

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«ТЕХНОЛОГІЯ ІОТ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
SMART CITY»

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

за спеціальності 126 Інформаційні системи та технології

(код, найменування спеціальності)

освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології

(назва)

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

(підпис)

Юрій ЧОРНИЙ
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Виконав:

здобувач вищої освіти

група ІСД-42

Юрій ЧОРНИЙ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник

к.т.н.

Ольга ПОЛОНЕВИЧ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

науковий ступінь,
вчене звання

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології

Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІСТ

_____ Каміла СТОРЧАК

“ _____ ” _____ 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

_____ Чорному Юрію Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи:

керівник кваліфікаційної роботи: Ольга ПОЛОНЕВИЧ к.т.н., доцент

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

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від “24” лютого 2025 р. №56

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «30» травня 2025 р.

3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи:

1. Науково технічна література.
2. Аналіз моніторингу та управління енергоефективністю.
3. Розумні системи для моніторингу та управління енергоефективною інфраструктурою.

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

1. Огляд проблематики енергоефективності в розумних містах.
2. Застосування технологій IoT для енергоефективності в розумних містах.
3. Інфраструктура та організація IoT-систем для енергоефективності.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *презентація*

6. Дата видачі завдання «24» лютого 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	03.03.25	
2	Розділ 1. Теоретичні основи використання IoT в Smart City	12.03.25	
3	Огляд сучасних IoT-технологій для Smart City	20.03.25	
4	Розділ 2. Аналіз рішень IoT для підвищення енергоефективності	01.04.25	
5	Вивчення прикладів енергоефективних IoT-систем	15.04.25	
6	Розділ 3. Проектування системи IoT для підвищення енергоефективності в умовах українського міста	21.04.25	
7	Висновки	30.04.25	
8	Оформлення та перевірка бакалаврської роботи	01.05.25	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Юрій ЧОРНИЙ

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник
кваліфікаційної роботи

(підпис)

Ольга ПОЛОНЕВИЧ

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра: 60 стор., 12 рис., 23 джерела.

Мета роботи – дослідження підходів до інтеграції технологій Інтернету речей в інформаційні системи міста для підвищення ефективності споживання енергії.

Об'єкт дослідження - процеси енергоспоживання в інфраструктурі міста.

Предмет дослідження - технології IoT як інструмент підвищення енергоефективності у Smart City.

У межах роботи проведено аналіз теоретичних основ функціонування IoT та концепції "розумного міста", з акцентом на їх застосування в енергетичному секторі, включаючи вивчення успішних зарубіжних прикладів, таких як системи розумних електромереж у Копенгагені та Сінгапурі, що забезпечують ефективне управління енергоспоживанням та інтеграцію відновлювальних джерел енергії. Досліджено особливості місцевої інфраструктури міста Бориспіль, на основі чого розроблено концептуальну модель IoT-системи енергоефективного управління, яка включає сенсорні пристрої, мікроконтролери, хмарні сервіси та інтелектуальний аналіз даних для моніторингу та оптимізації енергоспоживання. Сформовано рекомендації для впровадження подібних рішень в українських умовах, враховуючи технологічні можливості та виклики, а також проведено моделювання прототипу системи на базі платформи Tinkercad для управління енергетичними ресурсами, з подальшим тестуванням і пропозиціями щодо її вдосконалення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, IoT, РОЗУМНЕ МІСТО, SMART CITY, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, УРБАНІЗАЦІЯ, МІСЬКА ІНФРАСТРУКТУРА, МОДЕЛЮВАННЯ, ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, МОНІТОРИНГ, АНАЛІЗ ДАНИХ, ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ,

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ІoT В SMART CITY.....	10
1.1. Поняття "розумного міста": сучасний підхід	10
1.2. Архітектура ІoT: компоненти, протоколи, мережі	13
1.3. Проблеми енергоефективності в урбанізованих просторах	16
1.4. Світові тренди використання ІoT в міському середовищі	21
1.5. Еволюція концепції Smart City: від автоматизації до інтеграції	24
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ РІШЕНЬ ІoT ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ	29
2.1. Інтелектуальне освітлення	29
2.2. Управління будівлями	30
2.3. ІoT у транспорті	31
2.4. Вплив ІoT на зниження CO ₂ та екологічність	32
2.5. Безпека на кожному рівні архітектури ІoT	34
2.6 Інтелектуальне управління енергомережами (Smart Grid)	36
РОЗДІЛ 3. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ІoT ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В УМОВАХ УКРАЇНСЬКОГО МІСТА	40
3.1. Постановка задачі для пілотного проєкту	40
3.2. Архітектура запропонованої ІoT-системи	41
3.3. Вибір компонентів	44
3.4. Модель збереження, обробки та аналізу даних	47
3.5. Очікувані результати, обґрунтування ефективності	50
3.6. Обґрунтування актуальності впровадження ІoT-рішень у сфері енерго-менеджменту міста	53
ВИСНОВКИ.....	56
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	58
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)	60

ВСТУП

Актуальність теми. У контексті стрімкої урбанізації та зростання споживання енергоресурсів міста стикаються з викликом забезпечення стабільного функціонування інфраструктури при мінімізації енергетичних витрат. Одним з найбільш ефективних рішень цієї проблеми є концепція Smart City — розумного міста, яке використовує цифрові технології для оптимізації управлінських процесів і покращення якості життя мешканців. Однією з ключових складових цієї концепції є Інтернет речей (IoT), який забезпечує постійний моніторинг, аналіз і адаптацію споживання ресурсів. Саме застосування IoT-технологій відкриває нові можливості для підвищення енергоефективності міського середовища, що є надзвичайно актуальним як для країн з високим рівнем урбанізації, так і для України, яка активно модернізує свої міста.

Метою роботи є дослідження підходів до інтеграції технологій Інтернету речей в інформаційні системи міста для підвищення ефективності споживання енергії.

У межах роботи проведено аналіз теоретичних основ функціонування IoT, а також концепції "розумного міста", дослідити приклади їхнього успішного застосування в енергетичному секторі за кордоном. Крім того, сформовано рекомендації для впровадження подібних рішень в українських умовах. Особливе значення надається моделюванню IoT-системи енергоефективного управління на прикладі міста Бориспіль, із врахуванням специфіки місцевої інфраструктури та наявних технологічних можливостей.

Основні завдання дослідження:

- Проаналізувати теоретичні основи IoT і концепції Smart City.
- Визначити основні напрямки підвищення енергоефективності за допомогою IoT.
- Розглянути приклади успішного впровадження IoT у міських енергосистемах.

- Розробити модель використання IoT для підвищення енергоефективності в умовах українського міста.

Об'єкт дослідження — процеси енергоспоживання в інфраструктурі міста.

Предмет дослідження — технології IoT як інструмент підвищення енергоефективності у Smart City.

У процесі дослідження використано комплекс методів, серед яких:

- аналіз наукової літератури та практичних кейсів;
- порівняльний аналіз реалізованих IoT-рішень;
- моделювання систем енергоменеджменту на основі IoT;
- експертне оцінювання ефективності впровадження рішень.

Наукова новизна. У роботі запропоновано систематизований підхід до використання IoT для енергозбереження у міській інфраструктурі, а також визначено ключові чинники ефективності таких систем. Розроблена модель інтеграції IoT у енергетичні системи українських міст з урахуванням локальних особливостей.

Практичне значення. Результати дослідження можуть бути використані органами місцевого самоврядування, урбаністами та фахівцями з енергоменеджменту для впровадження сучасних технологій у практику міського управління. Запропоновані рекомендації сприяють підвищенню енергоефективності, зменшенню витрат на ресурси та покращенню екологічної ситуації в містах.

Результати дослідження були апробовані на II Всеукраїнській науково-технічній конференції «Технологічні горизонти: дослідження та застосування інформаційних технологій для технологічного прогресу України і світу», що відбулася 18 листопада 2024 року на базі кафедри Інформаційних систем та технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. Доповідь на тему «Застосування IoT для підвищення енергоефективності в системах “розумного міста”».

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ІoT В SMART CITY

1.1 Поняття "розумного міста": сучасний підхід

Концепція Smart City, або "розумного міста", що набула значного поширення в останні десятиліття, являє собою не просто технологічний тренд, а фундаментальну парадигму розвитку сучасних урбанізованих просторів. В її основі лежить ідея глибокої та всеосяжної інтеграції інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ), передових цифрових сервісів та інтелектуальних систем у саму тканину міського середовища. Головною метою такого симбіозу є досягнення якісно нового рівня функціонування міста, що виражається у суттєвому підвищенні якості життя його мешканців, кардинальному зростанні ефективності управління наявними ресурсами – енергетичними, матеріальними, фінансовими та людськими – а також у забезпеченні довгострокового сталого розвитку, що враховує екологічні, соціальні та економічні аспекти. "Розумне місто" – це не статичний стан, а динамічний процес безперервного вдосконалення, орієнтований на вирішення актуальних міських проблем та передбачення майбутніх викликів.

Основними характеристиками, що визначають сутність та відрізняють "розумне місто" від традиційних урбаністичних моделей, є низка взаємопов'язаних принципів. По-перше, це адаптивність – здатність міської системи гнучко реагувати на зміни внутрішніх та зовнішніх умов, будь то коливання попиту на послуги, екстремальні погодні явища чи нові соціально-економічні тенденції. Ця адаптивність досягається завдяки постійному моніторингу ключових параметрів міського життя та наявності механізмів швидкого коригування управлінських рішень. По-друге, підзвітність міських владних структур та сервісних організацій перед громадою, що забезпечується через відкритість даних, прозорість процесів прийняття рішень та наявність ефективних каналів зворотного зв'язку з мешканцями. По-третє, технологічна інтеграція, що передбачає не просто наявність окремих технологічних рішень, а їх поєднання в єдину, синергетичну систему, де різні компоненти взаємодіють та обмінюються даними для досягнення спільних

цілей. По-четверте, прозорість рішень, яка є логічним продовженням підзвітності та означає, що процеси управління містом, від планування бюджету до реалізації конкретних проектів, є відкритими для громадського контролю та розуміння. І, нарешті, п'яте, але чи не найважливіше – орієнтація на мешканців. Саме людина, її потреби, комфорт та безпека є центральним елементом концепції "розумного міста". Технології в такому місті слугують не самоціллю, а інструментом для покращення добробуту громадян та створення більш інклюзивного, справедливого та сприятливого для життя середовища.

Сучасний підхід до реалізації концепції Smart City суттєво еволюціонував від початкового фокусу на автоматизації окремих, часто ізольованих, міських сервісів. Якщо раніше "розумність" міста могла асоціюватися з впровадженням інтелектуальних систем паркування, автоматизованого вуличного освітлення чи електронного документообігу в муніципальних установах, то сьогоднішнє бачення є значно ширшим та амбітнішим. Мова йде про створення єдиної, комплексної екосистеми "розумного міста". В рамках такої екосистеми відбувається безперервний збір величезних масивів даних з різноманітних джерел – сенсорів, мобільних пристроїв, міських камер, соціальних мереж та багатьох інших. Ці дані, що відображають динаміку міських процесів у режимі реального часу, піддаються глибокому аналізу за допомогою алгоритмів машинного навчання, штучного інтелекту та технологій великих даних (Big Data). Результати цього аналізу стають основою для прийняття обґрунтованих та оптимальних управлінських рішень, спрямованих на підвищення ефективності функціонування всіх міських підсистем – транспорту, енергетики, комунального господарства, охорони здоров'я, освіти та безпеки.

У цьому контексті особливу, фундаментальну роль відіграє Інтернет речей (IoT), який виступає не просто одним із компонентів, а саме інфраструктурною основою цифрового міста. IoT являє собою глобальну мережу взаємопов'язаних фізичних об'єктів ("речей"), оснащених сенсорами, актуаторами та засобами комунікації, що дозволяє їм збирати, обробляти та обмінюватися даними без безпосереднього втручання людини. Саме ця мережа численних датчиків, що

пронизує міський простір – від інтелектуальних лічильників у квартирах та "розумних" світлофорів на перехрестях до систем моніторингу стану мостів та екологічних сенсорів – забезпечує первинний збір даних, необхідних для функціонування всієї екосистеми Smart City.



Рис. 1.1. Функціональна модель Smart City: від збору даних до управлінських рішень

Зібрана інформація передається через різноманітні канали зв'язку (дротові та бездротові) на спеціалізовані платформи, де вона агрегується, обробляється та візуалізується. Таким чином, IoT перетворює фізичне середовище міста на

інтерактивний, насичений даними простір, що відкриває безпрецедентні можливості для аналізу, прогнозування та проактивного управління міськими процесами. Без розгалуженої та надійної інфраструктури Інтернету речей реалізація повноцінної екосистеми "розумного міста", здатної до саморегуляції та адаптації, була б неможливою. Це технологічне підґрунтя дозволяє перейти від фрагментарної автоматизації до цілісного, інтелектуального управління містом як складною, динамічною системою.

1.2 Архітектура IoT: компоненти, протоколи, мережі

Інтернет речей (IoT) — це складна система, що об'єднує фізичні об'єкти, оснащені сенсорами, програмним забезпеченням і комунікаційними модулями, які забезпечують збір, передачу і обробку даних у режимі реального часу. Основна мета IoT — створити умови для автоматичного моніторингу, контролю та оптимізації різних процесів за допомогою взаємодії між пристроями.

Архітектура IoT-систем має багаторівневу структуру, де кожен рівень виконує свою функціональну роль і забезпечує узгоджену роботу всієї системи. Зазвичай виділяють такі основні рівні:

- Рівень пристроїв (Perception Layer): Цей рівень відповідає за безпосередній збір інформації із фізичного світу. До нього входять різноманітні датчики (температури, вологості, освітлення, руху), RFID-мітки, камери, а також виконавчі пристрої. Тут відбувається первинне перетворення фізичних параметрів у цифрові дані, які надалі обробляються

- Цей рівень фактично є «очима» і «вухами» IoT-системи.

- Мережева інфраструктура (Network Layer): Рівень відповідає за надійну та ефективну передачу зібраних даних від пристроїв до обробних центрів. Для цього використовуються різні протоколи та технології зв'язку, які відрізняються за радіусом дії, швидкістю передачі, енергоспоживанням і пропускну здатністю. Серед локальних мереж поширені Zigbee, Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi, які підходять для передачі даних на короткі відстані. Для

великого покриття з низьким енергоспоживанням застосовують LPWAN-технології, такі як LoRaWAN і NB-IoT. Також у деяких випадках використовується мобільний зв'язок 4G або 5G, що забезпечує високу швидкість і стабільність передачі даних.

- Рівень обробки та зберігання даних (Middleware / Data Layer): На цьому рівні відбувається агрегація, фільтрація, первинна обробка даних, а також їхнє зберігання у централізованих або розподілених хмарних сховищах. Використовуються спеціалізовані платформи, такі як AWS IoT, Microsoft Azure IoT Hub, Google Cloud IoT. Цей рівень також відповідає за управління потоками інформації, забезпечення безпеки та автентифікації пристроїв, а також за інтеграцію з аналітичними сервісами.

- Рівень застосування (Application Layer): Це верхній рівень, де реалізуються конкретні сервіси і додатки для кінцевих користувачів і операторів системи. Приклади включають моніторинг вуличного освітлення, управління трафіком, контроль споживання енергії, безпеку міських об'єктів тощо. Саме тут дані перетворюються у зрозумілі для людини рішення або автоматичні команди. Для забезпечення обміну інформацією в IoT-системах використовуються спеціалізовані протоколи зв'язку, оптимізовані під обмежені ресурси пристроїв та специфіку мереж:

- MQTT (Message Queuing Telemetry Transport): Легкий і ефективний протокол, заснований на моделі «publish/subscribe», що дозволяє пристроям обмінюватися повідомленнями через брокера. Завдяки мінімальним накладним витратам MQTT широко застосовується в системах з малопотужними сенсорами і нестабільними мережами.

- CoAP (Constrained Application Protocol): Протокол, розроблений спеціально для пристроїв з обмеженими ресурсами. CoAP підтримує RESTful архітектуру, що робить його сумісним з веб-технологіями. Протокол використовує UDP для швидкої передачі і мінімізації витрат енергії.

- HTTP/HTTPS: Хоча це стандартні веб-протоколи з більшими ресурсними вимогами, вони застосовуються у випадках, коли необхідна сумісність із веб-

додатками і високий рівень безпеки. HTTPS забезпечує шифрування даних, що важливо для захисту інформації.

Вибір мережевої технології в IoT залежить від конкретних вимог до покриття, швидкості передачі, енергоспоживання та вартості впровадження.

- Локальні бездротові мережі (WPAN): Технології типу Zigbee та Bluetooth Low Energy розраховані на невеликі відстані — зазвичай до кількох десятків метрів. Вони ідеальні для побудови мереж всередині будівель або компактних міських зон з низьким споживанням енергії.

- LPWAN (Low-Power Wide-Area Network): До них належать LoRaWAN, NB-IoT та LTE-M, які здатні забезпечувати зв'язок на кілометрові відстані при мінімальному енергоспоживанні. Ці технології ідеально підходять для міських сенсорних мереж, що охоплюють великі території.

- Мобільні мережі 4G/5G: Забезпечують високу швидкість передачі та низькі затримки, необхідні для складних IoT-застосунків, таких як відеоспостереження, автономні транспортні системи або системи критичного моніторингу.

Кожен рівень IoT-системи потребує надійного захисту інформації. Важливими аспектами є автентифікація пристроїв, шифрування переданих даних, контроль доступу і моніторинг мережевого трафіку. Використання протоколів з підтримкою безпеки (наприклад, MQTT з TLS, HTTPS) є обов'язковим для запобігання несанкціонованому доступу і забезпечення цілісності даних.

Таким чином, багаторівнева архітектура IoT із різноманітними мережевими технологіями і протоколами створює надійну та гнучку основу для реалізації інтелектуальних міських сервісів і підвищення ефективності управління міською інфраструктурою.

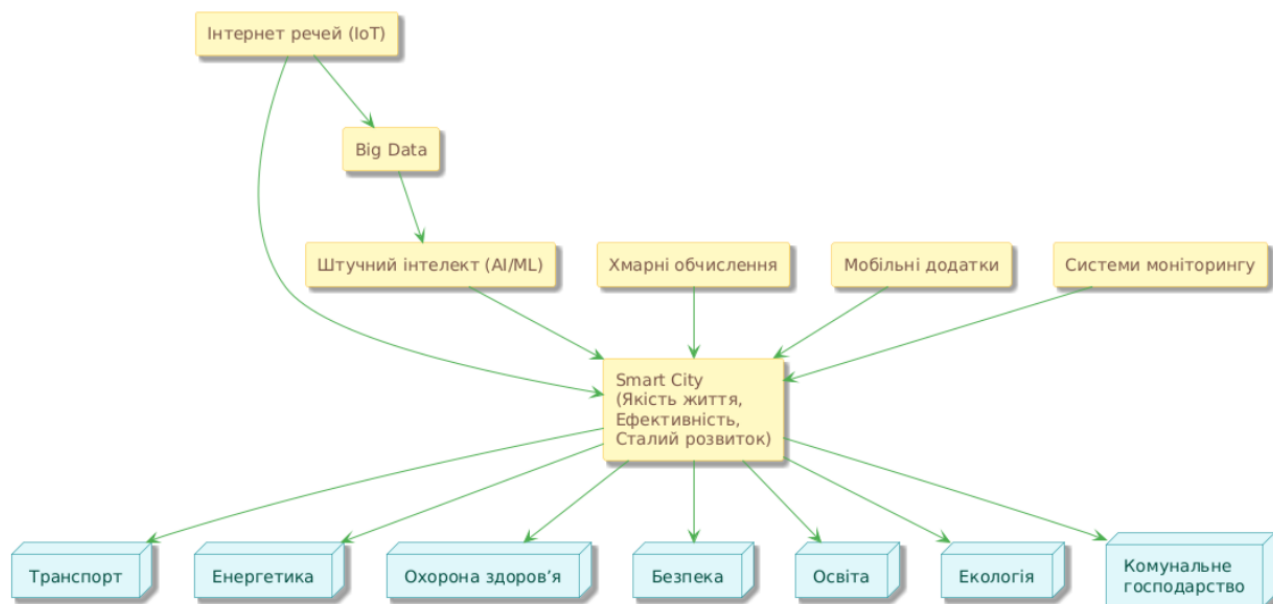


Рис. 1.2. Екосистема розумного міста: структура та технологічні взаємозв'язки

Діаграма відображає структурну модель «розумного міста», окреслюючи його основні функціональні підсистеми та взаємопов'язані технологічні елементи, які забезпечують їхню цілісність, взаємодію та ефективне функціонування в рамках єдиної урбаністичної екосистеми.

1.3 Проблеми енергоефективності в урбанізованих просторах

Сучасні урбанізовані простори, що є осередками економічної активності, інновацій та культурного життя, водночас постають перед гострою проблемою забезпечення сталого енергоспоживання. Динамічний розвиток міст, зростання чисельності населення та підвищення рівня комфорту неминуче призводять до ескалації енергетичних потреб. Основними споживачами енергії в міському середовищі традиційно виступають комплексні системи освітлення, що забезпечують функціонування міської інфраструктури в темну пору доби та створюють безпечне середовище для мешканців; розгалужені транспортні мережі,

які включають як громадський, так і приватний транспорт, що потребує значних обсягів палива та електроенергії; а також інженерні системи будівель, зокрема опалення, вентиляція та кондиціонування повітря (ОВК), що становлять лівову частку в структурі енергоспоживання житлового та комерційного секторів.

Однак саме в цих ключових сферах криються суттєві резерви для підвищення енергоефективності, оскільки поточний стан інфраструктури та підходи до управління енергоресурсами часто характеризуються значною марнотратністю. Однією з фундаментальних проблем є низька енергоефективність самої міської інфраструктури, що є наслідком як фізичного зносу обладнання, так і використання застарілих технологій. Системи централізованого теплопостачання, що домінують у багатьох містах, часто страждають від значних втрат тепла під час транспортування теплоносія від джерела до кінцевого споживача через недостатню ізоляцію трубопроводів та їх аварійний стан.

Аналогічні проблеми спостерігаються і в електромережах, де втрати електроенергії під час її передачі та розподілу можуть сягати значних величин, особливо на ділянках з перевантаженням або зношеним обладнанням. Окрім технологічних втрат, суттєвим фактором є відсутність гнучкого та адаптивного управління енергетичними потоками. Традиційні системи енергоменеджменту, як правило, функціонують на основі усереднених показників та статичних графіків навантаження, не маючи змоги оперативно реагувати на динамічні зміни в попиті на енергію.

Це призводить до ситуацій, коли генеруючі потужності працюють не в оптимальному режимі, або ж відбувається надлишкове виробництво енергії, яка не знаходить споживача, що в кінцевому підсумку веде до перевитрати первинних енергоресурсів. Наслідком такої неефективності стає не лише пряме зростання фінансових витрат для муніципалітетів, бізнесу та населення, але й посилення негативного впливу на довкілля через збільшення викидів парникових газів, зокрема діоксиду вуглецю (CO_2), що є ключовим фактором глобальних кліматичних змін.

Існуючі підходи до управління енергоспоживанням у містах часто не враховують комплексний вплив змінних факторів, що мають суттєвий вплив на реальний рівень енергетичних потреб. До таких факторів належать не лише сезонні та добові коливання навантаження на енергосистему, але й більш тонкі аспекти, як-от погодні умови (температура повітря, швидкість вітру, рівень сонячної інсоляції), які безпосередньо впливають на роботу систем опалення, вентиляції, кондиціонування та освітлення.

Крім того, поведінкові патерни мешканців, їхні звички та графіки активності також відіграють значну роль у формуванні профілю енергоспоживання. Наприклад, синхронізація робочих графіків значної частини населення призводить до пікових навантажень на транспортну систему та електромережі у ранкові та вечірні години. Традиційні системи енергоменеджменту, позбавлені можливості збору та аналізу даних про ці фактори в режимі реального часу, виявляються нездатними до проактивного та адаптивного управління, що ще більше поглиблює проблему неефективного використання ресурсів.

Саме в цьому контексті технології Інтернету речей (IoT) відкривають принципово нові горизонти для трансформації міських енергетичних систем. Впровадження розгалуженої мережі сенсорів та інтелектуальних пристроїв дозволяє здійснювати безперервний моніторинг ключових параметрів енергоспоживання на всіх рівнях – від окремої будівлі чи транспортного засобу до загальноміської інфраструктури. Зібрані дані, оброблені за допомогою сучасних аналітичних інструментів, стають основою для автоматичного керування енергетичними потоками, дозволяючи оптимізувати роботу обладнання, оперативно реагувати на зміни попиту та пропонувати гнучкі тарифи, що стимулюють споживачів до більш раціонального використання енергії. Таким чином, IoT-рішення створюють передумови для переходу від реактивного до предиктивного та адаптивного управління енергоефективністю.

Отже, головна проблема енергоефективності в урбанізованих просторах полягає не стільки в абсолютному зростанні енерговитрат, скільки в нераціональному та неефективному розподілі наявних енергетичних ресурсів. Ця

нераціональність є прямим наслідком відсутності комплексного аналізу даних в реальному часі та нездатності традиційних систем управління адаптуватися до динамічних умов функціонування міського організму.

Відсутність такого аналізу унеможливорює точне прогнозування попиту, виявлення прихованих резервів економії та прийняття обґрунтованих рішень щодо модернізації інфраструктури та впровадження новітніх енергозберігаючих технологій. Без глибокого розуміння структури енергоспоживання, його часових та просторових варіацій, а також взаємозв'язку з різними зовнішніми та внутрішніми факторами, будь-які спроби підвищення енергоефективності матимуть лише локальний та обмежений ефект.

Вирішення цієї комплексної проблеми потребує системного підходу, що поєднує технологічну модернізацію, впровадження інтелектуальних систем управління на базі IoT, зміну поведінкових моделей споживачів та розробку ефективних регуляторних механізмів на муніципальному та державному рівнях. Саме такий інтегрований підхід дозволить перетворити сучасні міста на дійсно енергоефективні, стійкі та комфортні середовища для життя.

Звісно, окреслена вище модель може здатися надто амбітною або навіть утопічною в умовах сьогоденної міської дійсності. Проте варто підкреслити, що подібні рішення вже активно впроваджуються на практиці провідними технологічними компаніями. Один із яскравих прикладів — діяльність компанії SCAND, яка спеціалізується на створенні програмного забезпечення для цифровізації міської інфраструктури з використанням інструментів IoT, хмарних платформ та аналітики великих даних.

На інфографіці, розробленій компанією SCAND, візуалізовано кількісні оцінки ефективності таких рішень: скорочення часу на щоденні поїздки, зменшення обсягів відходів і споживання води, зниження рівня злочинності та викидів парникових газів, а також рятування людських життів завдяки підвищенню рівня міської безпеки.

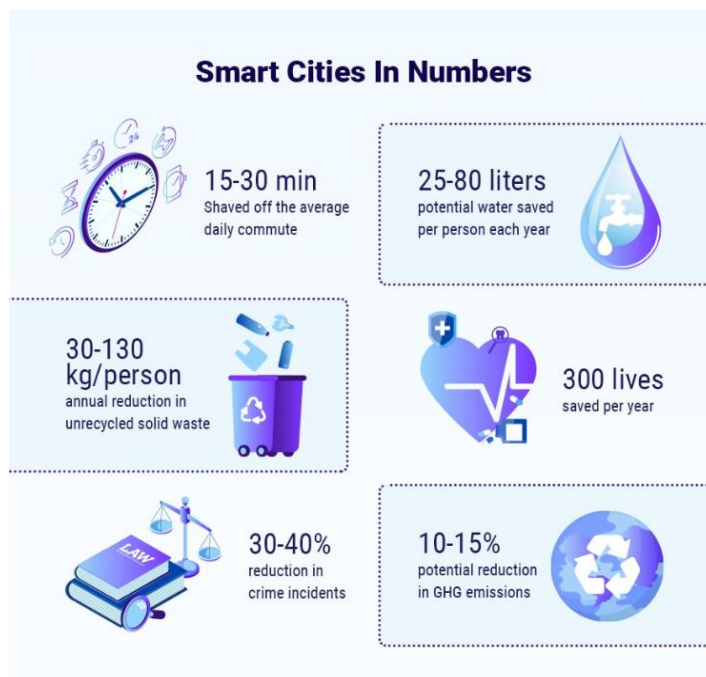


Рис.1.3. Можливості використання IoT у розвитку розумних міст (за даними компанії SCAND)

Компанія SCAND, яка виступає автором цієї інфографіки, є визнаним розробником програмного забезпечення з понад 20-річним досвідом роботи у галузі високих технологій. Її експертиза охоплює широкий спектр рішень для цифровізації міської інфраструктури, зокрема IoT, хмарних сервісів та систем обробки великих даних. Завдяки поєднанню глибокої технічної компетентності та орієнтації на довготривалу якість, SCAND заслужено користується довірою партнерів по всьому світу як надійний постачальник інноваційних технологічних рішень для сталого розвитку сучасних міст.

Особливої уваги заслуговує той факт, що SCAND має досвід співпраці з провідними міжнародними організаціями, зокрема NASA, IBM, Siemens, Cisco та Deloitte, що лише підтверджує її високий професійний рівень, здатність реалізовувати найскладніші проекти та відповідати найвибагливішим вимогам глобального ринку.

1.4 Світові тренди використання IoT в міському середовищі

Глобальна урбанізація, попри свої численні переваги, ставить перед людством складні виклики, серед яких забезпечення сталого енергоспоживання займає одне з чільних місць. У відповідь на ці виклики міста по всьому світу все активніше впроваджують інноваційні рішення на базі Інтернету речей (IoT), прагнучи трансформувати традиційні підходи до управління енергоресурсами та підвищити загальну енергоефективність міських систем. Світова практика демонструє надзвичайно широкий спектр застосувань IoT, що охоплює практично всі аспекти міського життя – від інтелектуального освітлення та управління транспортними потоками до оптимізації роботи комунальних служб та енергоменеджменту в будівлях. Ці технології не лише сприяють значному скороченню енергоспоживання та пов'язаних з ним викидів парникових газів, але й покращують якість життя містян, підвищують надійність та ефективність міської інфраструктури.

Яскравим прикладом успішного впровадження IoT для оптимізації міського освітлення є Барселона. Місто, відоме своїми амбітними цілями у сфері сталого розвитку, активно інвестує в інтелектуальні системи вуличного освітлення. Застосування LED-ліхтарів, оснащених датчиками руху та освітленості, а також інтегрованих у єдину мережу управління, дозволило не лише суттєво – за деякими оцінками, до 60% – скоротити витрати електроенергії на освітлення вулиць, але й підвищити безпеку та комфорт міського середовища. Система динамічно регулює яскравість освітлення залежно від реальної потреби: у нічний час за відсутності пішоходів чи транспортних засобів ліхтарі переходять у режим зниженої потужності, миттєво активуючись при виявленні руху. Окрім прямої економії енергії, така система забезпечує можливість віддаленого моніторингу стану кожного ліхтаря, що значно спрощує їх обслуговування та скорочує експлуатаційні витрати.

Інший напрямок, де IoT демонструє свою високу ефективність, – це оптимізація транспортних систем. Копенгаген, який послідовно втілює стратегію "зеленого" міста та активно розвиває велосипедну інфраструктуру, впровадив інноваційну систему управління світлофорними об'єктами. Ця система надає пріоритет велосипедистам та громадському транспорту, аналізуючи в режимі реального часу транспортні потоки за допомогою мережі сенсорів. Як результат, не лише скорочується час у дорозі для користувачів екологічних видів транспорту, що стимулює їх подальше використання, але й зменшуються затори, а отже, і непродуктивні витрати палива приватними автомобілями. Це, в свою чергу, позитивно впливає на якість повітря в місті та знижує рівень шуму. Подібні інтелектуальні транспортні системи, що включають адаптивне управління трафіком, інформування водіїв про дорожню ситуацію в реальному часі та оптимізацію маршрутів громадського транспорту, стають невід'ємною частиною сучасних "розумних міст".

Ефективне управління комунальними ресурсами, зокрема поводження з відходами, також є сферою активного застосування IoT-технологій. Сеул, столиця Південної Кореї, відомий своїми передовими технологічними рішеннями, впровадив інтелектуальні системи управління сміттєвими контейнерами. Спеціальні датчики, встановлені в контейнерах, відстежують рівень їх наповнення та передають цю інформацію до централізованої системи управління. На основі цих даних оптимізуються маршрути сміттєвозів: машини виїжджають лише тоді, коли це дійсно необхідно, і прямують лише до заповнених контейнерів. Такий підхід дозволяє значно скоротити кількість рейсів, мінімізувати пробіг транспортних засобів, а отже, і витрати палива та пов'язані з цим викиди шкідливих речовин. Окрім прямої економічної та екологічної вигоди, це також зменшує транспортне навантаження на вулиці міста та підвищує загальну ефективність роботи комунальних служб.

Збереження культурної спадщини в умовах сучасних вимог до енергоефективності – ще один важливий аспект, де IoT знаходить своє застосування. Амстердам, місто з багатою історією та численними архітектурними

пам'ятками, зіткнувся з проблемою забезпечення оптимального мікроклімату в історичних будівлях без надмірного енергоспоживання. Для вирішення цього завдання було реалізовано спеціалізовану IoT-платформу. Вона включає мережу сенсорів, що безперервно моніторять температуру, вологість та інші параметри повітря всередині будівель, а також інтелектуальні системи управління опаленням, вентиляцією та кондиціонуванням. Аналізуючи зібрані дані, система автоматично підтримує задані параметри мікроклімату, оптимальні для збереження історичних артефактів та конструкцій, при цьому мінімізуючи витрати енергії. Такий підхід дозволяє не лише зберегти безцінну культурну спадщину для майбутніх поколінь, але й зробити експлуатацію історичних будівель більш економічно вигідною та екологічно відповідальною.

Окрім наведених прикладів, світові тренди використання IoT для підвищення енергоефективності в містах охоплюють також інтелектуальні мережі (Smart Grids), які дозволяють оптимізувати виробництво, передачу та споживання електроенергії, інтегрувати відновлювані джерела енергії та забезпечувати двосторонній обмін даними між постачальниками та споживачами. Важливу роль відіграють системи енергоменеджменту будівель (BEMS), які автоматично керують освітленням, опаленням, вентиляцією та іншими інженерними системами, адаптуючись до присутності людей та зовнішніх умов. Розвиваються також технології "розумного" водопостачання, що дозволяють виявляти витoki, контролювати якість води та оптимізувати її споживання, що опосередковано також впливає на енергоефективність, адже перекачування та очищення води є енергоємними процесами. Інтелектуальні системи паркування, які інформують водіїв про наявність вільних місць, скорочують час пошуку парковки та, відповідно, непродуктивні витрати палива. Всі ці та багато інших IoT-рішень поступово перетворюють сучасні міста на більш ефективні, стійкі та комфортні екосистеми, де технології слугують меті раціонального використання ресурсів та збереження довкілля. Загалом, перехід до "розумних міст", рушійною силою якого значною мірою є Інтернет речей, відкриває безпрецедентні можливості для

кардинального підвищення енергоефективності та забезпечення сталого розвитку урбанізованих територій у глобальному масштабі.

1.5 Еволюція концепції Smart City: від автоматизації до інтеграції

Концепція розумного міста пройшла кілька етапів розвитку. Спочатку ідея зводилася до автоматизації окремих міських процесів, таких як управління вуличним освітленням чи паркуванням. Ці рішення дозволяли спростити роботу інфраструктури, зменшити витрати та підвищити ефективність. Однак з часом стало очевидно, що для досягнення суттєвих покращень в управлінні міськими ресурсами необхідна комплексна інтеграція різних систем.

На наступному етапі розвитку концепції Smart City почали інтегрувати різні технології та сервіси в єдину інфраструктуру. Це дозволило забезпечити обробку даних у реальному часі, що, в свою чергу, дало змогу приймати більш обґрунтовані та оперативні рішення для управління міськими ресурсами. Таким чином, від окремих технологій та рішень перейшли до створення цілісних екосистем, в яких всі компоненти взаємодіють між собою для підвищення ефективності функціонування міста.

Важливою складовою еволюції є зростаюча роль даних та аналітики. В умовах Smart City дані, які збираються з численних датчиків та пристроїв, аналізуються для підтримки процесів управління та прийняття рішень у реальному часі. Це дозволяє не лише оптимізувати використання ресурсів, а й знижувати енергетичні витрати, що є важливим кроком до сталого розвитку.

Таким чином, сучасна концепція Smart City вже не обмежується автоматизацією окремих процесів. Вона включає в себе інтеграцію технологій для комплексного управління міськими системами та забезпечення сталого розвитку. Враховуючи глобальні виклики, такі як зміна клімату та соціальні питання, концепція Smart City також відповідає цілям сталого розвитку, зокрема зниженню викидів CO₂, покращенню енергоефективності та підвищенню якості життя мешканців.

В умовах розвитку розумних міст дані стали основним активом для забезпечення ефективного управління міськими системами. Завдяки численним датчикам і пристроям Інтернету речей (IoT), міста отримують величезні обсяги інформації в реальному часі. Ці дані включають інформацію про рух транспорту, рівень забруднення, споживання енергії, стан інфраструктури та багато іншого. Проблема полягає в тому, що самі дані не є корисними без належного аналізу і розуміння того, як їх застосувати для прийняття рішень.

Аналітика даних є ключовим елементом у створенні ефективних рішень для управління міськими ресурсами. Вона дозволяє виявляти закономірності, прогнозувати навантаження на інфраструктуру, а також оцінювати ефективність різних управлінських заходів. Наприклад, дані про рух транспорту дозволяють оптимізувати час роботи світлофорів, зменшити затори та покращити загальну транспортну ситуацію в місті. Дані про споживання енергії можуть бути використані для створення більш ефективних стратегій управління енергетичними ресурсами та зменшення витрат.

Окрім цього, аналітика даних допомагає виявляти потенційні проблеми та здійснювати проактивне управління. Наприклад, аналіз даних про стан доріг може передбачити необхідність ремонту ще до того, як проблеми стануть критичними. Це дозволяє значно знизити витрати на ремонтні роботи та продовжити термін служби міської інфраструктури.

Таким чином, дані та їх аналітика стали не лише інструментами для покращення функціонування міських систем, а й основою для прийняття стратегічних рішень, які сприяють сталому розвитку та підвищенню якості життя у міському середовищі.

Сучасні розумні міста активно інтегруються в глобальні стратегії сталого розвитку, зокрема ті, що прописані в цілях ООН до 2030 року. Одним із основних завдань, які ставить перед собою концепція Smart City, є забезпечення ефективного використання ресурсів, зменшення негативного впливу на навколишнє середовище та покращення якості життя для мешканців. Відповідно, концепція розумного міста тісно пов'язана з низкою цілей сталого розвитку ООН.

Однією з ключових цілей є забезпечення доступу до чистої та доступної енергії для всіх (Ціль 7), що можна досягти завдяки впровадженню енергоефективних технологій та використанню відновлюваних джерел енергії в міських системах. Застосування технологій IoT дозволяє зменшити витрати енергії за рахунок автоматизованого управління освітленням, опаленням та іншими ресурсами.

Іншою важливою метою є забезпечення сталих міст і громад (Ціль 11). Для цього необхідно використовувати інноваційні технології для покращення міської інфраструктури, зменшення забруднення та підвищення рівня життя. Розумні міста сприяють розвитку стійкої транспортної інфраструктури, ефективному управлінню водними ресурсами та збільшенню доступності зелених зон для жителів.

Таким чином, концепція Smart City є важливим інструментом для досягнення цілей сталого розвитку, оскільки дозволяє інтегрувати новітні технології для підвищення ефективності використання ресурсів, зниження екологічного впливу та забезпечення високої якості життя для міських жителів.

Архітектура IoT-систем у Smart City.

Під IoT-системами в умовах «розумного міста» розуміють комплексну екосистему, у якій дані збираються, передаються, обробляються й використовуються для автоматизованого управління міськими процесами, наприклад, регулювання освітлення на вулицях у залежності від наявності людей.

Архітектура таких систем складається з кількох основних компонентів:

Датчики (сенсори): пристрої, які безпосередньо збирають первинні дані — температуру, вологість, рівень шуму, освітленість, рух тощо.

Шлюзи (gateway): проміжні пристрої, що передають інформацію від датчиків далі в систему, здійснюючи фільтрацію або агрегацію даних.

Сервери або хмарна платформа: місце збереження та обробки даних, що слугує основою для ухвалення рішень.

Аналітичні модулі (часто з використанням методів штучного інтелекту та машинного навчання): інструменти для виявлення закономірностей, прогнозування та оптимізації роботи системи.

Інтерфейс керування: панель для взаємодії оператора або автоматизованих процесів з системою.

Залежно від масштабу, бюджету та технічної зрілості міста, IoT-системи можуть мати такі варіанти архітектури:

- Централізована архітектура: усі дані збираються і обробляються в єдиному дата-центрі або хмарі. Такий підхід простий у реалізації, проте має ризик єдиної точки відмови.
- Розподілена архітектура: частина обробки здійснюється локально - на шлюзах або edge-пристроях. Це підвищує швидкодію та надійність, але ускладнює архітектуру.
- Гібридна архітектура: комбінує два попередні підходи, розподіляючи обробку між локальними та центральними елементами. Є найбільш гнучким і популярним варіантом.

Завдяки багаторівневій структурі IoT-система не лише реагує на поточні події, а й прогнозує їх, оптимізує витрати й підвищує комфорт життя мешканців. Кожен компонент виконує свою роль, але цінність системи полягає у їхній інтеграції.

На схемі зображена основна архітектура IoT-системи для «розумного міста». Початковим рівнем є датчики, які збирають інформацію про навколишнє середовище — освітленість, рух, температуру. Ці дані передаються на IoT-шлюз, де відбувається первинна фільтрація та локальна обробка інформації для зменшення обсягу і підвищення швидкодії системи. Опрацьовані дані надходять до хмарної бази даних, що служить централізованим сховищем і джерелом для подальшого аналізу. Аналітичні модулі, які можуть використовувати штучний інтелект, здійснюють глибоку обробку та генерацію рекомендацій чи автоматичних рішень. Кінцевим елементом є інтерфейс керування, через який користувач (адміністратор) має змогу моніторити стан системи і взаємодіяти з нею.

Такий багаторівневий підхід забезпечує ефективне збирання, обробку та використання даних для підвищення якості міських послуг.

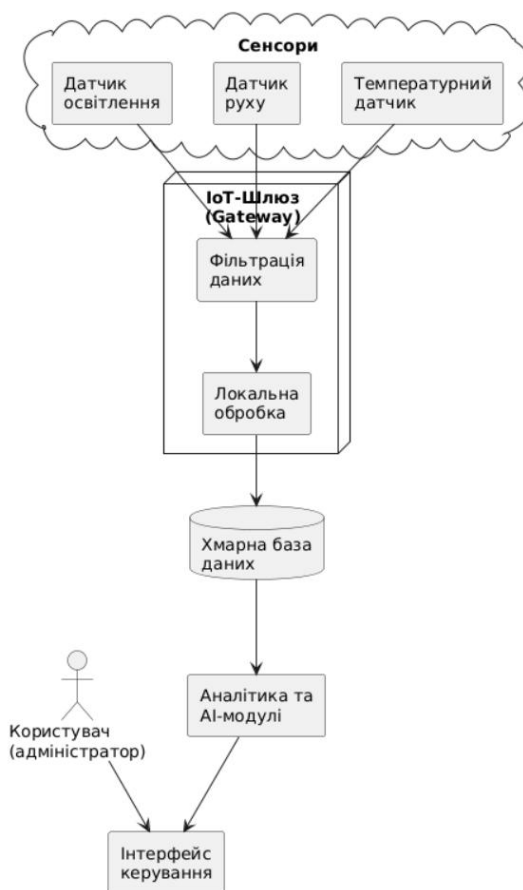


Рис. 1.4. Архітектура IoT-системи для Smart City: від датчиків до користувача через шлюзи, хмарне сховище та аналітичні модулі

2 АНАЛІЗ РІШЕНЬ ІОТ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

2.1 Інтелектуальне освітлення

Одним із найяскравіших і найвдаліших прикладів впровадження Інтернету речей (IoT) з метою підвищення енергоефективності є система інтелектуального вуличного освітлення, яка функціонує у місті Барселона. У межах цього проєкту місто встановило розгалужену мережу сучасних світлодіодних ліхтарів, кожен з яких обладнаний спеціальними датчиками руху і рівня освітленості. Завдяки цим сенсорам ліхтарі можуть автоматично регулювати інтенсивність світла залежно від наявності пішоходів, велосипедистів чи автомобілів у конкретній зоні, що дозволяє значно знизити споживання електроенергії у години найменшої активності.

Завдяки такому інноваційному підходу місто змогло не лише оптимізувати витрати на електроенергію, а й суттєво продовжити термін служби освітлювального обладнання. Окрім цього, вся система інтегрована з центральною платформою управління, що дає можливість в реальному часі відстежувати стан кожного окремого світильника, виявляти можливі несправності та своєчасно виконувати обслуговування. Це знижує ризик збоїв, зменшує вплив людського фактору та підвищує загальну надійність системи.

Завдяки комплексному впровадженню технологій IoT, глибинній аналітиці отриманих даних і продуманим управлінським рішенням на рівні міської адміністрації, Барселона змогла скоротити енергоспоживання на освітлення більш ніж на 60%. Цей приклад є показовим для інших міст, що прагнуть зробити свою інфраструктуру більш сучасною, ефективною та екологічно відповідальною. Система інтелектуального освітлення також сприяє підвищенню безпеки на вулицях, адже автоматичне підсилення світла в моменти активності людей знижує ризики аварій та правопорушень.

Таким чином, поєднання інноваційних технологій, відповідального управління і практичного досвіду дозволило Барселоні створити зразкову систему,

яка не тільки економить ресурси, але й робить місто комфортнішим для його мешканців і гостей.

2.2 Управління будівлями

Системи інтелектуального управління будівлями є одним із найважливіших напрямків застосування Інтернету речей (IoT) у сучасному урбаністичному середовищі. З огляду на те, що будівлі — це найбільші споживачі енергії у містах, впровадження таких систем має величезний потенціал для підвищення енергоефективності та зниження експлуатаційних витрат.

Інтелектуальні системи керування будівлями базуються на комплексі датчиків, приводів і спеціалізованих платформ для обробки великих обсягів даних. Сенсори постійно відстежують параметри внутрішнього середовища — температуру, вологість, освітленість, рівень вуглекислого газу, рух людей та інші показники. Ці дані в режимі реального часу аналізуються системою, яка автоматично регулює роботу різноманітних систем життєзабезпечення, таких як опалення, кондиціонування, вентиляція, освітлення та безпека.

Наприклад, коли система фіксує відсутність людей у певних приміщеннях, вона може автоматично вимикати або переводити в енергозберігаючий режим кондиціонери та освітлення, що значно знижує непотрібне енергоспоживання. Також системи можуть враховувати час доби, погодні умови або прогноз погоди для оптимального налаштування параметрів клімату, створюючи комфортні умови для мешканців і одночасно економлячи ресурси.

Однією з найперспективніших функцій таких систем є здатність до гнучкого управління споживанням енергії. Завдяки аналізу та прогнозуванню навантаження будівлі можуть змінювати режим споживання залежно від доступності енергії, зокрема від поновлюваних джерел, таких як сонячна або вітрова енергія. Це дозволяє інтегрувати будівлі в «розумні» електромережі (Smart Grids), де енергоспоживання оптимізується за допомогою двонаправленого зв'язку з енергосистемою, що сприяє підвищенню загальної стабільності та екологічності.

Впровадження таких інтелектуальних систем має не лише економічний, але й екологічний ефект — зменшується вуглецевий слід будівель, що важливо у

контексті глобальної боротьби зі зміною клімату. Крім того, автоматизація управління підвищує безпеку і комфорт для користувачів приміщень, дозволяючи ефективно реагувати на надзвичайні ситуації, такі як пожежі або витoki газу.

Таким чином, системи інтелектуального управління будівлями є ключовим елементом сучасної міської інфраструктури, сприяючи створенню сталого, економічного та комфортного житлового та робочого середовища.

2.3 IoT у транспорті

Міський транспорт сьогодні є однією з найважливіших сфер, де впровадження Інтернету речей (IoT) відкриває нові можливості для підвищення ефективності пересування, зменшення заторів на дорогах та покращення екологічної ситуації у містах. Завдяки використанню різноманітних сенсорів, датчиків та систем зв'язку, які збирають та аналізують дані в реальному часі, можна організувати рух так, щоб він став більш плавним і прогнозованим.

Наприклад, у Копенгагені створено інтелектуальну систему управління дорожнім рухом, яка надає пріоритет велосипедистам і громадському транспорту. Це здійснюється за допомогою динамічних світлофорів, що адаптують свою роботу залежно від поточного потоку транспортних засобів і пішоходів. Така система в режимі реального часу збирає інформацію про завантаженість доріг, швидкість руху та кількість транспортних засобів на різних ділянках міста. Завдяки цим даним світлофори автоматично змінюють свої режими, дозволяючи швидше проїжджати громадському транспорту і велосипедистам, що сприяє зменшенню загального часу перебування у заторах.

Впровадження подібних систем має низку переваг: по-перше, це сприяє зменшенню кількості автомобілів на дорогах, оскільки частина людей переходить на велосипеди або громадський транспорт, що робить міські маршрути більш екологічними. По-друге, знижується споживання палива, що позитивно впливає на економію ресурсів і зменшує викиди шкідливих речовин в атмосферу. В результаті якість повітря покращується, що важливо для здоров'я мешканців міста.

Крім того, у Копенгагені та інших містах активно використовують паркувальні сенсори, які визначають наявність вільних місць для паркування у реальному часі. Ця інформація передається через мобільні додатки водіям, що значно спрощує пошук паркувального місця. Внаслідок цього зменшується кількість автомобілів, які безцільно їздять вулицями у пошуках місця для стоянки, що також сприяє розвантаженню міського трафіку та зниженню рівня шуму й викидів.

Таким чином, застосування IoT у транспортній системі не лише оптимізує організацію руху, а й покращує екологічний стан міста, роблячи його комфортнішим для життя. Подальший розвиток таких технологій обіцяє ще більш ефективні рішення для вирішення проблем сучасної урбанізації та зростання населення.

2.4 Вплив IoT на зниження CO₂ та екологічність

Застосування IoT у міському середовищі має прямий вплив на екологічну ситуацію та загальне зменшення вуглецевого сліду. Завдяки точному моніторингу і керуванню енергоспоживанням у транспорті, будівлях та системах освітлення, IoT дозволяє містам істотно скоротити обсяги викидів CO₂.

За даними International Energy Agency (IEA), впровадження цифрових енергетичних технологій, включаючи IoT, може забезпечити скорочення глобальних викидів на 10–15% до 2040 року, якщо буде поєднане з переходом на відновлювані джерела енергії. Наприклад, лише оптимізація систем опалення та охолодження в міських будівлях за рахунок розумного моніторингу дозволяє знизити викиди CO₂ на 20–25% у середньому на одну будівлю.

Звіт United Nations Environment Programme (UNEP) зазначає, що цифровізація, включаючи IoT, є ключовим драйвером у досягненні Цілей сталого розвитку, зокрема Цілі 11 (*сталий розвиток міст*) та Цілі 13 (*боротьба зі зміною клімату*).

Дані, зібрані за допомогою сенсорів, використовуються для:

- прогнозування енергоспоживання;
- виявлення пікових навантажень;
- переходу на поновлювані джерела енергії;
- формування політик "зеленого" міста.

У результаті формується стійка екосистема, яка адаптується до навколишніх умов і сприяє досягненню глобальних екологічних цілей. Такі міста не лише зменшують свій вплив на довкілля, а й стають прикладом для інших країн щодо того, як технології можуть поєднуватись із відповідальним ресурсоспоживанням.

На рисунку зображено прототип інтелектуальної системи вуличного освітлення, де керування світлодіодом (що імітує вуличний ліхтар) здійснюється на основі даних від ІЧ-датчика руху.

- ESP32: Мікроконтролер, який обробляє дані з датчика та керує світлодіодом.
- ІЧ-датчик руху (PIR): Виявляє рух в зоні своєї дії та передає сигнал на ESP32.
- Світлодіод: Виконує функцію освітлювального елемента.

Програмний код на екрані демонструє логіку роботи системи: при виявленні руху ІЧ-датчиком, світлодіод вмикається, а при відсутності руху - вимикається. Також передбачено запам'ятовування попереднього стану датчика для уникнення повторних спрацювань.

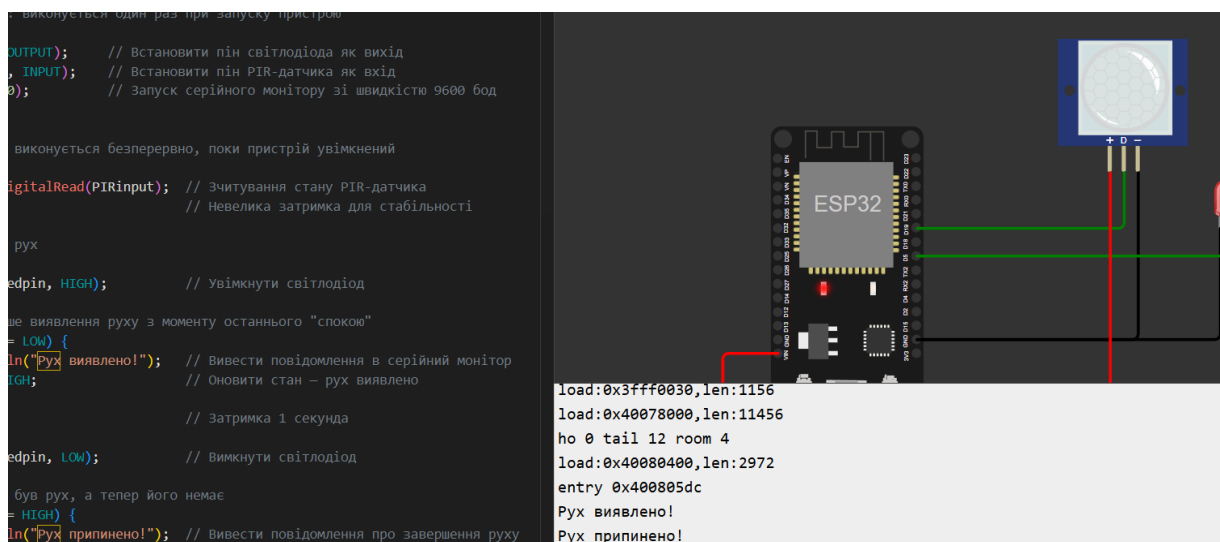


Рис. 2.1. Схематичний приклад реалізації інтелектуальної системи вуличного освітлення на базі ESP32 та ПЧ-датчика руху

2.5 Безпека на кожному рівні архітектури IoT

Впровадження технологій Інтернету речей у міському середовищі передбачає не лише функціональні переваги, а й потребу в забезпеченні надійного захисту всієї системи. З огляду на багаторівневу структуру IoT-систем, питання безпеки необхідно розглядати окремо для кожного рівня: пристроїв, передавання даних, обробки інформації та користувацьких інтерфейсів.

Рівень пристроїв

Фізичні пристрої — сенсори, контролери, виконавчі модулі — вважаються одними з найбільш вразливих, оскільки часто мають обмежені ресурси для самозахисту. Серед головних загроз: фізичний доступ сторонніх осіб, підміна прошивки, фальсифікація вхідних даних.

Для зниження ризиків використовують:

- унікальні апаратні ідентифікатори;
- локальне шифрування даних;
- захищене оновлення ПЗ через перевірені канали.

Рівень передавання даних

Цей рівень охоплює мережеві протоколи, що передають інформацію між пристроями та обчислювальними платформами. Його основні загрози — перехоплення, підміна пакетів або атаки типу «людина посередині».

Для захисту застосовують:

- протоколи типу TLS/DTLS;
- попередню аутентифікацію вузлів;
- зашифровані канали зв'язку (наприклад, VPN або IPSec).

Рівень обробки даних

Тут зберігається та аналізується інформація з великої кількості сенсорів. Загрози: несанкціонований доступ до серверів, витік персональних даних, або вразливості у програмному забезпеченні, що обробляє потоки даних.

Методи захисту:

- шифрування даних "на місці" (at rest) і "на шляху" (in transit);
- контроль доступу з багаторівневою аутентифікацією;
- регулярний аудит безпеки та оновлення ПЗ.

Рівень взаємодії з користувачами

Кінцеві інтерфейси (мобільні застосунки, панелі управління) — ще один критично важливий аспект. Тут можуть траплятись фішингові атаки, крадіжка паролів, надмірний доступ, який надається через погано налаштовані політики доступу.

Захист забезпечують:

- двофакторна автентифікація;
- журналювання дій користувачів;
- чітке обмеження прав доступу за ролями.

Надійна безпека IoT-платформи вимагає комплексного підходу на всіх рівнях архітектури, де кожен компонент повинен бути захищений окремо, але

інтегровано. Такий підхід дозволяє будувати міські системи, які не лише ефективні, а й стійкі до зовнішніх та внутрішніх загроз.

2.6 Інтелектуальне управління енергомережами (Smart Grid)

В умовах зростання попиту на електроенергію та інтеграції відновлюваних джерел енергії зростає потреба в гнучких, адаптивних системах енергопостачання. Саме тут на перший план виходить концепція Smart Grid — інтелектуальної енергомережі, побудованої на базі IoT-рішень.

Ці системи дозволяють не лише передавати енергію, а й оперативно реагувати на зміни в навантаженнях, балансувати потоки в реальному часі та взаємодіяти з децентралізованими джерелами, такими як приватні сонячні або вітрові установки.

Ключовими елементами Smart Grid є:

- "розумні" лічильники, що забезпечують точний облік споживання та можуть передавати дані в реальному часі;
 - сенсори напруги, струму та частоти, які моніторять стабільність мережі;
 - аналітичні модулі, здатні прогнозувати пікові навантаження та адаптувати режим роботи енергооб'єктів;
- інтерфейси для споживачів, які дозволяють отримувати дані про споживання та керувати навантаженням.

На ілюстрації наведено базовий приклад реалізації системи відстеження енергоспоживання, яка відображає ключовий принцип функціонування розумних електромереж (Smart Grid). В основі конструкції — мікроконтролер ESP32, що отримує аналогові сигнали з сенсора, який умовно моделює параметри споживання електроенергії.

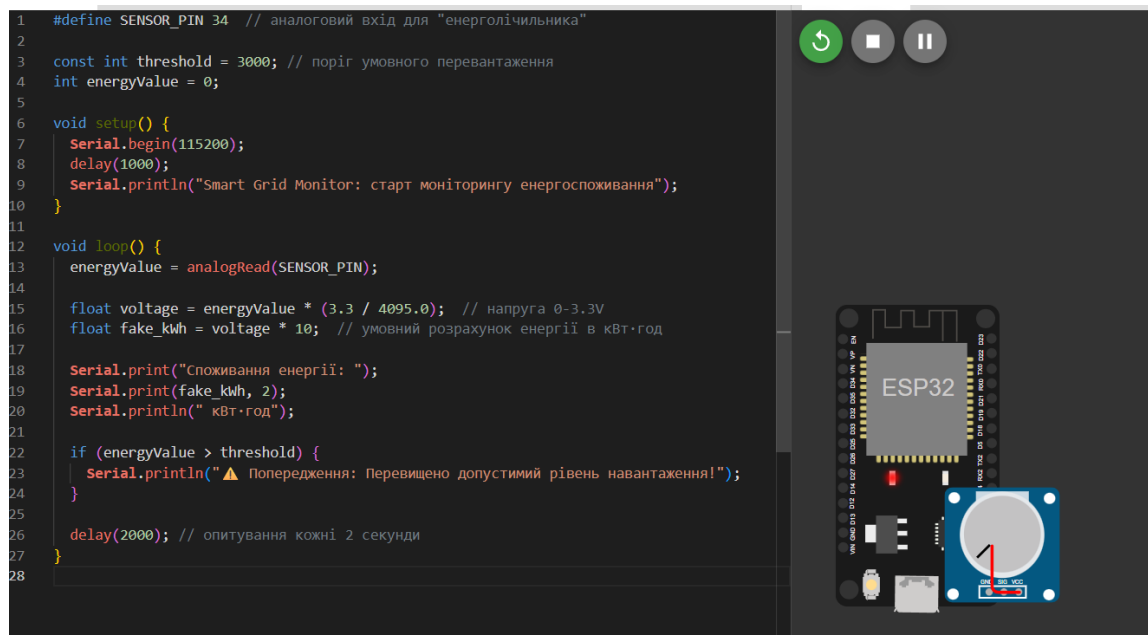


Рис. 2.2. Схематичний приклад моніторингу енергоспоживання в Smart Grid на базі ESP32

Програмна логіка пристрою передбачає:

- обчислення поточного рівня споживання на основі вхідного сигналу (напруги);
- фіксацію граничного значення (порогу) для визначення перевантаження;
- виведення повідомлення про перевищення допустимого рівня, якщо фактичні показники перевищують встановлену межу.

Цей макет демонструє практичне використання ESP32 як елементу IoT-інфраструктури для збору енергетичних даних у реальному часі. Такий підхід закладає основу для подальшого аналізу, реагування системи, та побудови інтелектуальних алгоритмів енергоефективного управління.

У багатьох європейських містах, зокрема у Відні, вже впроваджені пілотні проекти, де мешканці можуть контролювати свій енергоспоживчий профіль і обирати найоптимальніші тарифи, базуючись на даних у режимі реального часу. Це мотивує до більш раціонального ставлення до ресурсів та знижує загальне навантаження на мережу.

Для України концепція Smart Grid є стратегічно важливою у контексті модернізації енергетичної інфраструктури. Використання IoT у цій сфері може стати рушієм не лише енергоефективності, а й енергетичної безпеки, особливо у періоди пікових навантажень або в умовах обмеженого доступу до централізованих джерел живлення.



Рис. 2.3. Спрощена схема передачі даних у системі Smart Grid IoT-моніторингу енергоспоживання

На рисунку зображено спрощену схему передачі інформації в рамках системи інтелектуального моніторингу енергоспоживання, яка є складовою частиною концепції Smart Grid.

- ESP32 з лічильником енергії: здійснює збір даних про споживання електроенергії. У разі виявлення перевищення порогових значень навантаження, пристрій надсилає попередження користувачу. Дані передаються через бездротову мережу

- Мережа Wi-Fi: забезпечує передавання цифрових пакетів із даними від пристрою до хмарного або локального сервера

- Сервер збору даних: приймає, зберігає та систематизує інформацію про енергоспоживання з багатьох джерел

- Аналітична система: виконує обробку отриманих даних, аналізує тренди, виявляє пікові навантаження та аномалії

- Користувацький інтерфейс (мобільний додаток або веб-панель): візуалізує дані у зрозумілій формі для користувача, надає доступ до історії споживання та попереджень.

Цей приклад демонструє повний цикл роботи IoT-системи для енергомоніторингу — від первинного збору інформації до її обробки та подання користувачу.

3 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ІОТ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В УМОВАХ УКРАЇНСЬКОГО МІСТА

3.1 Постановка задачі для пілотного проєкту (на прикладі м. Бориспіль)

У сучасних умовах інтенсивної урбанізації та економічних викликів, пов'язаних із постійним зростанням цін на енергоресурси, перед українськими містами постає нагальна потреба в пошуку ефективних рішень для оптимізації споживання енергії. Питання енергоефективності стають ключовими не лише з економічної точки зору, а й з огляду на екологічну безпеку, зниження шкідливих викидів і покращення якості життя мешканців.

Місто Бориспіль, розташоване неподалік від столиці України, Києва, відіграє важливу роль у транспортній системі країни, оскільки тут розташований один із найбільших міжнародних аеропортів. Ця особливість формує високий рівень навантаження на міську інфраструктуру, що, у свою чергу, створює додаткові виклики для енергозабезпечення та організації дорожнього руху. Саме тому Бориспіль є ідеальним майданчиком для впровадження пілотного проєкту, спрямованого на підвищення енергоефективності за допомогою сучасних інформаційно-комунікаційних технологій.

Основна задача пілотного проєкту полягає у розробці та впровадженні комплексної модульної ІоТ-системи, яка об'єднає різні аспекти міського енергоспоживання і забезпечить їх ефективне управління в режимі реального часу. Зокрема, система включатиме:

- Інтелектуальне вуличне освітлення, що здатне автоматично регулювати яскравість залежно від часу доби, погодних умов, наявності пішоходів та транспортних засобів. Це дозволить не тільки знизити споживання електроенергії, а й підвищити рівень безпеки на вулицях.
- Моніторинг енергоспоживання у муніципальних будівлях, який дасть змогу відстежувати використання енергії в режимі онлайн, виявляти неефективні

ділянки та оперативно вживати заходів щодо їх оптимізації, наприклад, шляхом модернізації обладнання або впровадження енергоощадних технологій.

- Оптимізація дорожнього руху у центральній частині міста за допомогою сенсорів і аналітичних інструментів, що дозволить зменшити затори та час перебування автомобілів у русі. Це, своєю чергою, сприятиме зниженню витрат пального та зменшенню рівня забруднення повітря.

Ключовою метою проєкту є досягнення зниження загального рівня енергоспоживання на 25–30% протягом першого року після впровадження системи. Досягнення такого результату дозволить не лише зекономити бюджетні кошти, а й сприятиме покращенню екологічної ситуації в місті, створюючи більш комфортні та безпечні умови для життя мешканців.

Особливо важливо, що реалізація проєкту передбачає мінімальні зміни в існуючій міській інфраструктурі, що скорочує як часові, так і фінансові витрати на впровадження. Використання доступних та перевірених технологій забезпечить можливість масштабування рішення на інші міста України, що дозволить системно підвищити енергоефективність на національному рівні.

Таким чином, пілотний проєкт у Борисполі виступає не лише як локальна ініціатива, а як модель для подальшого розвитку «розумних міст» в Україні, сприяючи інтеграції сучасних технологій в управління міським господарством і забезпечуючи стійкий розвиток урбанізованих територій.

3.2 Архітектура запропонованої IoT-системи

Архітектура запропонованого рішення базується на трирівневій моделі, яка забезпечує комплексний підхід до збору, передачі та обробки даних у межах міської інфраструктури. Такий підхід дає змогу максимально ефективно

організувати роботу системи, забезпечуючи її надійність, масштабованість та гнучкість в управлінні.

Перший рівень — рівень збору даних (Edge Level) — передбачає встановлення різноманітних сенсорів та датчиків безпосередньо в елементах міської інфраструктури. Це можуть бути датчики освітлення, які реагують на зміну природних умов і регулюють інтенсивність штучного освітлення, датчики температури та вологості, що контролюють кліматичні умови у будівлях, датчики руху та присутності для оптимізації роботи вуличного освітлення, а також лічильники енергоспоживання, які допомагають контролювати використання електроенергії у різних об'єктах. Крім того, у системі передбачено використання GPS-модулів, встановлених на міському транспорті, що дозволяє відстежувати його рух у режимі реального часу, оптимізувати маршрути та підвищувати ефективність перевезень. Завдяки такому рівню відбувається збір детальної та актуальної інформації безпосередньо з джерел, що є основою для подальшої обробки та аналізу.

Другий рівень — рівень передачі даних (Network Level) — відповідає за безпечну, стабільну та енергоефективну комунікацію між пристроями збору даних та центральною системою обробки. Для цього використовуються сучасні бездротові протоколи зв'язку, такі як LoRaWAN та NB-IoT, які дозволяють передавати дані на великі відстані з мінімальним енергоспоживанням, що є особливо важливим для пристроїв, які працюють на автономних джерелах живлення. Для стаціонарних об'єктів з постійним електроживленням застосовуються більш традиційні технології, як-от Wi-Fi та Ethernet, що гарантують високу пропускну здатність і надійність зв'язку. На цьому рівні також функціонують маршрутизатори і шлюзи, які забезпечують правильну маршрутизацію інформації, контролюють цілісність та безперервність передачі даних, а також підтримують баланс навантаження в мережі.

Третій рівень — рівень обробки та управління (Cloud Level) — це централізована платформа, яка виконує ключову роль у зборі, зберіганні, аналізі та візуалізації даних, отриманих із різних джерел. Тут реалізовані алгоритми обробки

інформації, які дозволяють не тільки зберігати великі об'єми даних, але й проводити їх детальний аналіз у режимі реального часу. Зокрема, застосовуються методи машинного навчання для прогнозування енергоспоживання, виявлення аномалій, що можуть свідчити про несправності або неефективне використання ресурсів, а також для автоматизації процесів управління окремими підсистемами. Візуалізація даних здійснюється за допомогою інтуїтивно зрозумілих панелей моніторингу, які дозволяють операторам та адміністраторам міста вчасно реагувати на зміни, приймати обґрунтовані рішення та планувати подальші дії.

Важливою особливістю системи є те, що кожна підсистема — освітлення, будівлі, транспорт — інтегрується в єдину інформаційну платформу через стандартизовані API. Це забезпечує високу гнучкість у керуванні системою, дозволяє легко додавати нові компоненти та розширювати функціонал без необхідності радикальної зміни архітектури. Крім того, така інтеграція сприяє масштабованості системи, що є вкрай важливим для міських проєктів з урахуванням постійного росту та змін у інфраструктурі.

Отже, трирівнева архітектура IoT-системи для міста Бориспіль забезпечує комплексний та ефективний підхід до модернізації міської інфраструктури з урахуванням сучасних технологічних трендів. Вона поєднує у собі надійний збір даних, їх безпечну передачу та потужну обробку, що сприяє підвищенню енергоефективності, покращенню якості надання міських послуг та створенню комфортного середовища для мешканців.

На рисунку 3.1 представлена компонентна архітектура запропонованої IoT-системи, яка складається з трьох основних рівнів, що забезпечують збір, передачу та обробку даних для підвищення енергоефективності міської інфраструктури.

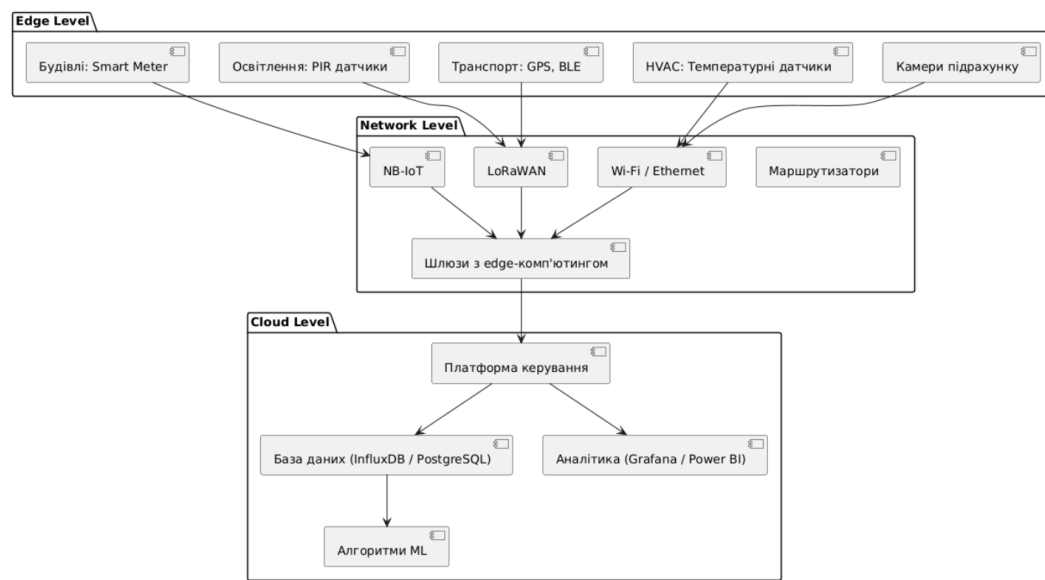


Рис. 3.1. Компонентна архітектура IoT-системи для міста Бориспіль

3.3 Вибір компонентів

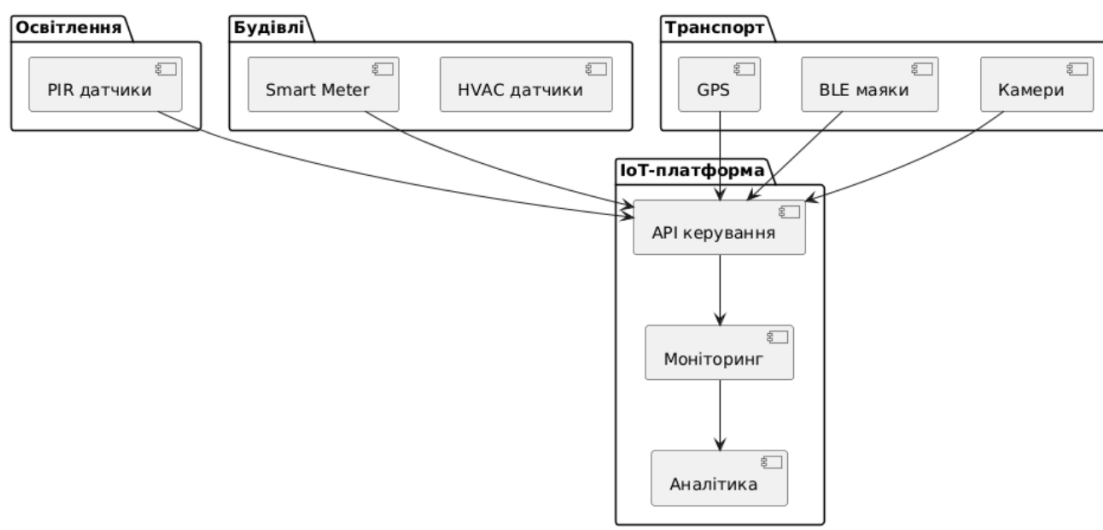


Рис. 3.2. Інтеграція підсистем освітлення, енергоспоживання та транспорту в єдину платформу

Рисунок 3.2 ілюструє логічну інтеграцію трьох основних підсистем — інтелектуального вуличного освітлення, моніторингу енергоспоживання в

муніципальних будівлях та системи управління транспортом — у єдину централізовану IoT-платформу.

Кожна підсистема функціонує автономно, збираючи та обробляючи відповідні дані за допомогою спеціалізованих датчиків і пристроїв. Проте саме об'єднання цих даних на спільній платформі забезпечує комплексний аналіз і оптимізацію роботи всієї міської інфраструктури.

Підсистема освітлення відповідає за автоматичне регулювання інтенсивності вуличного світла залежно від наявності руху, рівня природного освітлення та часу доби, що суттєво знижує енергоспоживання. Підсистема енергоспоживання контролює витрати електроенергії в будівлях, дозволяючи впроваджувати заходи з енергозбереження, наприклад, оптимізацію опалення та кондиціонування.

Підсистема транспорту збирає інформацію про рух міського транспорту за допомогою GPS і BLE-маяків, що дає змогу управляти трафіком та зменшувати затори, знижуючи тим самим споживання пального та викиди шкідливих речовин.

Усі підсистеми взаємодіють через стандартизовані API, що забезпечує гнучкість масштабування, оновлення та інтеграцію нових модулів у майбутньому. Єдина платформа дозволяє операторам отримувати цілісну картину стану міської енергосистеми в режимі реального часу і приймати ефективні управлінські рішення.

Для реалізації системи пропонується використання таких технологічних компонентів:

Сенсори та пристрої:

- датчики руху PIR для освітлення;
- датчики енергоспоживання (Smart Metering) для будівель;
- температурні та вологісні датчики для регулювання HVAC-систем;
- GPS-модулі та BLE-маяки для моніторингу транспорту;
- камери з IoT-модулями для підрахунку пішоходів і авто.



Рис. 3.3. Фізичне розгортання елементів IoT-системи у міській інфраструктурі

Рис. 3.3 ілюструє фізичне розгортання основних компонентів запропонованої IoT-системи у міській інфраструктурі Борисполя. На ньому відображено розташування сенсорів руху, датчиків енергоспоживання в муніципальних будівлях, а також GPS-модулів і BLE-маячків на транспорті. Камери з IoT-модулями встановлені у ключових точках для моніторингу пішоходів та автомобільного трафіку. Зображення демонструє інтеграцію різноманітних пристроїв у єдину мережу з урахуванням топології міста, що забезпечує ефективний збір даних та оперативну передачу інформації на центральну платформу управління. Такий підхід сприяє оптимізації енергоспоживання та покращенню функціонування міських систем у реальному часі.

Для забезпечення надійної та ефективної роботи IoT-системи необхідно правильно підібрати комунікаційні технології, що відповідають особливостям міської інфраструктури та вимогам до енергоспоживання. У запропонованій архітектурі використовуються різні бездротові та дротові мережеві рішення, кожне з яких оптимізоване для конкретного типу пристроїв і умов експлуатації.

LoRaWAN застосовується для передачі даних із сенсорів, розташованих на великих відстанях і з обмеженим енергоспоживанням, що особливо важливо для розподілених елементів системи, наприклад, у вуличному освітленні. NB-IoT орієнтований на роботу з точковими сенсорами в межах будівель, забезпечуючи надійне з'єднання з невеликим обсягом переданих даних. Для об'єктів із стабільним живленням застосовуються Wi-Fi та Ethernet, які дозволяють швидко і безперебійно передавати великі масиви інформації.

Щодо програмного забезпечення, для управління системою та обробки даних використовуються спеціалізовані IoT-платформи, такі як Blynk і ThingsBoard, або власні рішення, наприклад, на базі Node-RED. Для зберігання часових рядів даних рекомендовано застосовувати бази типу InfluxDB або PostgreSQL, що оптимізовані для обробки великих обсягів телеметрії. Аналітичні інструменти, такі як Grafana або Power BI, забезпечують візуалізацію та глибокий аналіз зібраних даних, що сприяє прийняттю обґрунтованих управлінських рішень.

Мережеві рішення:

- LoRaWAN — для енергоефективної передачі даних на великі відстані;
- NB-IoT — для точкових сенсорів у будівлях;
- Wi-Fi / Ethernet — для стаціонарних об'єктів з живленням.

Програмне забезпечення:

- платформи типу Blynk, ThingsBoard або власна кастомна розробка на базі Node-RED;
- бази даних InfluxDB або PostgreSQL для зберігання часових рядів;
- аналітика через Grafana або Power BI.

Усі пристрої мають бути сертифіковані за стандартами безпеки та стійкості до кліматичних умов.

3.4 Модель збереження, обробки та аналізу даних

Система передбачає безперервний збір телеметричних даних у режимі реального часу з подальшим їх збереженням у спеціалізованій базі даних часових рядів. Такий підхід дозволяє зберігати велику кількість інформації з точними часовими позначками, що є критично важливим для аналізу динамічних процесів. Для підвищення ефективності обробки даних і зменшення навантаження на центральні обчислювальні ресурси використовується концепція edge-computing. Вона передбачає виконання первинної обробки інформації безпосередньо на шлюзах, розташованих ближче до джерел даних — сенсорів. Завдяки цьому суттєво

зменшується обсяг даних, що передаються до хмарної платформи, а також підвищується швидкодія системи за рахунок локальної фільтрації, агрегування та попереднього аналізу.

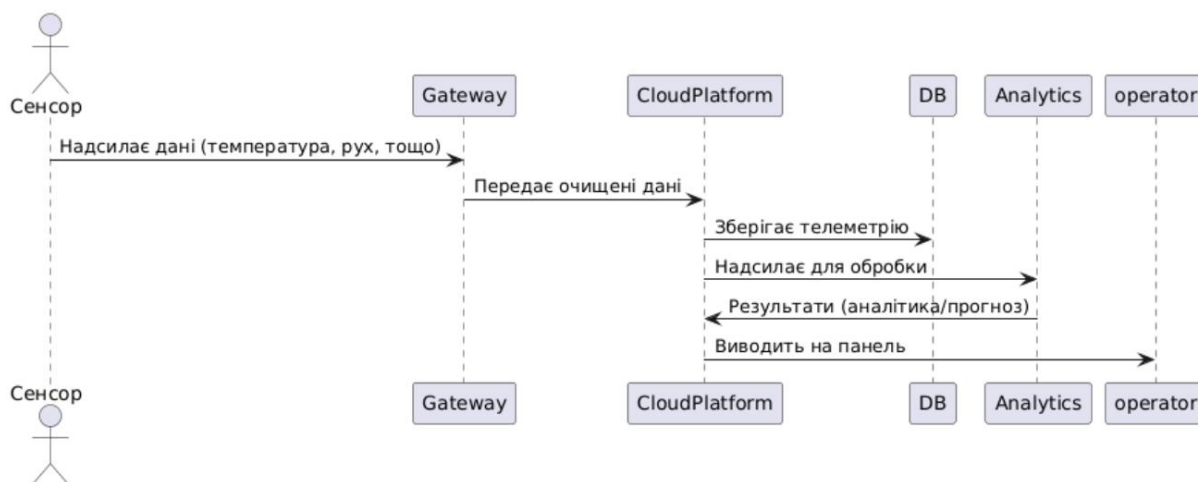


Рис. 3.4 Потік даних у системі від сенсора до панелі моніторингу

На рисунку 3.4 зображено основний шлях проходження інформації в запропонованій IoT-системі — починаючи від первинного збору даних сенсорами, які фіксують параметри навколишнього середовища та показники енергоспоживання, і до візуалізації цих даних через панель моніторингу для кінцевих користувачів. Сенсори збирають різноманітну інформацію про навколишнє середовище, таку як температура, вологість, рівень освітлення, а також показники споживаної електроенергії. Ці дані передаються на шлюзи, де відбувається їх попередня обробка — включно з фільтрацією шумів, агрегацією значень і перетворенням у формат, придатний для подальшого аналізу.

Далі оброблені дані відправляються до хмарної платформи, де вони зберігаються у базі даних часових рядів і піддаються більш складному аналізу. Хмарна інфраструктура забезпечує масштабованість, надійність та доступність інформації, що дозволяє проводити різноманітні аналітичні операції, зокрема побудову моделей прогнозування, виявлення аномалій та генерацію звітів.

Обробка зібраних даних включає кілька ключових етапів:

1. Виявлення аномалій — система аналізує поточні показники, виявляючи раптові або несподівані зміни, наприклад, різке зростання споживання електроенергії, що може свідчити про аварійну ситуацію або неефективне використання ресурсів.
2. Прогнозування споживання — на основі історичних даних та побудованих моделей прогнозування система оцінює майбутнє навантаження, що дозволяє планувати оптимальні режими роботи та уникати перевантажень.
3. Формування звітів і панелей управління — інформація структуровано подається у вигляді інтерактивних панелей моніторингу, які забезпечують операторів актуальними даними в режимі реального часу, а також аналітичними звітами для ухвалення стратегічних рішень.

Для ефективного управління енергоресурсами і підтримки прийняття оперативних рішень система реалізує комплексну обробку інформації на рівні хмарної платформи. Тут використовуються алгоритми, що автоматично виявляють аномалії в споживанні енергії, прогнозують майбутні навантаження за допомогою математичних моделей та методів аналізу даних, а також генерують докладні звіти і інтерактивні візуалізації. Завдяки такому підходу оператори отримують можливість вчасно реагувати на зміни, оптимізувати роботу обладнання та покращувати ефективність систем у різноманітних умовах міського середовища.

Усі дані мають бути анонімізовані та захищені відповідно до законодавства щодо захисту персональних даних.



Рис. 3.5 Алгоритм обробки, аналізу та візуалізації даних у хмарній платформі

3.5 Очікувані результати, обґрунтування ефективності

У межах реалізації пілотного проєкту з упровадження IoT-технологій в енергоменеджменті міста Бориспіль очікується досягнення конкретних, вимірюваних результатів у коротко- та середньостроковій перспективі. Ці результати охоплюють економічну, екологічну, технічну й соціальну площини впливу.

1. Зниження енергоспоживання систем освітлення на 50–60%

За рахунок впровадження інтелектуальних систем управління вуличним освітленням, які передбачають автоматичне регулювання яскравості залежно від часу доби, інтенсивності трафіку та погодних умов, очікується суттєве скорочення енергоспоживання. Подібні результати були досягнуті у Львові, Івано-Франківську та Чернігові, де завдяки впровадженню світлодіодних світильників з контролерами вдалося досягти економії до 60%. Зменшення енергоспоживання дозволяє зменшити навантаження на електромережу, знизити обсяг закупівлі електроенергії та забезпечити довший термін служби обладнання.

2. Оптимізація витрат на опалення й охолодження до 30%

Завдяки застосуванню IoT-сенсорів і систем автоматизованого регулювання мікроклімату в адміністративних і соціальних будівлях міста передбачається зниження витрат на опалення, кондиціонування та вентиляцію. Дані в режимі реального часу дозволять визначати, у яких приміщеннях потрібна корекція температурного режиму, що унеможливило перевитрати. Аналогічна система, впроваджена в межах проєкту GIZ у Житомирі, дозволила щороку економити до 28% теплової енергії в муніципальних закладах освіти.

3. Скорочення заторів у центральній частині міста на 15–20%

Інтелектуальні системи моніторингу дорожнього трафіку з камерами, сенсорами руху та адаптивним керуванням світлофорами дозволяють зменшити середній час перебування транспортного засобу в пробці. Це веде до зниження споживання пального, а отже — і викидів CO₂. Згідно з досвідом Києва та Вінниці, де були реалізовані системи адаптивного управління світлофорами, в середньому рівень заторів у пікові години зменшився на 18%, а середня швидкість руху підвищилася на 10–12%.

4. Підвищення прозорості та керованості енерговитрат

Запровадження централізованої системи збору та обробки даних дасть змогу міській адміністрації отримувати об'єктивну та актуальну інформацію про споживання енергоресурсів у всіх сферах: від житлового фонду до об'єктів критичної інфраструктури. Такий підхід дозволить виявляти аномальні відхилення,

вчасно реагувати на надмірні витрати та будувати ефективну стратегію енергетичного планування. В містах, які вже інтегрували подібні платформи (наприклад, Полтава), рівень втрат тепла та води знизився на 10–15%.

5. Позитивний соціальний ефект. Реалізація пілотного проєкту сприятиме підвищенню якості життя мешканців міста. Оптимізоване освітлення — це не лише економія, але й підвищення рівня безпеки на вулицях. Поліпшення якості повітря завдяки зменшенню викидів від транспорту позитивно вплине на здоров'я громадян. До того ж відкритість даних щодо енергоспоживання підвищить довіру населення до міської влади, а прозорість процесів управління енергетикою стане фактором приваблення нових інвестицій у міську інфраструктуру.

6. Можливість масштабування рішень. Успішна реалізація пілотного проєкту створить передумови для масштабування IoT-рішень не лише в інші райони міста Бориспіль, але й у малі та середні міста України, які стикаються з подібними викликами. Враховуючи стандартизований підхід до збору даних та відкриту архітектуру систем, впровадження може відбуватися поетапно, з адаптацією до локальних умов.

7. Економічне обґрунтування ефективності. Витрати на впровадження систем IoT у сфері енергоменеджменту зазвичай окупаються протягом 2–4 років. Дослідження, проведені в межах європейських програм URBACT та CIVITAS, підтверджують, що річна економія бюджету на енергії та обслуговуванні інфраструктури може становити до 20% від загального енергетичного кошторису міста. Таким чином, уже в середньостроковій перспективі місто отримає не лише компенсацію витрат, а й довготривалі фінансові вигоди.

3.6 Обґрунтування актуальності впровадження IoT-рішень у сфері енергоменеджменту міста

Станом на 2023 рік енергоефективність міських територій в Україні залишається на недостатньому рівні. За статистикою Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, близько 40% усього енергоспоживання в містах припадає на сферу житлово-комунального

господарства (ЖКГ), при цьому до 25% ресурсів втрачається через нераціональне використання, застарілу інфраструктуру та відсутність сучасних механізмів контролю та обліку. У цих умовах виникає гостра потреба в інтеграції інтелектуальних технологій, зокрема рішень на основі Інтернету речей (Internet of Things, IoT).

Одним із головних викликів традиційних систем енергоменеджменту є їхня низька гнучкість і відсутність здатності до адаптації в реальному часі. Переважна більшість українських муніципалітетів досі покладається на ручний збір даних або системи з обмеженим функціоналом, що не дозволяє оперативно реагувати на зміну навантаження чи виявляти аварійні стани. Наслідком такої інерційності є підвищене споживання енергоресурсів, фінансові втрати та погіршення якості послуг для мешканців.

Інтеграція IoT-рішень забезпечує низку стратегічних переваг:

- безперервний моніторинг енергоспоживання;
- можливість точного прогнозування навантажень;
- автоматичне виявлення втрат, витоків або перевантажень;
- адаптивне управління інфраструктурою на основі реальних даних.

Згідно з даними Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА), впровадження таких систем дозволяє скоротити споживання енергії на 20–30% упродовж перших двох років експлуатації.

Практичні приклади таких рішень уже існують в Україні та за її межами. Зокрема, у місті Львів було реалізовано проєкт із модернізації вуличного освітлення за підтримки НЕФКО (Північна екологічна фінансова корпорація), у межах якого впроваджено систему інтелектуального керування вуличним освітленням. В результаті місто досягло 60% економії електроенергії та суттєвого зниження експлуатаційних витрат.

Ще одним прикладом є пілотний проєкт «Розумне місто Дрогобич», у межах якого функціонує платформа моніторингу енергоспоживання в бюджетних установах. Система дає змогу оперативно відслідковувати витрати на опалення,

воду та електроенергію, а також виявляти аномалії в споживанні. За перший рік роботи проєкту вдалося зменшити витрати в окремих закладах на 10–15%.

На міжнародному рівні слід згадати проєкти, реалізовані в межах програми Horizon 2020. Наприклад, ініціатива «mySMARTLife», в якій беруть участь Гельсінкі, Гамбург та Нант, передбачає інтеграцію IoT у системи міського транспорту, теплопостачання та освітлення. Економія енергоресурсів у деяких районах цих міст сягнула понад 25%, а рівень викидів CO₂ знизився на 15–20%.

Окрім економічної складової, впровадження IoT-технологій позитивно впливає на екологічну ситуацію. Особливо це стосується транспортного сектору, де системи моніторингу трафіку дозволяють оптимізувати рух, зменшити затори та скоротити рівень шкідливих викидів. У масштабах великих міст це дозволяє уникнути щорічних викидів десятків тисяч тонн CO₂.

Варто також врахувати фактор енергетичної безпеки. В умовах війни та енергетичних атак Україна потребує гнучких і адаптивних систем, здатних автономно керувати енергетичними процесами та оперативно реагувати на надзвичайні ситуації. IoT-рішення, інтегровані з системами прогнозування та віддаленого керування, стають ключовим інструментом у забезпеченні сталого функціонування міської інфраструктури.

Таким чином, впровадження IoT-систем у сфері енергоменеджменту міста є критично необхідним. Це не лише технологічний прогрес, а й стратегічний крок до енергонезалежності, економічної ефективності, екологічної стабільності та підвищення якості життя мешканців.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження було доведено, що технології Інтернету речей (IoT) відіграють ключову роль у формуванні енергоефективної інфраструктури сучасного міського середовища. Концепція Smart City, що базується на інтеграції цифрових технологій, дозволяє не лише підвищити якість життя мешканців, а й оптимізувати управління ресурсами з урахуванням принципів сталого розвитку.

Проаналізовано теоретичні засади роботи IoT-систем, їхню архітектуру, протоколи та технічні особливості. Було виявлено, що саме багаторівнева структура та можливість обробки даних у реальному часі дозволяють системам IoT ефективно реагувати на зміни навантажень, погодних умов та поведінкових моделей мешканців.

На основі вивчення світового досвіду (Барселона, Копенгаген, Сеул, Амстердам) встановлено, що впровадження IoT-рішень у таких галузях, як вуличне освітлення, транспорт, управління відходами та будівельний сектор, призводить до значного зниження енергоспоживання — від 30 до 60%, залежно від обраної системи.

Особливу увагу приділено можливостям реалізації таких рішень в українських містах, зокрема — у місті Бориспіль. З урахуванням локальної інфраструктури запропоновано модель IoT-системи для енергоефективного управління, яка може стати основою для подальших практичних впроваджень. Змодельована система демонструє не лише технічну доцільність, а й економічну вигоду: зменшення втрат, зниження експлуатаційних витрат та можливість оперативного реагування на аварійні ситуації.

Наукова новизна роботи полягає в системному підході до оцінки потенціалу IoT у контексті українських реалій та формуванні моделі інтеграції цифрових рішень у міське управління. Практичне значення підтверджується можливістю адаптації розроблених рекомендацій для органів місцевого самоврядування та муніципальних підприємств.

У перспективі подальші дослідження можуть бути зосереджені на таких напрямках:

- моделювання економічного ефекту від впровадження IoT-систем у різних секторах міського господарства;
- розробка нормативно-правового супроводу цифрових трансформацій на рівні місцевих громад;
- створення відкритих платформ для публічного моніторингу енерговитрат у реальному часі.

Таким чином, технології IoT — це не просто набір «розумних» пристроїв, а інструмент стратегічного значення для розвитку сучасних міст, особливо в умовах обмежених ресурсів і зростаючих екологічних викликів. Їхнє впровадження в українських умовах є не лише можливим, а й необхідним кроком на шляху до сталого та енергоефективного майбутнього.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чорний Ю. В. Застосування IoT для підвищення енергоефективності в системах Smart City : власна наукова робота. – ДУІКТ, 2024.
2. CIVITAS Initiative. Smart Urban Mobility [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://civitas.eu>
3. Cisco Systems. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.cisco.com>
4. Copenhagen Solutions Lab. City of Copenhagen Official Site [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cphsolutionslab.dk>
5. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Аналітичні матеріали за 2023 рік. – Режим доступу: <https://saee.gov.ua>
6. Департамент інфраструктури м. Вінниця. Аналітика впровадження адаптивного управління дорожнім рухом [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vmr.gov.ua>
7. Дрогобич – Smart City. Офіційний портал міської ради [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://smart.drohobych-rada.gov.ua>
8. Енергоефективні міста України. Інфографіка про кожен з пакетів програми Фонду енергоефективності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://enefcities.org.ua/novyny/infografika-pro-kojen-z-paketiv-programy-fondu-energoefektyvnosti>
9. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions // *Future Generation Computer Systems*, 2013. – Vol. 29(7). – P. 1645–1660.
10. Глушков А. В. Інтернет речей: можливості та загрози // *Науково-технічний збірник НТУУ "КПІ"*, 2020.
11. Horizon 2020. mySMARTLife Project [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mysmartlife.eu>
12. International Energy Agency. Digitalization and Energy, 2017 [Електронний ресурс].

13. International Energy Agency. Energy Efficiency 2023 Report [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>
14. Komninos N., Philippou E., Pitsillides A. Survey in smart city technologies and applications // *Computer Networks*, 2016. – Vol. 101. – P. 123–145.
15. NEFCO – Північна екологічна фінансова корпорація. Проекти в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nefco.int>
16. SCAND. Smart Cities and IoT Infographic [Електронний ресурс] // *SCAND – Software Development Company*, 2021. – Режим доступу: <https://scand.com/company/news/smart-cities-iot-infographic>
17. Smart City Полтава. Платформа моніторингу енерговитрат [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://smart.city-poltava.gov.ua>
18. Smart City Case Study: Barcelona [Електронний ресурс] // *SmartCitiesWorld*. – Режим доступу: <https://www.smartcitiesworld.net>
19. United Nations Environment Programme (UNEP). Digital Transformation for Sustainable Development, 2022 [Електронний ресурс].
20. URBACT. Інновації в управлінні містами [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://urbact.eu>
21. Zanella A., Bui N., Castellani A., Vangelista L., Zorzi M. Internet of Things for Smart Cities // *IEEE Internet of Things Journal*, 2014. – Vol. 1(1). – P. 22–32.
22. Програма GIZ. «Енергоефективність у громадах
- 23.» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.giz.de>

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)