна запрограмувати, щоб працювала лише частина з них, а інші залишалися вимкненими. Якщо ж енергетичний ресурс буде виснажено, частина вимкнутих стовпів може автоматично увімкнутися, забезпечуючи чергування освітлення.

Інтерфейс користувача. Для зручності управління системою програмне забезпечення має включати інтуїтивний інтерфейс, доступний через веб-застосунок або мобільний додаток. Користувачі повинні мати можливість налаштовувати автоматизацію, переглядати історію роботи системи та отримувати повідомлення про несправності з будь-якого пристрою, підключеного до Інтернету.

Інтерактивні «дашборди» (див. рис. 2.15) в інтерфейсі надають користувачам інформацію про поточне енергоспоживання, стан акумуляторів, активні сценарії автоматизації та інші показники, що дозволить швидко реагувати на зміни та вносити коригування для забезпечення ефективної роботи системи.

2.4 Алгоритми управління та передачі даних в автономній системі

Для ефективного функціонування сучасних освітлених систем необхідно створити спеціальні алгоритми, які визначатимуть послідовність дій для забезпечення їхньої роботи, що дозволить системам не лише виконувати свої функції, але й значно покращувати існуючі можливості. Наразі багато подібних систем працюють на базі простих компонентів, таких як контролери, або ж мають обмежену функціональність через відсутність складніших обчислювальних механізмів. Більшість із них не має "інтелекту", що ускладнює їхню адаптивність і знижує ефективність роботи.

Якщо підійти до питання проектування з більшою увагою, можна створити дійсно автономну освітлену систему. Така система матиме підвищену адаптивність, знижене споживання енергії, а також триваліший термін служби компонентів. Завдяки цьому вдасться оптимізувати використання ресурсів і забезпечити стабільність роботи. Для досягнення цих цілей потрібно створити алгоритми, які керуватимуть кожним елементом системи:

- алгоритм автоматичного освітлення;
- алгоритм заряду/розряду акумулятора;
- алгоритм передачі даних;
- алгоритм управління інвертором;
- алгоритм енергозбереження;

Наявні системи здебільшого є надто спрощеними та не відповідають сучасним вимогам. Вони неефективно використовують доступні ресурси, наприклад, неекономно витрачають енергію батарей, або ж їхні механізми освітлення не оптимізовані. Такі недоліки призводять до того, що їхня довговічність та надійність залишають бажати кращого. Крім того, ці системи здебільшого не здатні взаємодіяти між собою, що обмежує їхню інтеграцію в більші централізовані інфраструктури.

Система, яку планується розробити, матиме можливість взаємодіяти з іншими системами, що дозволить централізовано керувати ними з єдиного пункту управління, що забезпечить не лише глобальну координацію, але й значно покращить ефективність усієї інфраструктури.

Алгоритм автоматичного освітлення. Алгоритм автоматичного освітлення передбачає використання кількох датчиків для ефективного управління освітленням залежно від зовнішніх умов. Основними датчиками є HC-SR501 для виявлення руху, BH1750 для вимірювання рівня освітленості. Система працює так, що коли датчик руху реєструє активність поруч із системою, освітлення вмикається на короткий проміжок часу, наприклад, на одну-дві хвилини, щоб забезпечити необхідне освітлення і водночас зекономити електроенергію у випадках, коли поблизу нікого немає (див. рис. 2.16).

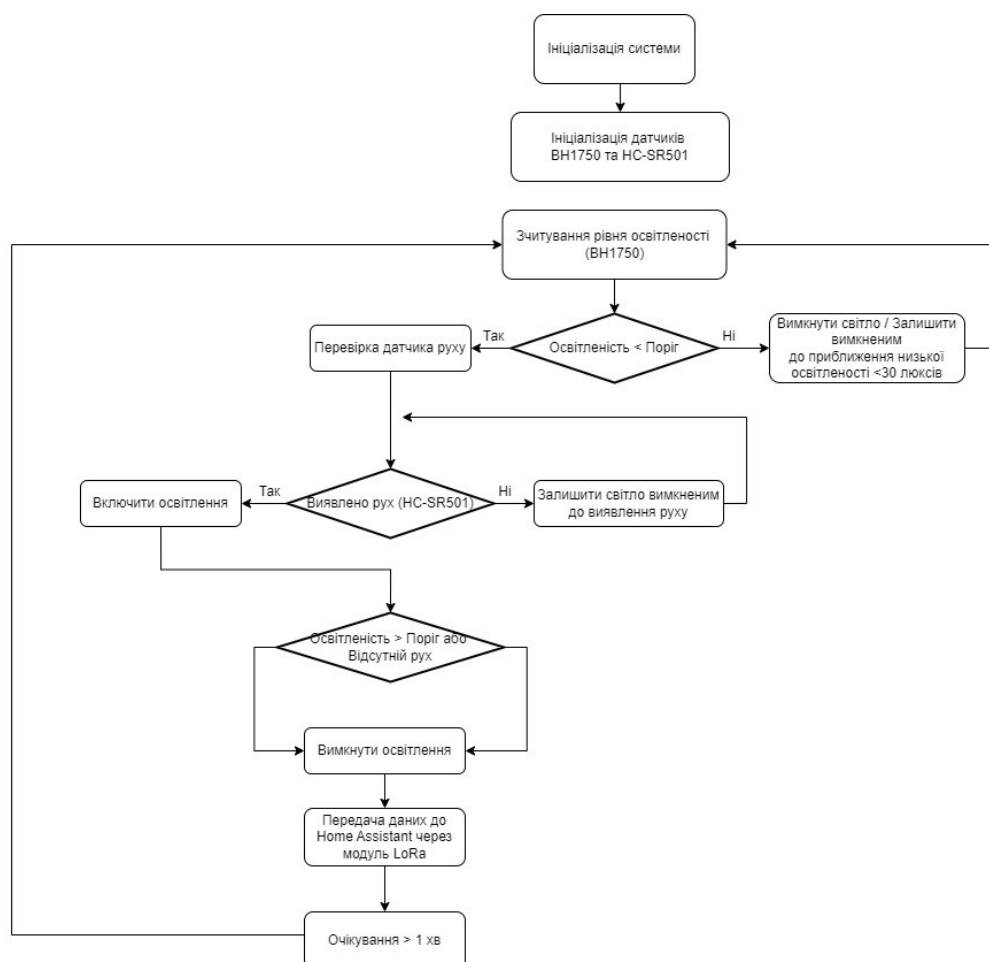


Рисунок 2.16 – Алгоритм автоматичного освітлення на основі датчиків руху HC-SR501 та освітлення BH1750

У вечірній або нічний час система реагує на сигнали датчика руху, забезпечуючи освітлення тільки за потреби. Крім цього, датчик освітленості визначає рівень природного світла, наприклад, якщо на вулиці вже світає і рівень освітленості досягає 30 люксів або більше, система переходить у денний режим. У такому режимі освітлення вимикається, а система може займатися іншими завданнями, наприклад, заряджати акумулятори, якщо система працює автономно від сонячної енергії, що дозволяє ефективно використовувати енергоресурси, уникаючи непотрібного споживання вдень.

Алгоритм заряду/розряду акумулятора. Алгоритм заряду і розряду акумулятора є одним із найважливіших компонентів автономної системи, адже акумулятори мають обмежений ресурс, і правильне управління зарядом може суттєво продовжити їх термін служби (див. рис. 2.17).

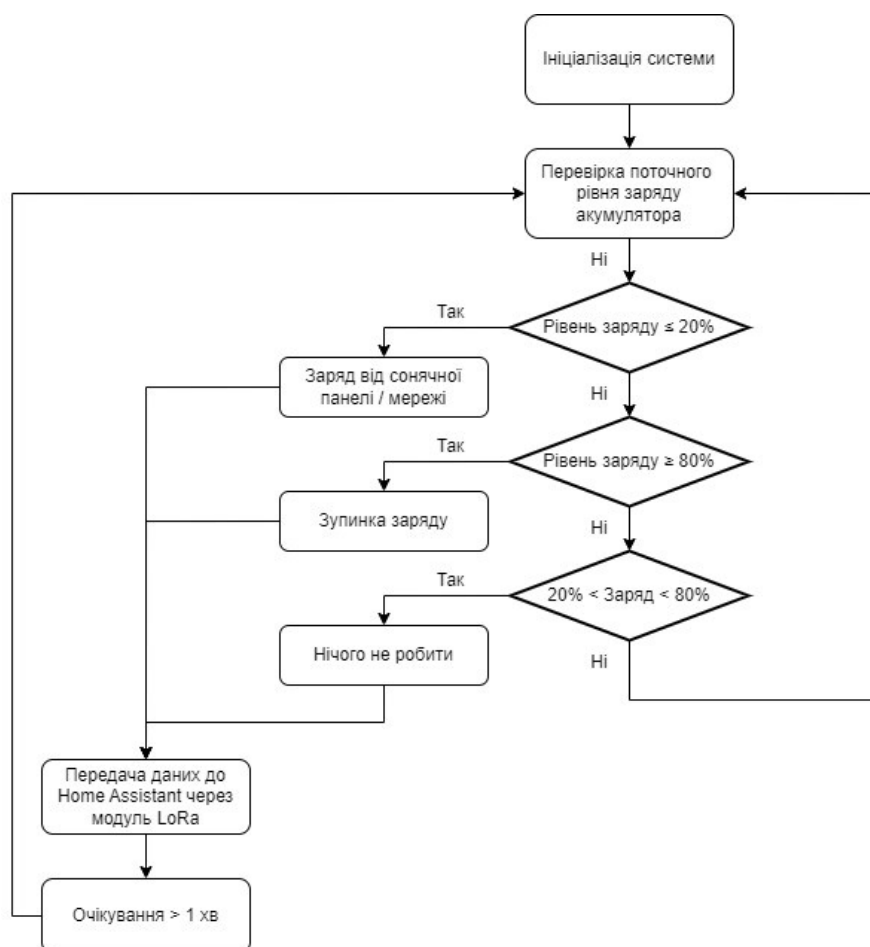


Рисунок 2.17 – Алгоритм заряду/розряду акумулятора у форматі:

$20\% < \text{Доступний заряд} < 80\%$

Для літій-залізо-фосфатних акумуляторів, ресурс яких складає понад 3000 циклів заряду-розряду, необхідно забезпечити оптимальні умови роботи, особливо для систем, які плануються для тривалої експлуатації без технічного обслуговування, наприклад, на 5–10 років і більше. Щоб зберегти ємність акумулятора на рівні, що зменшиться максимум на 20% за десятиліття, використовується алгоритм, який підтримує рівень заряду в межах від 20% до 80%.

Такий підхід гарантує, що акумулятор не буде перевантажуватись надмірним зарядом або розрядом, що значно збільшує його ресурс. Хоча освітлена система при цьому може працювати трохи менш інтенсивно, загальний термін її експлуатації значно зростає, знижуючи ризик необхідності заміни компонентів упродовж тривалого періоду.

Алгоритм роботи має кілька ключових етапів. По-перше, система постійно відстежує рівень напруги на акумуляторі за допомогою вбудованого в контролер MPPT (Maximum Power Point Tracking) датчика, який регулює заряд. Зарядка починається, якщо рівень заряду опускається нижче 80%. Енергія для цього береться переважно від сонячних панелей. У разі недостатнього виробітку, наприклад, за хмарної погоди або вночі, система автоматично підключає зарядку від мережі через інвертор.

Розрядка регулюється таким чином, що при зниженні рівня заряду до 20% система пріоритизує живлення освітлення від інших джерел, таких як сонячні панелі або мережа, мінімізуючи використання енергії акумулятора. Якщо рівень заряду падає до аварійного значення нижче 10%, система автоматично відключає непотрібні споживачі, щоб запобігти пошкодженню акумулятора.

Такий алгоритм також враховує аварійні ситуації, дозволяючи зберегти працездатність системи навіть за критичних умов. У результаті забезпечується стабільна робота освітлення, оптимальне використання енергоресурсів і довговічність акумуляторів, що є ключовими вимогами для автономних систем тривалого використання.

Алгоритм передачі даних. Алгоритм передачі даних є ключовим елементом, який дозволяє системі функціонувати ефективно, забезпечуючи передачу інформації на віддалені сервери для централізованого керування. Передача даних здійснюється за допомогою модуля LoRa, який забезпечує зв'язок на відстань до 2 км і більше, залежно від місцевості. У нашому випадку, враховуючи розташування системи в парку, реальна дальність зв'язку становить приблизно 2 км (див. рис. 2.18).

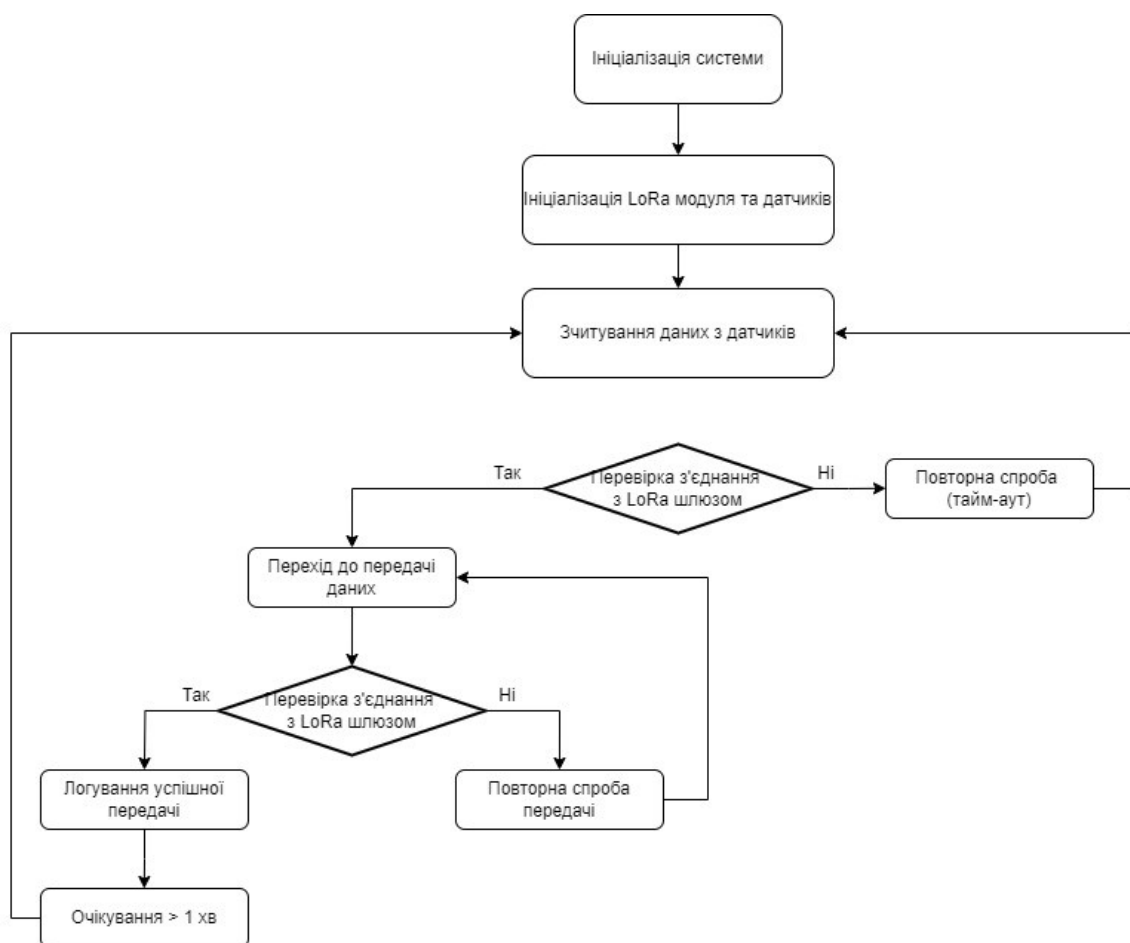


Рисунок 2.18 – Алгоритм передачі даних від LoRa модуля до шлюзу LoRa

Мета алгоритму — передача параметрів системи, таких як стан акумулятора, рівень освітлення, стан датчиків, аварійні сигнали, на централізований вузол. Цей вузол може бути реалізований на базі енергоефективних рішень, таких як Raspberry

Pi, або на старих комп'ютерах чи серверах. Дані можуть зберігатися та оброблятися за допомогою платформ типу OpenHAB, Home Assistant тощо.

Алгоритм передачі даних включає кілька основних етапів. Перший етап — це збір даних. Контролер, наприклад Arduino Mega 2560, отримує інформацію від усіх підключених датчиків і формує з неї пакет даних. До такого пакета можуть входити показники рівня заряду акумулятора, активності датчиків, аварійні повідомлення тощо.

На другому етапі сформований пакет передається через модуль LoRa до шлюзу LoRa, який підключений до централізованого вузла. На вузлі, наприклад Raspberry Pi, встановлений сервіс типу Home Assistant або OpenHAB, що дозволяє обробляти дані. Після отримання інформації центральний вузол може передати команди назад на Arduino для зміни режиму роботи системи залежно від поточних потреб чи виявлених змін у стані компонентів (див. рис. 2.19-2.20).

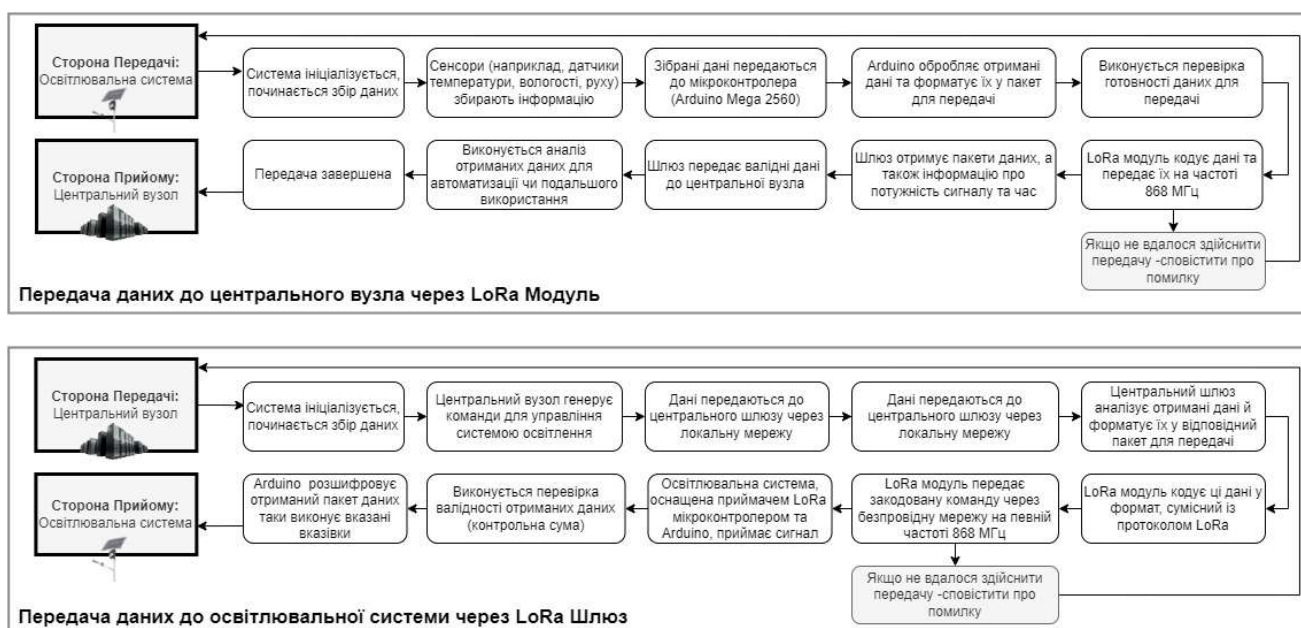


Рисунок 2.19 – Етапи передачі та прийому даних у двох напрямках (освітлювальна система та центральний шлюз)

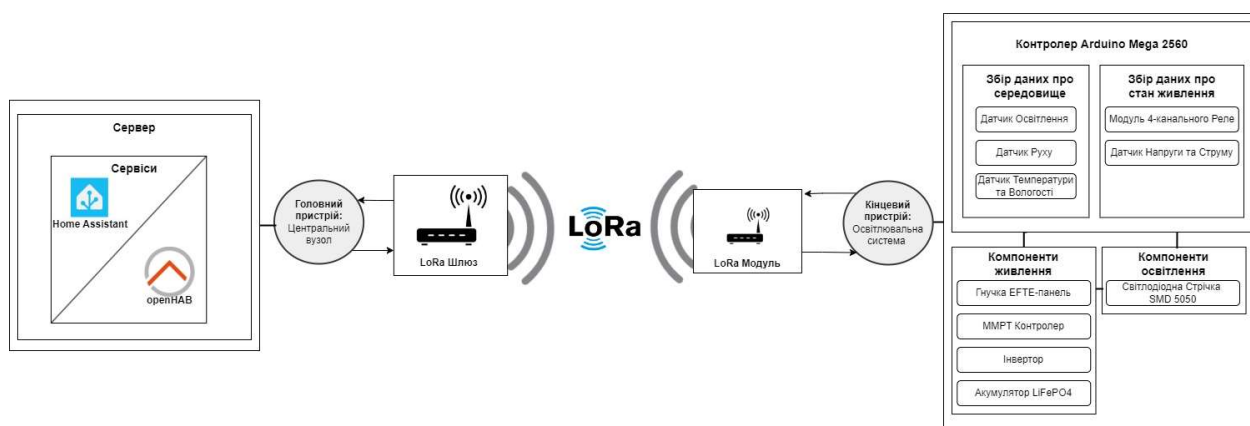


Рисунок 2.20 – Схема передачі та прийому даних у двох напрямках (освітлювальна система та центральний шлюз)

Попри те що система може функціонувати автономно, виконуючи певні сценарії, записані в програмі контролера, підключення до мережі LoRa є критично важливим для постійної передачі та прийому даних, що надасть центральному вузлу моніторити стан системи, аналізувати показники та приймати рішення завчасно, зокрема щодо коригування роботи системи у разі аварійних ситуацій.

Алгоритм управління інвертором. Алгоритм управління інвертором забезпечує коректну роботу системи шляхом оптимального використання різних джерел енергії, таких як сонячні панелі, акумулятори та електрична мережа. Інвертор у цій системі виконує функцію перетворення енергії, а також переключення між різними джерелами живлення залежно від поточних умов.

Основною функцією алгоритму є визначення, яке джерело енергії використовувати в конкретний момент часу (див. рис. 2.21). Пріоритет надається сонячній енергії, якщо вона доступна. У випадках, коли вироблення енергії від сонячних панелей є недостатнім, система перемикається на живлення від акумулятора. Якщо рівень заряду акумулятора опускається до критичного рівня, а вироблення сонячної енергії залишається низьким, система автоматично перемикається на живлення від електричної мережі.

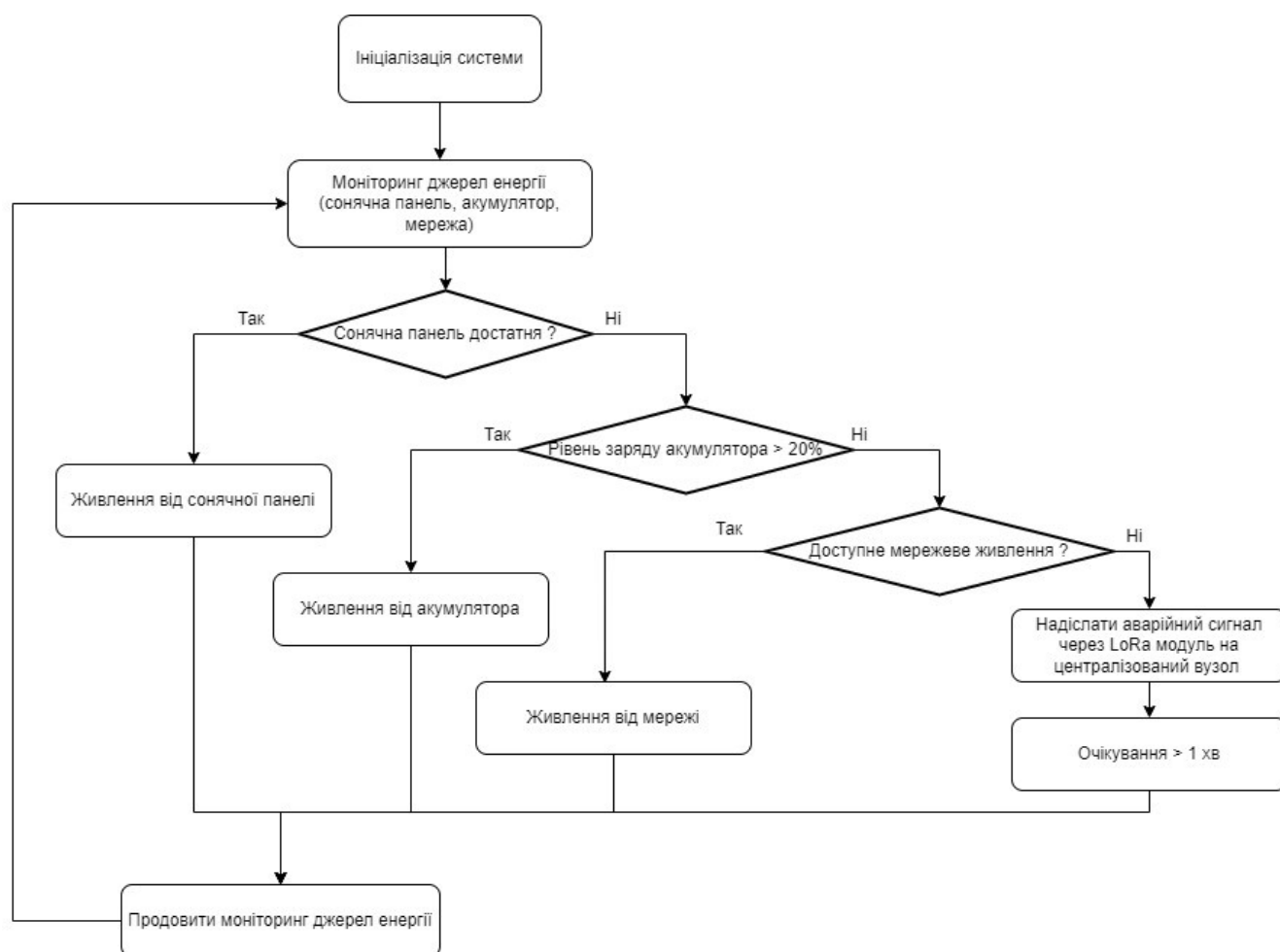


Рисунок 2.21 – Алгоритм управління інвертором у режимі:
сонячна панель > акумулятор > мережеве живлення

Процес управління включає постійний моніторинг напруги на всіх доступних джерелах енергії. Контролер, наприклад Arduino Mega 2560, аналізує поточні умови і визначає, яке джерело енергії активувати. У разі зміни умов система за допомогою реле здійснює переключення між сонячною панеллю, акумулятором та мережею.

Якщо виникає ситуація, коли жодне з джерел енергії недоступне, алгоритм передбачає надсилання аварійного сигналу через модуль LoRa, що дозволить оперативно виявляти проблеми та вживати необхідних заходів для їх вирішення.

Алгоритм також забезпечує резервування, що гарантує стабільну роботу системи навіть у випадках несправності окремих джерел живлення. Завдяки цьому підходу система максимально ефективно використовує доступну енергію,

знижуючи витрати на її виробництво та забезпечуючи тривалий і надійний робочий процес.

Алгоритм енергозбереження. Алгоритм енергозбереження є важливим компонентом системи, який спрямований на зниження енергоспоживання та оптимізацію роботи системи за обмежених ресурсів. Його основна мета полягає у зменшенні навантаження на акумулятор і забезпеченні тривалої роботи всієї системи навіть у випадках зниженої доступності енергії.

Робота алгоритму починається з аналізу поточного стану системи. Контролер, наприклад Arduino Mega 2560, отримує дані про рівень заряду акумулятора, інтенсивність сонячної активності та інші показники. На основі цих даних система прогнозує можливий рівень генерації енергії протягом дня і адаптує режими роботи відповідно до наявних ресурсів (див. рис. 2.22).

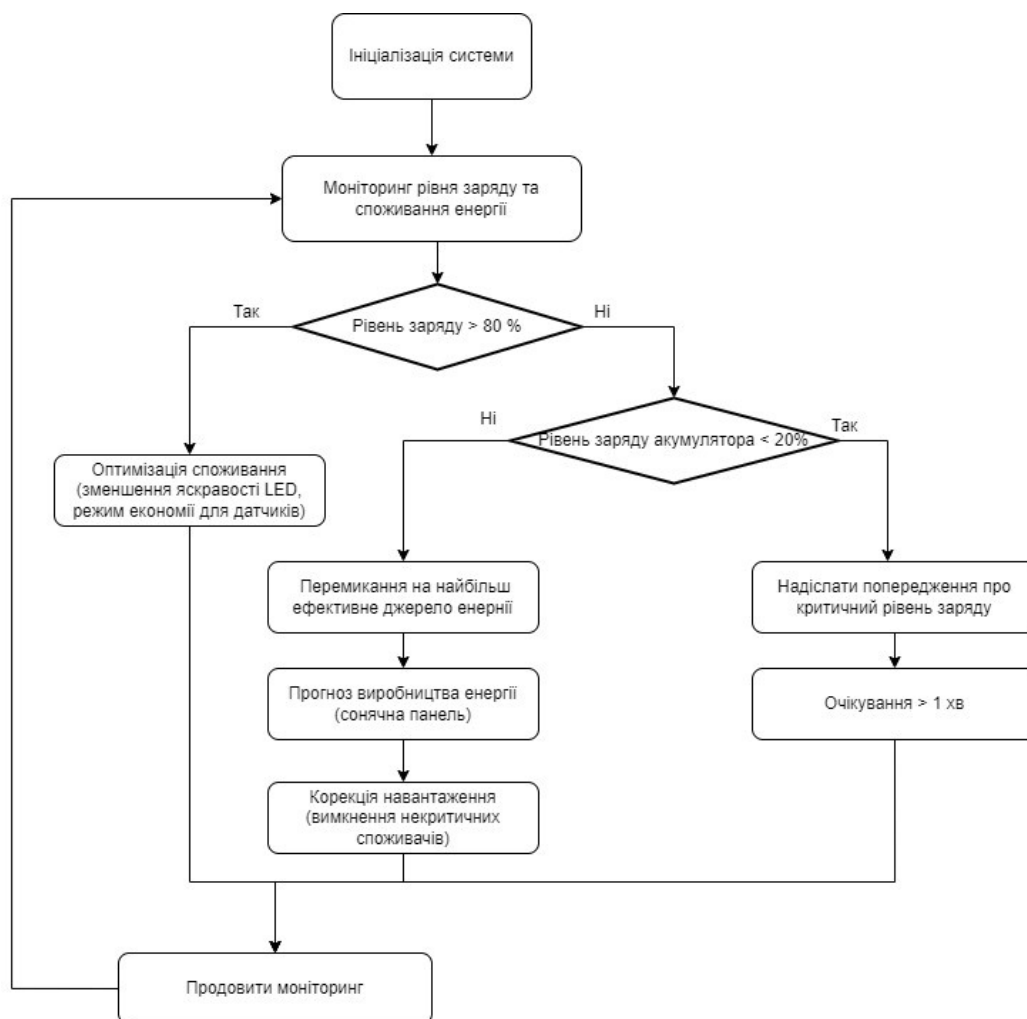


Рисунок 2.22 – Алгоритм управління енергозбереження шляхом оптимізацій споживання та перемикання на інше живлення

Для зниження енергоспоживання алгоритм передбачає такі заходи:

1. Зменшення яскравості LED-стрічок: освітлення регулюється залежно від потреб, наприклад, у вечірній час або в умовах низької активності.
2. Вимкнення освітлення в неробочі години: якщо вночі датчики не фіксують руху чи активності, освітлення вимикається.
3. Перехід датчиків у сплячий режим: для економії енергії частина обладнання може тимчасово відключатися або переходити в режим низького енергоспоживання.

Алгоритм також враховує прогнозовану кількість енергії, яку може бути згенеровано сонячними панелями протягом дня. Залежно від цього, система визначає оптимальні режими роботи, щоб уникнути перевантаження акумулятора та забезпечити достатню енергію для критичних функцій.

У вечірній і нічний час алгоритм пріоритезує економію енергії, адаптуючи роботу системи до поточного стану акумулятора, що дозволить уникнути надмірного розряду та збільшити тривалість роботи системи.

Енергозбереження працює у взаємодії з іншими алгоритмами, такими як автоматичне освітлення, заряд/розряд акумулятора, передача даних та управління інвертором. Усі ці алгоритми разом утворюють інтегровану систему, яка працює автономно під керуванням контролера Arduino Mega 2560. У разі необхідності система також може отримувати команди з централізованого вузла через модуль LoRa, що дозволяє здійснювати віддалене налаштування чи втручання без потреби фізично перебувати на місці.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОНОМНОЇ ОСВІТЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Вибір компонентів для автономної системи

Ключовий етап, на якому необхідно вибрати основні компоненти для створення автономної освітлювальної системи – вона буде складатися з низки обов’язкових елементів, деякі з яких можна замінити вже наявними або іншими альтернативними рішеннями. Головна мета цього етапу – оптимальний підбір компонентів, що дозволить інтегрувати систему в різні сценарії застосування, наприклад, для освітлення парків або вуличних територій.

Основним джерелом освітлення стануть енергоефективні світлодіодні лампи або ліхтарі, які мають перевагу над традиційними варіантами, такими як лампи розжарювання або люмінесцентні світильники. Завдяки високій світловіддачі вони не лише забезпечуватимуть яскраве освітлення в люменах, але й сприятимуть економії електроенергії, що є особливо актуальним для автономних систем.

Для живлення системи необхідно передбачити незалежні джерела енергії – це, зокрема, сонячні панелі, що забезпечать безперебійне живлення та дозволять уникнути залежності від електромережі у випадках аварій чи відключень. Заряджені сонячними панелями акумулятори підтримуватимуть роботу системи протягом кількох годин, а іноді й набагато довше, забезпечуючи стабільне функціонування освітлення навіть за відсутності сонця.

Контролери виступатимуть основним «мозковим центром» системи, регулюючи її роботу та управління живленням. Вони відповідатимуть за ефективне використання електроенергії, а також взаємодію з інтелектуальними датчиками IoT, що дозволить системі адаптуватися до різних ситуацій. Наприклад, завдяки датчикам руху, освітлення автоматично знижуватиметься або вимикатиметься в момент відсутності людей поруч, що додатково зменшить витрати енергії.

Інвертор стане важливим елементом захисту для акумуляторів, запобігаючи їх перевантаженню та перезарядженню, а також виконуючи роль контролера заряду. У такій масштабній системі важливо забезпечити стабільну роботу освітлення, щоб воно залишалося автономним і не залежало від зовнішніх джерел живлення. Усе це разом створить надійну, економічно ефективну та повністю автономну освітлювальну систему, що відповідає сучасним вимогам до інфраструктури.

При виборі компонентів для автономної освітлювальної системи важливо забезпечити її стабільну роботу без підключення до міської електромережі принаймні протягом однієї доби. Для цього потрібно ретельно обрати компоненти, які відповідатимуть усім необхідним критеріям, працюючи максимально ефективно та економічно.

Перш за все, важливо підтримувати стабільну роботу системи в умовах змінної освітленості, тобто забезпечити автоматичне регулювання яскравості відповідно до навколишніх умов. Система має інтегруватися в загальну мережу моніторингу та управління, що дозволить оптимізувати її роботу.

Вибір сонячної панелі – Flexible Solar Panel with ETFE. Сонячні панелі розрізняють за типами — моно- та полікристалічні, що визначаються структурою їхньої поверхні, яка перетворює сонячне світло в електричну енергію завдяки фотогальванічному ефекту. Для забезпечення стабільного яскравого освітлення навіть за умов аварійного відключення електроенергії, доцільно використовувати панелі достатньої потужності. Малопотужні панелі, як у дешевих збірках для садових ліхтарів, можуть працювати лише кілька годин, що не відповідає вимогам автономних освітлювальних систем.

Рекомендується використовувати гнучкі сонячні панелі з покриттям ETFE (етилентетрафторетилен), які мають ряд переваг. ETFE забезпечує стійкість до ультрафіолетового випромінювання, захищає панель від механічних пошкоджень та збільшує термін її служби. Гнучкість таких панелей дозволяє їх встановлювати на поверхнях із вигинами, що є важливим для нестандартних конструкцій. Крім того, панелі з ETFE покриттям демонструють кращу продуктивність у частковій

тіні (див. рис. 3.1), що робить їх ідеальним рішенням для використання у парках із густою рослинністю.



Рисунок 3.1 – Робота сонячної EFTE-панелі в умовах затінку

Для повноцінного заряду акумулятора в сонячний день та забезпечення часткового заряду в похмуру погоду оптимальним варіантом є панелі потужністю 100–150 Вт, дозволить досягти балансу між продуктивністю та вартістю, хоча можливий вибір менш потужних панелей на 50 Вт для бюджетних систем. Слід пам'ятати, що ККД більшості сучасних панелей становить приблизно 23%, тобто від 100-ватної панелі очікуваний вихід буде в межах 70–80 Вт, залежно від сонячної активності.

Вибір потужності панелі залежить від вимог системи. Наприклад, для менш енергозатратних систем доцільно використовувати панелі на 50 Вт, тоді як для більш продуктивних рішень — панелі на 100 або 150 Вт, що дозволить адаптувати систему до різних бюджетних обмежень та умов застосування, забезпечуючи ефективну роботу освітлювальної системи (див. рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Гнучка сонячна панель з ETFE покриттям

Одним із важливих аспектів ефективної роботи сонячних панелей є їхнє правильне розташування. У парках панелі доцільно встановлювати на верхівках ліхтарних стовпів, використовуючи наявну інфраструктуру. Враховуючи, що у наших широтах сонячне світло падає під різними кутами протягом дня, горизонтальне або вертикальне розміщення панелей не забезпечить стабільного вироблення енергії.

Щоб максимізувати ефективність панелей, необхідно враховувати оптимальний кут нахилу залежно від положення сонця на горизонті. Панелі слід розташовувати так, щоб уникнути тіней від самого стовпа, дерев чи інших об'єктів. У густій рослинності можливе встановлення панелей на дахах прилеглих будівель, що забезпечує кращу експозицію до сонячного світла, хоча потребує додаткових витрат на кабелі для з'єднання.

Також важливо обирати панелі із захисним покриттям, яке зменшує накопичення пилу та бруду, що може значно знижувати ефективність генерації енергії. Панелі з ETFE покриттям мають властивості самоочищення, що забезпечує їхню стабільну продуктивність навіть у забруднених умовах. Хоча такі панелі коштують дорожче, їхня довговічність та ефективність у довгостроковій перспективі роблять їх вигідним вибором для автономних освітлювальних систем.

Вибір контролера заряду – EPEVER MPPT Tracer 2210A. Щодо контролера заряду, варто розглянути MPPT-контролери, які здатні ефективно регулювати потужність, яку панелі подають на акумулятори (див. рис. 3.3).



Рисунок 3.3 – Контролери EPEVER MPPT Tracer 2210A

На відміну від звичайних контролерів, які можуть лише частково регулювати подачу енергії, MPPT-контролери дозволяють отримувати максимальний можливий ККД, особливо за умов змінної освітленості. Наприклад, MPPT-контролер EPEVER MPPT Tracer 2210A, який ми розглядаємо, оптимізує зарядку акумуляторів, постійно регулюючи напругу та струм, що запобігає перезарядженню акумуляторів і потенційним аваріям, а також дозволяє продовжити термін служби акумуляторів, запобігаючи їх деградації.

Для забезпечення стабільного живлення системи, необхідно передбачити можливість підзарядки від міської мережі, щоб покрити часи, коли сонячної енергії недостатньо – це завдання вирішується за допомогою інвертора, який виконує функцію перетворення енергії з міської мережі для зарядки акумуляторів, забезпечуючи стабільну роботу освітлювальної системи навіть у разі відсутності сонячного світла.

Вибір інвертора – Jongfa 1000W with Battery Charger. Для забезпечення стабільної роботи автономної освітлювальної системи використовується інвертор Jongfa 1000W. Він виконує функцію підзарядки акумуляторів від міської

електромережі паралельно з сонячними панелями, підтримуючи резервну енергію в батареях навіть за умов низької сонячної активності (див. рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Інвертор Jongfa 1000W з функцією заряду акумулятора

Інвертор Jongfa 1000W має низку переваг, які роблять його оптимальним вибором для даної системи. Завдяки високій потужності він здатний забезпечити ефективну зарядку акумуляторів навіть за підвищених енергетичних потреб. Крім того, інвертор оснащений функцією чистої синусоїдальної хвилі, що підвищує стабільність і надійність системи, захищаючи чутливу електроніку від коливань напруги.

Такий інвертор доцільно використовувати у парках та інших громадських просторах, де потрібна висока стабільність і надійність освітлення. У конфігурації з Jongfa 1000W система здатна забезпечувати безперебійне освітлення навіть за умов відсутності сонячної енергії, ефективно перемикаючись між джерелами живлення та гарантуючи зарядку акумуляторів від мережі.

На відміну від менш потужних та бюджетних перетворювачів, таких як DC-DC Boost Converter, інвертор Jongfa 1000W значно розширює функціональні можливості системи, забезпечуючи тривалу автономність і стабільну роботу в умовах різних кліматичних сценаріїв. Завдяки цьому він є оптимальним рішенням

для системи, яка покликана працювати у великих масштабах, таких як парки чи протяжні вуличні освітлювальні комплекси.

Вибір «буфера» для накопичення енергії – LiFePO_4 12V 100Ah. Одним із основних компонентів нашої освітлювальної системи є блок акумуляторів, що забезпечує її автономну роботу та дозволяє накопичувати енергію як від сонячних панелей, так і від міської електромережі.

Акумуляторна збірка складається з декількох батарей, які разом забезпечують необхідну ємність у міліампер-годинах (мАг), що дозволяє системі працювати впродовж тривалого часу. Залежно від потреб, збірка може містити від 4 до 8 акумуляторів для зберігання енергії, що забезпечить надійний запас навіть за нестачі сонячної енергії (див. рис. 3.5).



Рисунок 3.5 – Акумулятор LiFePO_4 12V 100Ah

Для створення надійної та довговічної системи рекомендується використовувати літій-іонні (Li-ion) або літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4) акумулятори, що відрізняються високою довговічністю, стабільністю роботи при змінних температурах та низьким рівнем саморозряду:

1. Літій-іонні (Li-ion) батареї розраховані на 500-800 циклів заряд-розряд, що дозволяє експлуатувати їх в середньому 3-4 роки, після чого вони починають втрачати ємність.
2. Літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4) акумулятори мають значно більший ресурс — 3,5 тисячі циклів і більше, а отже, їх строк служби досягає 10 років із зниженням продуктивності лише на 20%.

Щоб забезпечити автономну роботу освітлювальної системи на добу, ємність акумуляторів має бути достатньою для всього енергоспоживання, включаючи освітлення, датчики та системи зв'язку. Наприклад, якщо система споживає 50 Вт на годину, для безперервної роботи необхідно 1200 Вт·год акумуляторної ємності. Крім сонячної панелі, важливо передбачити підзарядку від міської мережі для забезпечення живлення за умов поганого освітлення.

У нашому випадку використовуватиметься літій-залізо-фосфатна (LiFePO₄) збірка на 12 В та ємністю 100 А·год, яка забезпечить високу тривалість роботи і стабільність, що дозволить освітленню працювати на повну потужність навіть без підключення до мережі.

Для дорожнього освітлення особливо важливо забезпечити безпеку на переходах і в місцях інтенсивного руху пішоходів, що можна зробити за допомогою таких автономних освітлювальних систем, що працюватимуть у критичних точках безпеки на дорозі, а не по всьому периметру.

Вибір штучного освітлення – SMD 5050 LED Strip 12V. Наступним важливим елементом нашої освітлювальної системи є світлодіодна стрічка на основі LED-технології, що забезпечує високу яскравість за низького енергоспоживання. Ця LED-стрічка, схожа на ті, що використовуються в побутових умовах, але для освітлювальних систем нам достатньо лише невеликого відрізка, здатного видавати достатньо світла для зовнішнього використання, наприклад, у парках (див. рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Світлодіодна стрічка SMD 5050 LED Strip 12V

Для таких цілей рекомендовано світлодіодні стрічки SMD 5050, які забезпечують високу світловіддачу і мають ефективність приблизно 720 люмен на Ват/м, що дозволить економно освітлювати значні території, не витрачаючи зайвої енергії.

У першій конфігурації планується використовувати стрічки на 12 В, оскільки такі світлодіодні стрічки можуть працювати безпосередньо від акумулятора, не потребуючи додаткового перетворення напруги.

Використання світлодіодних стрічок, що живляться від 12 В, також мінімізує втрати енергії порівняно з тими, що потребують 220 В. Якщо ж підключати до акумулятора стрічку на 220 В через інвертор, відбуватимуться додаткові втрати енергії, що значно зменшує час автономної роботи. Використання світлодіодних стрічок на 12 В дозволяє уникнути цього і досягти стабільного та довготривалого освітлення.

Вибір контролера – Arduino Mega 2560. Дуже важливим елементом, що об'єднує всі компоненти освітлювальної системи в єдину робочу структуру, є контролер. Для наших цілей оптимальним варіантом є контролер на базі платформи Arduino, оскільки це доступне й енергоефективне рішення для автоматизації та моніторингу роботи освітлювальних систем (див. рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Контролери Arduino Mega 2560

Завдяки Arduino, система здатна ефективно працювати, забезпечуючи не тільки освітлення, а й моніторинг, контроль і оптимізацію енергоспоживання. Arduino виконує роль «мозку» системи, обробляючи сигнали з датчиків та забезпечуючи контроль за різними процесами. Наприклад, він дає змогу

налаштовувати яскравість LED-стрічок, здійснювати контроль заряджанням акумуляторів та контролювати їхній стан, що захищає батареї від глибокого розряду чи надмірного заряду, що важливо, оскільки подібні неконтрольовані процеси швидко знижують ефективність акумуляторів, пошкоджуючи їх.

Arduino також дозволяє програмувати налаштування енергоспоживання – це означає, що контролер може знижувати яскравість освітлення в певні години, або при високому рівні зовнішнього освітлення, що забезпечує значну економію енергії.

Інтерфейс Arduino дозволяє підключати до нього датчики, контролери зарядки, а також безпроводний модуль LoRa для керування системою дистанційно, що актуально для створення інтегрованої системи розумного міста.

Для нашої конфігурації, де потрібна максимальна продуктивність та автономність, доцільно використовувати контролер Arduino Mega 2560 – він має значний ресурс обчислень і розширені можливості підключення, що робить його ідеальним варіантом для комплексного управління системою освітлення.

Вибір модуля безпроводного зв'язку – RFM95W LoRa 915MHz Module. Основним рішенням для об'єднання освітлювальних систем в єдину мережу виступатиме модуль безпроводного зв'язку LoRa, що дозволить здійснювати централізоване керування всією системою освітлення на рівні всього парку – через єдиний додаток (наприклад, веб-додаток) можна буде віддалено спостерігати за станом усіх освітлювальних точок, контролювати їхню роботу, а також налаштовувати параметри освітлення для кожної зони. Доступ до управління буде здійснюватися з централізованої платформи, що значно полегшить моніторинг і контроль (див. рис. 3.8).



Рисунок 3.8 – Модуль безпроводного зв'язку RFM95W LoRa 915MHz Module

Технологія LoRa вирізняється здатністю передавати дані на великі відстані, що особливо корисно для таких інфраструктурних проєктів, як освітлення парків або навіть вуличне освітлення в міських районах. LoRa може забезпечити стабільну передачу даних на відстані до 10-20 км на відкритій місцевості, що робить її ідеальним вибором для великих парків або навіть груп парків у межах одного міста.

Інші рішення, як Wi-Fi або ZigBee, хоч і можуть використовуватися для коротших дистанцій, є менш ефективними через більше енергоспоживання. LoRa, навпаки, вирізняється високою енергоефективністю, що дозволяє знизити витрати на живлення, що важливо для віддалених автономних систем освітлення.

Завдяки модулю LoRa зможе надсилати важливі дані про стан освітлювальної системи, такі як рівень заряду акумуляторів, статус ліхтарів, і інші параметри, на центральний сервер для моніторингу й управління – це забезпечить створення єдиної стабільної мережі з можливістю централізованого управління, яка стане ефективною навіть на великих відстанях. Хоча для окремих парків така велика дальність зв'язку не є критичною, можливість управління кількома парками в межах 10 км відкриває додаткові переваги.

У нашій системі буде використовуватися LoRa-модуль RFM95W на частоті 915 МГц, який підійде як для нашої конфігурації освітлювальної системи. Модуль має низьке енергоспоживання та забезпечить необхідну функціональність і стабільність для моніторингу та управління всією системою освітлення в централізованому режимі.

Реле для комутації джерел живлення – 4-Channel Relay. Реле є ключовим компонентом у системі управління джерелами енергії. Воно використовується для фізичної комутації між різними джерелами живлення: сонячною панеллю, акумулятором та мережею змінного струму. У нашій системі використовується 4-канальний модуль реле (див. рис. 3.9), який забезпечує можливість незалежного підключення кожного джерела енергії.



Рисунок 3.9 – Реле для комутації джерел живлення 4-Channel Relay

Кожен канал реле відповідає за перемикання окремого джерела живлення. Наприклад, одне реле комутує ланцюг між сонячною панеллю та акумулятором, інше — між акумулятором і інвертором, а наступне забезпечує підключення мережі змінного струму в разі критичного рівня заряду акумулятора. Реле керуються сигналами з Arduino Mega 2560, що визначає, яке джерело активувати відповідно до отриманих даних від датчиків напруги та струму.

Модуль реле працює при низькій напрузі керування (5 В), що забезпечує його сумісність з Arduino. Однак реле також здатні перемикати високовольтні та високоструміві ланцюги (до 250 В і 10 А), дозволить безпечно керувати різними джерелами енергії без ризику перевантаження або пошкодження елементів системи.

Для забезпечення стабільної роботи реле, у схемі передбачені додаткові захисні компоненти, такі як діоди для усунення паразитних струмів та оптрони для гальванічної розв'язки між Arduino та силовими ланцюгами.

Датчик для моніторингу напруги та струму – INA219. Датчик напруги та струму є основою для моніторингу стану енергетичних компонентів системи. Датчик напруги дозволяє визначати поточний рівень напруги на кожному джерелі енергії, включаючи сонячну панель, акумулятор та мережу змінного струму. Відповідні дані передаються на Arduino Mega 2560 для аналізу, що дозволяє автоматизувати процеси зарядки та розрядки акумулятора (див. рис. 3.10).



Рисунок 3.10 – Датчик для моніторингу напруги та струму INA219

Датчик струму забезпечує вимірювання поточного навантаження на систему, допомагаючи відстежувати споживання енергії, що дозволить визначити, наскільки ефективно працюють різні компоненти, такі як інвертор чи зарядний пристрій. Отримані значення струму також використовуються для виявлення можливих несправностей, наприклад перевантаження або короткого замикання.

Датчик підключаються до Arduino через аналогові входи, де дані оцифровуються для подальшої обробки. Типові моделі датчиків, які використовуються в системі, модулі на базі INA219 (для моніторингу струму та напруги). Вони забезпечують достатню точність вимірювань для домашніх і промислових застосувань.

У поєднанні з алгоритмами управління цей датчик дозволяє створити систему, яка самостійно контролює стан джерел енергії, запобігає їх перевантаженню та підвищує загальну енергоефективність.

Вибір датчиків – HC-SR501 (руху), BH1750 (освітленості) та DHT22 (температури та вологості). Наступним кроком для підвищення розумності наших освітлювальних систем є впровадження спеціальних датчиків. Вони забезпечать не лише реакцію на зовнішні зміни, але й створять основу для автоматизованого управління, що дозволить зробити систему по-справжньому інтелектуальною. Зокрема, необхідно використати три основні види датчиків: датчики руху, освітлення та вологості й температури (див. рис. 3.11).



Рисунок 3.11 – Датчик руху (HC-SR501),
освітленості (BH1750) та рівня температури та вологості (датчик DHT22)

Датчик руху, наприклад HC-SR501, виявлятиме об'єкти в зоні освітлення, автоматично активуючи або збільшуючи яскравість світлодіодів, що допоможе заощадити енергію, освітлюючи простір тільки за потреби. Датчик освітленості (наприклад, BH1750) дозволить оцінювати рівень природного освітлення і коригувати інтенсивність світла світлодіодів для економії електроенергії. Цей датчик працює схоже на сенсор яскравості в смартфонах, автоматично підлаштовуючи освітленість залежно від зовнішніх умов, що допоможе системі ефективно використовувати ресурс акумулятора.

Датчик вологості й температури, наприклад DHT22, дозволить відстежувати погодні умови для регулювання режимів роботи системи, підвищуючи її енергоефективність. Такі дані можуть використовуватися для моніторингу температури в різних зонах парку, створюючи додатковий функціонал для аналізу умов навколишнього середовища. Оскільки мережа освітлення буде пов'язана за допомогою LoRa, зібрані дані з усіх сенсорів можна передавати в єдину систему моніторингу, дозволяючи віддалене керування та налаштування.

Вибір шлюза – LoRa Gateway. Щоб забезпечити централізоване управління освітлювальними системами, зібраними на базі контролера Arduino Mega 2560, слід ретельно підійти до вибору програмного забезпечення (див. рис. 3.12).



Рисунок 3.12 – Безпроводний шлюз LoRa
EU868 US915 AU915 AS923 Outdoor Industrial

Враховуючи, що основним каналом зв'язку є безпроводна технологія LoRa, необхідно врахувати особливості комунікації цієї системи. LoRa не є універсальним рішенням для Інтернету речей (IoT), який зазвичай використовує протоколи Wi-Fi, Zigbee чи Z-Wave, тому для реалізації зв'язку необхідний спеціальний шлюз LoRa Gateway.

Шлюз підключатиметься до мережевої інфраструктури (наприклад, комутаторів чи маршрутизаторів), що дозволить контролювати систему освітлення з єдиного центру на відстані до 2–3 км.

Вибір ПЗ для керування системою – Home Assistant або openHAB. Для забезпечення керування всіма освітлювальними системами з одного місця підходять платформи з відкритим кодом, як-от Home Assistant або openHAB (див. рис. 3.13).



Рисунок 3.13 – Програмне забезпечення Home Assistant та openHAB для керування системою

Вони підтримують пристрої LoRa, але потребують додаткового обладнання у вигляді шлюзів та спеціальних інтеграцій. Окрім того, необхідно буде налаштувати сервер для локального управління системою, який може бути розгорнутий на мініатюрних ПК на зразок Raspberry Pi або невеликих ПК [30].

Сервер відповідатиме за локальне управління освітленням та передачу даних до глобальної мережі Інтернет. Для безпечного з'єднання можна використовувати сервіси на кшталт Cloudflare, що забезпечить захист та стабільність з'єднання.

Залежно від масштабу проекту можна також обрати інші варіанти безпроводного зв'язку, наприклад, Zigbee. Але навіть з цим протоколом будуть потрібні шлюзи, які забезпечать взаємодію серверу з мережею через Ethernet або Wi-Fi.

У випадку великого бюджету, для більш масштабних рішень, таких як мережі розумного міста, можна розглянути хмарні платформи Amazon AWS або Microsoft Azure IoT Hub. Вони дозволяють підключення пристроїв LoRa через мережу LoRaWAN і забезпечують повноцінне керування з хмари. Проте для невеликих проєктів, наприклад для парків, такі хмарні рішення можуть бути надто витратними.

Оптимальним варіантом стане використання платформ з відкритим кодом, які дозволять з мінімальними витратами створити локальний сервер і мати доступ до системи через захищений вебдодаток, що надасть можливість зручно керувати освітленням парку дистанційно.

Вибір комутаційних кабелів – MC4. Варто зазначити, що, окрім компонентів для освітлювальних систем, необхідно також подбати про якісні комутаційні з'єднання для їх ефективного функціонування.

Для підключення сонячних панелей до МРРТ-контролерів знадобляться надійні кабелі – стандартні або спеціально виготовлені на замовлення кабелі з роз'ємами, наприклад, типу MC4, які зазвичай використовують у системах із сонячними панелями, інверторами та МРРТ-контролерами.

Особливо важливо враховувати такі деталі в контексті встановлення кабелів – оскільки наші освітлювальні системи будуть переважно стаціонарними, тобто розміщеними в одному місці, ми плануємо використовувати для зв'язку безпроводні технології, наприклад, LoRa.

Проте, у випадку, якщо система встановлена в парку або іншій локації з великою кількістю дерев, що перешкоджає прямому монтажу сонячних панелей на самих освітлювальних пристроях, може виникнути потреба у прокладанні кабелів на значну відстань. Це, однак, не завжди виправдано, оскільки довгі кабелі – це додаткові витрати, а також потенційні втрати енергії через її розсіювання при транспортуванні.

Ідеальні умови для нашої системи – це мінімізація відстані між сонячними панелями та освітлювальними системами, що дозволить зменшити потребу у великій кількості кабелів, зберегти естетичний вигляд та підвищити ефективність системи загалом, уникаючи додаткових витрат на довгі кабелі та втрат енергії через її спотворення.

Якщо правильно об'єднати всі компоненти і зібрати їх в єдину систему (див. рис. 3.14, табл. 3.1-3.2), вийде потужна, ефективна і безперебійна аварійна освітлювальна система для парків, яка базується на технологіях Інтернету речей (IoT).

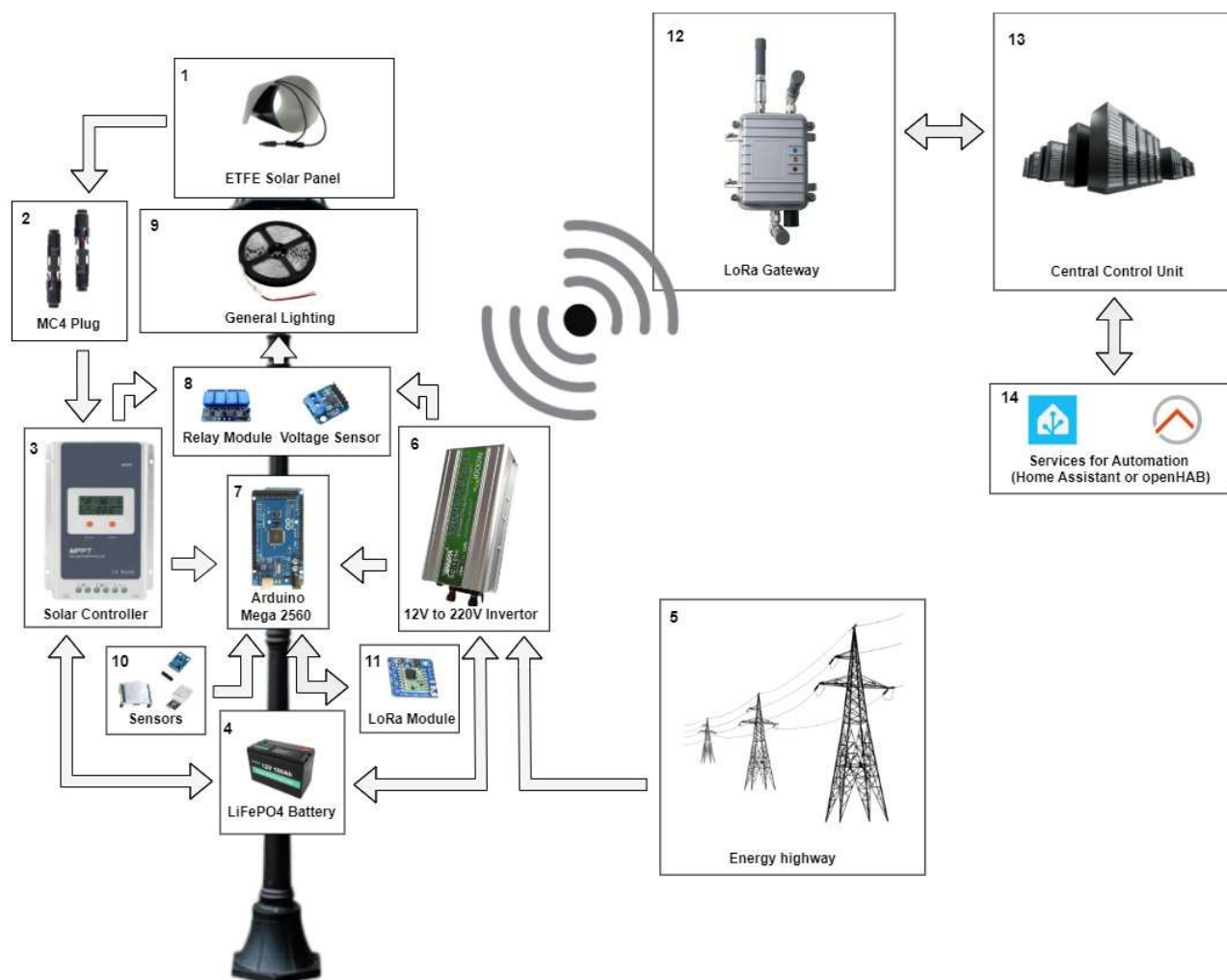


Рисунок 3.14 – Запропонована автономна IoT-освітлювальна система для парків з ETFE-панеллю, LoRa-керуванням і локальною автоматизацією

Така система здатна працювати автономно завдяки сонячним панелям з покриттям ETFE, які забезпечують довготривалу і ефективну генерацію енергії, і акумуляторам LiFePO₄, що мають високий ресурс роботи та підтримуються алгоритмами, які оптимізують їх заряд і розряд.

Якщо правильно об'єднати всі компоненти і зібрати їх в єдину систему, вийде потужна, ефективна і безперебійна аварійна освітлювальна система для парків, яка базується на технологіях Інтернету речей (IoT). Така система здатна працювати автономно завдяки сонячним панелям з покриттям ETFE, які забезпечують довготривалу і ефективну генерацію енергії, і акумуляторам LiFePO₄, що мають високий ресурс роботи та підтримуються алгоритмами, які оптимізують їх заряд і розряд.

Інтегрувавши в систему певні алгоритми, можна забезпечити її роботу відповідно до потреб користувачів і конкретних умов. Алгоритми автоматичного освітлення дозволяють реагувати на рух у парку, зміну зовнішнього освітлення чи температури, забезпечуючи комфорт і безпеку для відвідувачів. Алгоритми енергозбереження оптимізують використання енергії, регулюючи яскравість світильників залежно від зовнішніх умов і прогнозу енергогенерації, а також перемикаючи джерела живлення між сонячними панелями, акумуляторами і мережею.

Ця система, оснащена LoRa-модулями, може передавати дані на значні відстані до централізованого центру керування, що дозволить об'єднати велику кількість окремих освітлювальних систем у єдину мережу, яку можна моніторити і керувати з одного місця. Центр керування отримує дані про стан кожної системи, рівень заряду акумуляторів, поточну генерацію енергії, споживання і можливі аварійні сигнали. Таким чином, адміністратори мають змогу оперативно реагувати на проблеми і планувати обслуговування системи.

Автоматизація процесів у такій системі значно спрощує її експлуатацію. Завчасно підготовлені алгоритми дозволяють системі працювати самостійно, без постійного втручання людини, що включає автоматичне включення і вимкнення освітлення, перемикання між джерелами живлення, обмеження рівня розрядки акумуляторів і оптимізацію енергоспоживання. Завдяки цьому досягається максимальна ефективність використання енергетичних ресурсів і знижується необхідність у частому технічному обслуговуванні.

Великою перевагою такої системи є її масштабованість. Однотипні модулі можуть бути встановлені по всьому парку, навіть у віддалених його частинах, де немає доступу до центральної енергомережі. Водночас вся мережа інтегрується в єдину інтелектуальну систему, якою можна централізовано керувати. Ця інтеграція сприяє підвищенню безпеки в громадських просторах, зниженню енергетичних витрат і забезпеченню стабільної роботи освітлювальної системи навіть у критичних умовах, таких як перебої з електропостачанням або несприятливі погодні умови.

Порівняння запропонованої системи між існуючими. Запропоноване рішення має суттєві переваги (див. рис. 3.1) порівняно з існуючими системами автономного освітлення. Більшість стандартних систем використовують окремі вуличні ліхтарі на сонячних панелях, які працюють автономно без централізованого керування. Дані про стан таких систем недоступні в реальному часі, що ускладнює моніторинг і обслуговування.

У запропонованому рішенні використано IoT-технології з далеким радіусом зв'язку за допомогою LoRa, що дозволяє об'єднати всі елементи системи в єдину мережу, що забезпечить централізоване управління з одного центру, доступ до даних про стан акумуляторів, споживання енергії, працездатність сенсорів та інших компонентів у режимі реального часу. Такий підхід значно підвищує ефективність моніторингу та спрощує обслуговування.

Іншою важливою перевагою є використання гнучких сонячних панелей із покриттям EFTE. Стандартні жорсткі панелі без спеціального захисного шару мають нижчу ефективність, особливо в умовах затінення чи похмурої погоди, і менш довговічні через вплив ультрафіолету та механічні пошкодження. Гнучкі панелі з EFTE покриттям краще працюють у розсіяному світлі, є стійкими до механічних пошкоджень і ультрафіолету, а також забезпечують довший термін служби. Крім того, вони дозволяють установку на поверхнях різної форми, що розширює можливості їхнього монтажу, зокрема в умовах парків із великою кількістю дерев.

Система також включає розширений набір датчиків для оптимізації енергоспоживання. Зокрема, датчики руху активують освітлення лише за потреби, знижуючи зайві витрати енергії. Датчики освітленості дозволяють автоматично регулювати рівень яскравості залежно від природного освітлення, а датчики температури і вологості допомагають підтримувати стабільну роботу системи, запобігаючи перегріву компонентів. Додатково впроваджено датчик напруги і струму INA219, який забезпечує точний моніторинг заряду і стану акумуляторів, що дозволяє ефективніше керувати енергетичними ресурсами.

Гнучкість запропонованого рішення є ще однією важливою перевагою. Система дозволяє обирати потужність сонячних панелей у діапазоні 50–150 Вт, адаптуючись до умов і бюджетних обмежень. У конфігурації використовується універсальний інвертор Jongfa 1000W, який працює як із сонячними панелями, так і з мережею, забезпечуючи резервування живлення, що гарантує стабільну роботу системи навіть у разі несприятливих погодних умов або перебоїв у сонячному заряді. Централізований моніторинг через IoT дозволяє оперативно виявляти несправності та вживати заходів для їх усунення.

Таблиця 3.1 – Порівняння запропонованої системи між існуючими

Параметр	Існуючі рішення	Запропоноване рішення	Перевага запропонованого рішення
Тип сонячних панелей	Жорсткі панелі, низька ефективність у затінку	Гнучкі панелі з EFTE покриттям, висока ефективність у затінку та довговічність	Краща ефективність у розсіяному світлі, довговічність, стійкість до пошкоджень
Моніторинг і управління	Відсутність централізованого моніторингу, обмежена автоматизація	Централізований моніторинг через LoRa, повна автоматизація	Оперативний контроль, можливість централізованого керування
Енергоспоживання	Незбалансований розподіл використання наявних ресурсів	Використання датчиків руху, освітленості та температури для оптимізації	Економія енергії, довша автономна робота

Продовження таблиці 3.1 – Порівняння запропонованої системи між існуючими

Параметр	Існуючі рішення	Запропоноване рішення	Перевага запропонованого рішення
Гнучкість установки	Фіксовані габаритні панелі, обмежений монтаж	Гнучкі панелі для установки на різних поверхнях і формах	Можливість адаптації до складних умов
Тип інвертора	Обмежена функціональність, недостатня гнучкість	Універсальний інвертор з можливістю роботи від сонячних панелей і мережі	Резервування живлення, стабільна робота за будь-яких умов
Датчики та IoT	Обмежений набір сенсорів, відсутність IoT	Розширений набір датчиків (руху, освітленості, температури, струму) з підключенням до IoT	Більший контроль над системою, оптимізація енергоспоживання
Резервування живлення	Відсутнє або мінімальне	Резервування акумуляторів через мережу за допомогою інвертора	Стабільність роботи навіть за несприятливих умов

Продовження таблиці 3.1 – Порівняння запропонованої системи між існуючими

Параметр	Існуючі рішення	Запропоноване рішення	Перевага запропонованого рішення
Довговічність та обслуговування	Зниження ефективності через накопичення пилу, обмежений моніторинг	Використання EFTE покриття, IoT моніторинг для швидкого виявлення несправностей	Менші витрати на обслуговування, тривалий термін служби

Таблиця 3.2 – Орієнтовна вартість запропонованої системи

№	Назва комплектуючої	Характеристика / Модель	Ціна (за 1 шт.)	Ціна (за 20 шт.)
1	Гнучка сонячна EFTE-панель	Altek ALF-120W	\$110	\$2,200
2	Сонячний контролер	EPEVER MPPT Tracer 2210A (20A, 12/24V)	\$100	\$2,000
3	Акумулятор	Li Time LiFePO4 12V 100Ah	\$180	\$3,600
4	Датчик напруги та струму	INA219 (I2C модуль контролю струму і напруги)	\$3	\$60
5	Інвертор з функцією зарядки акумулятора	Jongfa SC-10000 1000W	\$60	\$1,200
6	Світлодіодна стрічка	SMD 5050 LED Strip 12V 5m	\$10	\$200
7	Контролер освітлення	Arduino Mega 2560	\$35	\$700
8	Датчик руху	HC-SR501 PIR	\$1	\$20
9	Датчик освітленості	BH1750 (I2C)	\$2	\$40

Продовження таблиці 3.2 – Орієнтовна вартість запропонованої системи

№	Назва комплектуючої	Характеристика / Модель	Ціна (за 1 шт.)	Ціна (за 20 шт.)
10	Датчик температури/вологи	DHT22	\$6	\$120
11	Модуль LoRa	Adafruit RFM95W LoRa 868/915MHz	\$50	\$1,000
12	Роз'єми для панелей	Роз'єми MC4	\$3	\$60
13	Макетна плата + дроти	400 Pin + Dupont дроти	\$5	\$100
14	Корпус для електроніки	Бокс монтажний пластиковий SKIM 700x500x250 з панеллю IP65 10м	\$70	\$1,400
15	Кабелі	Кабель для сонячних панелей 6 мм2 KBE Solar DB EN 50618 h1z2z2-k	\$13	\$260
16	Програмне забезпечення	Home Assistant	Безкоштовно	
	Загальна вартість:		\$648	\$12,960

Таблиця 3.3 – Орієнтовна вартість центрального вузла

№	Назва комплектуючої	Характеристика / Модель	Ціна
1	Центральний вузол	Raspberry Pi 4 Model B	\$110
2	Шлюз LoRa	LoRa Gateway EU868	\$500
	Загальна вартість:		\$660

3.2 Інтеграція з існуючою інфраструктурою

Одним із ключових аспектів впровадження автономних освітлювальних систем у парках є можливість використання існуючої інфраструктури для реалізації таких рішень. Наприклад, у багатьох парках уже встановлені LED-світлодіодні стрічки або навіть вбудовані акумулятори – це дозволяє лише частково модернізувати систему, додаючи необхідне комутаційне обладнання, наприклад, компактну серверну коробку з усім обладнанням, яку можна закріпити на ліхтарному стовпі. Додатково до цієї коробки можна під'єднати сонячну панель і впровадити інші компоненти, щоб оптимізувати роботу освітлювальних систем (див. рис. 3.15) [3, 9, 36, 37].



Рисунок 3.15 – Інтеграція освітлювальної системи у існуючу інфраструктуру

Наявність готової інфраструктури дозволяє значно знизити витрати на побудову повноцінних автономних освітлювальних систем, однак слід враховувати, що для підтримки автономії системи також можуть бути необхідні МРРТ-контролери для управління зарядкою акумуляторів [14].

Для світлодіодних стрічок, які працюють від 220 В, може знадобитися додаткова резервна лінія на 12 В, що забезпечить переключення між міською електромережею та автономною системою, яка, хоча й працюватиме дещо слабше від звичайної світлодіодної стрічки, буде функціонувати як резервне джерело освітлення.

При впровадженні подібних систем важливо розуміти, що не всі існуючі освітлювальні рішення, наприклад, лампи розжарювання або галогенні лампи, підходять для модернізації в автономні системи. Автономні системи потребують сучасних технологій, які забезпечують їхню масштабованість, інтелектуальність та можливість єдиного централізованого управління. Тому для нових парків, що тільки будуються, можливо, доведеться інвестувати в нову інфраструктуру, зокрема в ліхтарні стовпи, на які буде закріплюватись усе необхідне обладнання [3, 4, 10, 37].

Використання існуючих рішень і їхня модернізація дозволять підвищити рівень комфорту та безпеки у парках і на пішохідних переходах. Завдяки автономному освітленню, відвідувачі почуватимуться захищеними і не потребуватимуть додаткових джерел світла, таких як ліхтарики або світловідбивні жилети. Дане рішення забезпечить комфорт і безпеку, використовуючи вже створену інфраструктуру та сучасні технології для її вдосконалення.

Як зазначалося раніше, існуюча інфраструктура освітлювальних систем може бути вдосконалена для надання автономності й певної інтелектуальності. Сучасні автономні освітлювальні системи широко використовуються, зокрема в міських умовах, де вуличні ліхтарі оснащують сонячними панелями. Протягом дня ці панелі накопичують сонячну енергію, забезпечуючи повністю автономне освітлення вночі, без необхідності підключення до централізованої електромережі. Завдяки впровадженню готових рішень, що вже забезпечують автономне функціонування, ми можемо ще більше вдосконалити існуючі системи [5].

Наприклад, у деяких міських освітлювальних системах, таких як освітлення для паркувальних зон чи пішохідних переходів, використовують датчики руху. Завдяки цьому світло вмикається тільки тоді, коли датчик виявляє присутність автомобіля чи пішохода, що знижує енерговитрати та продовжує строк служби обладнання. І хоча такі рішення не повністю відповідають концепції розумних автономних систем, вони вже дозволяють реалізувати деякі з наших ідей [9, 10, 36].

Так, навіть за наявності базової інфраструктури, існує можливість створити повністю автономні освітлювальні системи, засновані на інтелектуальних рішеннях, що сприяє розвитку сучасних технологій.

Запропонований підхід дозволяє перетворити традиційні освітлювальні системи на високотехнологічні системи майбутнього, де використовується комплексний підхід до комунікації пристроїв.

Об'єднавши всі компоненти в одну мережу, ми забезпечуємо зручне централізоване управління та керування, що робить роботу такої мережі ефективною і зручною для користувачів (див. рис. 3.16) [31, 39].



Рисунок 3.16 – Освітлювальна система зі вбудованою сонячною панеллю (або батареєю) зі «буфером» для запасання енергії

3.3 Перспективи розвитку та інноваційні технології

Подальший розвиток автономних освітлювальних систем має великий потенціал завдяки впровадженню новітніх технологій та інноваційних підходів, що здатні значно підвищити їхню ефективність та інтеграцію з іншими інфраструктурними рішеннями, що особливо актуально в умовах можливих відключень електроенергії, які можуть негативно вплинути на традиційні системи освітлення, тоді як автономні системи не лише залишаться функціональними, а й нададуть можливість централізованого керування. У випадках, коли в парках або інших громадських місцях зберігаються застарілі енерговитратні освітлювальні системи, перехід на автономне освітлення може суттєво знизити загальні витрати енергії та зробити управління освітленням зручнішим і ефективнішим (див. рис. 3.17) [36].



Рисунок 3.17 – Перспективи розвитку у вуличних освітлювальних системах

Перспективи вдосконалення таких систем включають використання штучного інтелекту та машинного навчання для адаптації освітлення до зовнішніх умов. Наприклад, алгоритми можуть аналізувати дані про погоду, час доби та сезонні зміни, дозволяючи системі самостійно коригувати рівень освітлення. У менш завантажені години інтенсивність освітлення може знижуватися, а в пікові періоди — збільшуватися. Такі інтелектуальні рішення також можуть забезпечити

адаптацію до погодних умов: за поганої погоди система зможе автоматично переключатися на підживлення від міської мережі, зберігаючи ресурс акумуляторів, а за наявності сонячної погоди — забезпечувати повне заряджання акумуляторів для подальшого автономного використання [37].

Інтеграція автономних систем освітлення з елементами розумного міста відкриває додаткові можливості, перетворюючи їх на частину загальної міської інфраструктури. Наприклад, такі системи можуть бути поєднані з моніторингом дорожнього трафіку, системами безпеки та екологічними рішеннями, що дозволить використовувати світлові стовпи не тільки для освітлення, але й для встановлення датчиків якості повітря, відеокамер, що підвищують рівень безпеки, та інших датчиків. Камери та сенсори можуть об'єднуватися у безпроводну мережу, використовуючи одну енергетичну систему, що забезпечить постійний моніторинг і надасть актуальні дані про стан екології та безпеки.

Так, можливо інтегрувати додаткові датчики в існуючі автономні освітлювальні системи для парків, спроектовані на основі IoT-технологій, що дозволить, крім базового освітлення, впроваджувати різні додаткові функції, такі як встановлення камер відеоспостереження та датчиків якості повітря. Їх можна розміщувати безпосередньо на тих самих опорах, що й освітлення, що забезпечить використання єдиної інфраструктури для живлення і функціонування цих елементів, створюючи комплексну екосистему, яка виконує не лише роль освітлення, а й охоплює інші важливі аспекти міського середовища [9].

Варто зазначити, що такі камери відеоспостереження споживають значно менше енергії порівняно з традиційними освітлювальними системами, що дозволяє підтримувати економічність усієї системи. Додаткова інтеграція з елементами розумного міста включає можливості моніторингу транспортного потоку. Наприклад, такі системи можуть збирати дані про транспортні потоки і коригувати рівень освітлення на перехрестях або в пішохідних зонах, підвищуючи безпеку та видимість у критичних місцях.

Інтелектуальні алгоритми можуть заздалегідь виявляти наближення автомобілів або пішоходів, налаштовуючи освітлення для оптимальної видимості.

Наприклад, система може автоматично активувати підвищене освітлення, якщо виявить автомобіль за кілька сотень метрів від перехрестя, а в місцях з відсутнім трафіком – знижувати яскравість для економії енергії. Такий підхід дозволяє створити не просто традиційну освітлювальну систему, а по-справжньому розумну, яка реагує на ситуацію і забезпечує ефективне використання енергоресурсів та інфраструктури.

Також, розглядаючи рішення з використанням сонячних панелей, можемо бачити перспективу, за якої автономні освітлювальні системи майбутнього здатні використовувати декілька джерел енергії одночасно для забезпечення енергетичної незалежності. Така різноманітна система може включати комбінацію сонячних панелей, вітрогенераторів і навіть новітніх п'єзоелектричних технологій, які генерують енергію від руху транспорту чи пішоходів. Вони стають дедалі популярнішими, і вже ведуться активні експерименти для перевірки ефективності цих рішень (див. рис. 3.18) [37].

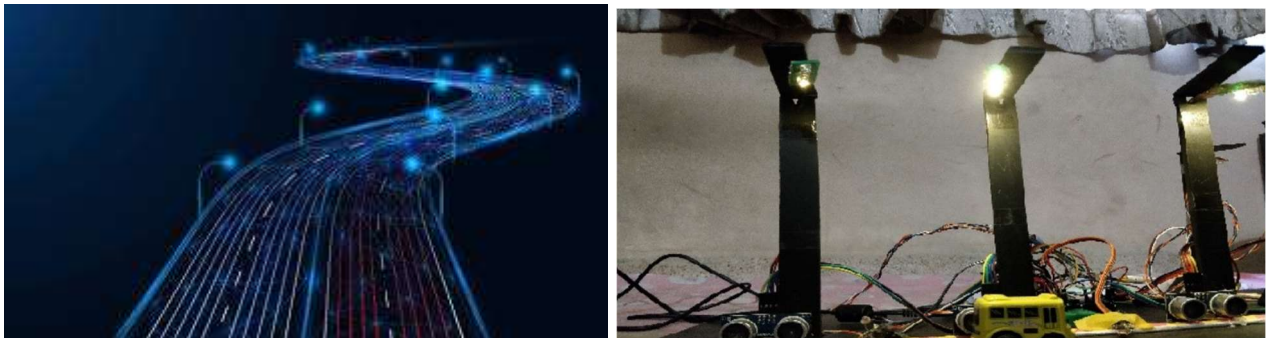


Рисунок 3.18 – Використання п'єзоелектричних технологій
як альтернативні джерела живлення

Застосування таких інноваційних технологій дозволить освітлювальним системам майбутнього значно розширити можливості живлення, навіть в умовах обмеженої доступності сонячного світла, що особливо актуально для регіонів з екстремальними кліматичними умовами, як-от Швеція, де через полярну ніч протягом тривалих періодів немає достатньої кількості сонячного світла для зарядки системи. У таких місцях поєднання альтернативних джерел, як вітряна

енергія та п'єзоелектричні технології, може стати основою для стабільного функціонування освітлення (див. рис. 3.19) [37, 38].



Рисунок 3.19 – Потреба у пошуках альтернативних джерел живлення для надскладних ситуації: Швеція, Полярна ніч

Водночас розвиток акумуляторних технологій також відкриває нові горизонти – сучасні твердотільні батареї, які перевершують своїх попередників, забезпечують не тільки триваліший термін служби, але й підвищену ємність за менших розмірів. Такі технології, хоча й перебувають на стадії активного вдосконалення, вже показують значний потенціал для покращення автономних систем, що свідчить про те, що розвиток акумуляторних рішень, включаючи зміну хімічного складу та використання нових матеріалів, лише розширює межі енергонезалежності для розумних міських систем майбутнього (див. рис. 3.20) [40].

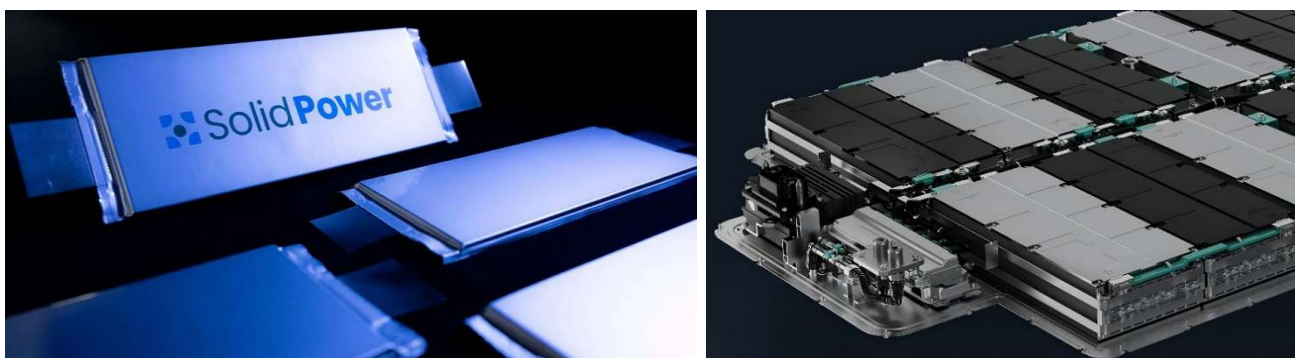


Рисунок 3.20 – Потреба у пошуках альтернативних джерел живлення для надскладних ситуації: Твердотільні натрієві батареї

Однією з перспектив удосконалення сучасних освітлювальних систем є впровадження централізованого управління через єдиний додаток. Такий додаток дозволить здійснювати повний управління та моніторинг всіма освітлювальними пристроями, що не тільки скоротить витрати на обслуговування, а й значно полегшить аналіз та контроль усієї системи [35, 39].

Крім цього, він надасть можливість віддалено налаштовувати інтенсивність світла для кожного пристрою, контролювати стан акумуляторів та інших компонентів, створювати звіти про енергоспоживання, аналізувати витрати, а також оперативно отримувати інформацію про несправності чи необхідність обслуговування [9, 35, 39].

Варто зазначити, що подібні рішення для управління вже використовуються, проте на значно нижчому рівні, ніж дозволяють сучасні технології. На даний момент існує безліч різноманітних платформ та технологій для Інтернету речей, але вони, як правило, не завжди є сумісними між собою. Багато пристроїв використовують власні протоколи та технології зв'язку, що ускладнює об'єднання їх в єдину платформу [9, 31].

Платформи на зразок Home Assistant чи openHAB можуть слугувати містком, що дозволяє інтегрувати різні рішення в єдину систему. Щоб забезпечити повну сумісність та стабільність роботи таких систем, необхідно мати власний сервер для управління всіма компонентами, що сприятиме надійній роботі та ефективному керуванню в межах одного додатку [35, 39].

Як було вже зазначено, інтеграція освітлювальних систем у межах розумного міста значно розширює їхні автоматизаційні можливості. Впровадження датчиків руху, освітленості, температури та вологості дозволяє системі адаптувати освітлення до реальних умов. Наприклад, у похмурі та дощові дні система може вмикати освітлення раніше, оскільки сутінки настають швидше через недостатнє природне освітлення. Традиційні ж системи, запрограмовані на чіткий час включення, можуть вмикатися пізніше, що знижує їхню ефективність. Для кращої адаптації до змін часу, таких як перехід на літній чи зимовий час, система може

автоматично синхронізуватися з погодними умовами та налаштуваннями часу, оптимізуючи яскравість освітлення відповідно до інтенсивності трафіку, що зменшує витрати на електроенергію [9, 27, 28, 29, 32].

Датчики також збирають статистичні дані, які допомагають проаналізувати необхідний рівень освітлення та налаштувати систему для ще кращої адаптації в майбутньому. Цей рівень автоматизації дозволяє освітлювальним системам працювати без втручання оператора, а впроваджені алгоритми обробляють усі рутинні налаштування [9, 32].

Однією з ключових технологій для забезпечення безпроводного зв'язку є LoRa (Long Range), яка була обрана за її енергоефективність та здатність забезпечувати стабільний зв'язок на великих відстанях, до 10 км на відкритих територіях. Завдяки LoRa системи освітлення можуть підтримувати зв'язок навіть між різними парками чи великими міськими зонами без потреби у локальних серверах. Така технологія здатна забезпечити зв'язок і в забудованих районах на відстані 2-3 км, де традиційні способи з'єднання малоефективні через заглушення сигналу. LoRa дозволяє передавати дані від датчиків і контролерів до центрального сервера з мінімальними витратами енергії, що сприяє економії та підвищує ефективність системи загалом [31].

ВИСНОВКИ

Автономні системи освітлення на основі сонячних панелей є сучасним і ефективним рішенням для громадських просторів, таких як парки і вулиці. Використання гнучких панелей з покриттям EFTE, а також літій-залізо-фосфатних акумуляторів, забезпечує тривалий термін служби, високу ефективність навіть у затінених умовах та стабільну роботу за несприятливої погоди. Такі системи значно зменшують витрати на електроенергію та залежність від традиційної електромережі.

Інтеграція з IoT-пристроями, такими як датчики руху, освітленості, температури та струму, дозволяє оптимізувати енергоспоживання та забезпечити багатофункціональність. Завдяки цьому освітлювальні системи можуть не лише виконувати свою основну функцію, а й забезпечувати моніторинг стану довкілля, безпеку та управління. Такий підхід сприяє економії ресурсів і підвищенню комфорту мешканців, де завдяки алгоритмам автоматизації, все працює злагоджено.

Застосування технологій безпроводного зв'язку, таких як LoRa, дає змогу ефективно управляти системами на великих територіях і забезпечувати централізований моніторинг. Інтеграція машинного навчання та штучного інтелекту зможе додати адаптивність освітленню до змін зовнішніх умов, прогнозувати споживання енергії та оптимально управляти ресурсами, що відкриває нові можливості для розвитку автономних систем освітлення.

Подальший розвиток запропонованого рішення може включати інтеграцію з іншими компонентами розумного міста та використання інших альтернативних джерел енергії, таких як вітрові турбіни, та у близькій перспективі – п'єзоелектричні технології, що дозволить зменшити екологічний вплив, підвищити енергоефективність і зробити автономні освітлювальні системи ключовим елементом сталого розвитку міської інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Onu P., Pradhan A., Mbohwa C. The potential of industry 4.0 for renewable energy and materials development – The case of multinational energy companies. ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023077551> (дата звернення: 16.10.2024).
2. Energy Efficiency Index, the Basis for Comparison | Carrier. Carrier. URL: <https://www.carrier.com/commercial-refrigeration/en/eu/EcoDesign/energy-efficiency-index/> (дата звернення: 16.10.2024).
3. Energy Saving Light Bulbs: The Bright Choice for Your Home. Electrical Wholesalers & Supply Stores Online | Meteor Electrical | Meteor Electical. URL: <https://www.meteorelectrical.com/blog/energy-saving-light-bulbs.html> (дата звернення: 16.10.2024).
4. Halttu J. Led lamps vs incandescent lamps: advantages and disadvantages. Led Store. URL: <https://ledstore.pro/blog/2023/05/19/led-lamps-vs-incandescent-lamps-advantages-and-disadvantages> (дата звернення: 16.10.2024).
5. В Україні хочуть побудувати 2 ГВт зелених потужностей. ЕкоПолітика. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/v-ukraini-hochut-pobuduvati-2-gvt-zelenih-potuzhnostej/> (дата звернення: 16.10.2024).
6. The Role of Solar Street Lighting in Disaster Preparedness and Response. Engoplanet. URL: <https://www.engoplanet.com/single-post/solar-street-lighting-in-disaster-preparedness-and-response> (дата звернення: 17.10.2024).
7. How Do Solar Batteries Work? Archives. Solar.com. URL: <https://www.solar.com/learn/how-do-solar-batteries-work/> (дата звернення: 17.10.2024).
8. Roy A. Techavo System. Motion Sensor: Learn Everything You Need to Know. URL: <https://www.techavo.in/motion-sensor-learn-everything-you-need-to-know/> (дата звернення: 17.10.2024).
9. How to Using IoT in Smart Lighting - DusunIoT. Dusun IoT: Embedded Hardware Vendor/Manufacturer | IoT Gateway Expert. URL: <https://www.dusuniot.com/blog/how-to-using-iot-in-smart-lighting/> (дата звернення: 17.10.2024).
10. What is Smart Street Lighting Using IoT. MOKOSmart #1 Smart Device Solution in China. URL: <https://www.mokosmart.com/smart-street-lighting-using-iot/> (дата звернення: 18.10.2024).
11. Ysiao A. Combining Video Surveillance Cameras with Street Lamps. LinkedIn: Log In or Sign Up. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/combining-video-surveillance-cameras-street-lamps-amay-xiao-d0gyf/> (дата звернення: 18.10.2024).
12. What Are The Main Components of Solar Panels? - Professional Distributed PV Module Manufacturer. Professional Distributed PV Module Manufacturer. URL:

<https://www.maysunsolar.com/blog-what-are-the-main-components-of-solar-panels/> (дата звернення: 18.10.2024).

13. Solar Cheat Sheet: What You Need to Know Before Getting Solar Panels. CNET. URL: <https://www.cnet.com/home/energy-and-utilities/solar-cheat-sheet-your-complete-guide-to-getting-solar-panels-at-home/> (дата звернення: 20.10.2024).

14. How Does a Solar Charge Controller Work?. AltE Store. URL: <https://altestore.com/pages/how-does-a-solar-charge-controller-work?srsltid=AfmBOop5Y7qEAHLJ6ZxJJcfjWy2Vnx654kZK44aa-Poc6dZhCkGPuoqA> (дата звернення: 20.10.2024).

15. Effect Of Solar Shading on Solar Panels' Efficiency | Solar Medix. Solar Medix. URL: <https://solarmedix.com/effect-of-shading-on-solar-panels-efficiency/#:~:text=Likewise,%20shading%20a%20solar%20cell,potential%20due%20to%20this%20restriction.> (дата звернення: 22.10.2024).

16. How to avoid the shadow effect on solar panels?. Guangdong Prostar New Energy Technology Co., Ltd. URL: <https://www.prostarsolar.net/article/how-to-avoid-the-shadow-effect-on-solar-panels.html> (дата звернення: 22.10.2024).

17. Solar Panel Efficiency - Pick the Most Efficient Solar Panels Archives. Solar.com. URL: <https://www.solar.com/learn/solar-panel-efficiency/> (дата звернення: 22.10.2024).

18. How does a wind turbine work? - Action Renewables. Action Renewables. URL: <https://actionrenewables.co.uk/news/how-does-a-wind-turbine-work/> (дата звернення: 22.10.2024).

19. Wind Energy v. Solar Energy: Which is a Better Renewable for Your Commercial Farm? | Ceres Greenhouse. Commercial Greenhouses - Residential Greenhouse Solutions - Ceres. URL: <https://ceresgs.com/wind-energy-v-solar-energy/> (дата звернення: 23.10.2024).

20. Flooded Batteries vs. AGM Batteries: Understanding the Differences - Power Sonic. Power Sonic. URL: <https://www.power-sonic.com/blog/flooded-batteries-vs-agm-batteries-understanding-the-differences/> (дата звернення: 23.10.2024).

21. Choosing the Right Lithium Battery: LiFePO4 vs. Li-Ion vs. Li-Poly Compared. eco-worthy-uk. URL: <https://uk.eco-worthy.com/blogs/lithium-battery-comparison#:~:text=LiFePO4%20batteries%20last%20longer%20and,cars%20or%20high-performance%20vehicles.> (дата звернення: 23.10.2024).

22. Everything you need to know about Lithium-Ion Batteries. Verkor. URL: <https://verkor.com/en/everything-you-need-to-know-about-lithium-ion-batteries/> (дата звернення: 23.10.2024).

23. Wong B. LiFePO4 Battery Working Principle | IMPROVE BATTERY. IMPROVE BATTERY. URL: <https://www.improvecn.com/articles/lifepo4-battery-working-principle> (дата звернення: 23.10.2024).

24. NiMH rechargeable battery & battery » All about nickel metal hydride technology. Conrad Electronic » All parts of success. URL: <https://www.conrad.com/en/guides/industry/rechargeable-battery-technologies/nimh-technology.html> (дата звернення: 24.10.2024)

25. Smart crosswalk - LED Solutions. LED Solutions. URL: <https://ledsolutions.kz/en/smart-crosswalk/> (дата звернення: 24.10.2024).

26. Тарасовський Ю. Мобільних операторів зобов'язали забезпечити 10 годин роботи мережі в умовах відключень світла – Forbes.ua. Forbes.ua. URL: <https://forbes.ua/news/mobilnikh-operatoriv-zobovyazali-zabezpechiti-10-godin-roboti-merezhi-v-umovakh-vidklyuchen-svitla-17072024-22439> (дата звернення: 24.10.2024).

27. lady ada. PIR Motion Sensor. Adafruit Learning System. URL: <https://learn.adafruit.com/pir-passive-infrared-proximity-motion-sensor/overview> (дата звернення: 25.10.2024).

28. LDR Sensor (Light Dependent Resistor) - Pinout, Connections. techZeero. URL: <https://techzeero.com/sensors-modules/ldr-sensor/> (дата звернення: 27.10.2024).

29. What Is The Temperature And Humidity Sensor? And How To Select It?. Environment Monitoring Sensors Manufacturer. URL: <https://www.renkeer.com/temperature-humidity-sensors-select/> (дата звернення: 27.10.2024).

30. Halfacree G. Raspberry Pi 5 Review – Hands-On with the Most Powerful Raspberry Pi Yet. Hackster.io. URL: <https://www.hackster.io/news/raspberry-pi-5-review-hands-on-with-the-most-powerful-raspberry-pi-yet-57efaf61b10f> (дата звернення: 27.10.2024).

31. dfrobot.com. DFRobot Open-Source Hardware Electronics and Kits. URL: <https://www.dfrobot.com/blog-1646.html> (дата звернення: 27.10.2024).

32. 16 Types of sensors used in IoT - Freeway. Freeway. URL: <https://freeway.com/16-types-of-sensors-used-in-iot/> (дата звернення: 27.10.2024).

33. ESP32 vs Arduino : Definition & the Main Differences. acebott. URL: <https://acebott.com/stem-blogs/esp32-vs-arduino-what-is-different/#:~:text=ESP32%20development%20boards%20are%20suitable,hobbyist%20projects,%20and%20artistic%20installations.> (дата звернення: 28.10.2024).

34. The IoT cloud: Microsoft Azure vs. AWS vs. Google Cloud. IoT Analytics. URL: <https://iot-analytics.com/iot-cloud/> (дата звернення: 28.10.2024).

35. Smart Life App - a Comprehensive Guide - Everything You Need to Know. SmartHome. URL: <https://www.smarthome.news/how-tos/other-systems/smart-life-app-review-and-guide> (дата звернення: 28.10.2024).

36. Ali Kazmi S. N., Ulasyar A., Nadeem F. IoT based Energy Efficient Smart Street Lighting Technique with Air Quality Monitoring. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/348887601_IoT_based_Energy_Efficient_Smart_Street_Lighting_Technique_with_Air_Quality_Monitoring (дата звернення: 28.10.2024).

37. The Future of Smart Street Lights | Coolfire Blog. Coolfire. URL: <https://coolfiresolutions.com/blog/smart-street-lights/> (дата звернення: 28.10.2024).

38. What It's Like to Experience Polar Night in the World's Northernmost Town. Smithsonian Magazine. URL: <https://www.smithsonianmag.com/travel/what-its-like-to-experience-polar-night-in-the-worlds-northernmost-town-180985271/> (дата звернення: 29.10.2024).

39. Barclay L. Home Assistant vs OpenHAB - Which one is better?. Everything Smart Home. URL: <https://everythingsmarthome.co.uk/home-assistant-vs-openhab-which-one-is-better/> (дата звернення: 29.10.2024).

40. Solid-state batteries - E-Mobility Engineering. E-Mobility Engineering. URL: <https://www.emobility-engineering.com/solid-state-batteries/> (дата звернення: 30.10.2024).

41. Козловський М.А. Використання rsa протоколів у криптографічній безпеці інформаційних систем. «Сучасний стан та перспективи розвитку ІОТ» : V Всеукр. науково-техн. конф., м.Київ, 18 квітня 2024 р. С. 89-91. URL: https://duikt.edu.ua/uploads/p_2661_70423010.pdf

42. Козловський М.А., Асеева Л.А. Інтелектуальні системи освітлення для парків з використанням ІоТ і відновлюваних джерел енергії. «Проблеми комп'ютерної інженерії» : Науково-практ. конф., м.Київ, 3 грудня 2024 р. С.23-25.

43. Козловський М.А., Асеева Л.А. Перспективи впровадження LED-технологій для освітлення міських просторів. «Проблеми комп'ютерної інженерії» : Науково-практ. конф., м.Київ, 3 грудня 2024 р. С.20-22.

Порівняння трьох типів безпроводних технологій (Wi-Fi, ZigBee та LoRa) за кількома ключовими характеристиками

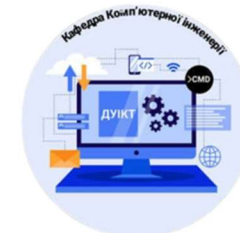
Таблиця А.1 – Порівняння трьох типів безпроводних технологій.

Характеристика	Wi-Fi	ZigBee	LoRa
Діапазон частот	2.4 ГГц, 5 ГГц	2.4 ГГц	433 МГц, 868 МГц, 915 МГц
Радіус дії	30-50 метрів (в приміщенні)	10-20 метрів (в приміщенні)	2-15 км (залежно від умов)
Пропускна здатність	Висока (до 1 Гбіт/с і більше)	Низька (до 250 Кбіт/с)	Дуже низька (до кількох кілобіт/с)
Енергоспоживання	Високе	Низьке	Дуже низьке
Кількість пристроїв	Підтримує багато підключень	Може підтримувати до 65,000 пристроїв у мережі	Підтримує велику кількість пристроїв
Типи застосувань	Високошвидкісна передача даних, інтернет, потокове відео	Розумний дім, автоматизація, сенсори	Далекі сенсори, IoT, агрономія
Затримка передачі	Низька	Низька	Висока
Безпека	WPA/WPA2, але вразливий до атак	AES шифрування, безпечні з'єднання	AES шифрування, але обмежена безпека для вузлів
Інфраструктура	Потребує маршрутизаторів	Потребує хабів (систем управління)	Потребує шлюзів та мережевих серверів
Сумісність	Стандартні пристрої від різних виробників	Обмежена між виробниками	Стандартизація залежить від виробника

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ



**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра комп'ютерної інженерії**



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістра
НА ТЕМУ: «АВТОНОМНІ ОСВІТЛЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ НА
ОСНОВІ ІОТ ДЛЯ ПАРКІВ З АЛЬТЕРНАТИВНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ
ЖИВЛЕННЯ»

Виконав студент групи КСДМ-62
Козловський Максим Андрійович
Керівник дипломної роботи:
Асєєва Людмила Анатоліївна,
phD (доктор філософії), доцент

Київ – 2025

2 Мета, об'єкт, предмет дослідження

Мета роботи – розробити ефективну автономну освітлювальну систему на основі IoT для парків, яка використовує альтернативні джерела живлення для зменшення енергоспоживання та екологічного впливу

Об'єкт дослідження – автономні освітлювальні системи для парків

Предмет дослідження – технічні й технологічні особливості розробки та функціонування IoT-систем освітлення з альтернативними джерелами живлення

3

Актуальність роботи

У роботі досліджується розробка та впровадження автономних освітлювальних систем для парків і громадських просторів, що базуються на сучасних технологіях Інтернету речей (IoT). Особливу увагу приділено оптимізації енергоспоживання, використанню сенсорів для моніторингу умов навколишнього середовища та забезпеченню стабільної роботи систем за допомогою акумуляторних технологій.

Розглядаються підходи до централізованого управління освітленням на великих територіях із використанням безпроводних технологій. Досліджено можливості інтеграції алгоритмів роботи у систему для прогнозування енергоспоживання та адаптації роботи систем до зовнішніх умов, а також перспективи їх включення до розумної міської інфраструктури.

4 Потреба у впровадженні автономних освітлювальних систем з інтеграцією IoT-технологій



Рис. 1.6 – Штучне освітлення у вечірній час

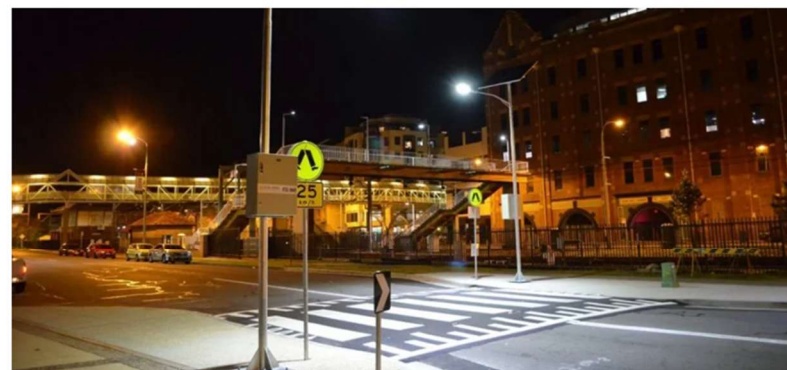


Рис. 1.7 – Штучне освітлення зі вбудованими сонячними панелями для забезпечення безпеки пішоходів у вечірній час та у разі відключень світла

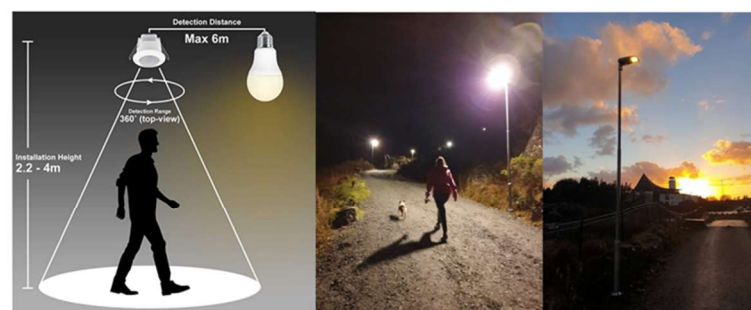


Рис. 1.9 – Використання датчиків освітленості та руху для зниження енерговитрат у часи простою

5

Компоненти запропонованої автономної освітлювальної системи

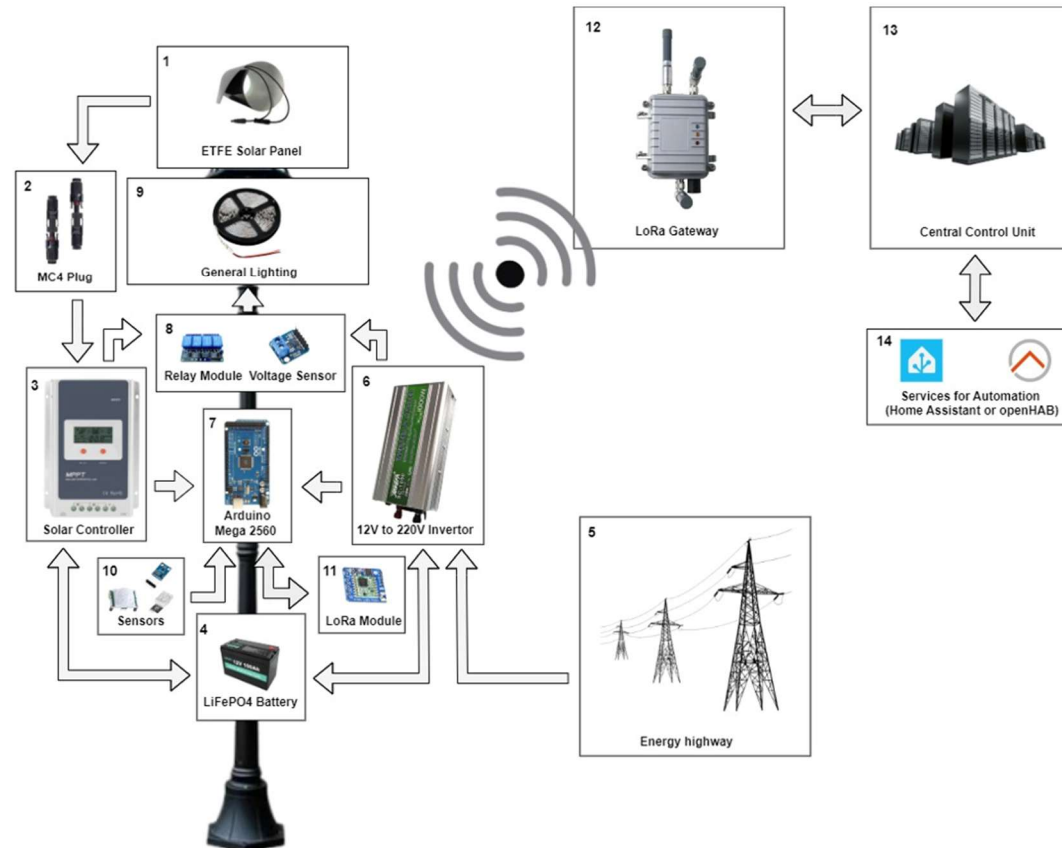


Рис. 3.14 – Запропонована автономна IoT-освітлювальна система для парків з ETFE-панеллю, LoRa-керуванням і локальною автоматизацією

6

Архітектура автономної освітлювальної системи з елементами IoT



Рис. 2.20 – Схема передачі та прийому даних у двох напрямках (освітлювальна система та центральний шлюз)

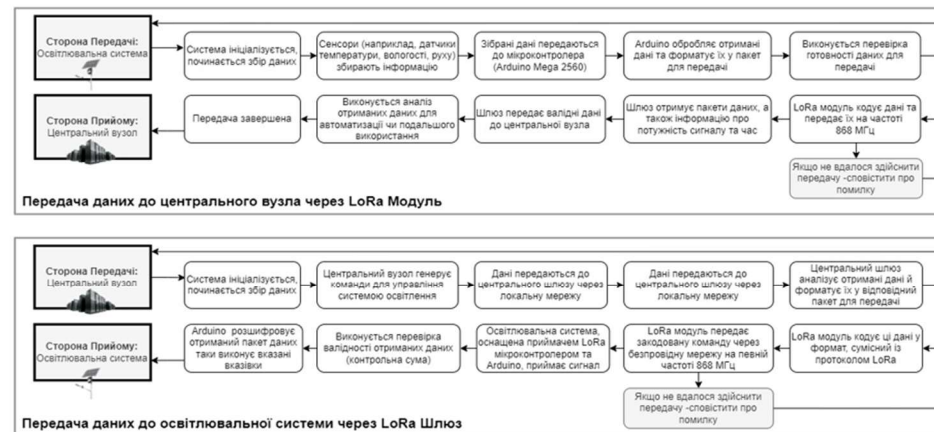


Рис. 2.19 – Етапи передачі та прийому даних у двох напрямках (освітлювальна система та центральний шлюз)

7

Алгоритми резервування в автономній системі

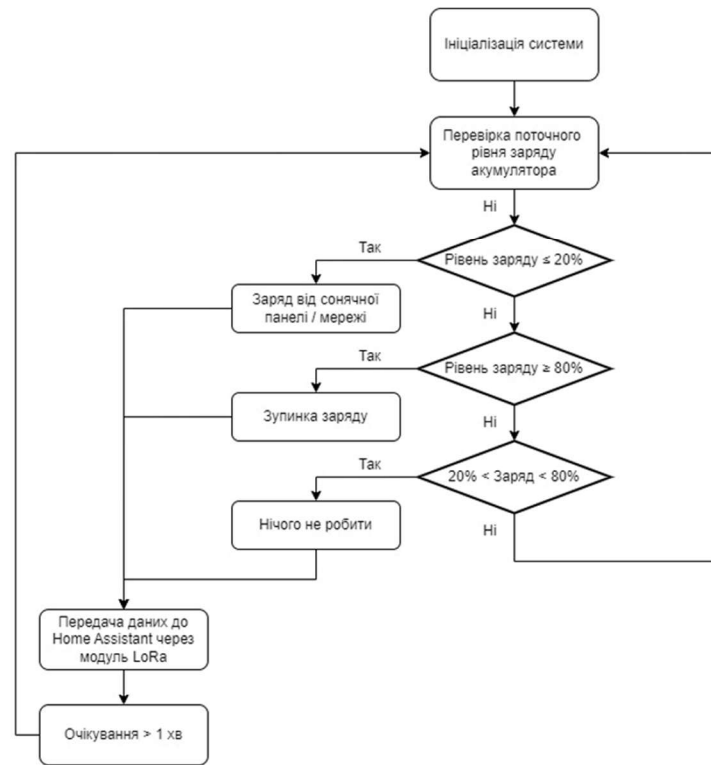


Рис. 2.17 – Алгоритм заряду/розряду акумулятора у форматі: 20% < Доступний заряд < 80%

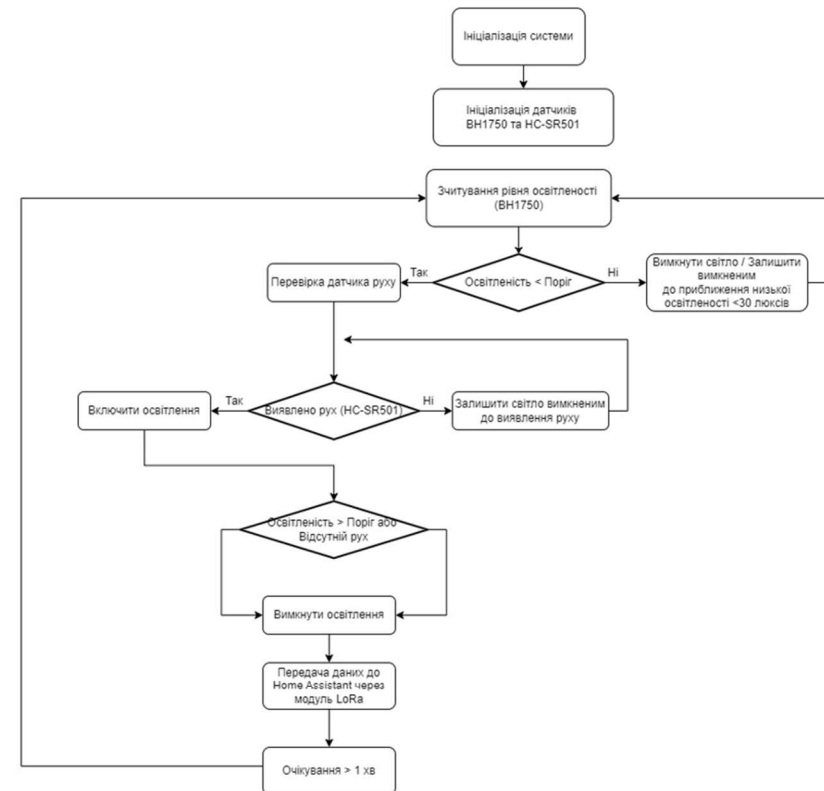


Рис. 2.16 – Алгоритм автоматичного освітлення на основі датчиків руху HC-SR501 та освітлення BH1750

8

Алгоритми управління в автономній системі

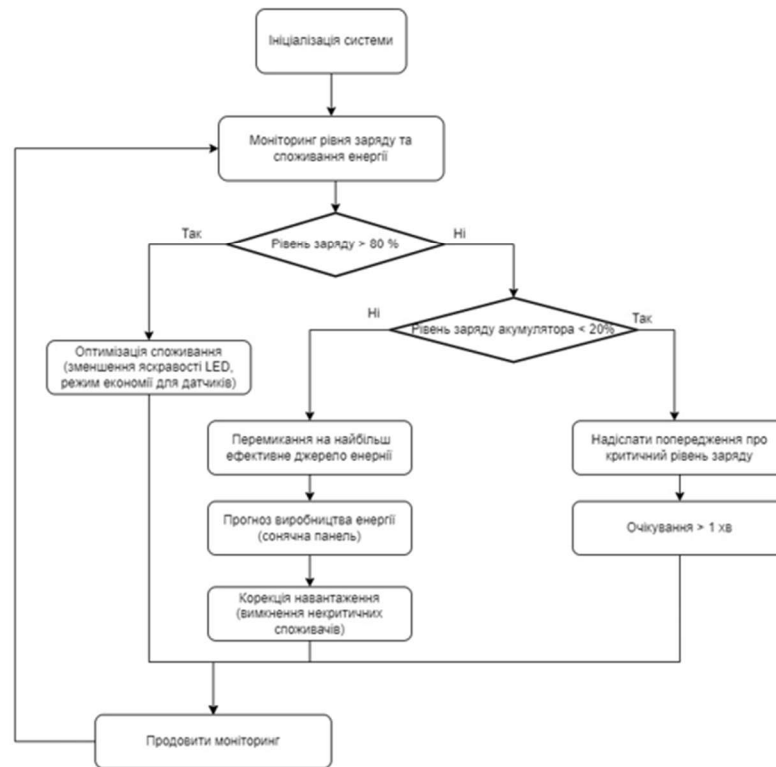


Рис. 2.22 – Алгоритм управління енергозбереження шляхом оптимізації споживання та перемикання на інше живлення

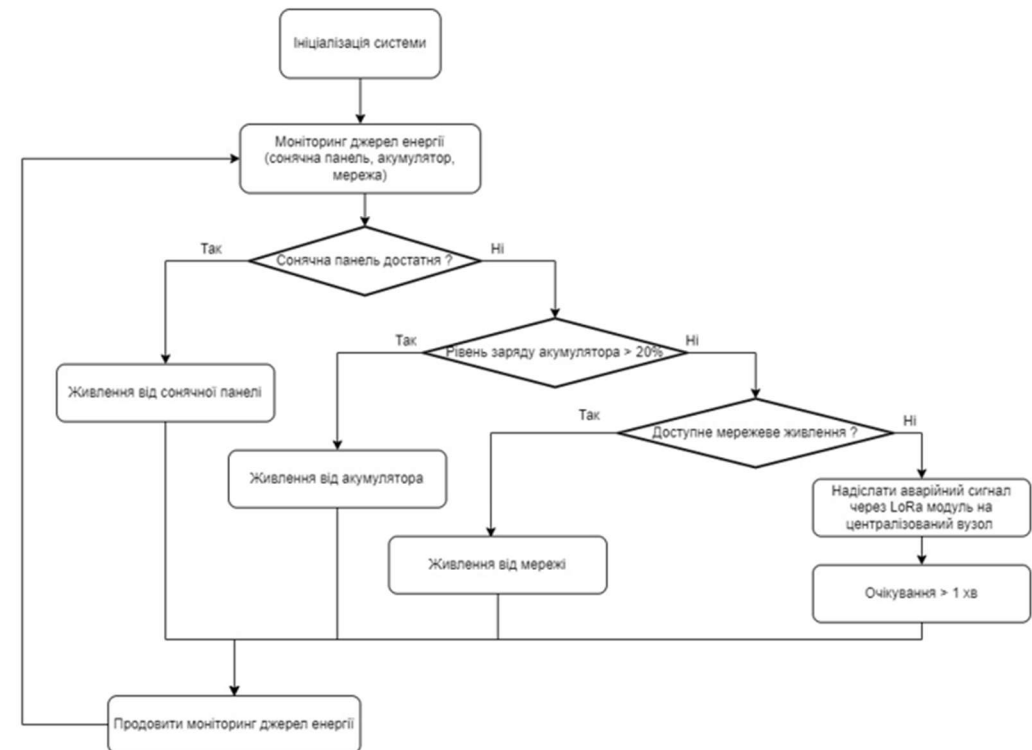


Рис. 2.21 – Алгоритм управління інвертором у режимі: сонячна панель > акумулятор > мережеве живлення

9

Алгоритм передачі даних в автономній системі

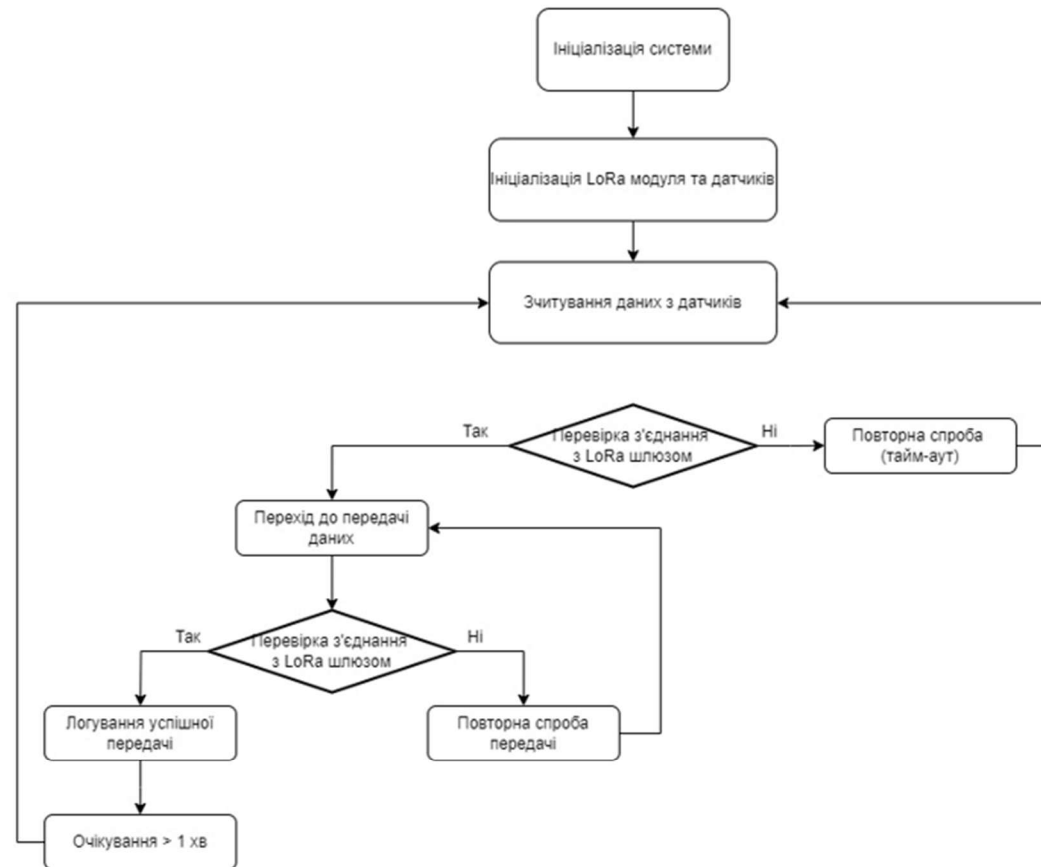


Рис. 2.18 – Алгоритм передачі даних від LoRa модуля до шлюзу LoRa

10

Методи енергозбереження та оптимізації споживання енергії



Рис. 3.1 – Робота сонячної EFTE-панелі в умовах затінку



Рис. 3.2 – Гнучка сонячна панель з EFTE покриттям



Рис. 3.5 – Акумулятор LiFePO₄ 12V 100Ah

11

Порівняння запропонованого рішення з існуючими системами

Параметр	Існуючі рішення	Запропоноване рішення	Перевага запропонованого рішення
Тип сонячних панелей	Жорсткі панелі, низька ефективність у затінку	Гнучкі панелі з EFTE покриттям, висока ефективність у затінку та довговічність	Краща ефективність у розсіяному світлі, довговічність, стійкість до пошкоджень
Моніторинг і управління	Відсутність централізованого моніторингу, обмежена автоматизація	Централізований моніторинг через LoRa, повна автоматизація	Оперативний контроль, можливість централізованого керування
Енергоспоживання	Незбалансований розподіл використання наявних ресурсів	Використання датчиків руху, освітленості та температури для оптимізації	Економія енергії, довша автономна робота
Гнучкість установки	Фіксовані габаритні панелі, обмежений монтаж	Гнучкі панелі для установки на різних поверхнях і формах	Можливість адаптації до складних умов
Тип інвертора	Обмежена функціональність, недостатня гнучкість	Універсальний інвертор з можливістю роботи від сонячних панелей і мережі	Резервування живлення, стабільна робота за будь-яких умов
Датчики та IoT	Обмежений набір сенсорів, відсутність IoT	Розширений набір датчиків (руху, освітленості, температури, струму) з підключенням до IoT	Більший контроль над системою, оптимізація енергоспоживання
Резервування живлення	Відсутнє або мінімальне	Резервування акумуляторів через мережу за допомогою інвертора	Стабільність роботи навіть за несприятливих умов
Довговічність та обслуговування	Зниження ефективності через накопичення пилу, обмежений моніторинг	Використання EFTE покриття, IoT моніторинг для швидкого виявлення несправностей	Менші витрати на обслуговування, тривалий термін служби

Табл. 3.1 – Порівняння запропонованої системи між існуючими

12 Орієнтовний кошторис запропонованого рішення

№	Назва комплектуючої	Характеристика / Модель	Ціна (за 1 шт.)	Ціна (за 20 шт.)
1	Гнучка сонячна EFTE-панель	Altek ALF-120W	\$110	\$2,200
2	Сонячний контролер	EPEVER MPPT Tracer 2210A (20A, 12/24V)	\$100	\$2,000
3	Акумулятор	Li Time LiFePO4 12V 100Ah	\$180	\$3,600
4	Датчик напруги та струму	INA219 (I2C модуль контролю струму і напруги)	\$3	\$60
5	Інвертор з функцією зарядки акумулятора	Jongfa SC-10000 1000W	\$60	\$1,200
6	Світлодіодна стрічка	SMD 5050 LED Strip 12V 5m	\$10	\$200
7	Контролер освітлення	Arduino Mega 2560	\$35	\$700
8	Датчик руху	HC-SR501 PIR	\$1	\$20
9	Датчик освітленості	BH1750 (I2C)	\$2	\$40

Табл. 3.2 – Орієнтовна вартість запропонованої системи

№	Назва комплектуючої	Характеристика / Модель	Ціна
1	Центральний вузол	Raspberry Pi 4 Model B	\$110
2	Шлюз LoRa	LoRa Gateway EU868	\$500
	Загальна вартість:		\$660

Табл. 3.3 – Орієнтовна вартість центрального вузла

№	Назва комплектуючої	Характеристика / Модель	Ціна (за 1 шт.)	Ціна (за 20 шт.)
10	Датчик температури/вологи	DHT22	\$6	\$120
11	Модуль LoRa	Adafruit RFM95W LoRa 868/915MHz	\$50	\$1,000
12	Роз'єми для панелей	Роз'єми MC4	\$3	\$60
13	Макетна плата + дроти	400 Pin + Dupont дроти	\$5	\$100
14	Корпус для електроніки	Бокс монтажний пластиковий SKIM 700x500x250 з панеллю IP65 10м	\$70	\$1,400
15	Кабелі	Кабель для сонячних панелей 6 мм2 KBE Solar DB EN 50618 h1z2z2-k	\$13	\$260
16	Програмне забезпечення	Home Assistant	Безкоштовно	
	Загальна вартість:		\$648	\$12,960

Продовж. табл. 3.2 – Орієнтовна вартість запропонованої системи

13

Висновки

Автономні системи освітлення на основі сонячних панелей є сучасним і ефективним рішенням для громадських просторів, таких як парки і вулиці. Використання гнучких панелей з покриттям EFTE, а також літій-залізо-фосфатних акумуляторів, забезпечує тривалий термін служби, високу ефективність навіть у затінених умовах та стабільну роботу за несприятливої погоди. Такі системи значно зменшують витрати на електроенергію та залежність від традиційної електромережі.

Інтеграція з IoT-пристроями, такими як датчики руху, освітленості, температури та струму, дозволяє оптимізувати енергоспоживання та забезпечити багатофункціональність. Завдяки цьому освітлювальні системи можуть не лише виконувати свою основну функцію, а й забезпечувати моніторинг стану довкілля, безпеку та управління. Такий підхід сприяє економії ресурсів і підвищенню комфорту мешканців, де завдяки алгоритмам автоматизації, все працює злагоджено.

14

Продовження висновків

Застосування технологій безпроводного зв'язку, таких як LoRa, дає змогу ефективно управляти системами на великих територіях і забезпечувати централізований моніторинг. Інтеграція машинного навчання та штучного інтелекту зможе додати адаптивність освітленню до змін зовнішніх умов, прогнозувати споживання енергії та оптимально управляти ресурсами, що відкриває нові можливості для розвитку автономних систем освітлення.

Подальший розвиток запропонованого рішення може включати інтеграцію з іншими компонентами розумного міста та використання інших альтернативних джерел енергії, таких як вітрові турбіни, та у близькій перспективі – п'єзоелектричні технології, що дозволить зменшити екологічний вплив, підвищити енергоефективність і зробити автономні освітлювальні системи ключовим елементом сталого розвитку міської інфраструктури.

15

Публікації та апробація роботи

1. Козловський М.А. Використання RSA протоколів у криптографічній безпеці інформаційних систем. «Сучасний стан та перспективи розвитку ІОТ» : V Всеукр. науково-техн. конф., м.Київ, 18 квітня 2024 р. С. 89-91. URL: https://duikt.edu.ua/uploads/p_2661_70423010.pdf.
2. Козловський М.А., Асеева Л.А. Інтелектуальні системи освітлення для парків з використанням ІоТ і відновлюваних джерел енергії. «Проблеми комп'ютерної інженерії» : Науково-практ. конф., м.Київ, 3 грудня 2024 р. С.23-25.
3. Козловський М.А., Асеева Л.А. Перспективи впровадження LED-технологій для освітлення міських просторів. «Проблеми комп'ютерної інженерії» : Науково-практ. конф., м.Київ, 3 грудня 2024 р. С.20-22.