

## ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий (Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва спеціальності

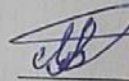
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

на тему Технологія змінного енергоспоживання  
для пристроїв IoT

ДРМТР 2021076.00.00

Виконав: студент 2 курсу, група ТРМ-20-1



підпис

М.В. Любарський

Ініціали, прізвище

Керівник: к-т техн. наук, доц.



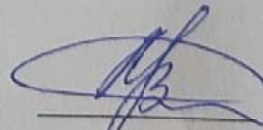
підпис

Д.А. Макаришкін

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, проф.



підпис

В.В. Мартинюк

Ініціали, прізвище

9 12 2021 р.

Хмельницький, 2021

Хмельницький національний університет

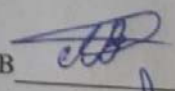
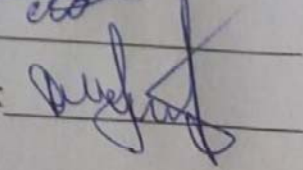
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій  
Освітній рівень другий (магістерський)  
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації  
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка  
Освітня-професійна програма Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедрою АКІТ  
В.В. Мартинюк  
« 2 » 09 2021р.

### ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Любарський Михайло Володимирович

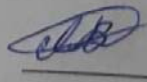
- 1 Тема роботи: Технологія змінного енергоспоживання для пристроїв IoT  
керівник роботи Макаришкін Д.А., к.т.н, доцент.  
Затверджено наказом по університету від «25» серпня 2021р. № 102.
- 2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 02.12.2021р.
- 3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)  
Мета роботи – визначення факторів застосування технології 5G на прикладі застосування M2M з'єднань за забезпечення задачі зменшення енерговитрат для передачі інформації з метою зменшення апаратних витрат та покращення виявлення завад в каналах при передачі інформаційних посилок.  
Об'єкт дослідження – технологія передачі інформації із застосуванням M2M пристроїв  
Предмет дослідження – теоретичний аналіз стану мережі передачі інформації стандарту 5G, моделі підключення до вузлів мережі, моделі формування сигналів, практичне зображення за допомогою інструментів візуального моделювання
- 4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)  
1 Аналіз літературних джерел та визначення проблематики дослідження. 2 IoT в енергетичному секторі. 3 Способи організації безпроводного доступу речей в сучасних мережах. 4 Дослідження застосування сучасних систем IoT для забезпечення енергоефективних рішень

Завдання отримав   
Науковий керівник 

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел	06.09.21-17.09.21	виконано
2	Написання 1 розділу	07.09.21-17.09.21	виконано
3	Визначення проблеми дослідження	06.09.21-17.09.21	виконано
4	Написання 2 розділу	06.09.21-01.10.21	виконано
5	Розробка моделі	06.09.21-01.10.21	виконано
6	Написання 3 розділу	06.09.21-22.10.21	виконано
7	Теоретичне та практичне моделювання	11.10.21-05.11.21	виконано
8	Написання 4 розділу	25.10.21-19.11.21	виконано
9	Оформлення роботи	08.11.21-28.11.21	виконано
10	Оформлення презентації	29.11.21-03.12.21	

Студент



Підпис

М. В. Любецький

Ініціали, прізвище

Керівник роботи



Підпис

Р. А. Макаришкін

Ініціали, прізвище

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПРОБЛЕМАТИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	9
1.1 Загальні відомості .....	9
1.1.1 Поняття.....	11
1.1.2 Мотивація.....	12
1.1.3 Методологія оцінювання.....	14
1.2 Інтернет речей (IoT) та сучасні телекомунікаційні технології.....	14
1.3 Технології забезпечення IoT .....	16
1.3.1 Сенсорні пристрої .....	17
1.3.2 Приводи.....	19
1.3.3 Комунікаційні технології .....	21
1.3.4 Бездротові технології для додатків IoT в енергетичному секторі.....	22
1.3.5 Bluetooth Low Energy (BLE).....	22
1.3.6 Zigbee .....	23
1.3.7 Long Range .....	24
1.3.8 Технологія глобальної мережі Sigfox.....	25
1.3.9 NB-IoT .....	25
1.3.10 Long Term Evolution for Machine-Type Communications .....	26
1.3.11 Weightless .....	26
1.3.12 Супутникова комунікаційна технологія .....	26
1.4 Дані Інтернету речей і обчислення.....	27
1.4.1 Хмарні обчислення.....	28
1.4.2 Туманні обчислення.....	29
Висновок з розділу .....	30
РОЗДІЛ 2 ІОТ В ЕНЕРГЕТИЧНОМУ СЕКТОРІ.....	31

2.1 Роль IoT в енергетичному секторі.....	31
2.2 Інтернет речей і генерація енергії.....	31
2.2.1 Розумні міста .....	36
2.2.2 Розумна мережа .....	37
2.2.3 Розумні будівлі .....	39
2.2.4 Розумне використання енергії в промисловості .....	40
2.2.5 Інтелектуальний транспорт .....	42
2.3 Проблеми застосування IoT .....	43
2.4 Споживання енергії.....	44
2.5 Інтеграція IoT з підсистемами .....	45
2.5.1 Конфіденційність користувачів .....	45
2.5.2 Виклик безпеки.....	46
2.6 Стандарти IoT .....	46
2.7 Архітектурний дизайн системи з підтримкою IoT .....	47
2.8 Блокчейн і Інтернет речей .....	47
2.9 Зелений Інтернет речей.....	49
2.10 Існуючі рішення архітектури систем IoT.....	50
Висновки з розділу .....	51
<b>РОЗДІЛ 3 Способи організації безпроводного доступу речей в сучасних мережах.....</b>	
3.1.1 Особливості виникнення і розвитку Інтернету речей .....	52
3.1.2 Сучасні радіотехнології для зв'язку M2M .....	58
Висновки з розділу .....	66
<b>РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ СИСТЕМ IOT ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РІШЕНЬ.....</b>	
4.1 Доступ в стільникових системах M2M .....	67
4.1.1 Характеристики роботи каналу випадкового доступу в LTE. Організація з'єднання M2M -устройств з мережею. ....	67
4.1.2 Аналіз продуктивності стільникових систем M2M.....	76

Висновки з розділу .....	88
ВИСНОВКИ З РОБОТИ .....	89
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ .....	91

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Інтеграція відновлюваної енергії та оптимізація використання енергії є ключовими факторами сталого переходу в енергетику та пом'якшення наслідків зміни клімату. Сучасні технології, такі як Інтернет речей (IoT), пропонують широку кількість застосувань в енергетичному секторі, тобто в постачаннях, передачі та розподілу енергії та попиті. IoT можна використовувати для підвищення енергоефективності, збільшення частки відновлюваної енергії та зменшення впливу використання енергії на навколишнє середовище. У цій статті розглядається існуюча література щодо застосування IoT в енергетичних системах загалом і в контексті розумних мереж зокрема. Крім того, ми обговорюємо вбудовані технології IoT, включаючи хмарні обчислення та різні платформи для аналізу даних. Крім того, ми розглядаємо проблеми розгортання IoT в енергетичному секторі, включаючи конфіденційність і безпеку, з деякими рішеннями цих проблем, такими як технологія блокчейн. Це опитування надає розробникам енергетичної політики, економістам з питань енергетики та менеджерам огляд ролі IoT в оптимізації енергетичних систем.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Магістерська робота виконана відповідно до поточних та перспективних планів наукової роботи Хмельницького національного університету, кафедри за тематикою покращення методів формування, генерування, прийому та обробки сигналів.

**Мета роботи** – визначення факторів застосування технології 5G на прикладі застосування M2M з'єднань за забезпечення задачі зменшення енерговитрат для передачі інформації з метою зменшення апаратних витрат та покращення виявлення завад в каналах при передачі інформаційних посилок.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити **наступні завдання**:

1. Проаналізувати існуючі тенденції та апаратні рішення щодо впровадження технології 5G, що мають місце на сучасному ринку телекомунікаційних послуг.

2. Розглянути різні варіанти використання Інтернету речей у кожному розділі ланцюга постачання енергії. Обговорити різні компоненти системи Інтернету речей.

3. Розглянути застосування IoT в ланцюжку постачання енергії на різних рівнях на прикладі M2M з'єднання.

**Об'єкт дослідження** – технологія передачі інформації із застосуванням M2M пристроїв.

**Предмет дослідження** – методи забезпечення мінімізації втрат енергії для задачі максимізації передачі інформації за умов існування одночасного підключення до каналів зв'язку.

**Методи дослідження** – теоретичний аналіз стану мережі передачі інформації стандарту 5G, моделі підключення до вузлів мережі, моделі формування сигналів, практичне зображення за допомогою інструментів візуального моделювання.

**Науково-практична новизна роботи.** На основі проведених досліджень, представлено оцінку стійкості мережі до забезпечення одночасності підключення ряду пристроїв між собою. Показано особливості взаємодії та розроблено практичні рекомендації щодо впровадження.

**Публікації.** На основі матеріалів магістерської роботи опублікована стаття у збірнику наукових праць студентів ХНУ.

#### **Структура та об'єм магістерської роботи**

Робота складається з 4-х розділів, загальним обсягом 107 сторінок. В роботі використано 168 посилань на літературні джерела.

# РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПРОБЛЕМАТИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1 Загальні відомості

Перші мережі 5G розгортаються по всьому світу сьогодні на тлі очікувань, що ця передова мобільна технологія зіграє значну роль у цифровій трансформації та економічному успіху багатьох країн.

Перші комерційні мобільні стільникові мережі 5G та наявність більш доступних пристроїв стимулюють попит і інтерес ринку як серед споживачів, так і підприємств. У цій роботі розглядається вплив 5G на Інтернет речей та розглядаються деякі унікальні особливості та переваги 5G порівняно з іншими технологіями. У ньому також представлені випадки використання Інтернету речей, які можна підтримувати за допомогою існуючих технологій стільникового зв'язку, таких як 3G і 4G, і обговорюються випадки використання, коли 5G є важливим. Орієнтована на розгортання стільникових технологій для додатків IoT, ця стаття призначена як навчальний документ для нетехнічних користувачів і замовників комунікаційних систем на підприємствах.

Очікується, що кількість підключень IoT зросте протягом наступних п'яти років. За прогнозами GSMA Intelligence, до 2025 року загальна кількість IoT-з'єднань зросте до 25,2 мільярдів. За оцінками, 3,1 мільярда з них використовуватимуть технології стільникового зв'язку, у тому числі малопотужні глобальні мережі мобільного Інтернету речей [1].

Пристрої IoT сьогодні використовують широкий спектр бездротових технологій. Сюди входять технології короткого радіусу дії, які зазвичай використовують неліцензійний спектр, наприклад WiFi, Bluetooth, ZigBee і Z-wave, а також технології широкого стільникового зв'язку, що використовують ліцензований спектр, наприклад GSM, LTE і 5G. Також доступні альтернативні рішення, такі як технології малої потужності, що працюють у неліцензійному

спектрі, зокрема LoRa та Sigfox. Стільникові технології, що працюють у ліцензованому спектрі, пропонують низку переваг для пристроїв IoT, включаючи розширене надання, керування пристроями та надання послуг. Що ще більш важливо, стільникові мережі пропонують глобальне покриття та високий рівень надійності, безпеки та продуктивності, необхідні навіть для найвимогливіших додатків IoT.

Сучасні мережі LTE або 4G продовжуватимуть співіснувати з 5G, пропонуючи достатнє покриття та ємність для широкого кола випадків використання, оскільки покриття 5G розшириться у всьому світі в найближчі роки [1].

Однак 5G дає ряд переваг для IoT, які недоступні з 4G або іншими технологіями. Серед них — здатність 5G підтримувати величезну кількість статичних і мобільних пристроїв IoT, які мають різноманітні вимоги до швидкості, пропускної здатності та якості обслуговування. Більшість із них можна згрупувати за трьома основними категоріями – розширений мобільний широкопasmовий доступ (eMBB), масовий Інтернет речей (відомий як mMTC) та критичні комунікації. Мережі 5G, які розгортаються сьогодні, будуються на мережах 4G, які використовують технології LTE для машин (LTE-M) і вузькосmового IoT (NB-IoT), при цьому 5G забезпечує функціональність, необхідну для підтримки як існуючих, так і майбутніх випадків використання.

GSMA очікує, що 5G забезпечить високошвидкісний, надійний і безпечний мобільний широкопasmовий зв'язок із низькими затримками на ранніх етапах розгортання. З часом величезна кількість пристроїв IoT буде підключено до мереж 5G, забезпечуючи підтримку наднадійного зв'язку з низькими затримками. Комбінація 5G та бездротових передових технологій підтримуватиме вимогливі випадки використання, такі як автономне водіння, критичні за часом промислові виробничі процеси IoT та доповнена та віртуальна реальність (AR/VR).

Мобільні мережі Інтернету речей, які використовують стільникові технології LTE-M або NB-IoT, продовжують набирати популярність для

додатків, які вимагають підключення до глобальної території (LPWA) з низьким рівнем енергоспоживання [3]. Станом на жовтень 2019 року мобільні оператори запустили 123 комерційні мережі LTE-M і NB-IoT. Ці мережі продовжуватимуть розвиватися та працюватимуть безперебійно як із існуючими мережами, так і з підключенням 5G NR (Нове радіо).

З точки зору базової мережі, як існуюче ядро LTE (Enhanced Packet Core/EPC), так і нове ядро 5G (5GC) продовжуватимуть підтримувати еволюцію мобільного Інтернету речей у майбутньому.

### **1.1.1 Поняття**

Промислові революції можна розділити на чотири фази. Під час першої революції були відкриті нові джерела енергії для роботи машин. Значними етапами розвитку на цьому етапі були масовий видобуток вугілля та винахід парових електростанцій [1]. Друга революція, відома як масове виробництво та виробництво електроенергії, була періодом бурхливого розвитку промисловості, що відрізнялася великим виробництвом чавуну та сталі. На цьому етапі було створено багато великих фабрик з їх складальними лініями та створено нові підприємства [2]. Третя революція запровадила комп'ютерні та перше покоління комунікаційних технологій, наприклад, систему телефонії, що дозволило автоматизувати ланцюги поставок [3].

Очікується, що широкий спектр сучасних технологій, таких як комунікаційні системи (наприклад, 5G), інтелектуальні роботи та Інтернет речей (IoT), сприятиме четвертій промисловій революції [4, 5, 6]. IoT з'єднає низку пристроїв, людей, даних і процесів, дозволяючи їм безперешкодно спілкуватися один з одним. Таким чином, Інтернет речей може допомогти покращити різні процеси, щоб вони були більш кількісними та вимірними, збираючи та обробляючи велику кількість даних [7]. Інтернет речей потенційно може підвищити якість життя в різних сферах, включаючи медичні послуги, розумні міста, будівельну промисловість, сільське господарство, водне господарство та енергетичний сектор [8]. Це забезпечується за рахунок

збільшення автоматизованого прийняття рішень в режимі реального часу та полегшення інструментів для оптимізації таких рішень.

### **1.1.2 Мотивація**

Світовий попит на енергію зріс на 2,3% у 2018 році порівняно з 2017 роком, що є найвищим зростанням з 2010 року [9]. У результаті викиди CO<sub>2</sub> від енергетичного сектору досягли нового рекорду в 2018 році. У порівнянні з доіндустріальним рівнем температури глобальне потепління наближається до 1,5 °C, швидше за все, до середини 21 століття [10]. Якщо ця тенденція переважить, глобальне потепління перевищить ціль на 2 °C, що матиме серйозний вплив на планету та життя людей. Екологічні проблеми, такі як глобальне потепління та локальне забруднення повітря, дефіцит водних ресурсів для виробництва теплової енергії та обмеження виснаження викопних енергетичних ресурсів, викликають нагальну потребу в більш ефективному використанні енергії та використанні відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). ). Різні дослідження показали, що невикопна енергетична система майже неможлива без ефективного використання енергії та/або зменшення попиту на енергію, а також високого рівня інтеграції ВДЕ, як на рівні країни [11], регіонального [12] чи глобально [13].

На основі порядку денного Цілей сталого розвитку ООН [14], енергоефективність є одним із ключових чинників сталого розвитку. Більше того, енергоефективність пропонує економічні вигоди в довгостроковій перспективі за рахунок зниження вартості імпорту/постачання палива, виробництва енергії та скорочення викидів у енергетичному секторі. Для підвищення енергоефективності та більш оптимального управління енергією ефективний аналіз даних в реальному часі в ланцюжку постачання енергії відіграє ключову роль [15]. Ланцюжок постачання енергії, від видобутку ресурсів до доставки їх у корисній формі кінцевим споживачам, включає три основні частини: (i) постачання енергії, включаючи процеси нафтопереробного заводу; (ii) процеси перетворення енергії, включаючи передачу та розподіл

(T&D) енергоносіїв; та (iii) сторона потреби в енергії, яка включає використання енергії в будівлях, транспортному секторі та промисловості [16]. На рисунку 1.1 показано ці три частини з відповідними компонентами. У рамках цієї роботи ми обговорюємо роль IoT у всіх різних сегментах ланцюга постачання енергії. Наша мета – показати потенційний внесок IoT в ефективне використання енергії, зниження попиту на енергію та збільшення частки ВДЕ.

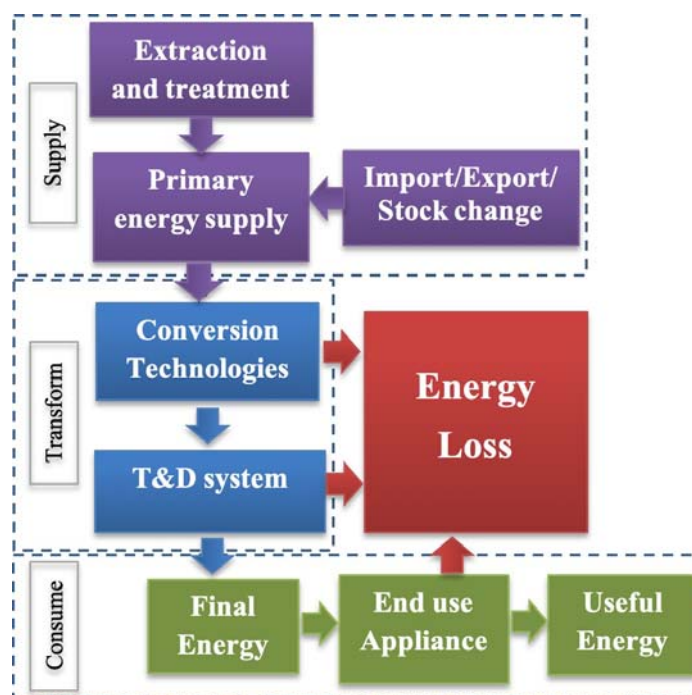


Рисунок 1.1 – Energy supply chain

IoT використовує датчики та комунікаційні технології для виявлення та передачі даних у реальному часі, що дозволяє здійснювати швидкі обчислення та приймати оптимальні рішення [17]. Крім того, IoT може допомогти енергетичному сектору перетворитися з централізованої на розподілену, розумну та інтегровану енергетичну систему. Це є ключовою вимогою для розгортання локальних розподілених ВДЕ, таких як енергія вітру та сонця [18], а також перетворення багатьох дрібних кінцевих споживачів енергії в споживачів шляхом об'єднання їх виробництва та оптимізації їх попиту, коли це корисно для мережі. Системи на основі IoT автоматизують, інтегрують та контролюють процеси за допомогою датчиків і комунікаційних технологій.

Великий збір даних та використання інтелектуальних алгоритмів для аналізу даних у реальному часі може допомогти відстежувати моделі споживання енергії різними користувачами та пристроями в різних масштабах часу та ефективніше контролювати це споживання [19].

### **1.1.3 Методологія оцінювання**

Застосування Інтернету речей у різних галузях і галузях широко обговорювалося та розглядалося в літературі (наприклад, [20, 21, 22]. Крім того, проблеми та можливості щодо розгортання однієї або групи технологій IoT отримали високий рівень технічної оцінки, наприклад, датчиків [23] або мережі 5G [24]. Що стосується енергетичного сектора, більшість досліджень зосереджено на одному конкретному підсекторі, наприклад, на будівлях або технічний потенціал певної технології IoT в енергетиці. Наприклад, Стойкоска та інші [25] розглядають програми Інтернету речей для розумних дому та перспективи інтеграції цих додатків у середовище з підтримкою IoT. У дослідженні Гнуї та інших [26] методи, останні досягнення та впровадження 5G вивчається лише з акцентом на попит на енергію. Роль IoT у підвищенні енергоефективності в будівлях і громадському транспорті обговорювалася відповідно в [27, 28]. Хатуа та інші [29] розглядають ключову проблему. s у придатності протоколів передачі даних і зв'язку IoT для розгортання в розумних мережах.

Однак, на відміну від розглянутої літератури, де увага зазвичай приділяється або конкретному підсектору в енергетичному секторі, або певним технологіям Інтернету речей, у цій роботі розглядається застосування IoT в енергетичному секторі, від виробництва енергії до передачі та розподілу (T&D) і попиту.

### **1.2 Інтернет речей (IoT) та сучасні телекомунікаційні технології**

IoT – це нова технологія, яка використовує Інтернет і спрямована на забезпечення зв'язку між фізичними пристроями або «речами» [30]. Приклади

фізичних пристроїв включають побутову техніку та промислове обладнання. Використовуючи відповідні датчики та комунікаційні мережі, ці пристрої можуть надавати цінні дані та надавати людям різноманітні послуги. Наприклад, розумний контроль енергоспоживання будівель дозволяє знизити витрати на електроенергію [31]. IoT має широкий спектр застосувань, наприклад, у виробництві, логістиці та будівництві [32]. Інтернет речей також широко використовується в моніторингу навколишнього середовища, системах і послугах охорони здоров'я, ефективному управлінні енергією в будівлях і послугах на основі дронів [33, 34, 35, 36].

Під час планування програми IoT, яка є першим кроком у проектуванні систем IoT, вибір компонентів IoT, таких як сенсорний пристрій, протокол зв'язку, зберігання даних та обчислення, має відповідати передбачуваному застосуванню. Наприклад, платформа IoT, яка планується керувати опаленням, охолодженням та кондиціонуванням повітря (HVAC) у будівлі, вимагає використання відповідних датчиків навколишнього середовища та відповідних комунікаційних технологій [37]. На рисунку 1.2 показані різні компоненти платформи IoT [38]. Пристрої IoT, які є другим компонентом платформ IoT, можуть бути у формі датчиків, виконавчих механізмів, шлюзів IoT або будь-якого пристрою, який приєднується до циклу збору, передачі та обробки даних. Наприклад, пристрій шлюзу IoT дозволяє маршрутизувати дані в систему IoT і встановлювати двосторонній зв'язок між пристроєм і шлюзом і шлюзом в хмару.

Протоколи зв'язку, які є третім компонентом платформи IoT, дозволяють різним пристроям спілкуватися та обмінюватися своїми даними з контролерами або центрами прийняття рішень. Платформи IoT пропонують гнучкість вибору типу комунікаційних технологій (кожна має свої особливості) відповідно до потреб програми. Прикладами цих технологій є Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee [39] та стільникові технології, такі як мережі LTE-4G та 5G [40]. Сховище даних є четвертим компонентом платформи IoT, який дозволяє керувати даними, зібраними з датчиків.

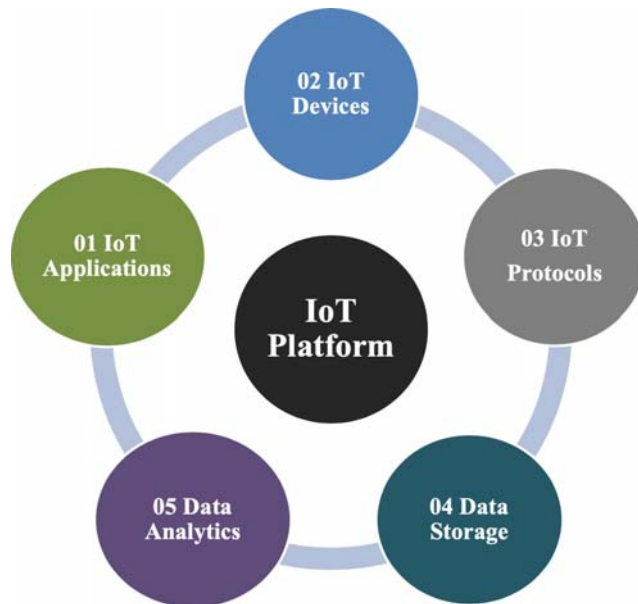


Рисунок 1.2 – Діаграма з описом компонентів платформи IoT.

В принципі, дані, зібрані з пристроїв, дуже великі. Це вимагає планування ефективного сховища даних, яке може бути на хмарних серверах або на межі мережі Інтернету речей. Збережені дані, які використовуються в аналітичних цілях, утворюють п'ятий компонент платформ IoT. Аналітика даних може виконуватися в автономному режимі після збереження даних або може бути у формі аналітики в реальному часі. Аналіз даних виконується для прийняття рішення про роботу програми. Виходячи з потреби, аналіз даних може виконуватися офлайн або в режимі реального часу. У офлайн-аналітиці збережені дані спочатку збираються, а потім візуалізуються на місці за допомогою інструментів візуалізації. У разі аналітики в режимі реального часу для візуалізації використовуються хмарні або граничні сервери, напр. потокова аналітика [41].

### 1.3 Технології забезпечення IoT

IoT — це парадигма, в якій об'єкти та елементи системи, оснащені датчиками, виконавчими механізмами та процесорами, можуть спілкуватися один з одним для надання значущих послуг. У системах Інтернету речей датчики використовуються для виявлення та збору даних і через шлюзи

направляють зібрані дані до центрів управління або хмари для подальшого зберігання, обробки, аналітики та прийняття рішень. Після прийняття рішення відповідна команда надсилається назад на привод, встановлений у системі, у відповідь на отримані дані. Оскільки існує різноманітність сенсорних і виконавчих пристроїв, комунікаційних технологій та обчислень даних, у цьому розділі ми пояснюємо існуючі технології, які дозволяють IoT. Далі ми наведемо приклади з літератури, як ці технології використовуються в енергетичному секторі.

### **1.3.1 Сенсорні пристрої**

Датчики є ключовими драйверами IoT [42]. Вони використовуються для збору та передачі даних в режимі реального часу. Використання датчиків підвищує ефективність, функціональність і відіграє вирішальну роль в успіху IoT [43]. Існують різні типи датчиків, які розроблені для різних цілей застосування. Приклади таких застосувань включають сільське господарство, моніторинг навколишнього середовища, системи та послуги охорони здоров'я, а також громадську безпеку [44]. На практиці в енергетиці, включаючи виробництво, передачу та розподіл та виробництво енергії, використовується багато цих датчиків. В енергетичному секторі датчики використовуються для економії як витрат, так і енергії. Датчики забезпечують розумну систему управління енергією та забезпечують оптимізацію енергії в режимі реального часу та сприяють застосуванню нових підходів до управління енергетичним навантаженням. Дослідження та майбутні тенденції сенсорних пристроїв також спрямовані на розробку сенсорних додатків для покращення формування навантаження та поінформованості споживачів, а також на розробку специфічних засобів для збільшення виробництва відновлюваної енергії [45]. У двох словах, використання сенсорних пристроїв в IoT в енергетичному секторі значною мірою покращує діагностику, прийняття рішень, аналітику, процеси оптимізації та інтегровані показники продуктивності. Через велику кількість датчиків, які використовуються в енергетичному секторі, нижче ми пояснюємо

кілька прикладів сенсорних пристроїв, які зазвичай застосовуються у виробництві та споживанні енергії.

Датчики температури використовуються для виявлення коливань в системі нагрівання та охолодження [46]. Температура є важливим і поширеним параметром навколишнього середовища. В енергетиці основним принципом виробництва електроенергії є процес перетворення механічної енергії в електричну, тоді як механічна енергія одержується з теплової енергії, наприклад, теплові електростанції, вітрові, водні та сонячні електростанції. Ці перетворення енергії отримують за допомогою теплової, тобто температури. Що стосується споживання енергії, датчики температури використовуються для максимізації продуктивності системи при зміні температури під час нормальної роботи. Наприклад, у житлових приміщеннях найкращий час для включення або вимкнення систем вентиляції та охолодження розпізнають датчики температури; таким чином, енергією можна правильно керувати з метою економії енергії [42].

Датчики вологості використовуються для визначення кількості вологи та вологості повітря. Відношення вологи в повітрі до найбільшої кількості вологи при певній температурі повітря називається відносною вологістю [47]. Застосування датчиків вологості в енергетиці широке. Наприклад, вони зазвичай використовуються у виробництві енергії вітру. Використання датчиків вологості на вітрогенераторах навіть життєво необхідне, якщо турбіни розташовані на березі (через високий рівень вологи в повітрі). Датчики вологості можуть бути розміщені в гондолі та в нижній частині вітрогенераторів і забезпечують постійний моніторинг вологості. Це дозволяє операторам вживати заходів щодо змін або відхилень в умовах роботи турбіни, що призводить до більш послідовних операцій, оптимізації продуктивності та зниження витрат на енергію. Датчики світла використовуються для вимірювання яскравості (рівень зовнішнього освітлення) або яскравості світла.

У споживанні енергії світлові датчики мають кілька застосувань у промислових та повсякденних споживчих додатках. В якості основного

джерела споживання енергії в будівлях відноситься освітлення, на яке, відповідно, припадає майже 15% загального споживання електроенергії [48]. У світовому масштабі приблизно 20% електроенергії витрачається на освітлення [49]. Таким чином, датчики освітленості можна використовувати для автоматичного контролю рівня освітлення в приміщенні та на вулиці, вмикаючи та вимикаючи або зменшуючи рівень освітлення, таким чином, щоб рівень електричного освітлення можна було автоматично регулювати у відповідь на зміни зовнішнього освітлення. Таким чином, енергія, необхідна для освітлення внутрішніх приміщень, може бути зменшена [19].

Пасивні інфрачервоні (PIR) датчики, також відомі як датчики руху, використовуються для вимірювання інфрачервоного світлового випромінювання, що випромінюється від об'єктів, що оточують їх. У споживанні енергії ці датчики використовуються для зниження споживання енергії в будівлях. Наприклад, за допомогою PIR-датчиків можна виявити присутність людей у просторі. Якщо в просторі не виявлено руху, то управління світлом простору вимикає світло, тобто розумне керування освітленням. Таким чином зменшується споживання електроенергії в будівлях [50]. Аналогічно це можна застосувати для систем кондиціонування повітря, які споживають майже 40% енергії в будівлях [48].

Датчики наближення використовуються для виявлення присутності поблизу об'єктів без будь-якого фізичного контакту [51]. Прикладом застосування датчиків наближення є виробництво енергії вітру. Ці датчики забезпечують довговічність і надійне визначення положення у вітрових турбінах. У вітряних турбінах застосування датчиків наближення включає контроль нахилу лопаті, положення ротора та положення гальма по ротору; моніторинг зносу гальма; і моніторинг частоти обертання ротора [52].

### **1.3.2 Приводи**

Приводи - це пристрої, які перетворюють певну форму енергії в рух. Вони отримують електричний вхід від систем автоматизації, перетворюють

вхідні дані в дію та діють на пристрої та машини в системах IoT [53]. Приводи створюють різні моделі руху, такі як лінійні, коливальні або обертові рухи. За джерелами енергії приводи поділяються на такі типи [54].

Пневматичні приводи використовують стиснене повітря для створення руху. Пневматичні приводи складаються з поршня або діафрагми для створення рушійної сили. Ці приводи використовуються для керування процесами, які вимагають швидкої та точної реакції, оскільки ці процеси не потребують великої кількості рушійної сили.

Гідравлічні приводи використовують рідину для створення руху. Гідравлічні приводи складаються з циліндра або рідинного двигуна, який використовує гідравлічну потужність для забезпечення механічної роботи. Механічний рух дає вихід у вигляді лінійного, обертального або коливального руху. Ці приводи використовуються в управлінні промисловими процесами, де потрібна висока швидкість і великі зусилля.

Теплові приводи використовують джерело тепла для створення фізичної дії. Теплові приводи перетворюють теплову енергію в кінетичну енергію або рух. Як правило, термостатичні приводи складаються з чутливого до температури матеріалу, ущільненого діафрагмою, яка притискається до пробки для переміщення поршня. Матеріалом, що реагує на температуру, може бути будь-який тип рідини, газу, воскоподібної речовини або будь-якого матеріалу, який змінює об'єм залежно від температури.

Для створення руху електричні приводи використовують зовнішні джерела енергії, наприклад, батареї. Електричні приводи - це механічні пристрої, здатні перетворювати електрику в кінетичну енергію за одиничний лінійний або обертальний рух. Конструкції цих приводів засновані на передбачуваних завданнях в рамках процесів.

В енергетиці, наприклад, на електростанціях, пневмоприводи традиційно використовують для регулюючої арматури. Технологія електричного приводу регулюючого клапана дозволяє досягти енергоефективності. Вони також часто є кінцевим елементом керування в роботі електростанції [55]. Існує безліч

приводів, розроблених для енергетичної промисловості, наприклад, електричний привід LINAK (<https://www.linak.com/business-areas/energy/>), які пропонують рішення, наприклад, для мінімізації витрат енергії при відкритті людей і блокування гальм у вітряних турбінах і створення руху в сонячних панелях стеження. У літературі також є багато досліджень, спрямованих на ілюстрацію застосування актуаторів в IoT. Наприклад, у дослідженні [56] пропонується бездротова мережа датчиків і приводів для забезпечення автоматичної інтелектуальної системи на основі IoT. Тоді як, оптимізуючи роботу пристроїв і машин в IoT, запропонована система досягає зниження їх загальної енергії в певний момент часу.

### **1.3.3 Комунікаційні технології**

Системи бездротового зв'язку відіграють головну роль в активації IoT. Бездротові системи підключають сенсорні пристрої до шлюзів IoT і здійснюють наскрізний обмін даними між цими елементами IoT. Бездротові системи розробляються на основі різних бездротових стандартів, і використання кожного з них залежить від вимог програми, таких як діапазон зв'язку, пропускна здатність та вимоги до споживання енергії. Наприклад, часто відновлювані джерела енергії, зокрема вітрові та сонячні електростанції, здебільшого розташовані у дуже віддалених районах. Тому забезпечити надійний зв'язок IoT у віддалених місцях є складним завданням. Використання систем IoT на цих сайтах вимагає вибору відповідної комунікаційної технології, яка може гарантувати безперервне з'єднання та підтримувати передачу даних в режимі реального часу енергоефективним способом. Через важливість комунікаційних технологій в Інтернеті речей, у цьому підрозділі ми розглянемо деякі з цих технологій. Ми також наведемо кілька прикладів, щоб показати їхню роль в енергетичному секторі. Потім ми надаємо порівняння в таблиці 1, щоб показати різницю кожної з технологій у застосуванні з IoT.

### **1.3.4 Бездротові технології для додатків IoT в енергетичному секторі**

Широко досліджуються бездротові технології малого радіусу дії, наприклад Wireless Fidelity (Wi-Fi) (<https://www.wi-fi.org/>) для додатків IoT в енергетичному секторі. В енергетиці очевидні випадки використання Wi-Fi включають облік енергії та управління енергією будівлі [57, 58, 59, 60, 61]. Однак через високі вимоги до потужності Wi-Fi ця технологія не є найкращим рішенням в енергетиці. Технології зв'язку малопотужної глобальної мережі (LPWAN), такі як вузькосмуговий IoT (NB-IoT); ZigBee; технології Bluetooth з низьким споживанням енергії (BLE); а також новітні технології LPWAN, такі як LoRa, Sigfox та LTE-M, що працюють у неліцензійному діапазоні [62], є кращими рішеннями для використання в енергетичному секторі. Тому що ці новітні технології LPWAN дозволяють створити надійну, недорогу, малопотужну технологію з великим радіусом дії, технологію останньої милі для інтелектуальних рішень з управління енергією [63]. Тому в цій роботі пояснено нові технології LPWAN та розглянемо деякі приклади їх застосування в енергетичному секторі. Ми також пояснюємо супутникову технологію, яка відіграє важливу роль у забезпеченні глобального підключення IoT для промислових секторів, розташованих у віддалених районах. Крім того, у таблиці 1 ми проілюструємо різні особливості цих технологій.

### **1.3.5 Bluetooth Low Energy (BLE)**

Bluetooth Low Energy (BLE) — це технологія бездротового зв'язку малої дальності для IoT, яка дозволяє обмінюватися даними за допомогою коротких радіохвиль (<https://www.bluetooth.com/>). BLE є менш дорогим у розгортанні, із типовим діапазоном від 0 до 30 м, що дозволяє створити миттєву персональну мережу [64]. BLE націлений на невеликі додатки IoT, які вимагають від пристроїв передавати невеликі обсяги даних, що споживають мінімальну потужність. Галузі в енергетичному секторі з добре розробленою стратегією IoT можуть створювати нові форми міжмашинного зв'язку та між машиною та людиною, використовуючи цю технологію. В енергетичному секторі BLE

широко використовується для споживання енергії в житлових і комерційних будівлях. Наприклад, автори [65] описують розумну офісну систему управління енергією, яка зменшує споживання енергії ПК, моніторів і світильників за допомогою BLE. В іншому дослідженні пропонується система управління енергією для розумних будинків, яка використовує BLE для зв'язку між побутовою технікою, спрямовану на зменшення енергії в будинках [66]. Аналогічно, використовуючи BLE, дослідження в [67] представляє нечітко засноване рішення для інтелектуального управління енергією в домашній автоматизації, спрямоване на покращення схеми управління енергією будинку.

### **1.3.6 Zigbee**

Zigbee — це комунікаційна технологія, яка призначена для створення персональної мережі та націлена на невеликі програми (<https://zigbee.org/>). Zigbee легко реалізувати і планується забезпечити низьку вартість, низьку швидкість передачі даних і високонадійні мережі для малопотужних додатків [68, 69]. Zigbee також використовує специфікацію сітчастої мережі, де пристрої під'єднані за допомогою багатьох взаємозв'язків. Використовуючи функцію сітчастої мережі Zigbee, максимальна дальність зв'язку, яка становить до 100 м, значно розширюється. У енергетичному секторі приклади застосування IoT Zigbee включають системи освітлення (будинки та вуличне освітлення), розумні мережі, наприклад, розумні електролічильники, системи домашньої автоматизації та промислової автоматизацію. Ці програми мають на меті забезпечити підходи до ефективного споживання енергії. У літературі, з метою мінімізації витрат на електроенергію споживачів, дослідження в [70] оцінюють ефективність застосування домашнього керування енергією шляхом створення бездротової сенсорної мережі за допомогою Zigbee. Автори [71] також вводять інтерфейси розумного дому, щоб забезпечити взаємодію між пристроями ZigBee, електричним обладнанням та розумними лічильниками для більш ефективного використання енергії. У роботі [72] представлена система моніторингу на основі ZigBee, яка використовується для вимірювання та

передачі енергії побутових приладів на розетках і освітлювальних приладах, спрямованих на зниження споживання енергії. В іншому дослідженні [73] представлені польові випробування з використанням технологій ZigBee для моніторингу фотоелектричних і вітроенергетичних систем. Результати дослідження демонструють кваліфікацію пристроїв ZigBee, що застосовуються в розподіленій відновлюваній генерації та інтелектуальних системах обліку.

### **1.3.7 Long Range**

Long Range (LoRa) LoRa — це технологія бездротового зв'язку, розроблена для IoT (<https://lora-alliance.org/>). LoRa – це економічно ефективна комунікаційна технологія для широкого розгортання Інтернету речей, яка може збільшити термін служби акумулятора на багато років. LoRa також використовується для встановлення далекого мовлення (більше 10 км у сільській місцевості) з дуже низьким споживанням енергії [74]. Особливості цієї технології роблять її придатною комунікаційною технологією для використання в енергетичному секторі переважно в розумних містах, наприклад, розумні мережі та системи автоматизації будівель, наприклад, розумні вимірювання.

У роботі [75] спрямована на оптимізацію споживання енергії шляхом розгортання системи енергоменеджменту будівлі з використанням LoRa. Робота пропонує платформу шляхом інтеграції кількох систем, таких як кондиціонування повітря, освітлення та моніторинг енергії, для оптимізації енергії будівлі. Результат платформи дозволив заощадити 20% енергії. У роботі [76] автори розробили інтелектуальний контролер на основі машинного навчання для комерційних будівель HVAC з використанням LoRa. Розумний контролер визначає, коли кімната не зайнята, і вимикає систему HVAC, зменшуючи споживання енергії до 19,8%. Інше дослідження [77] з використанням технології LoRa представляє впровадження електронної платформи енергоменеджменту в громадських будівлях. Завдяки тесту

розроблена платформа дозволяє заощадити енергію для системи освітлення на 40%.

### **1.3.8 Технологія глобальної мережі Sigfox**

Sigfox — це технологія глобальної мережі, яка використовує надвузьку смугу (<https://www.sigfox.com/>). Sigfox дозволяє пристроям зв'язуватися з низьким енергоспоживанням для забезпечення додатків IoT [78]. Наприклад, щодо доцільності цієї технології в енергетичному секторі, у дослідженні в [79] розглядаються технологічні досягнення та представляється Sigfox як один із найкращих кандидатів з низьким енергоспоживанням для інтелектуального вимірювання для забезпечення енергетичних послуг у реальному часі для домогосподарств. Крім того, у дослідженні в [80] порівнюються різні технології глобальної мережі малої потужності та робиться висновок, що Sigfox є підходящим рішенням для використання з датчиками оповіщення про електричні розетки в розумних будівлях.

### **1.3.9 NB-IoT**

Вузькосмуговий Інтернет речей (NB-IoT) — це комунікаційна технологія LPWAN, яка підтримує велику кількість пристроїв і послуг IoT з високою швидкістю передачі даних з дуже низькою затримкою (<https://www.3gpp.org/news-events/1733-niot/>). NB-IoT – це недороге рішення, яке має тривалий час роботи від акумулятора та забезпечує розширене покриття. За словами авторів роботи [81], через особливості затримки NB-IoT ця технологія є потенційним рішенням для розумних мереж розподілу енергії, забезпечуючи недорогий зв'язок для розумних лічильників. Крім того, дослідження в [82] демонструє технологію NB-IoT для інтелектуального вимірювання. Як інше застосування NB-IoT в енергетичному секторі, робота в [83] представляє NB-IoT як потенційне рішення для комунікацій в розумних мережах шляхом порівняння NB-IoT з іншими комунікаційними технологіями з точки зору швидкості передачі даних, затримки та діапазону зв'язку.

### **1.3.10 Long Term Evolution for Machine-Type Communications**

Long Term Evolution for Machine-Type Communications (LTE-M) — це стандартизація 3GPP (партнерський проект третього покоління), яка призначена для зменшення складності пристрою для зв'язку машинного типу (MTC) [84]. LTE-M підтримує безпечний зв'язок, забезпечує повсюдне покриття та високу потужність системи. LTE-M також пропонує послуги з меншою затримкою та більшою пропускну здатністю, ніж NB-IoT [85]. Крім того, ця технологія пропонує енергоефективне розподілення ресурсів для невеликих електричних пристроїв, що робить її потенційним рішенням для інтелектуальних лічильників [86] та комунікацій у розумній мережі [87].

### **1.3.11 Weightless**

Weightless — це відкритий бездротовий стандарт LPWAN, розроблений для встановлення зв'язку між великою кількістю пристроїв і машин IoT (<http://www.weightless.org/>). Weightless є потенційним рішенням для інтелектуального вимірювання в енергетичному секторі [88]. На основі дослідження в [89], Weightless є придатною бездротовою технологією, яку можна використовувати в додатках IoT для розумного дому для інтелектуального вимірювання та комунікацій у розумній мережі.

### **1.3.12 Супутникова комунікаційна технологія**

Супутникова комунікаційна технологія — це ще одна комунікаційна технологія, яка має дуже широке охоплення та може підтримувати програми з низькою швидкістю передачі даних між машиною (M2M) [90]. Супутникова технологія підходить для підтримки пристроїв і машин IoT у віддалених місцях. Дослідження в [91] представляє супутниковий зв'язок між машинами на основі IoT, який застосовний до розумної мережі, зокрема для сектору передачі та розподілу (T&D). Подібне дослідження підкреслює важливість використання супутникового зв'язку IoT в енергетичній сфері, наприклад сонячних і вітрових електростанціях [92].

**Таблиця 1.1. Порівняння між різними безпроводними технологіями**

Параметр Технологія	Розташуватися	Швидкість Передач даних	Енергетичне Використання (Життя Батарей)	Безпека	Інсталяційна Вартість	Додаток Прикладу
LoRA	<50 км.	0.3–38.4 kbps	Дуже low (8-10 років)	Високо	Низька	Кмітливі будівлі (розумно, освітлюючи)
NB-IoT	<50 км.	<100 kbps	Високо (1-2 роки)	Високо	Низька	Кмітлива grid комунікація
LTE-m	<200 км.	0.2–1 Mbps	Low (7-8 років)	Високо	Помірна	Кмітливий метр
Sigfox	<50 км.	100 bps	Low (7-8 років)	Високо	Помірна	Кмітливі будівлі (штепсельні вилки)
Невагомий	<5 км.	100 kbps	Low (Дуже Довго)	Високо	Низька	Кмітливий метр
Bluetooth	<50 m	1 Mbps	Low (Декілька місяців)	Високо	Низька	Кмітливі домашні побутові прилади
Zigbee	<100 m	250 Kbps	Дуже Low (5-10 років)	Low	Низька	Розумно, вимірюючи в поновлюваних енергіях
Супутник	Дуже Довго >1500 км.	100 kbps	Високо	Високо	Висока	Установки енергії сонячного & вітру

#### 1.4 Дані Інтернету речей і обчислення

Обчислення та аналіз даних, згенерованих IoT, дозволяє отримати більш глибоке уявлення, точну реакцію системи та допомагає приймати відповідні рішення щодо споживання енергії системами [99]. Однак обчислення даних IoT є складною проблемою. Тому що дані Інтернету речей, відомі як великі дані, відносяться до величезної кількості структурованих і неструктурованих даних, які генеруються різними елементами систем Інтернету речей, такими як датчики, програмні програми, розумні або інтелектуальні пристрої та комунікаційні мережі. У зв'язку з особливостями великих даних, які включають великий обсяг, високу швидкість та різноманітність [100], їх необхідно

ефективно обробляти та аналізувати [101]. Обробка великих даних виходить за рамки традиційних методів, тобто зберігати їх на локальних жорстких дисках, обчислювати та аналізувати. Для управління великими даними необхідні передові обчислювальні та аналітичні методи [102, 103]. Нижче ми пояснюємо хмарні обчислення та туманні обчислення, які широко використовуються для обробки та обчислення великих даних.

#### **1.4.1 Хмарні обчислення**

Хмарні обчислення – це підхід до обробки даних, який пропонує послуги, програми, зберігання та обчислення через Інтернет і дозволяє обчислювати дані, що передаються з пристроїв IoT. У хмарних обчисленнях хмара відноситься до «Інтернету», а обчислення відноситься до послуг обчислень і обробки, які пропонуються цим підходом [104]. Хмарні обчислення складаються як із прикладних сервісів, доступ до яких здійснюється через Інтернет, так і з апаратних систем, які розташовані в центрах обробки даних [105]. Використовуючи ці характеристики, хмарні обчислення дозволяють обробляти великі дані та надають комплексні обчислювальні можливості [106]. Основні переваги використання хмарних систем покладаються на [107] (i) значне зниження вартості обладнання; (ii) збільшення обчислювальної потужності та ємності зберігання даних; і (iii) наявність багатоядерної архітектури, що полегшує керування даними. Крім того, хмарні обчислення є захищеною системою, яка надає ресурси, обчислювальну потужність та сховище, необхідні з географічного розташування [108]. Ці особливості хмарних обчислень дозволяють легко аналізувати, контролювати та ефективно сортувати великі дані, отримані в результаті зростаючих додатків IoT [109]. Крім того, хмарні обчислення усувають витрати, необхідні для придбання апаратного та програмного забезпечення та виконання алгоритмів обробки даних Інтернету речей, що призводить до значної мінімізації електроенергії, необхідної для локальних обчислень даних.

## 1.4.2 Туманні обчислення

Хмарні обчислення є однією з найкращих обчислювальних парадигм для обробки даних для додатків IoT. Через затримку та обмеження пропускної здатності централізованих ресурсів, які використовуються для обробки даних, потрібні більш ефективні способи. Туманні обчислення — це розподілена парадигма та розширення хмари, яке переміщує обчислювальні й аналітичні служби ближче до межі мережі. Туманні обчислення — це парадигма, яка розширює хмару в більшому масштабі та може підтримувати більші робочі навантаження [110]. У туманних обчисленнях будь-який пристрій з можливістю обчислення, зберігання та підключення до мережі працює як туманний вузол. Приклади цих пристроїв включають, але не обмежуються ними, персональні комп'ютери, промислові контролери, комутатори, маршрутизатори та вбудовані сервери [111]. У цій обчислювальній парадигмі fog забезпечує обробку та зберігання даних IoT локально на пристроях IoT замість того, щоб надсилати їх у хмару. Переваги цього підходу включають покращені безпечні послуги, необхідні для багатьох додатків IoT, а також зменшення мережевого трафіку та затримки [112]. Тому, на відміну від хмарних обчислень, fog пропонує обробні та обчислювальні послуги з швидшою реакцією та вищою безпекою. Це дозволяє швидше приймати рішення та вживати відповідних дій.

## **Висновок з розділу**

1. Показано, що розвиток технології 5G в цілому та при застосуванні до сфери IoT вивчається лише з акцентом на попит на енергію. Роль IoT у підвищенні енергоефективності в будівлях і громадському транспорті обговорювалася в багатьох роботах.

2. IoT – це нова технологія, яка використовує Інтернет і спрямована на забезпечення зв'язку між фізичними пристроями або «речами». Інтернет речей також широко використовується в моніторингу навколишнього середовища, системах і послугах охорони здоров'я, ефективному управлінні енергією в будівлях і послугах на основі дронів

3. Протоколи зв'язку, які є третім компонентом платформи IoT, дозволяють різним пристроям спілкуватися та обмінюватися своїми даними з контролерами або центрами прийняття рішень.

## **РОЗДІЛ 2 ІОТ В ЕНЕРГЕТИЧНОМУ СЕКТОРІ**

### **2.1 Роль ІоТ в енергетичному секторі**

Сьогодні енергетичний сектор сильно залежить від викопного палива, що становить майже 80% кінцевої енергії у всьому світі. Надмірне видобуток та спалювання викопного палива має несприятливий вплив на навколишнє середовище, здоров'я та економіку через забруднення повітря та зміну клімату. Енергоефективність, тобто споживання менше енергії для надання тієї ж самої послуги, і використання відновлюваних джерел енергії є двома основними альтернативами для зменшення негативного впливу використання викопного палива [12, 13].

У цьому розділі ми обговорюємо роль ІоТ в енергетичному секторі, від видобутку палива, експлуатації та обслуговування (О&М) енергогенеруючих активів до Т&D, а кінцеве використання енергії ІоТ може відігравати вирішальну роль у зменшенні втрат енергії та її зниження. викиди CO<sub>2</sub>. Система енергоменеджменту на основі ІоТ може контролювати споживання енергії в режимі реального часу та підвищувати рівень обізнаності про енергетичні характеристики на будь-якому рівні ланцюга поставок [15, 113]. У цьому розділі спочатку обговорюється застосування ІоТ на етапах виробництва енергії. Потім ми продовжимо з концепцією розумних міст, яка є загальним терміном для багатьох підсистем на основі ІоТ, таких як розумні мережі, розумні будівлі, розумні фабрики та інтелектуальний транспорт. Далі ми обговоримо кожен із вищезгаданих компонентів окремо. Нарешті, ми підсумуємо результати цього розділу в таблицях 2.1 і 2.2.

### **2.2 Інтернет речей і генерація енергії**

Автоматизація промислових процесів і системи наглядового контролю та збору даних стали популярними в енергетиці в 1990-х роках [37]. Завдяки моніторингу та контролю обладнання та процесів, ранні етапи ІоТ почали

вносити свій внесок у енергетичний сектор, зменшуючи ризик втрати виробництва або відключення електроенергії. Надійність, ефективність, вплив на навколишнє середовище та питання технічного обслуговування є основними проблемами старих електростанцій. Вік обладнання в енергетиці та неякісне технічне обслуговування можуть призвести до високих втрат енергії та ненадійності. Інколи активи мають понад 40 років, вони дуже дорогі, і їх неможливо легко замінити. IoT може сприяти зменшенню деяких з цих проблем в управлінні електростанціями [37]. Застосовуючи датчики IoT, пристрої, підключені до Інтернету, можуть розрізняти будь-які збої в роботі або ненормальне зниження енергоефективності, що викликає тривогу про необхідність технічного обслуговування. Це підвищує надійність та ефективність системи, а також знижує витрати на обслуговування [114]. Згідно з [115], нова електростанція на основі IoT може заощадити 230 мільйонів доларів США протягом усього терміну служби, а існуюча установка такого ж розміру може заощадити 50 мільйонів доларів США, якщо вона оснащена платформою IoT.

Для скорочення використання викопного палива та використання місцевих енергетичних ресурсів багато країн пропагують відновлювані джерела енергії (ВДЕ). Залежні від погоди або змінні відновлювані джерела енергії (VRE), такі як енергія вітру та сонця, ставлять перед енергетичною системою нові проблеми, відомі як «виклик переривчастості». В енергетичній системі з високою часткою VRE узгодження виробництва енергії з попитом є великою проблемою через мінливість попиту та пропозиції, що призводить до невідповідності в різних часових масштабах.

Системи IoT пропонують гнучкість у збалансуванні виробництва та попиту, що, у свою чергу, може зменшити проблеми розгортання VRE, що призведе до більшої частки інтеграції чистої енергії та менших викидів ПГ [116].

Таблиця 2. 2. Застосування IoT в енергетичному секторі (1): регулювання, ринок та енергопостачання.

	Додаток	Сектор	Опис	Вигоди
Регулювання і ринок	Демократизація енергії	Регулювання	Забезпечуючи доступ до ґрат, бо багато маленьких кінцевих користувачів для рівні до рівної електрики торгують і вибираючи постачальника вільно.	Полегшуючи ієрархію в енергії гнучко ланцюгова, ринкова влада, і централізував гнучко; перетворюючи на рідину ринок енергії і знижуючи ціни для споживачів; і створюючи усвідомлення на використанні енергії і ефективності.
	Скупчення маленького prosumers (віртуальні енергетичні установки)	Ринок енергії	Залучаючий вантаж і покоління групи кінцевих користувачів, щоб запропонувати електриці, балансувати, або запасні ринки.	Мобілізуючи маленькі вантажі, щоб брати участь в конкурентоздатних ринках; допомога ґратам, скорочуючи вантаж в пікових часах; Обгороджування ризику високих рахунків електрики в пікових годинах; і покращуючи гнучкість ґрат і скорочуючи потребу у балансуванні активів; Пропозиція прибутковості споживачам.
	Профілактика	Розташована вгору за течією нафтогазова промисловість/ компанії користі	Дефект, витік, і втома, моніторинг, аналізуючи великих даних, зібрала через статичні і мобільні датчики або камери.	Скорочення ризику відмови, виробничої втрати і ремонтного простою; скорочення вартості М О&; і запобігаючи нещасним випадкам і збільшуючи безпеку.
	Підтримка дефекту	Розташована вгору за течією нафтогазова промисловість/ компанії користі	Ідентифікуючи відмови і проблеми в мережах енергії і можливо виправляючи їх фактично.	Поліпшення надійності обслуговування; поліпшення швидкості в установці витоків в районному нагріванні або відмов в ґратах електрики; і скорочуючи ремонтний час і ризик оздоровчої/безпеки.
Енергія гнучко	Зберігання енергії і аналітика	Індустріальні постачальники або корисні компанії	Аналіз ринкових даних і можливостей для формування вибору гнучкості як наприклад зберігання енергії в системі.	Скорочуючи ризик постачання і вимагають нестійкість; збільшуючи прибутковість в енергії торгують оптимальним використанням гнучкого і storage вибору; і гарантуючи оптимальну стратегію для storage активів.
	Енергетика Digitalized	Оператор системи корисних компаній &	Аналізуючи великі дані і управляючи багатьма одиницями покоління в масштабах різного часу.	Поліпшення безпеки постачання; поліпшення використання активу і управління; скорочення вартості забезпеченості резервною місткістю; прискорення відповіді до втрати вантажу; і скорочуючи ризик пропуску.

Крім того, за допомогою IoT можна досягти більш ефективного використання енергії, використовуючи алгоритми машинного навчання, які

допомагають визначити оптимальний баланс різних технологій попиту та пропозиції [37]. Наприклад, використання алгоритмів штучного інтелекту може збалансувати вихідну потужність теплової електростанції з джерелами власного виробництва електроенергії, наприклад, об'єднавши багато невеликих сонячних фотоелектричних панелей [117].

Таблиця 2.2 підсумовує застосування IoT в енергетичному секторі, від регулювання енергопостачання та ринків.

Таблиця 3. Застосування IoT в енергетичному секторі (2): енергетичні мережі та сторона попиту.

Додаток	Сектор	Опис	Виплати
Кмітливі грати	Електричне управління	grid Платформа для дії великих даних grid використання технологій ICT в вантажу; протилежність традиційним гратам.	Поліпшення ефективності енергії і інтеграції поширюваного покоління і поліпшення безпеки постачання; і скорочуючи потребу в місткості резервного постачання і витратах.
Мережеве управління	Електричне операційне управління	grid & даними в різних грат, щоб гратами оптимальніше.	Ідентифікуючи слабкі місця і зміцнюючи грати відповідно і скорочуючи ризик пропуску.
Інтегральний контроль електрокара неглибоко (EV)	Електричне операційне управління	grid & станцій і циклів Evs.	Аналіз даних заряджаючих і charge/discharge попиту в пікових часах; аналізуючи і передбачаючи дію Evs на вантажі; і ідентифікуючи області для установки нових заряджаючих станцій і підкріплення дистрибутивних грат.
Контроль управління транспортним засобом до грат (V2G)	Електричне операційне управління	grid & charge/discharge для підтримки грат, коли треба.	Аналізуючи вантаж і зразок Evs формуючи Evs в постачанні грат електрикою; Скорочуючи потребу в резервній місткості впродовж Контролю пікових годин і управління флотом EV, щоб запропонувати оптимальну взаємодію між гратами і EVS.

Додаток	Сектор	Опис	Виплати
Microgrids	Грати електрики	Платформи для управління grid незалежного політичного діяча від центральних грат.	Поліпшення безпеки постачання; створення сумісності і гнучкості між microgrids і головних грат; пропонуючи стійкі ціни електрики для споживачів, сполучених з microgrid.
Контроль управління Районною мережею, що нагрівається (централізоване Теплопостачання)	і Мережа централізованого теплопостачання	Аналізуючи великі дані температури завантажуються мережевих і сполучених споживачів.	Поліпшення ефективності грат у відповідності попиту; скорочуючи температуру постачання гарячіше водою і зберігаючи енергію, коли можливо; і солідаризуючись grid пункти з потребою в підкріпленні.
Вимагайте відповідь	Житлова/ комерційна промисловість	Центральний контроль ( & тобто, переміщуючись, вирівнювання.	Скорочуючи попит в піковий час, який безпосередньо скорочує grid затор.
Вимагайте відповідь (вимагайте бічного управління)	Житлова/ комерційна промисловість	Центральний контроль ( & тобто, переміщуючись, вантаж електрики; і багатьох споживачів, інвестиціях в grid аналізуючи вантаж і дію побутових приладів.	Скорочуючи попит в піковий час, який безпосередньо скорочує grid затор; скорочення рахунків споживчої потреби в електриці; і скорочуючи потребу в резервну місткість.
Передова вимірююча інфраструктура	Кінцеві користувачі	Користуючись датчиками і пристроями, щоб зібрати і проаналізувати вантаж і часу; температурні дані в споживчому сайті.	Наявність доступу до детальних варіацій вантажу в масштабі різного часу; ідентифікація областей для поліпшення ефективності (наприклад надмірно з кондиціонованим повітрям кімнати або додаткові вогні, коли там - ніякі тимчасові власники) енергії; і скорочуючи вартість використання енергії.
Управління енергії батареї	Кінцеві користувачі	Аналітика даних для формування батареї у кращому разі відповідний час	Оптимальна стратегія для charge/розвантаження батареї в масштабі різного часу; покращуючи ефективність енергії і допомагаючи гратам в пікових часах; і скорочуючи вартість використання енергії.

Додаток	Сектор	Опис	Виплати
Кмітливі будівлі	Кінцеві користувачі	Централізоване дистанційне управління побутових приладів і пристроїв.	і Поліпшення комфорту побутових приладів і системами HVAC; скорочуючи ручне втручання, економлячи час і енергію; збільшуючи знання на енергії використовують і вплив на довкілля; поліпшення готовності для приєднання до кмітливої grid або віртуальної енергетичної установки; і поліпшив інтеграцію поширюваного покоління і storage систем.

### 2.2.1 Розумні міста

Нині приголомшливі темпи урбанізації, а також перенаселення викликали багато глобальних проблем, таких як забруднення повітря та води [118], доступ до енергії та екологічні проблеми. У цьому напрямі одним із головних завдань є забезпечення міст чистими, доступними та надійними джерелами енергії. Останні розробки цифрових технологій стали рушійною силою для застосування розумних рішень на основі IoT для вирішення існуючих проблем у контексті розумного міста [119]. Розумні фабрики, розумні будинки, електростанції та ферми в місті можна підключити і збирати дані про їх споживання енергії в різні години доби. Якщо буде виявлено, що секція, наприклад, житлові райони, споживає найбільше енергії в другій половині дня, то автоматично енергію, призначену для інших секцій, наприклад, фабрик, можна звести до мінімуму, щоб збалансувати всю систему з мінімальними витратами та ризиком перевантажень або затемнення.

У розумному місті різними процесами, наприклад, передачею та зв'язком інформації, інтелектуальною ідентифікацією, визначенням місцезнаходження, відстеженням, моніторингом, контролем забруднення та управлінням ідентифікацією можна ідеально керувати за допомогою технології IoT [120]. Технології IoT можуть допомогти контролювати кожен об'єкт у місті. До датчиків можна підключити будівлі, міську інфраструктуру, транспорт,

енергетичні мережі та комунальні послуги. Ці підключення можуть забезпечити енергоефективне розумне місто завдяки постійному моніторингу даних, зібраних із датчиків. Наприклад, шляхом моніторингу транспортних засобів за допомогою Інтернету речей можна керувати вуличними ліхтарями для оптимального використання енергії. Крім того, органи влади можуть мати доступ до зібраної інформації та приймати більш обґрунтовані рішення щодо вибору транспорту та потреби в енергії.

### **2.2.2 Розумна мережа**

Розумні мережі – це сучасні мережі, що використовують найбезпечніші та надійні технології ІКТ для контролю та оптимізації виробництва енергії, мереж T&D та кінцевого використання. Підключаючи багато розумних лічильників, розумна мережа розвиває багатоспрямований потік інформації, який можна використовувати для оптимального управління системою та ефективного розподілу енергії [121]. Застосування розумних мереж можна виділити в різних підсекторах енергетичної системи окремо, наприклад, у виробництві енергії, будівлях чи транспорті, або їх можна розглядати взагалі.

У традиційних мережах батареї заряджалися за допомогою адаптерів через електричні кабелі та інвертор AC/DC [121]. Ці батареї можна заряджати бездротовим способом в розумній мережі, використовуючи технологію індуктивної зарядки. Крім того, в розумній мережі можна проаналізувати структуру попиту на енергію кінцевих користувачів шляхом збору даних через платформу IoT, наприклад, час зарядки мобільних телефонів або електромобілів. Потім найближча станція бездротової зарядки акумулятора може виділити потрібний часовий інтервал, і цей пристрій/транспортний засіб можна зарядити. Ще одна перевага полягає в тому, що використання Інтернету речей призведе до кращого контролю та моніторингу пристроїв, оснащених акумулятором, а отже, по-перше, можна регулювати розподіл енергії, а по-друге, можна гарантувати доставку електроенергії до цих транспортних засобів. Це значно зменшить непотрібне споживання енергії.

Крім того, IoT можна застосовувати в ізольованих і мікромережах для деяких островів або організацій, особливо коли енергія потрібна кожен момент без винятку, наприклад, у базах даних. У таких системах всі активи, підключені до мережі, можуть взаємодіяти один з одним. Також доступні дані про потребу в енергії будь-якого активу. Ця взаємодія може забезпечити ідеальне управління розподілом енергії, коли це необхідно. З точки зору спільного впливу інтелектуальних мереж, як показано на рисунку 2.1, у розумному місті, обладнаному інтелектуальними мережами на основі IoT, різні частини міста можуть бути з'єднані між собою [121].

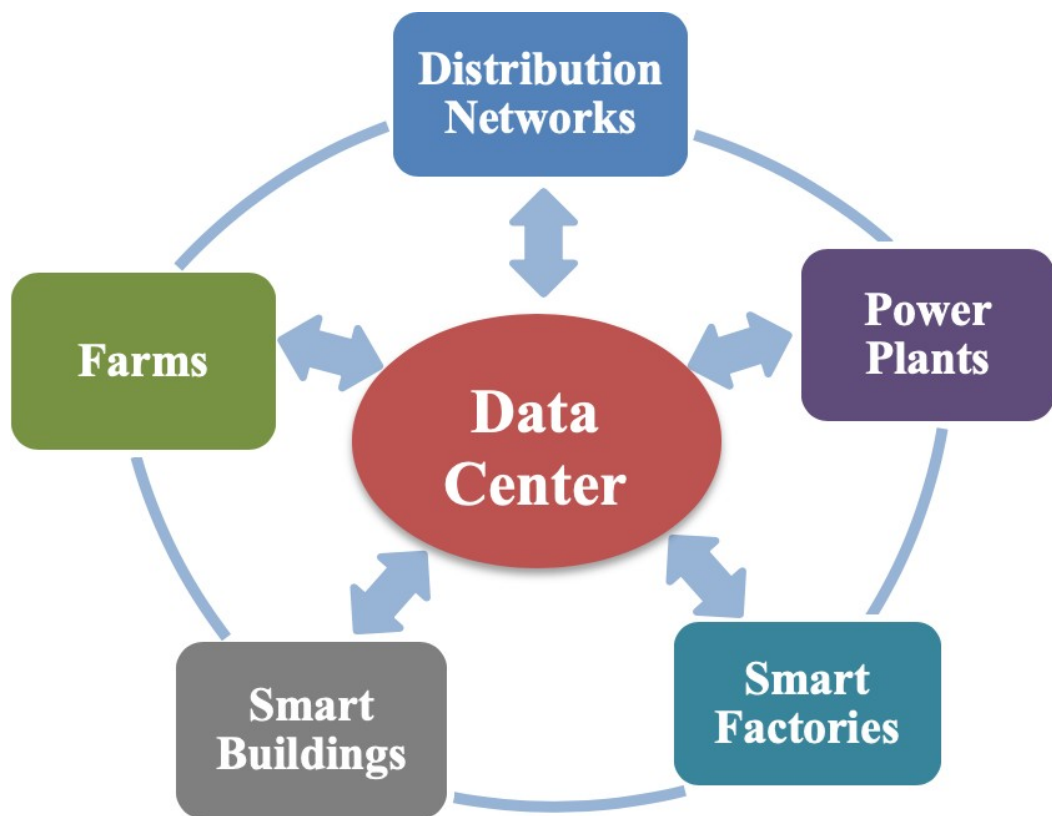


Рисунок 2.1 – Централізоване підключення даних у концепції розумного міста

Під час спільної комунікації між різними секторами інтелектуальна мережа може попереджати операторів за допомогою розумних пристроїв, перш ніж виникне будь-яка гостра проблема [113, 122]. Наприклад, за допомогою постійного моніторингу можна виявити, чи потреба в енергії перевищує

потужність мережі. Тому, одержуючи дані в режимі реального часу, органи влади можуть прийняти різні стратегії, а споживання енергії можна перенести на інший час, коли очікуваний попит менший. У деяких регіонах для змінних цін на енергію розглядаються тарифи розумного (або динамічного) ціноутворення [123]. Тарифи ціноутворення в режимі реального часу (RTP), а також ціна на енергію будуть вищими в певний час, коли споживання енергії буде вищим. Завдяки даним, зібраним з компонентів інтелектуальної мережі, споживання та виробництво енергії можна ідеально оптимізувати та керувати за допомогою далекоглядних стратегій. Зменшення втрат при передачі в мережах T&D шляхом активного керування напругою або зменшення нетехнічних втрат за допомогою мережі інтелектуальних лічильників є іншими прикладами застосування IoT [37].

### **2.2.3 Розумні будівлі**

Споживання енергії в містах можна розділити на різні частини; житлові будинки (побутові); і комерційні (послуги), включаючи магазини, офіси та школи, а також транспорт. Побутове енергоспоживання в житловому секторі включає освітлення, обладнання (прилади), гарячу воду, приготування їжі, охолодження, опалення, вентиляцію та кондиціонування (HVAC) (рисунок 2.2). Споживання енергії HVAC зазвичай становить половину споживання енергії в будівлях [124]. Тому управління системами HVAC є важливим для зниження споживання електроенергії. З розвитком технологій у галузі, пристрої IoT можуть відігравати важливу роль у контролі втрат енергії в системах HVAC. Наприклад, розташувавши деякі бездротові термостати на основі зайнятості, можна реалізувати незайняті місця. Після виявлення незайнятої зони можна вжити деяких заходів для зниження споживання енергії. Наприклад, системи HVAC можуть зменшити роботу в незайнятій зоні, що призведе до значного зниження споживання енергії та втрат.

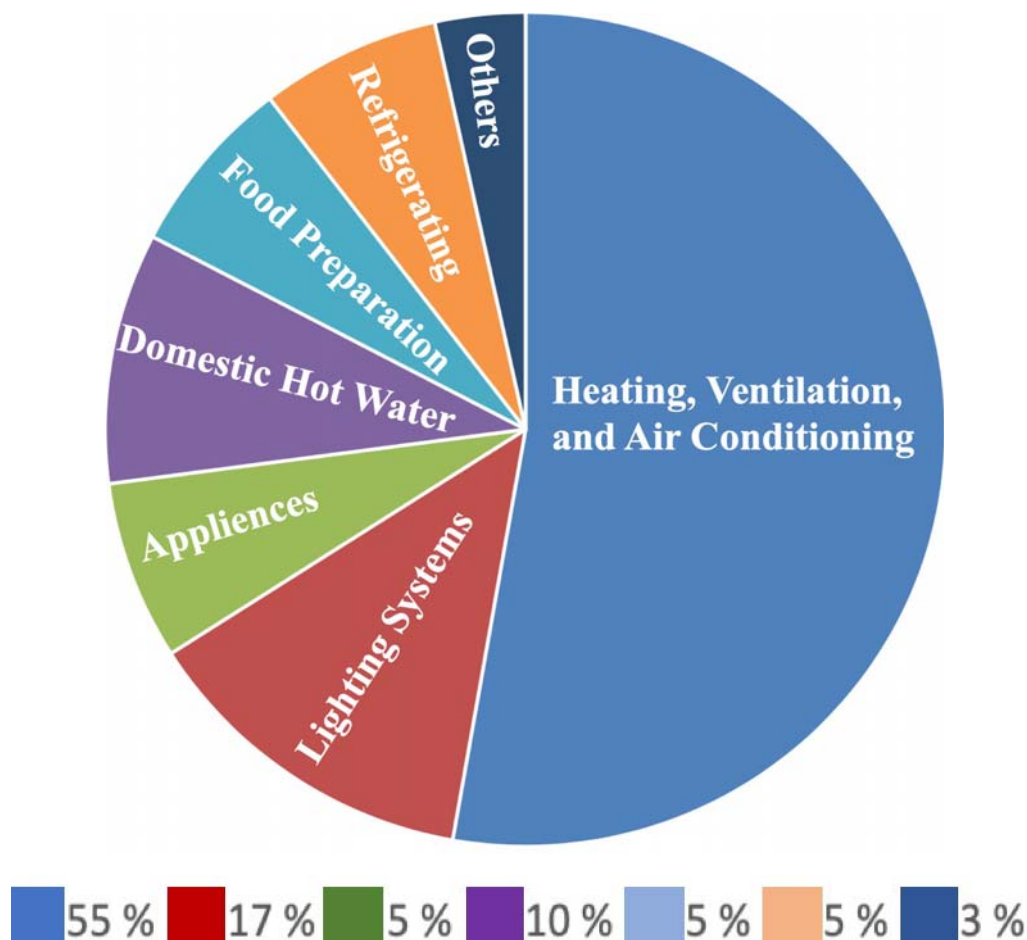


Рисунок 2.2 – Доля житлового енергоспоживання

IoT також можна застосовувати для управління втратами енергії в системах освітлення. Наприклад, за допомогою систем освітлення на основі IoT клієнти будуть попереджені, коли споживання енергії перевищить стандартний рівень. Крім того, завдяки ефективному аналізу даних у реальному часі навантаження з високого піку буде переміщено на низькі пікові рівні. Це робить значний внесок у оптимальне використання електричної енергії [119, 125] та скорочення пов'язаних викидів парникових газів. Використовуючи Інтернет речей, реагування на попит стане більш гнучким і гнучким, а моніторинг і управління попитом стануть ефективнішими.

#### 2.2.4 Розумне використання енергії в промисловості

IoT можна використовувати для розробки повністю підключеної та гнучкої системи в галузі для зниження споживання енергії при оптимізації виробництва. На традиційних фабриках витрачається багато енергії на

виробництво кінцевого продукту та контроль якості кінцевого продукту. Крім того, моніторинг кожного окремого процесу вимагає залучення людських ресурсів. Однак використання гнучкої та гнучкої системи на розумних фабриках допомагає одночасно розпізнавати збої, а не розпізнавати їх шляхом моніторингу продуктів наприкінці виробничої лінії. Тому можна негайно вжити відповідних заходів, щоб запобігти марнотратному виробництву та пов'язаному з цим витрачанням енергії.

З точки зору моніторингу процесів під час виробництва, IoT та його технологія відіграють вирішальну роль. Прикладами обладнання для моніторингу можуть бути пристрої шлюзу, мережі хабів IoT, веб-сервери та хмарні платформи, до яких можна отримати доступ за допомогою розумних мобільних пристроїв (наприклад, смартфонів чи персональних комп'ютерів). Бездротові комунікації, такі як Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, Z-wave, або дротові комунікації, такі як локальна мережа (LAN), можна використовувати для підключення всіх частин обладнання [126]. Крім того, для більш ефективного використання Інтернету речей, встановивши датчики на кожному компоненті промислового майданчика, можна виявити компоненти, які споживають більше енергії, ніж їх номінальний рівень енергії. Таким чином, кожним окремим компонентом можна легко керувати, несправності компонентів можна виправити, а споживання енергії кожним компонентом можна оптимізувати. Це значною мірою призводить до зменшення втрат енергії на розумних фабриках.

На розумній фабриці обробка даних є ключовим елементом у всій системі, за допомогою якої дані в хмарній платформі (діє як мозок) будуть аналізуватися, щоб допомогти менеджерам вчасно приймати більш ефективні рішення [127]. З точки зору моніторингу та підтримки активів виробництва, великою проблемою на заводах є знос машин і механічних пристроїв. За допомогою відповідної платформи та інструментів IoT можна вибрати відповідний розмір пристрою, щоб зменшити знос і пов'язані витрати на технічне обслуговування. Умовний моніторинг на основі IoT гарантує, що механічний пристрій ніколи не досягне порогової межі. Це просто означає, що

пристрій служить довше і зазнає менше збоїв. Крім того, можна очікувати, що збої, які призводять до втрати енергії, будуть усунені.

Гнучкі системи на основі IoT можуть забезпечити розумну систему для співпраці між клієнтами, виробниками та компаніями. Тому конкретна продукція буде виготовлена безпосередньо за замовленням замовника. Таким чином, енергія, що витрачається під час процесу зберігання запчастин, а також енергія, що витрачається на склади для збереження запчастин, значно зменшиться. Виготовлятиметься та зберігатиметься лише певна кількість продукції різних видів, що покращує управління споживанням енергії та ефективністю виробництва [126].

### **2.2.5 Інтелектуальний транспорт**

Однією з основних причин забруднення повітря та втрат енергії у великих містах є надмірне використання приватного транспорту замість громадського транспорту. На відміну від традиційної транспортної системи, де кожна система працює незалежно, застосовуючи технології IoT у транспорті, так зване «розумне транспортування», пропонує глобальну систему управління. Крім того, обробка даних у реальному часі відіграє важливу роль в управлінні трафіком. Усі компоненти транспортної системи можна з'єднати разом, а їх дані можна обробляти разом. Контроль заторів і інтелектуальні системи паркування з використанням онлайн-карт – це деякі додатки розумного транспорту. Розумне використання транспорту дозволяє пасажиром вибрати більш економний варіант із меншою відстанню та найшвидшим маршрутом, що заощаджує значну кількість часу та енергії [120]. Громадяни зможуть визначати час свого прибуття та ефективніше керувати своїм графіком [125]. Таким чином скоротиться час поїздок містом, а втрати енергії значно зменшаться. Це може значно зменшити викиди CO<sub>2</sub> та інших забруднюючих повітря газів від транспортування [119].

Таблиця 2.3 підсумовує застосування IoT в енергетичному секторі, від розумних енергетичних мереж до кінцевого використання енергії.

Цифровалізація на основі IoT перетворює енергетичну систему з односпрямованого напрямку, тобто від виробництва через енергетичні мережі до споживачів, до інтегрованої енергетичної системи. Різні частини такої інтегрованої розумної енергетичної системи зображені на рисунку 2.3.

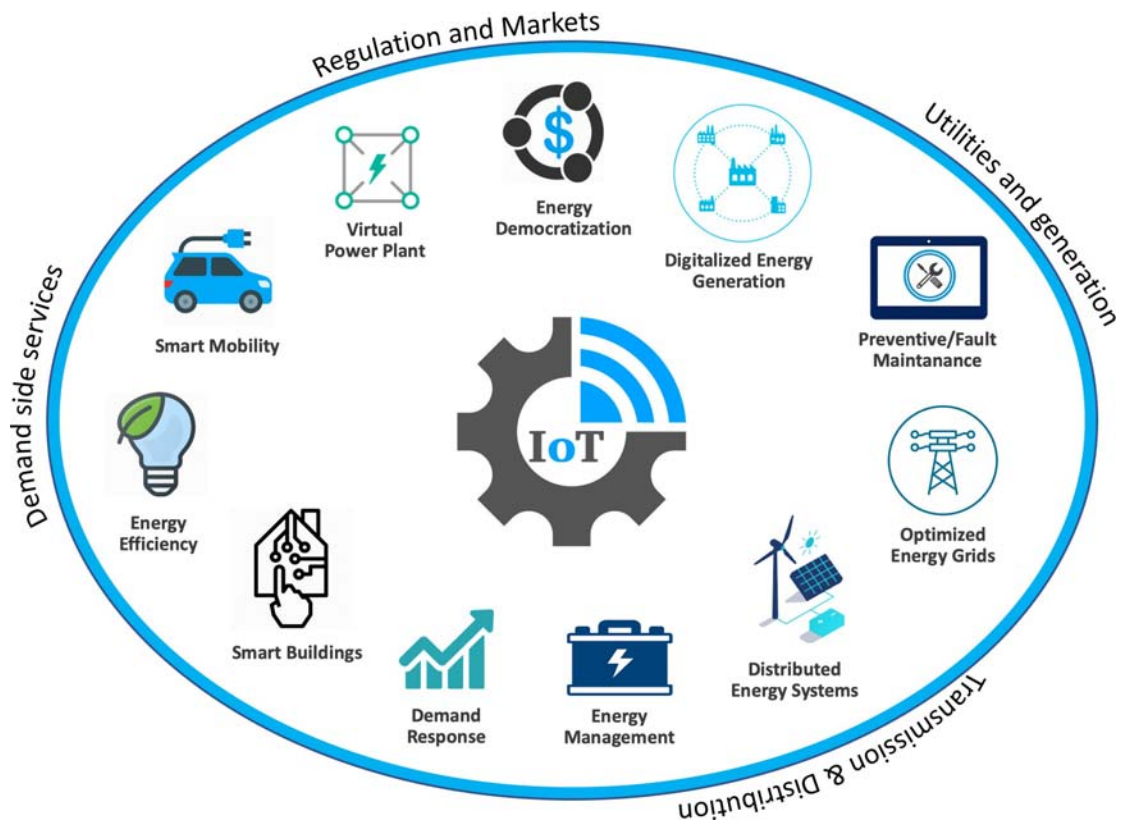


Рисунок 2.3 – Додатки IoT в інтегральній кмітливій системі енергії

## 2.3 Проблеми застосування IoT

Крім усіх переваг Інтернету речей для енергозбереження, розгортання Інтернету речей в енергетичному секторі представляє проблеми, які потребують вирішення. У цьому розділі розглядаються проблеми та існуючі рішення щодо застосування енергетичних систем на основі IoT. Крім того, у таблиці 2.3 підсумовано проблеми та поточні рішення використання IoT в енергетичному секторі.

Таблиця 2.4. Проблеми та поточні рішення використання IoT в енергетичному секторі.

Задача	Вхідні параметри	Рішення задачі	Отримана вигода
Забезпечення надійного наскрізного з'єднання	Дизайн архітектури	Користування різномірною довідковою архітектурою	З'єднання речей і людей
	Різноманітні технології	Звернення відкритого стандарту	Масштабованість
Інтеграція IoT з підсистемами	Управління IoT даними	Проектування моделей разом моделювання	В реальному часі дані серед пристроїв і підсистем
	Злиття IoT з існуючими системами	Моделювання інтегральних систем енергії	Зниження у вартості підтримки
Стандартизація	Масивне розгортання пристроїв IoT	Визначення системи	Послідовність серед різних пристроїв IoT
	Неузгодженість серед пристроїв IoT	Відкрита інформація моделює і протоколи	Покриття різних технологій
Безпека IoT	Передача високої швидкості передач даних	Проектування ефективних протоколів комунікації	Збереження енергії
	Ефективне енергоспоживання	поширювана обчислювальна техніка	Збереження енергії
Призначена для користувача конфіденційність	Загрози і кібер-атаки	Схеми розподілені системи	Вдосконалена безпека
	Підтримка інформації призначеного користувача персоналу	Прохання для призначений користувача дозвіл	Дозволяє краще ухвалення рішення

## 2.4 Споживання енергії

В енергетичних системах основні зусилля платформ IoT – це економія енергії. В енергетичних системах для забезпечення зв'язку за допомогою IoT дані передають величезна кількість пристроїв IoT. Для запуску системи IoT і передачі величезної кількості даних, які генеруються пристроями IoT, потрібна значна кількість енергії [128]. Тому енергоспоживання систем IoT залишається важливою проблемою. Однак різні підходи намагалися зменшити енергоспоживання систем IoT. Наприклад, налаштувавши датчики на перехід у сплячий режим і просто працюючи, коли це необхідно. Розробка ефективних комунікаційних протоколів, які дозволяють використовувати розподілені обчислювальні методи, що забезпечують енергоефективні комунікації, було дуже вивчено. Застосування методів оптимізації радіозв'язку, таких як

оптимізація модуляції та кооперативний зв'язок, розглядається як рішення. Більше того, енергоефективні методи маршрутизації, такі як кластерні архітектури та використання методів багатошляхової маршрутизації, сприймалися як інше рішення [129, 130, 131].

## **2.5 Інтеграція IoT з підсистемами**

Основним завданням є інтеграція системи IoT в підсистеми енергетичної системи. Тому що підсистеми енергетичного сектору є унікальними, що використовують різноманітні технології передачі даних та датчиків. Тому необхідні рішення для управління обміном даними між підсистемами енергетичної системи з підтримкою IoT [132, 133, 134]. Підхід до пошуку рішень інтеграційного завдання з урахуванням вимог IoT підсистеми відноситься до моделювання інтегрованого каркаса для енергетичної системи [132]. Інші рішення пропонують розробку моделей спільного моделювання для енергетичних систем для інтеграції системи та мінімізації помилки затримки синхронізації між підсистемами [135, 136].

### **2.5.1 Конфіденційність користувачів**

Конфіденційність відноситься до права окремих або кооперативних споживачів енергії зберігати конфіденційність своєї особистої інформації, коли вона передається організації [137, 138]. Тому доступ до відповідних даних, таких як кількість споживачів енергії, а також кількість і типи приладів, які споживають енергію, стає неможливим. Справді, ці типи даних, які можна зібрати за допомогою Інтернету речей, дозволяють краще приймати рішення, які можуть впливати на виробництво, розподіл та споживання енергії [139]. Однак, щоб зменшити порушення конфіденційності користувачів, постачальникам енергії рекомендується запитувати дозвіл користувачів на використання їхньої інформації [140], гарантуючи, що інформація користувачів не буде передана іншим сторонам. Іншим рішенням також може бути надійна

система управління конфіденційністю, де споживачі енергії контролюють свою інформацію, і пропонується конфіденційність [141].

### **2.5.2 Виклик безпеки**

Використання Інтернету речей та інтеграція комунікаційних технологій в енергетичні системи посилює загрозу та кібератаки на інформацію користувачів та енергетичні системи від виробництва, передачі та розподілу до споживання [142, 143]. Ці потоки визначають виклик безпеки в енергетичному секторі [144]. Крім того, енергетичні системи на основі IoT широко розгорнуті у великих географічних районах в енергетичному секторі для надання послуг. Широке розгортання систем IoT ставить їх під більший ризик опинитися під кібератаками. Щоб подолати цю проблему, дослідження вводять схему шифрування для захисту енергетичної інформації від кібератак [145]. Крім того, для зниження ризику кібератак і підвищення безпеки системи запропоновано розподілені системи керування, які забезпечують керування на різних рівнях системи IoT [146].

### **2.6 Стандарти IoT**

IoT використовує різноманітні технології з різними стандартами для підключення одного пристрою до великої кількості пристроїв. Невідповідність між пристроями IoT, які використовують різні стандарти, створює новий виклик [147].

У системах із підтримкою IoT існують два типи стандартів, включаючи мережеві протоколи, протоколи зв'язку та стандарти агрегації даних, а також нормативні стандарти, пов'язані з безпекою та конфіденційністю даних. Проблеми, що стоять перед прийняттям стандартів в рамках IoT, включають стандарти обробки неструктурованих даних, питання безпеки та конфіденційності на додаток до нормативних стандартів для ринків даних [148].

Підхід до подолання проблеми стандартизації енергетичної системи на основі IoT полягає у визначенні системи систем зі здоровим глуздом розуміння, щоб дозволити всім суб'єктам однакового доступу та використання. Інше рішення стосується розробки відкритих інформаційних моделей та протоколів стандартів сторонами, що співпрацюють. Це має призвести до стандартів, які є вільно і загальнодоступними [149].

## **2.7 Архітектурний дизайн системи з підтримкою IoT**

Системи з підтримкою IoT складаються з різноманітних технологій із збільшенням кількості розумних взаємопов'язаних пристроїв і датчиків. Очікується, що IoT забезпечить комунікацію в будь-який час і в будь-якому місці для будь-яких супутніх послуг, як правило, автономно та випадково. Це означає, що системи IoT, засновані на цілях їх застосування, розроблені за складними, децентралізованими та мобільними характеристиками [149]. Беручи до уваги характеристики та потреби додатка IoT, еталонна архітектура не може бути унікальним рішенням для всіх цих додатків. Тому для систем IoT необхідні гетерогенні еталонні архітектури, які є відкритими та відповідають стандартам. Архітектура також не повинна обмежувати користувачів у використанні фіксованих і наскрізних IoT-комунікацій [149, 150].

## **2.8 Блокчейн і Інтернет речей**

Сучасні системи IoT переважно покладаються на централізовані хмарні системи [151, 152]. У більшості додатків IoT потрібно підключити тисячі пристроїв і машин IoT, які важко синхронізувати. Більше того, через централізовану і серверно-клієнтську природу IoT, коли сервер уразливий, усі підключені об'єкти легко зламати та зламати, що призводить до проблем із безпекою системи та проблемами конфіденційності для користувачів [153]. На щастя, блокчейн може стати рішенням цієї проблеми [154].

Блокчейн надає децентралізовану та демократизовану платформу, яка не потребує втручання третьої сторони. Консенсусна платформа блокчейну

вимагає від кожного вузла IoT довести, що він переслідує ту ж мету, що й інші. Перевірені транзакції також зберігаються у вигляді блоку, який пов'язаний з попереднім таким чином, що інформація ніколи не може бути стерта. Більше того, історія кожної окремої транзакції на кожному вузлі може бути записана і доступна кожному. Тому будь-який учасник блокчейну відразу дізнається про будь-які зміни в кожному блоці [155, 156, 157]. Крім того, завдяки розподіленому реєстру блокчейну навіть тисячі пристроїв IoT можна легко синхронізувати. Консенсусні алгоритми блокчейну на основі однорангових мереж можуть забезпечити безпечну розподілену базу даних [153]. Таким чином, блокчейн може пообіцяти децентралізований та приватний IoT, який може гарантувати конфіденційність [158].

Що ще важливіше, блокчейн може зберігати та обмінюватися оновленнями програмного забезпечення між об'єктами. Існують вузли перевірки на нешкідливість, які підтверджують точність інформації про оновлення як новий вузол і гарантують його захист від будь-яких загроз, коли оновлення, додане в блокчейн як дійсний блок, неможливо видалити або змінити. Тому платформи на основі IoT можуть бути забезпечені доступністю та нешкідливістю оновлень за допомогою блокчейну [159].

В енергетичному секторі застосування блокчейну прискорить ефективність Інтернету речей, забезпечуючи децентралізовану платформу для розподіленого виробництва та зберігання електроенергії, що підвищить енергетичну безпеку та ефективність. Реальні та висококваліфіковані дані можуть вільно обмінюватися між пристроями, і люди можуть мати прямий доступ до енергетичної інформації без участі будь-якої третьої сторони. Сусіди можуть просто обмінюватися енергією один з одним. Тому без залучення влади не тільки підвищиться довіра серед людей, але й можна заощадити багато витрат на це підключення до централізованих мереж. Ще одна перевага полягає в тому, що, відстежуючи статистику використання області, Blockchain дозволяє розподіляти енергію для дистанційного керування потоком енергії в цій

конкретній області. Крім того, IoT-системи на основі блокчейну допомагають у діагностиці та обслуговуванні обладнання в розумній мережі [154].

Наразі пряме застосування технології блокчейн в системі на основі IoT неможливо через брак достатньої кількості обчислювальних ресурсів, недостатню пропускну здатність і необхідність збереження електроенергії. Проте хмарні та туманні обчислювальні платформи можуть полегшити шлях до послуг блокчейн в IoT [160].

## **2.9 Зелений Інтернет речей**

Споживання енергії IoT-пристроями є важливою проблемою, особливо у масштабному розгортанні цих технологій найближчим часом. Для роботи мільярдів пристроїв, які будуть підключені до Інтернету, потрібна значна кількість енергії. Велика кількість пристроїв Інтернету речей також створюватиме велику кількість електронних відходів [161]. Для вирішення цих проблем необхідні низьковуглецеві та ефективні комунікаційні мережі. На щастя, ці потреби привели до появи зеленого IoT (G-IoT) [162, 163]. Ключовим компонентом G-IoT є його енергоефективні характеристики протягом усього життєвого циклу, тобто проектування, виробництво, розгортання та, зрештою, утилізація [129].

Цикл G-IoT можна застосовувати в різних технологіях IoT. Наприклад, у мітках радіочастотної ідентифікації (RFID). Щоб зменшити кількість матеріалу в кожній мітці RFID, яку важко переробити, розмір RFID-міток зменшують [161, 164, 165, 166, 167, 168]. Ще одним прикладом є комунікація Green M2M, яка дозволяє налаштувати передачу потужності на мінімальний рівень, сприяє більш ефективним протоколам зв'язку з використанням алгоритмічних і розподілених обчислювальних методів [129]. У бездротових сенсорних мережах також вузли датчиків можуть перебувати в сплячому режимі і працювати тільки в разі потреби. Крім того, для зниження енергоспоживання вузлів можна застосовувати методи радіооптимізації, такі як оптимізація модуляції або кооперативний зв'язок. Більше того, енергоефективні методи

маршрутизації, такі як кластерні архітектури або багатоканальна маршрутизація, можуть забезпечити ефективні рішення [130, 131]. Підсумовуючи, вищезгадані підходи та приклади можуть зменшити енергетичні потреби систем IoT.

## **2.10 Існуючі рішення архітектури систем IoT**

Проте найбільш сучасні безпроводні рішення, що застосовують у край високі частоти (міліметрові хвилі, або mmWave) для забезпечення зв'язку, дозволяють впоратися з великими об'ємами передаваного трафіку в масових сценаріях. У цій главі проводиться моделювання mmWave системи ношених пристроїв з метою підвищення енергетичної ефективності їх доступу, яке враховує форму діаграми спрямованості антени і інтерференцію, що виникає між персональними мережами сусідніх користувачів. Крім того, пропонується зручна для математичного опису абстракція протоколу mmWave -доступа, а також даються рекомендації по управлінню параметрами такої системи. Результати, отримані в цій главі, можуть бути використані для підвищення енергетичної ефективності роботи практичних радіотехнологій, таких як IEEE 802.11ad/ay.

## Висновки з розділу

1. Система енергоменеджменту на основі IoT може контролювати споживання енергії в режимі реального часу та підвищувати рівень обізнаності про енергетичні характеристики на будь-якому рівні ланцюга поставок. Завдяки моніторингу та контролю обладнання та процесів, ранні етапи IoT почали вносити свій внесок у енергетичний сектор, зменшуючи ризик втрати виробництва або відключення електроенергії.

2. IoT можна використовувати для розробки повністю підключеної та гнучкої системи в галузі для зниження споживання енергії при оптимізації виробництва.

3. Розгортання Інтернету речей в енергетичному секторі представляє проблеми, які потребують вирішення, а саме: Забезпечення надійного наскрізного з'єднання; Інтеграція IoT з підсистемами; Стандартизація; Безпека IoT; Призначена для користувача конфіденційність.

4. Споживання енергії IoT-пристроями є важливою проблемою, особливо у масштабному розгортанні цих технологій найближчим часом. Для роботи мільярдів пристроїв, які будуть підключені до Інтернету, потрібна значна кількість енергії.

## **РОЗДІЛ 3 Способи організації безпроводного доступу речей в сучасних мережах**

### **3.1.1 Особливості виникнення і розвитку Інтернету речей**

**Походження технологій M2M.** На думку експертів, людство знаходиться на порозі нової промислової революції, яка обіцяє колосальні економічні і соціальні блага, в результаті повсюдного підключення до мережі Інтернет регіонів, об'єктів і навіть процесів. Центральна доктрина Інтернету речей припускає з'єднання всіляких сутностей, що оточують нас, називаються «речі», їх виявлення і іменування, а також інтеграцію з інфраструктурою мережі Інтернет [230]. Ця галузь знань увібрала в себе цілий ряд різних сенсорних, телекомунікаційних, мережевих і інформаційних технологій, а також методів зберігання і обробки даних і нині має значний потенціал для створення технологічних інновацій, що використовуються безліччю компаній для отримання свого доходу.

Засадничі технології у рамках Інтернету речей базуються на концепції міжмашинної взаємодії M2M, надаючи автономним і автоматичним пристроям (таким як сенсори, силові приводи, промислові роботи, інтелектуальні вимірники і так далі) можливість взаємодіяти один з одним, а також з мережею Інтернет при мінімальному залученні користувача системи. У міру скорочення прибутку від традиційних голосових послуг, оператори мобільного зв'язку зацікавленіші в просуванні всіляких M2M -сервисов. В зв'язку з цим технології M2M дозволяють пристрою передавати наявні у нього повідомлення через інший пристрій або ж безпосередньо через мережу деякому видаленому застосуванню, яке потім інтерпретує ці дані і може виконати які-небудь дії на їх основі.

Ранні форми M2M-з'єднань відносять до промислових систем диспетчерського управління і збору даних SCADA, які активно використовувалися з 1980-х років, але, по суті, тоді були ізольованими і одиничними рішеннями. На шляху свого подальшого розвитку технології M2M

абсорбували методи радіочастотної ідентифікації RFID, а також засоби організації безпроводних сенсорних мереж WSN, що послідували за ними. Передумовами активного поширення систем M2M в недавні роки послужили дешевший і доступніший безпроводний зв'язок, ефективні хмарні системи зберігання і обробки даних, а також велика різноманітність облаштувань різної продуктивності, вартості і споживаної потужності. Очікується, що подальша еволюція M2M і IoT буде тісно пов'язана з киберфізическими системами, які об'єднують обчислювальні і фізичні процеси, а також з кибербіологіческими системами, доповнюючими мережеву взаємодію інформацією від живих організмів.

На сьогодні сервіси M2M включають широкий спектр застосувань - від ношених пристроїв для фітнеса і медичних цілей до автономних і безпілотних автомобілів. Це обумовлює бурхливий ріст числа підключених M2M -устройств з поточних 10 мільярдів до 24-50 мільярдів в самому найближчому майбутньому, що підтверджується прогнозами таких компаній і асоціацій, як Cisco, Ericsson і GSMA. У найближче десятиліття очікується, що предмети повсякденного ужитку, включаючи меблі, харчові контейнери і навіть паперові документи, зможуть отримати можливість доступу в мережу Інтернет. Для позначення такої майбутньої трансформації Інтернету було запропоновано декілька нових понять, таких як Інтернет Усього (компанія Cisco), що сполучає воедино людей, процеси, інформацію і речі, а також Індустріальний Інтернет (компанія General Electric та ін.), що спрощує роботу застосувань, що мають життєво важливе значення і пов'язаних з промисловою автоматизацією, управлінням виробничими процесами і так далі.

**Ретроспектива розвитку технологій M2M.** Що історично склалася на ринку застосувань IoT фрагментація, підкріплена тривалою практикою створення одиничних нішевих рішень, істотно ускладнює управління системами M2M, уповільнює розвиток інноваційних продуктів в цій області і утрудняє контроль над відповідними накладними витратами. Як наслідок, нині IoT є надмірно розгалуженою і складною неоднорідною екосистемою, яка

включає всілякі радіотехнології M2M, такі як ZigBee, WirelessHART, 6LowPAN, WiFi, Bluetooth, ISA100.11a, MiWi, BACnet, Z - Wave і багато інших. Таким чином, створення універсальної безпроводної інфраструктури стає все більш актуальним завданням, рішення якого вимагає перегляду традиційних підходів до побудови, розміщення, обслуговування і використання існуючих і перспективних систем M2M.

Тоді як різні дротяні і безпроводні засоби зв'язку зіграли свого часу важливу роль для конструювання IoT в його нинішньому вигляді, істотна доля наявних рішень не виправдала спочатку покладених на них очікувань, передусім, з точки зору їх практичної придатності. Типовим прикладом може служити радіоустаткування ZigBee, побудоване на основі стандарту IEEE 802.15.4 з подальшими технічними поправками, прийнятими IEEE і IETF. Відносно низька потужність передачі устаткування ZigBee істотно обмежує ефективну зону покриття пристроїв і у результаті обумовлює побудову складної багатострибкової топології мережі при її розгортанні на великій території. Організація такого покриття вимагає високої щільності розміщення мережевих шлюзів і ретрансляторів, які, у свою чергу, також потребують електроживлення. Це призводить до швидкого виснаження їх батарей, які необхідно замінювати кожні одиндва роки, а також до низької надійності з тривалими періодами відмови і до високої вартості обслуговування такої системи.

Недавні спроби комітетів і груп по стандартизації IEEE 802.15.4e, IETF RoLL і 6TiSCH здолати відмічені вище обмеження дозволили деяким чином поліпшити роботу мережі у багатострибковому режимі за рахунок введення жорсткішої синхронізації вузлів при одночасному контролі витрати їх енергії. Ці заходи допомагають продовжити термін служби батарей, але не впливають на радіус зони покриття крайових пристроїв. Таким чином, відносно невисока міра надійності даної системи стає перешкодою до її використання в ситуаціях, чутливих до тривалих інтервалів відмови. Попри те, що ця технологія все ще застосовується на практиці, наприклад, в системах контролю, побудованих на

основі стандартів WirelessHART і ISA 100.11a, деякі великі компанії вже відмовилися від подальшого виробництва облаштувань ZigBee.

В результаті безпроводні технології для побудови IoT знаходяться зараз на роздоріжжі і налічують безліч рішень M2M, що змагаються, претендують на першість в цій ніші. Основну конкуренцію традиційним ZigBee -подобним підходам складають енергоефективні мережі далекого радіусу дії LPWAN, такі як LoRaWAN і SIGFOX, системи WiFi HaLow (IEEE 802.11ah) малій потужності, а також різні доповнення до стільникових технологій 4G і 5G, призначені для підтримки M2M -приложений. Такі відносно сучасніші підходи стають істотно привабливіше для розгортання мереж IoT відносно як доступності, так і надійності радіоз'єднання. Вони дозволяють зняти обмеження при зборі даних у всіляких застосуваннях M2M і, тим самим, стають придатнішими для забезпечення перспективних IoT -сервисов.

**Особливості міжмашинної взаємодії.** Як впливає з вищевикладеного, застосування M2M значною мірою вплинули на ландшафт сучасних систем безпроводної передачі даних і зараз швидко стають однією з основних рушійних сил, спрямованих на зміну ринку послуг мобільного зв'язку, що склався. Проте в порівнянні з традиційними способами обміну інформацією між людьми H2H організація з'єднань M2M має ряд унікальних особливостей, серед яких слід зазначити дуже велике число підключених до мережі пристроїв, відносно малий об'єм даних при кожній відправці і порівняно нечасті спроби передачі. Таким чином, особливі характеристики міжмашинного трафіку породжують цілий ряд нових завдань в області проектування і розгортання мереж M2M, роблячи при цьому вплив на параметри системи, пов'язані з її вартістю, складністю побудови і енергетичною ефективністю, а також на відповідні вимоги за якістю обслуговування.

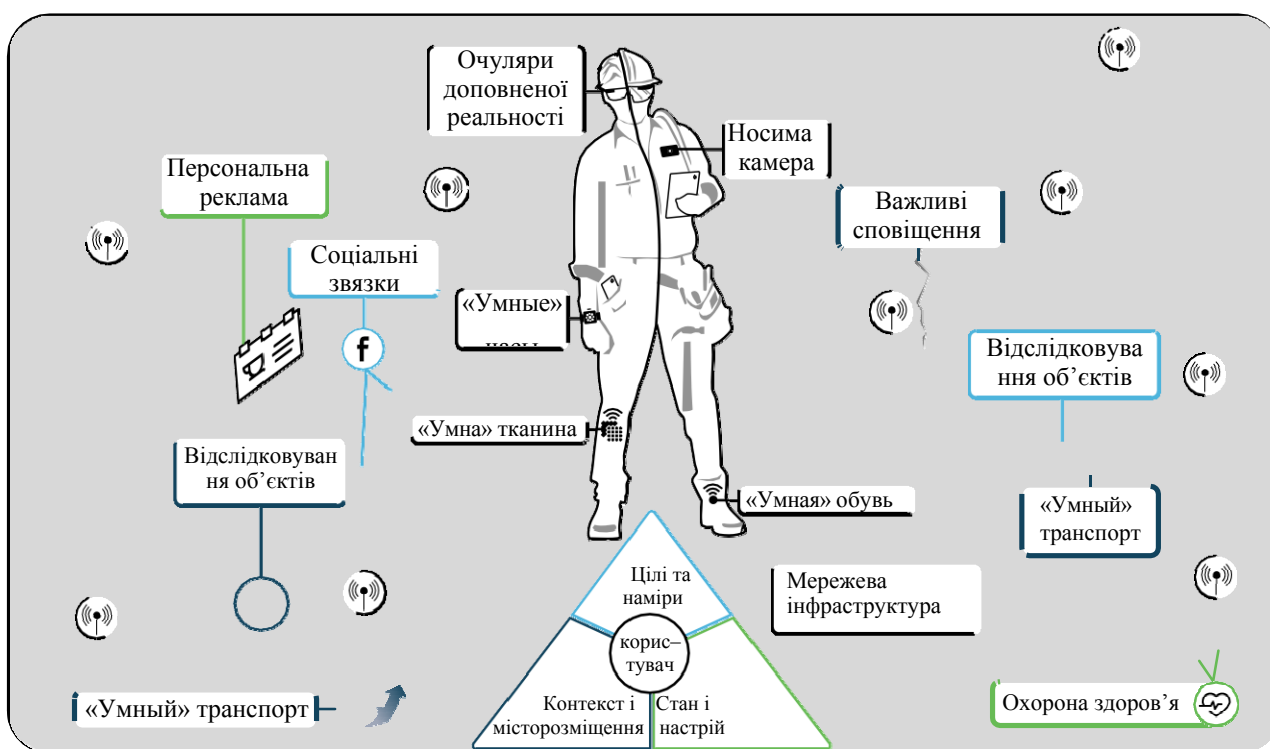
Дійсно, незважаючи на потенційно велике число пристроїв, вони в основному передають короткі фрагменти даних з досить тривалими паузами . Результати практичних вимірів показують, що M2M -устройства є більшою мірою виробниками, ніж споживачами інформації, що призводить до перекосу

їх вимог по радіоресурсах мережі доступу у бік передачі по лінії вгору. Така поведінка відповідає їх типовому застосуванню, що частенько призводить до сплеску активності в робочі години, оскільки більшість учасників міжмашинної взаємодії використовуються в комерційній сфері. Важливо також помітити, що в цілях економії батареї устаткування M2M проявляє активність тільки впродовж досить коротких інтервалів часу, що призводить до нечастих і, як правило, стійких до затримки сесій. Приміром, число лічильників води, електрики і газу може бути украй велике (аж до 35 тисяч штук на стільнику), але інтервали між відправками даних від кожного з них бувають значними і допускається, що інформація прибуде з деяким запізнюванням.

Усі ці специфічні особливості міжмашинної взаємодії вимагають створення відповідних засобів радіозв'язку. При цьому розрізняються режими передачі облаштуванням M2M своїх даних безпосередньо в мережу доступу або ж на проміжний агрегуючий вузол з подальшою пересилкою в мережу. Крім того, сусідні M2M -устройства можуть скористатися прямими каналами D2D для відправки своїх даних, минувши таким чином необхідність залучення інфраструктури оператора. Для скорочення накладних витрат на збір даних від облаштувань M2M спочатку передбачалося використати неліцензований спектр при доставці їх трафіку (наприклад, частотні діапазони ISM, SRD, PLMR або навіть телевізійні канали). В результаті виникла безліч закритих і нестандартних рішень для організації локальної міжмашинної взаємодії, т.з. капілярних систем M2M. Проте подібні підходи накладають жорсткі обмеження на максимальну випромінювану потужність і тривалість робочого циклу, а також змушують пристрої прослуховувати радіоканал перед початком кожної своєї передачі.

Альтернативним і сучаснішим рішенням по організації міжмашинної взаємодії стає використання технологій мобільного зв'язку, т.з. стільникових систем M2M, які можуть бути доступні як у вигляді зовнішнього покриття, так і усередині приміщень. Застосування стільникових рішень для підключення облаштувань M2M привабливо унаслідок широкого охоплення областей,

вбудованих механізмів управління і забезпечення безпеки, а також місткої транспортної мережі. Проте при цьому безліч існуючих систем M2M як і раніше застосовує стільникові технології GSM, GPRS і cdma2000 попередніх поколінь, які можуть бути істотно поліпшені за показниками своєї універсальності, вартості, складності і енергетичної ефективності. З урахуванням великої різноманітності застосувань M2M і їх вимог (див. рисунок 3.1) комітетом 3GPP проводиться безперервне доопрацювання специфікацій системи LTE для ефективнішої підтримки різних M2M -сервисов.



Споживчі сценарії

Промислові сценарії

Рисунок 3.1 — Споживче та промислове застосування M2M-пристроїв

У міру того як устаткування LTE стає все дешевше і простіше у виготовленні, багато операторів послуг IoT розглядають стільникові системи M2M в якості найбільш перспективних, в основному завдяки ефективнішому використанню ними радіресурсів і високої доступності мережевого покриття. Таким чином, переважний варіант розгортання мережі є сполученням капілярної системи M2M з краєм стільникової інфраструктури і далі

використання останньої в якості транспортної мережі для передачі міжмашинного трафіку. При покритті великих територій деякі крайові пристрої можуть бути підключені через капілярний шлюз, тоді як інші з'єднуються із стільниковою мережею безпосередньо, знижуючи тим самим складність планування системи. Подальший виклад спрямований на розгляд різних варіантів побудови безпроводних з'єднань M2M відповідно до сучасних стандартів радіозв'язку.

### **3.1.2 Сучасні радіотехнології для зв'язку M2M**

Оскільки Zigbee -подібні підходи зайняли дуже обмежену ринкову нішу і малоприсадибні для забезпечення роботи перспективних M2M -приложень, дослідницький інтерес в цій області змістився у бік ефективніших рішень [50]. Потреба в розробці нових технологій радіодоступу, які дозволили б безпосередньо врахувати особливості міжмашинної взаємодії, стала очевидна вже в середині 2000-х років. Низька споживана потужність, доступна вартість устаткування, широка область охоплення мережі, а також можливість підтримки великої кількості пристроїв з невисокою періодичністю відправки даних стали основними вимогами до сучасних систем M2M . В зв'язку з цим створення відповідних технологічних напрацювань (див. рисунок 3.2) було ініційоване і просувалось паралельно відразу у рамках декількох комітетів із стандартизації, включаючи ETSI і 3GPP, а також групи IEEE 802.11 і 802.15. Поточні результати роботи деяких з них обговорюються далі.

Енергоефективні мережі далекого радіусу дії. Порівняно недавно виник новий клас безпроводних технологій для зв'язку M2M, який прийнято називати енергоефективною мережею далекого радіусу дії ствия, або LPWAN. Подібні рішення реалізовані на практиці в неліцензованому спектрі і підтримують відносно невисокі швидкості передачі даних невеликого об'єму , що, проте, підходить для широкого класу M2M -приложень з низькою періодичністю відправки інформації (див. малюнок 4.1). Багато рішень LPWAN є на сьогодні досить закритими і практично несумісні між собою. Проте останнім часом

спостерігаються спроби просунути деякі компоненти LPWAN -технологій в комітет із стандартизації стільникових систем зв'язку, наприклад, через групу 3GPP GERAN. По аналогії з поліпшеннями, запланованими 3GPP у рамках еволюції мереж LTE, мета цих пропозицій полягає в розширенні зони покриття існуючих мереж M2M, зниженні складності побудови крайового устаткування і продовженні часу життя батарей.

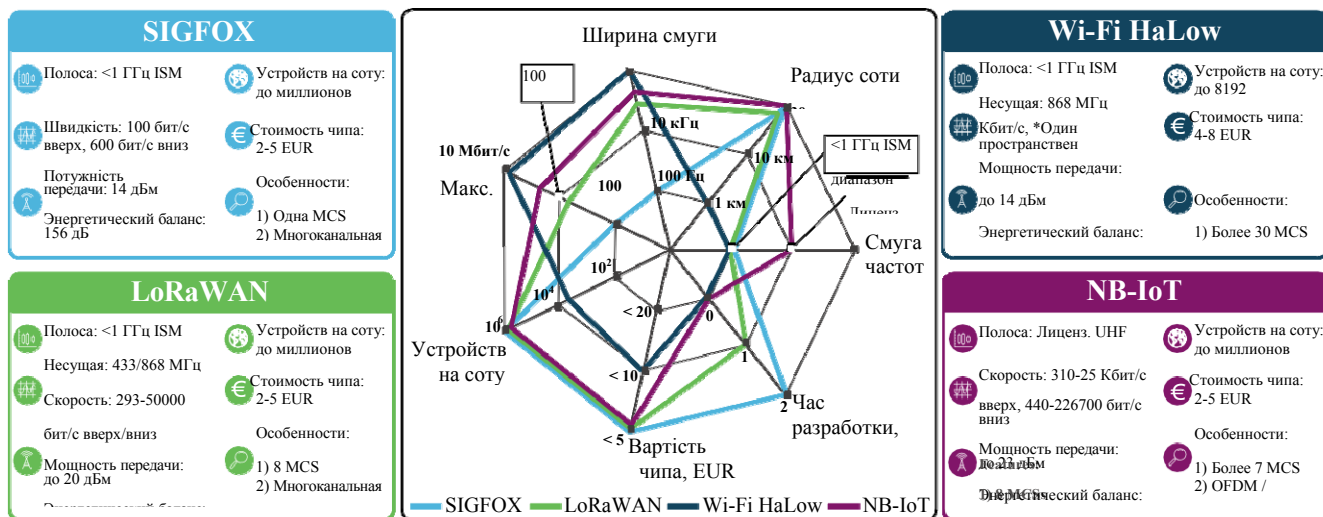


Рисунок 3.2 — Основні характеристики перспективних M2M -радіотехнологій

На сьогодні спостерігається велика різноманітність всіляких систем LPWAN, яке включає стандартизовані технології (IEEE 802.15.4g і 802.15.4k, ETSI LTN і так далі), частково відкриті протоколи, запропоновані спеціальними робочими групами і альянсами (приміром, Weightless and LoRaWAN), а також закриті нішеві рішення (такі як SIGFOX, RPMA і WAVIoT). При такій безлічі наявних варіантів підходи до розробки відповідних технологічних компонентів також значно розрізняються. Як приклад нижче розглядаються два сучасні рішення LPWAN, іменовані SIGFOX і LoRaWAN. Обидві радіотехнології працюють на частотах нижче 1 ГГц в неліцензованому спектральному діапазоні ISM (для промислового, наукового і медичного застосування) і використовують метод доступу до каналу, побудований на принципах алгоритму Алоха з перебудовою по частоті, що призводить до

обмежень на тривалість їх робочого циклу. Архітектурно обидві системи мають топологію, подібну до стільникової.

Мережа SIGFOX оперує з вузькосмуговими сигналами ultra - narrowband 100 Гц, використовуючи двійкову фазову маніпуляцію BPSK, а також 600 Гц, використовуючи частотну маніпуляцію гауса GFSK, для передачі по лінії вгору і вниз відповідно. Короткі пакети даних вирушають у випадкові моменти часу по довільно вибраному каналу, що відповідає так званому випадковому множинному доступу з розділенням по частоті і часу RFTDMA. Для виявлення радіосигналів, що випромінюють, устаткування БС має можливість прослуховувати канал в досить широкому діапазоні частот (від десятків до сотень кГц). Попри те, що система SIGFOX накладає жорсткі обмеження на об'єм даних, що передаються в кожному радіокадрі (тобто не більше 12 байт), час відправки такого кадру може перевищувати 1 с. З інших вузьких місць цієї технології слід зазначити наявність єдиної модуляційно-кової схеми MCS, а також ліміт на число пакетів даних, які можуть бути передані на і від облаштування M2M в день, рівний 4 і 140 відповідно.

На відміну від технології SIGFOX мережа LoRaWAN підтримує безліч MCS. При цьому обов'язкові MCS базуються на власному напрацюванні LoRa, яке використовує метод розширення спектру SS і засноване на лінійній частотній модуляції. Число відповідних сигналів для відправки одного біта інформації, а також смуга пропускання каналу зв'язку, який впливає на тривалість кожного сигналу, можуть бути вибрані так, щоб досягти необхідного співвідношення між часом передачі і радіусом зони покриття. Крім того, в деяких географічних регіонах може застосовуватися маніпуляція GFSK із швидкістю передачі даних в 50 кбит/с. Можна припустити, що розглянуті вище технології LPWAN будуть корисні на відносно ранніх стадіях розвитку екосистеми IoT, поки число підключених до мережі пристроїв ще досить мало. Проте при цьому вони можуть зіграти важливу роль для підтримки масових застосувань IoT, доки стандартизовані стільникові системи M2M остаточно не займуть ринок і не отримають досить широке поширення.

**Системи WiFi HaLow малій потужності.** У недавні роки технологія WiFi комітету IEEE 802.11 отримала колосальний розвиток і фактично стала рішенням за умовчанням як для домашніх, так і для корпоративних мереж зв'язку. Проте системи на основі WiFi довгий час не застосовувалися для застосувань M2M в основному із-за свого досить високого енергетичного споживання. Порівняно недавно ця обставина змінилася, після того, як що підтримує стандартизацію IEEE 802.11 співтовариство прийняло рішення накласти обмеження на тривалість робочого циклу мережі, а також провести модифікацію радіоустаткування WiFi в цілях підвищення енергетичної ефективності системи. З іншого боку, підтримка мобільності і роумінгу у рамках технології WiFi залишається досить мізерною, а з точки зору надійності зв'язку відсутні як механізми строгого гарантування якості обслуговування, так і засоби ефективного управління інтерференцією на непередбачуваних неліцензованих частотах.

Після відповідного дослідження стало зрозуміло, що властивості поширення радіосигналу на частотах нижче 1 ГГц можуть надати сприятливіші умови для встановлення з'єднань M2M в порівнянні з традиційними підходами, що використовують частотні діапазони в районі 2,4 і 5 ГГц. Проте доступні в неліцензованому ISM-спектрі на частотах нижче 1 ГГц радіоресурси надзвичайно невеликі, що вимагає акуратного і точного проектування мережі доступу. З урахуванням цієї обставини Комітетом із стандартизації IEEE 802.11 був запущений новий проект, який стартував в 2010 році і отримав позначення IEEE 802.11ah. Цільова технологія заснована на модифікації стандарту IEEE 802.11ac шляхом зниження тактової частоти його роботи в 10 разів і націлена на надання ширшого охоплення (до 1 км) для надійного обслуговування масових застосувань M2M з високою спектральною і енергетичною ефективністю.

На сьогодні в умовах міської забудови можуть розміщуватися десятки тисяч облаштувань M2M, що призводить до необхідності підтримувати до 6000 вузлів на кожній точці доступу IEEE 802.11ah. Досягаючи такої місткості, ця

технологія при цьому не являється назад сумісною з іншими протоколами лінійки WiFi. В результаті безпроводна мережа IEEE 802.11ah підходить для підключення просунутих M2M-пристроїв, які мають строгіші вимоги по мінімальній швидкості передачі даних і затримці доступу. Технологічно система IEEE 802.11ah є несумісною з іншими WiFi -продуктами рішення, що функціонує на частотах нижче 1 ГГц в неліцензованому спектральному діапазоні ISM і засноване на використанні мультиплексування з ортогональним частотним розділенням OFDM. Вона підтримує десятки різних налаштувань з урахуванням ширини смуги пропускання радіоканалу, а також використовуваних модуляційно-кодових схем MCS.

Нині основна робота із створення специфікацій технології IEEE 802.11ah, також відомою як WiFi HaLow малій потужності, фактично завершена, а тестове устаткування, що реалізовує цей стандарт, вже починає з'являтися на ринку. При цьому одним з ключових відкритих питань стає майбутній характер взаємовідносин між системою WiFi HaLow і іншими продуктами лінійки WiFi. Зокрема, представляє інтерес, чи стануть мережі WiFi HaLow відносно незалежними або ж будуть інтегровані з традиційним устаткуванням WiFi, наприклад, у вигляді комбінованих пристроїв, як це було зроблено в технології Bluetooth Smart. Приміром, нові точки доступу WiFi могли б підтримувати обидва режими радіозв'язку або призначені для користувача термінали WiFi стали б додатково забезпечувати функціонал точки доступу HaLow для M2M -устройств.

**Стільникові системи M2M.** Застосування стільникових технологій зв'язку, розроблених комітетом 3GPP, стає усе більш привабливим для організації масового доступу облаштувань M2M в мережу завдяки їх великій зоні обслуговування, порівняно низькій вартості розгортання, високому рівню інформаційної безпеки, роботі в контрольованому ліцензованому спектрі, а також відносній простоті і гнучкості управління. Проте мережі LTE спочатку не були призначені для ефективною підтримки M2M -приложений, оскільки історично орієнтувалися на забезпечення послуг, що сильно відрізняються від

них як за характеристиками передаваного трафіку, так і за вимогами до якості обслуговування. Таким чином, комітету 3GPP довелося значно поліпшити технологію LTE, щоб дозволити їй ефективно обслуговувати всілякі облаштування M2M.

Враховуючи той факт, що число учасників міжмашинної взаємодії продовжує нестримно зростати, до складу специфікацій LTE потрібно було включити цілий ряд спеціалізованих механізмів для підтримки дуже великого числа пристроїв. Упродовж багатьох років ефективне забезпечення міжмашинної взаємодії стало для різних робітників груп 3GPP предметом безперервної діяльності. Вже з початку 2010-х років були зроблені перші спроби по розробці нової технології, широко відомої під назвою LTE, - MTC, або LTE - M. Відповідно, в першу чергу був запропонований метод управління перевантаженням, іменованій вдосконаленою заборонаю на доступ EAB, який став частиною 3GPP Release 11 і дозволив уникнути ситуацій, коли мережа доступу відмовляє із-за сплеску завантаження, пов'язаного з одноразовим підключенням великого числа M2M -устройств. Продовжуючи покращувати характеристики M2M -взаимодействия відносно вартості устаткування і його енергетичного споживання, а також прагнучи підвищити фактичну дальність обслуговування і місткість мережі, комітет 3GPP зробив ряд рішучих дій. По-перше, були запропоновані простіші протоколи, що управляють, для підключення облаштувань M2M, які дозволили зменшити їх енергетичні витрати, коли дані передаються нечасто і малими порціями. В зв'язку з цим пристроям, що відправляють дані з тривалими паузами, була також надана можливість подовжувати періоди очікування в режимі непостійного прийому DRX, що привело до подальшого зниження енергетичного споживання. Потім в 3GPP Release 12 був введений новий клас спрощених терміналів Cat. 0, які використовують смугу пропускання в 20 МГц і отримують граничну швидкість передачі даних в 1 Мбіт/с. Нарешті, до складу 3GPP Release 13 був включений додатковий клас Cat. M1, який має доступ до смуги пропускання в 1,4 МГц з

обмеженою потужністю передачі, досягаючи при цьому значного приросту в максимальній дальності з'єднання.

Незважаючи на істотне збільшення числа регіонів, в яких вже розгорнуті мережі LTE, безліч областей як і раніше використовує системи попередніх поколінь, засновані на технології GSM. У такому разі стільникові технології M2M вимушені використати режим GPRS/EDGE для організації міжмашинної взаємодії. Оскільки очікується, що мережі GSM продовжать грати значну роль в розвитку екосистеми IoT зважаючи на свою високу поширеність і низькі витрати, комітет 3GPP зробив спробу адаптувати систему GSM для потреб застосувань IoT з метою запропонувати ефективнішу альтернативу передачі M2M -трафіка за допомогою GPRS. Виникла в результаті технологія, відома як GSM з широким охопленням EC, - GSM, вводить поверх архітектури GSM набір як каналів, що управляють, так і каналів для передачі даних, а також включає просунуті механізми передачі з повтореннями і методи комбінування сигналів. Як наслідок, мережі EC - GSM потенційно можуть підтримувати до 50 тисяч пристроїв стільнику, причому якість сигналу на частотах нижче 1 ГГц покращується до 20 дБ.

Нарешті, з 2015 року комітетом 3GPP почалася робота із створення нової стільникової системи M2M, яка стала відома як технологія вузькосмугового IoT (NB - IoT). Відповідний клас терміналів Cat. NB1 визначає пристрої, що сумісні з сучасними стільниковими системами і мають складність близько 10% тій, яку мають термінали класу Cat. 1. Це стало можливо завдяки звуженню смуги пропускання до 180 кГц, використанню схеми OFDMA з інтервалом між тими, що піднесуть 15 кГц для передачі по лінії вниз, а також схеми FDMA з інтервалом між тими, що піднесуть 15 кГц і схеми SC - FDMA з інтервалом між тими, що піднесуть 3,75 або 15 кГц для передачі по лінії вгору. Технологія NB - IoT може запропонувати три варіанти розгортання мережі M2M : з окремим розміщенням, усередині смуги частот LTE і усередині захисної смуги частот LTE. Розмір блоку даних для відправки як по лінії вгору, так і по лінії вниз був скорочений, і при цьому було спрощено багато протоколів, що управляють.

Стандартизація першої версії протоколу NB - IoT завершилася в 2016 році, коли він був включений до складу 3GPP Release 13. Після цього у рамках 3GPP Release 14 були введені ще два класи терміналів, Cat. M2 і Cat. NB2, з поліпшеннями для досягнення додаткової гнучкості і продуктивності.

## **Висновки з розділу**

1. Засадничі технології у рамках Інтернету речей базуються на концепції міжмашинної взаємодії M2M, надаючи автономним і автоматичним пристроям з можливістю взаємодіяти напряду один з одним, а також з мережею Інтернет при мінімальному залученні користувача системи.

2. Ще історично так склалася на ринку застосувань IoT, що фрагментація мережі, підкріплена тривалою практикою створення одиничних нішевих рішень, істотно ускладнює управління системами M2M, уповільнює розвиток інноваційних продуктів в цій області і утрудняє контроль над відповідними накладними витратами.

3. Нині IoT є надмірно розгалуженою і складною неоднорідною екосистемою, яка включає всілякі радіотехнології M2M, такі як ZigBee, WirelessHART, 6LowPAN, WiFi, Bluetooth, ISA100.11a, MiWi, BACnet, Z - Wave і багато інших. Таким чином, створення універсальної безпроводної інфраструктури стає усе більш актуальним завданням.

## **РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ІОТ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РІШЕНЬ**

### **4.1 Доступ в стільникових системах M2M**

Застосування сучасних систем IoT для забезпечення енергоефективних рішень в енергетичному секторі має багато переваг, про які було зазначено в попередніх розділах. Однак для розгортання Інтернету речей у енергетичній сфері необхідні нові рішення та тенденції для підвищення ефективності Інтернету речей та подолання пов'язаних із цим проблем. У цьому розділі ми представляємо технологію Blockchain і Green-IoT як два підходи, які можуть допомогти подолати деякі проблеми.

#### **4.1.1 Характеристики роботи каналу випадкового доступу в LTE. Організація з'єднання M2M -устройств з мережею.**

Для встановлення початкового з'єднання з мережею LTE облаштування M2M, такі як сенсори, лічильники і вимірники, можуть використати канал випадкового доступу RACH .

Оскільки протокол функціонування цього каналу початково не враховував особливості міжмашинної взаємодії, представляє інтерес дослідження параметрів його роботи у випадках, коли мережа доступу схильна до сплесків завантаження, пов'язаних з одноразовим підключенням великого числа M2M -устройств . При цьому конкуренція між безліччю терміналів за можливість передачі в режимі перевантаження робить такий аналіз нетривіальним.

Також важливо порівняти між собою характеристики роботи каналу RACH в умовах перевантаження і в режимі нормальної роботи, коли значного сплеску завантаження не відбувається .

Далі розглядається типовий сценарій, що відповідає роботі інтелектуальної енергосистеми, в якому велике число облаштувань M2M встановлює з'єднання з мережею LTE впродовж досить короткого інтервалу

часу, наприклад, для відправки тривожного повідомлення про зміну режиму електроживлення. Оскільки лічильники, сенсори і вимірники є обладнаннями невеликого розміру, що живляться від батареї, облік їх енергетичного споживання у край важливий. В зв'язку з цим подальший виклад спрямований на вивчення енергетичної ефективності і інших характеристик M2M -устройств при їх масовому підключенні до мережі LTE в умовах перевантаження каналу RACH. Це дослідження проводиться на підставі відповідних технічних документів комітету 3GPP, в яких задані параметри сценарію, що розглядається тут.

Процедура випадкового доступу в системі LTE приведена на малюнку 4.3. Спочатку термінал посилає на БС LTE повідомлення Msg 1, що називається преамбулою, використовуючи при цьому фізичний канал випадкового доступу PRACH. При цьому конкретна преамбула для передачі вибирається випадковим чином з безлічі заздалегідь зарезервованих для цієї мети послідовностей. Слід зазначити, що число доступних для організації випадкового доступу послідовностей може бути менший, ніж найбільше можливе їх число в 64 преамбули, залежно від налаштувань мережі доступу. Якщо два термінали або більше вибрали ідентичні преамбули, а потім відправили їх до одного і того ж моменту часу, на стороні БС може виникнути колізія. Преамбули також можуть не досягти БС при недостатньому значенні випромінюваної терміналом потужності.

Якщо преамбула була прийнята успішно, то БС LTE (що називається також eNodeB) підтверджує цей факт шляхом відправки у відповідному інтервалі повідомлення Msg 2, відомого як відповідь випадкового доступу RAR. Для цього терміналу висилається покажчик на радіоресурси фізичного колективного каналу по лінії вниз PDSCH, які містять його повідомлення RAR. Оскільки eNodeB повинна встановити, який з терміналів передав яку преамбулу, ініціюється так званий процес дозволу колізії. Після закінчення деякого часу обробки повідомлення RAR термінали, що беруть участь, передають повідомлення Msg 3, яке є запитом на встановлення контролю за

радіоресурсами RRC. Його відправка відбувається у фізичному колективному каналі по лінії вгору PUSCH з використанням радіоресурсів, вказаних в повідомленні Msg 2. Процедура випадкового доступу завершується після успішного прийому від eNodeB повідомлення Msg 4, яке називається налаштуванням з'єднання RRC.

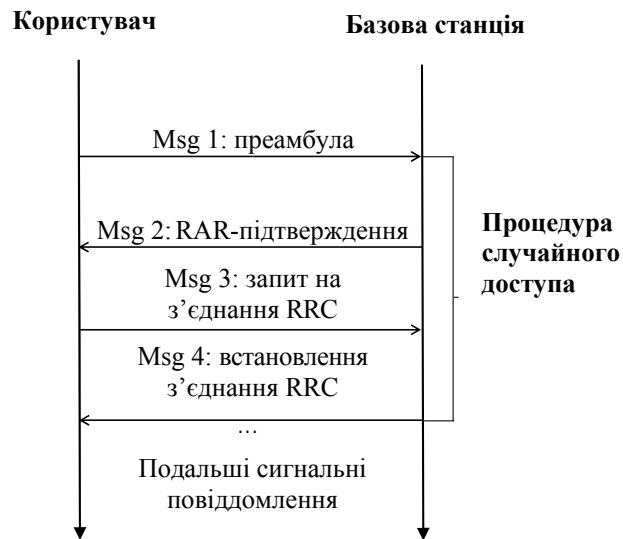


Рисунок 4.1 — Порядок процедури випадкового доступу в системі LTE

Коли схожі повідомлення Msg 3 вирушають більш ніж одним терміналом із-за попередньої колізії їх повідомлень Msg 1 (преамбула), на стороні eNodeB у кращому разі може бути прийнято тільки одне з них, що призводить до відсилання відповідного повідомлення Msg 4 успішному терміналу. Інакше, якщо термінал не отримав очікуваного ним повідомлення Msg 4, він запускає процедуру випадкового доступу наново після деякого інтервалу відстрочення, вибраного випадковим чином у рамках певного вікна, що задається значенням індикатора відстрочення. Вузьке місце даного протоколу, особливо за наявності безлічі терміналів, що вимагають одночасного доступу, пов'язане з ростом вірогідності виникнення колізії (див. рисунок 3.2,а). Проте доставка повідомлення RAR усередині виділеного інтервалу очікування також може потерпіти невдачу в силу обмежених радіоресурсів каналу PDCCH. Більше

того, можливо, що сполучення Msg 3 і Msg 4 з деякою вірогідністю спотворюються при передачі.

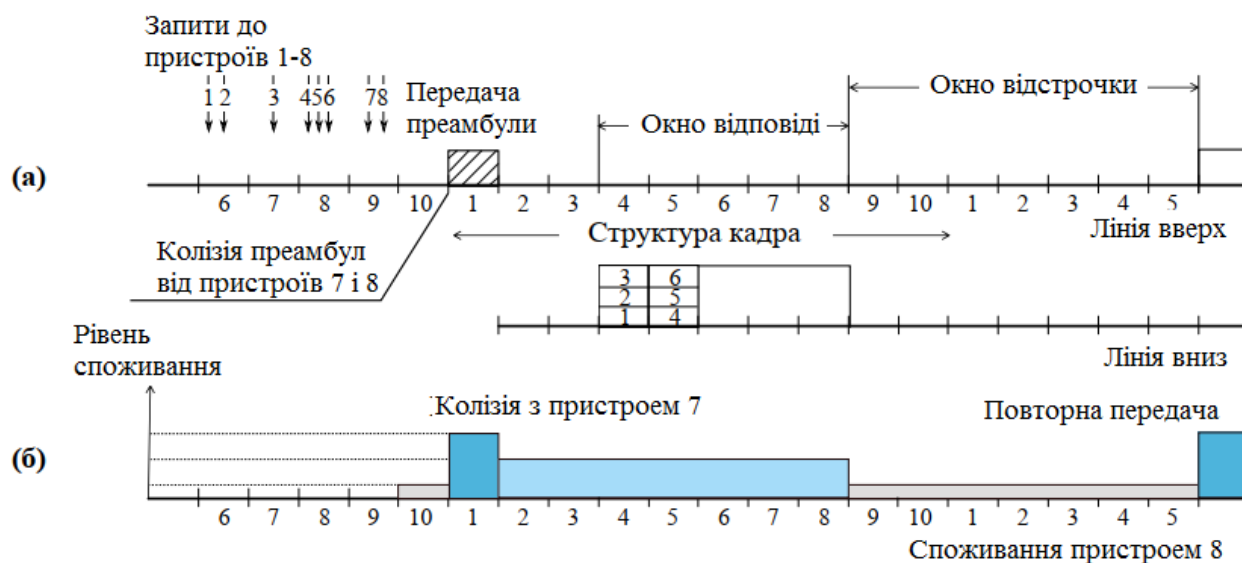


Рисунок 4.2 — Приклад роботи процедури випадкового доступу в часі (а) і приклад енергоспоживання для терміналу номер 8 (б)

В результаті цілий ряд негативних подій може стати причиною невдачі при роботі процедури випадкового доступу і тим самим викликати додаткову затримку початкового входу в мережу. Очевидно, що вірогідність колізії зростає зі збільшенням числа терміналів, що беруть участь у встановленні з'єднання з БС, а також залежить від параметрів їх трафіку. В умовах перевантаження RACH число тих, що конкурують за вихід в цей канал пристроїв може досягати 30 тисяч штук на одну стільнику, що відповідає оцінці і у результаті запозичена комітетом 3GPP в якості рекомендованої максимальної щільності розміщення терміналів. Таке величезне число конкуруючих M2M -устройств може привести до дуже високої вірогідності колізії і навіть спричинити вичерпання радіоресурсів мережі доступу. У відповідь на цю загрозу комітет 3GPP ініціював роботу за оцінкою причин і наслідків подібного перевантаження, аналіз обставин якої приведений нижче.

**Моделювання перевантажень в мережі доступу.** У даному типовому сценарії стільника системи зв'язку 3GPP LTE містить M ідентичних M2M -

устройств. Кожне з них вибирає підкадр для початку процесу передачі по лінії вгору згідно з рівномірним розподілом (тип трафіку 1) або бета-распределению (тип трафіку 2) на інтервалі  $[1; N]$ . Передача преамбули, що займає в точності один підкадр, може здійснюватися в кожному підкадрі з номером  $b$ , тобто в слотах  $1, b + 1, \dots, b \cdot i + 1, i \in \mathbb{N}^+$ . Після активації облаштування M2M вважається зайнятим до моменту завершення своєї процедури випадкового доступу. Інакше цей пристрій називається неактивним. У тих підкадрах, де відбувається обслуговування (тобто коли запланована можливість передачі PRACH), кожен зайнятий пристрій вибирає одну з  $s$  преамбул випадковим чином за рівномірним законом і відправляє її.

Відповідно до рекомендацій мається на увазі, що колізія настає, коли два або більше за облаштування M2M вибирають ідентичну преамбулу і передають її в одному і тому ж слоті. При цьому передбачається, що усі преамбули, що вступили в конфлікт, будуть втрачені на стороні БС після закінчення деякого часу обробки, що на практиці відповідає гіршій можливій ситуації. Інакше відправка преамбули вважається успішною з вірогідністю  $\_$  в силу поступового підвищення випромінюваної терміналом потужності, де  $\_$  - число спроб передачі. Найбільше допустиме число спроб передачі однієї преамбули складає  $L1$ . Якщо її відправка стає неуспіхом із-за колізії або ж недостатнього рівня потужності, відповідне M2M-пристрій рівномірним чином вибирає собі лічильник відстрочення з вікна  $W$ . Після  $K0$  підкадрів очікування починається так званий інтервал відповіді, розмір  $K$  (див. малюнок 4.4).

Усередині цього інтервалу відповіді eNodeB висилає терміналам повідомлення RAR в підкадрах, вибраних рівномірно з діапазону  $[1; K]$ . Якщо облаштування M2M не отримує повідомлення RAR, то його поточна спроба відправки преамбули оголошується неуспіхом, і такий термінал ініціює процедуру відстрочення подальшої передачі. У разі успішного отримання M2M-устройством повідомлення RAR цей термінал починає формування повідомлення Msg 3 для відсилання впродовж часу  $L3$ . Потім він відправляє

повідомлення Msg 3 і чекає впродовж часу  $L_3$  прийому повідомлення Msg 4 (див. малюнок 4.3). У свою чергу, повідомлення Msg 3 і Msg 4 доставляються успішно з вірогідністю  $\pi_3$  і  $\pi_4$  відповідно. Найбільше допустиме число спроб передачі повідомлення Msg 3 складає  $L_3$ .

Аналіз введеної вище моделі системи зв'язку з можливістю виникнення колізій є непростим завданням, точне рішення якого ускладнене в силу «пам'яті» процесу. Це пов'язано з наявністю змінного часу відстрочення передачі, постійних інтервалів очікування і, особливо, значного числа преамбул в процедурі випадкового доступу. Наприклад, в класичній системі випадкового множинного доступу з єдиною преамбулою затримку входу в мережу можна оцінити за допомогою підходу, використовуваного раніше для аналізу алгоритму Алоха. Проте в системі, що вивчається тут, цей популярний метод не дає точного наближення, тому далі застосовується розширення техніки з роботи. Для того, щоб абстрагуватися від наявності «пам'яті» і отримати оцінку *величини* для даної системи з колізіями, вводиться наступна еквівалентна модель.

1) Передбачається, що M2M-пристрої активізуються згідно з розподілом Бернуллі з вірогідністю  $\pi$ . Тоді деякий термінал може ініціювати своє початкове з'єднання з мережею в кожному підкадрі з відповідною вірогідністю  $\pi = 1/N$ , де  $N$  - число підкадрів в початковій системі.

2) Далі опускається безпосередній розгляд інтервалу очікування і вікна відстрочення, яке замінюється припущенням про те, що в кожному підкадрі зайнятий пристрій може активізуватися з деякою вірогідністю  $\pi_0 = 1/(K_0 + K_1 + K + \omega)$ . Це міркування означає, що термінал активізується одного разу впродовж інтервалу  $(K_0 + K_1 + K + \omega)$ , якщо його початкова спроба передачі виявилася неуспіхом із-за колізії або ж недостатнього рівня потужності.

3) Вірогідність успішного завершення процедури початкового доступу позначається як  $\mu$ , тобто запит на вхід в мережу обслуговується в поточному підкадрі з деякою вірогідністю  $\mu$ . Інакше термінал робить спробу діставання доступу до каналу в наступному доступному для нього підкадрі.

4) Для простоти найбільше допустиме число спроб передачі однієї преамбули далі не розглядається.

У рамках введеної вище спрощуючої системи допущень можна отримати апроксимацію для середньої затримки входу в мережу. Для цього спочатку корисно розглянути ситуацію без виникнення колізій, для якої вірогідність отримання обслуговування ( $\tilde{\mu}$ ) може бути виведена з вираження:

$$E[\tilde{\tau}^{(1)}] = E[\tau^{(1)}]$$

як

$$\tilde{\mu} = \frac{1}{E[\tau^{(1)}]} = \frac{1}{c_1(K_1 + K_0 + K + \bar{w}) + \frac{b-K+1}{2} - \bar{w}},$$

де  $E[\tau^{(1)}]$  - середня тривалість інтервалу часу між моментом активізації терміналу і моментом отримання ним повідомлення RAR, а  $E[\tilde{\tau}^{(1)}]$  - середня тривалість відповідного інтервалу у введеній еквівалентній системі. Приведене тут вираження буде використано надалі при описі завантаження системи для M2M -устройств, які уникнули колізій.

В результаті стаціонарний розподіл вірогідності  $\omega = \{\omega_0, \omega_1\}$  виражається із співвідношення  $\Pi^T \omega = \omega$  і при цьому  $\omega_0 + \omega_1 = 1$ . Таким чином, середнє значення параметра  $Q_i$  може бути знайдене як

$$E[Q_i] = 1 \cdot \omega_1 = \frac{\pi}{\pi + \mu_j},$$

де  $Q_i$  - величина, що показує, чи активізовано облаштування  $i$ , а  $\mu_i$  - вірогідність успішної передачі преамбули.

Використовуючи закон Литтла, можливо встановити середній час, проведений системою в змозі  $j$

$$E[\tau_j^{(1)}] = \frac{E[Q_i]}{\pi} = \frac{1}{\pi + \mu_j}.$$

В можливості  $j$  для  $j - 1$  зайнятих терміналів вірогідність отримати доступ до каналу і вибрати ту ж саму преамбулу, що і облаштування  $j$ , складає  $\pi_0 \cdot 1/s$  (вірогідність активізації пристрою, помножена на вірогідність вибору ідентичної преамбули). Для неактивних  $M - j$  терміналів відповідна вірогідність є  $\pi \cdot 1/s$  (вірогідність вступу нового запиту на доступ, помножена на вірогідність вибору ідентичної преамбули).

Отже, вірогідність уникнення колізії може бути вчислена таким чином:

$$\pi_j^* = (1 - \pi_0 s^{-1})^{j-1} (1 - \pi s^{-1})^{M-j}$$

Далі враховується механізм поступового підвищення випромінюваної терміналом потужності. Тоді вірогідність уникнення колізії при спробі передачі з номером  $n$  задається у виді

$$\begin{aligned} Pr\{1\text{-й успех}\} &= \left(1 - \frac{1}{e}\right) \pi_j^*, \\ Pr\{2\text{-й успех}\} &= \left(1 - \left(1 - \frac{1}{e}\right) \pi_j^*\right) \left(1 - \frac{1}{e^2}\right) \pi_j^*, \\ &\dots \\ Pr\{n\text{-й успех}\} &= \left(1 - \frac{1}{e^n}\right) \pi_j^* \prod_{i=1}^{n-1} \left(1 - \pi_j^* \left(1 - \frac{1}{e^i}\right)\right), \\ &\dots \end{aligned}$$

Тут, як і раніше, не враховуються втрачені преамбули, а проводиться усереднювання по успішних спробах передачі, коли шукані середні величини замінюють на умовні математичні очікування. Таким чином, середнє число спроб передачі виражається у виді

$$\bar{n}_j = \pi_j^* \sum_{n=1}^{L_1} n \left(1 - \frac{1}{e^n}\right) \prod_{i=1}^{n-1} \left(1 - \pi_j^* \left(1 - \frac{1}{e^i}\right)\right)$$

Зважаючи на механізм поступового підвищення потужності, тепер можна встановити значення вірогідності успішної передачі  $\mu_j$  пристроєм  $i$  в наступному виді:

$$\mu_j = \left( \bar{n}_j \cdot (K_1 + K_0 + K + \bar{w}) + \frac{b - K + 1}{2} - \bar{w} \right)^{-1}$$

де величина  $j$  обчислюється за допомогою вираження, приведеного вище.

Отже, середній час обслуговування може бути отриманий як

$$E[\tau^{(1)}] = \sum_{j=1}^M \theta_j E[\tau_j^{(1)}] = \sum_{j=1}^M \theta_j \frac{1}{\pi + \mu_j}$$

де  $\{\theta_j\}_{j=1}^M$  - стаціонарний розподіл вірогідності, а  $\theta_j$  - стаціонарна вірогідність перебування в змозі  $j$ .

Для знаходження введеного вище стаціонарного розподілу вірогідності слід розглянути усі переходи між станами системи і вирішити відповідне матричне рівняння розмірності  $M$ . Для спрощення обчислень можна опустити складніші переходи між станами і усереднити  $\theta_j$  з використанням біномного розподілу таким чином:

$$\theta_j = \binom{M-1}{j-1} \rho^{j-1} (1-\rho)^{M-j}$$

де  $\rho$  - завантаження даної системи, а

$$\binom{M-1}{j-1} = \frac{(M-1)!}{(j-1)!(M-j)!}$$

При такому способі розрахунку не враховуються колізії між іншими терміналами і передбачається, що їх випробовує тільки даний пристрій  $i$ . Тим самим можна знайти завантаження системи  $\rho = \pi/\tilde{\mu}$  за допомогою вираження для вірогідності отримання обслуговування  $\mu$  у випадку без колізій. Підсумкове вираження, що дозволяє оцінити середній час обслуговування, є

$$E[\tau^{(1)}] = \sum_{j=1}^M \frac{\binom{M-1}{j-1} \rho^{j-1} (1 - \rho)^{M-j}}{\frac{1}{N} + (a_j(K_1 + K_0 + K + \bar{w}) + \frac{b-K+1}{2} - \bar{w})^{-1}},$$

де  $\pi_j^*$  і  $a_j$  були визначені вище.

Запропонований підхід допускає цілий ряд важливих практичних узагальнень і розширень. Зокрема, можна вивчити режим нормального функціонування мережі доступу, коли перевантажень не виникає. При цьому інтервал часу між надходженнями нових запитів на доступ розподілений за експоненціальним законом із заданим параметром  $1/\lambda$ . Також варто відмітити, що представлена математична модель може охарактеризувати роботу методів управління перевантаженням, наприклад таких, як попереднє відстрочення (pre-backoff).

#### 4.1.2 Аналіз продуктивності стільникових систем M2M

**Підтримка великого числа пристроїв.** Як було відмічено вище, інтелектуальна енергосистема є важливим застосуванням M2M, що включає велике число сенсорів, лічильників і вимірників, які передають свої дані через мережеву інфраструктуру в автоматизованому режимі. Така поведінка є типовою для масових M2M-сервисов і тому стає опорним сценарієм, що демонструє ключові особливості міжмашинної взаємодії (див. малюнок 4.5). Відповідно, облаштування M2M, що входять до складу інтелектуальної енергосистеми, можуть бути поділені на наступні класи залежно від пріоритету інформації, що відправляється ними : високопріоритетні (тривожні повідомлення) і низькопріоритетні (дані вимірів). З боку мережі зв'язку передача тривожних повідомлень потенційно зв'язана з підвищеною трудністю, оскільки вони часто виникають практично синхронно і при цьому мають строгі обмеження на допустиму затримку доступу [48].

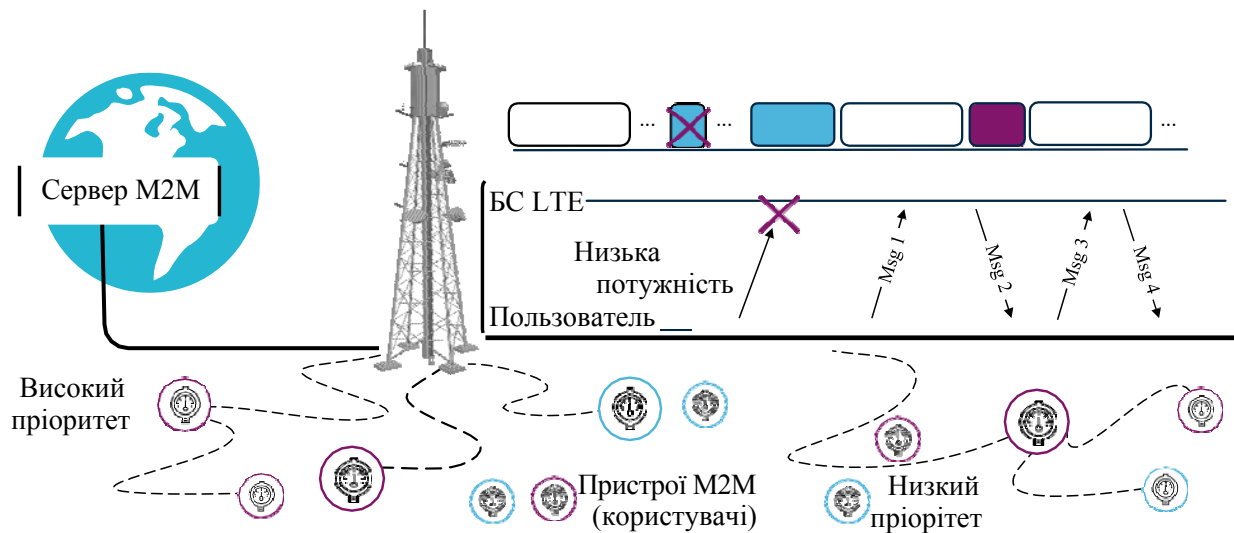


Рисунок 4.3 — Типовий сценарій M2M з великим числом пристроїв

На сьогодні система LTE надає ряд виділених каналів для передачі даних від M2M -устройств по лінії вгору. Зокрема, канал PRACH використовується терміналами для початкового доступу, а також для того, щоб запросити необхідні радіоресурси, коли вони ще не були надані. Підключення до мережі безлічі облаштувань M2M впродовж короткого інтервалу часу може викликати сплеск завантаження каналу PRACH внаслідок його обмеженої місткості. Важливо нагадати, що робота системи PRACH організована в два етапи (див. рисунок 3.3). На першому з них відбувається синхронізація відліку часу по лінії вгору (пов'язана з обміном повідомленнями Msg 1 і Msg 2), коли при передачі преамбул в режимі випадкового доступу використовується поступове підвищення потужності для її підстроювання під стан каналу зв'язку. На другому етапі застосовується повідомлення Msg 3 для відправки службової інформації по лінії вгору на БС (звану eNodeB або eNB), а також повідомлення Msg 4 для подальшого дозволу можливих колізій. Для розуміння того, як велике число M2M -устройств впливає на характеристики процедури випадкового доступу в системі LTE, тут і далі наводяться результати моделювання роботи каналу PRACH на рівні протоколу, які були заздалегідь відкалібровані з тестовими даними 3GPP . Мета цього дослідження - аналіз функціонування системи PRACH в умовах перевантаження, коли велике число

облаштувань M2M, що мають різний пріоритет, встановлює своє з'єднання з мережею доступу (див. рисунок 3.4). В зв'язку з цим цікаво спостерігати, що при додаванні близько 40% високопріоритетних терміналів, що відправляють тривожні повідомлення, до початкової (типовому) множини в 30000 низькопріоритетних терміналів, передавальних дані своїх вимірів, різко погіршується якість роботи PRACH.

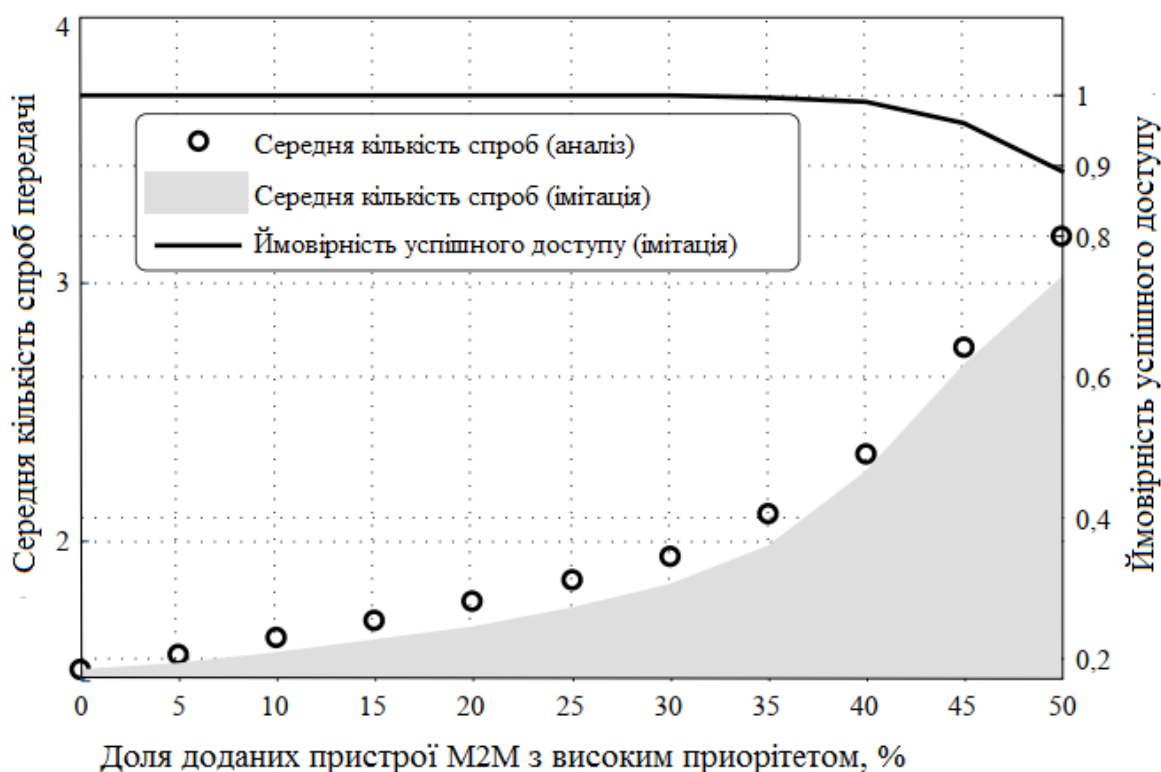


Рисунок 4.4 — Характеристики доступу M2M-пристроїв з різними пріоритетами

Цікаво також помітити, що преамбули PRACH, вибрані M2M - устрояствами випадковим чином, можна розглядати як кодові «канали» (див. рисунок 3.5), що не перекриваються. У разі, коли два або більше за термінал вибирають ідентичну преамбулу (канал), виникає ситуація, що нагадує типову колізію між пакетами даних. Подібна інтерпретація дозволяє вивчати процес змагання між облаштуваннями M2M, спираючись на відомі результати, отримані для багатоканальних протоколів випадкового доступу. Як наслідок,

можна отримати точну апроксимацію в заданому діапазоні параметрів роботи системи PRACH (див. рисунок 3.4), таких як число доступних преамбул ( $M$ ) і терміналів ( $U$ ), що змагаються, розмір вікна відстрочення та ін. Проте подібні рішення можна застосовувати лише в окремих випадках, а взагалі кажучи, виникає необхідність проведення безпосереднього чисельного аналізу, який вдається тільки для досить невеликого числа облаштувань/каналів із-за швидко зростаючої обчислювальної складності.

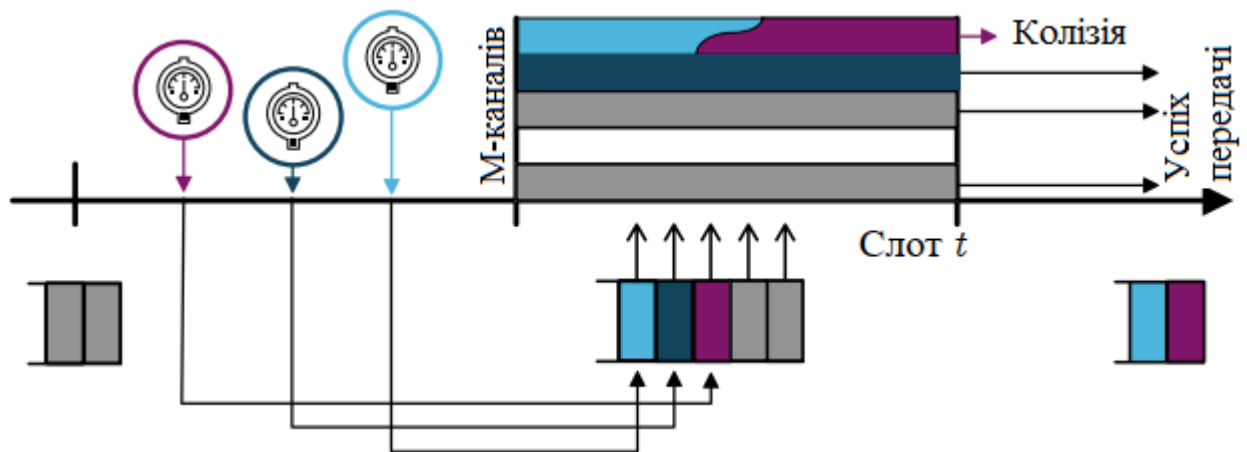


Рисунок 4.5 — Моделювання багатоканального протоколу випадкового доступу

В якості альтернативи для аналізу подібних систем M2M можна застосовувати методи дифузійної апроксимації, які дозволяють охарактеризувати області стабільності відповідної багатоканальної мережі випадкового множинного доступу, а також використати підходи з кооперацією і рандомізацією. В якості цільового сценарію корисно розглянути застосування M2M, пов'язане з промисловою автоматизацією (див. рисунок 3.7) і вимагаюче певних гарантій по затримці доступу і надійності доставки даних (наприклад, при відправці пріоритетних і/або критичних повідомлень). У цьому контексті рисунок 3.8 демонструє затримки передачі, спостережувані в системі PRACH і отримані за допомогою аналітичного моделювання. Подібні результати дозволяють проводити оптимізацію процедури випадкового доступу шляхом вибору відповідного значення вірогідності повторної передачі повідомлення

Msg 1 для заданого (найбільшого) числа M2M -устройств і безліч використуваних ними преамбул (каналів).

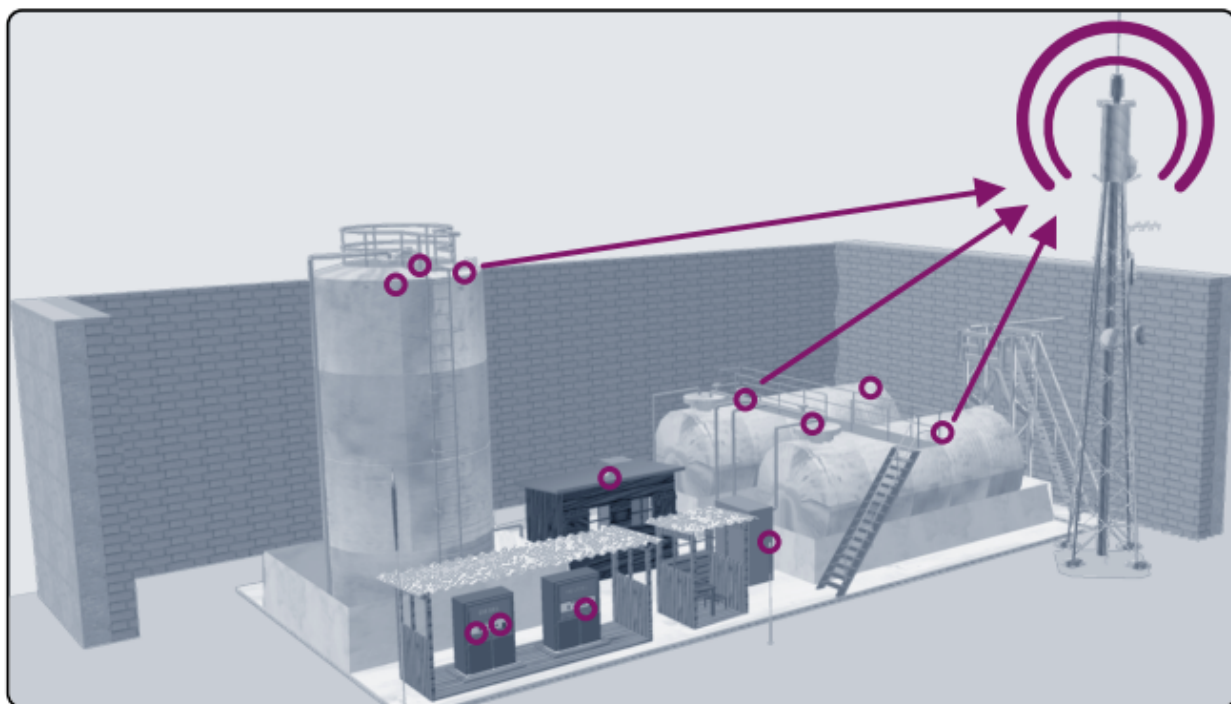


Рисунок 4.6 — Приклад розміщення M2M -системи для автоматизації виробництва

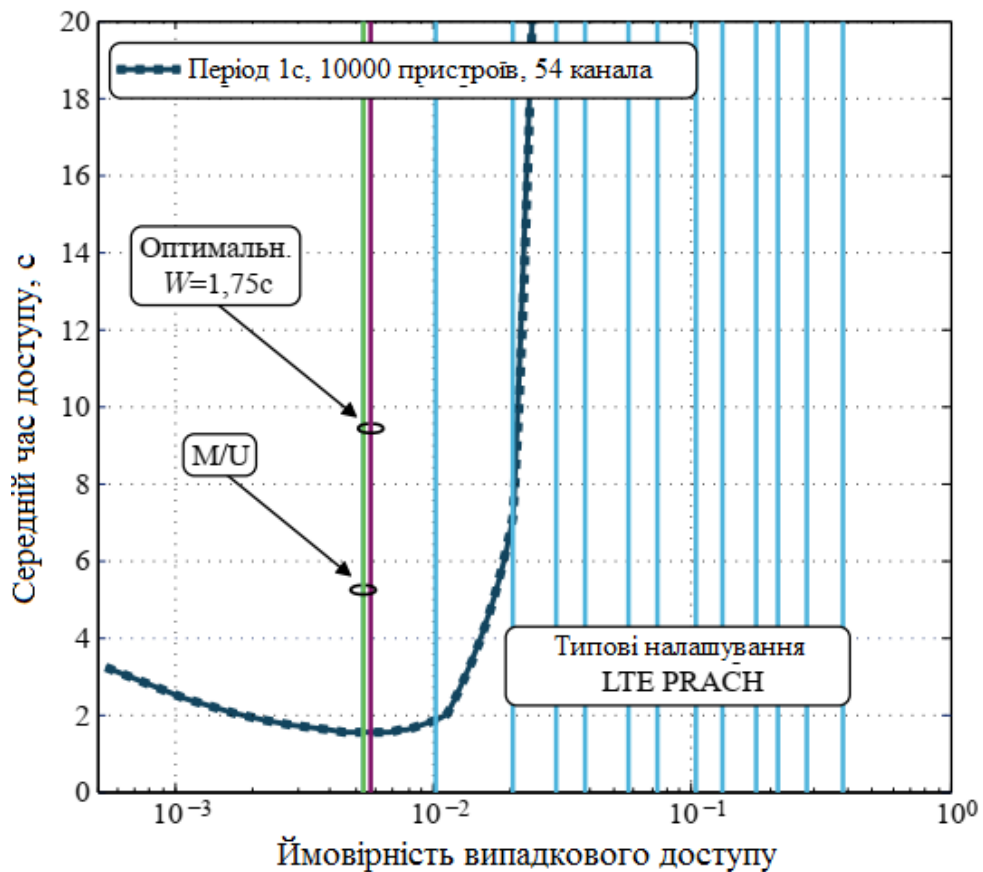


Рисунок 4.7 — Затримка доступу в стільниковій системі з великим числом облаштувань M2M

Детальніше на малюнку порівнюється оптимізована затримка доступу з аналогічними даними, отриманими для типових значень індикатора відстрочення PRACH, заданих специфікаціями 3GPP. Даний підхід дозволяє БС LTE підлаштовувати параметри функціонування процедури PRACH за наявності загальносистемної інформації про усі підключені облаштування M2M. Проте у випадках, коли подібна інформація з якоїсь причини недоступна, конкуруючі термінали можуть використати простіші (евристичні) методи контролю доступу в мережу, такі як вибір вірогідності повторної передачі преамбули у вигляді відношення  $M$  до  $U$ . Це частенько дозволяє досягти продуктивності, близької до оптимальної. Запропоновані тут результати дозволяють проектувати методи ефективного управління характеристиками роботи стільникової системи M2M, наприклад, затримкою доступу в мережу LTE, що виявляється у край важливо за підтримки

застосувань Індустріального Інтернету з жорсткими вимогами відносно доставки даних.

**Енергетична ефективність і передача даних малого об'єму.** У тісному взаємозв'язку із затримкою і вірогідністю успішного доступу знаходиться енергетична ефективність з'єднань M2M, яку необхідно враховувати, оскільки M2M -устройства зазвичай мають малі габарити і живляться від батареї. Приведене тут дослідження розглядає сценарій, коли деяке застосування IoT змушує велике число терміналів виконувати певну дію практично одночасно, наприклад, передавати виміри інтелектуальних лічильників. Те ж саме відбувається, коли виникає непередбачена, надзвичайна або критична подія, наприклад, масове відключення електрики або його відновлення, відмова мережевої інфраструктури і так далі. У цих випадках безліч облаштувань M2M підключаються до мережі доступу впродовж короткого інтервалу часу, використовуючи в цих цілях процедуру випадкового доступу PRACH для встановлення синхронізації відліку часу по лінії вгору як при початковому доступі, так і при безпосередній передачі своїх даних.

На малюнку 4.10 показані характеристики початкового входу в мережу для 30 тисяч облаштувань M2M відносно споживаної ними потужності, вірогідності колізії і вірогідності успішного доступу для різних значень індикатора відстрочення PRACH. Приведені дані отримані для типового процесу активізації терміналів згідно з бета-распределению (тип трафіку 2), як рекомендовано відповідною документацією 3GPP. Використовуване середовище імітаційного моделювання враховує основні рівні потужності для кожного передавального терміналу (неактивну, простою, прийому і передачі) на усіх етапах роботи процедури PRACH (див. малюнок 4.11). Результати показують ефективність альтернативних методів управління перевантаженням (див. рисунок 3.8), тому можна зробити висновок про те, що комбінація збільшеного інтервалу відстрочення і попереднього відстрочення успішно справляється з перевантаженням, що настає внаслідок сплеску активності облаштувань M2M.

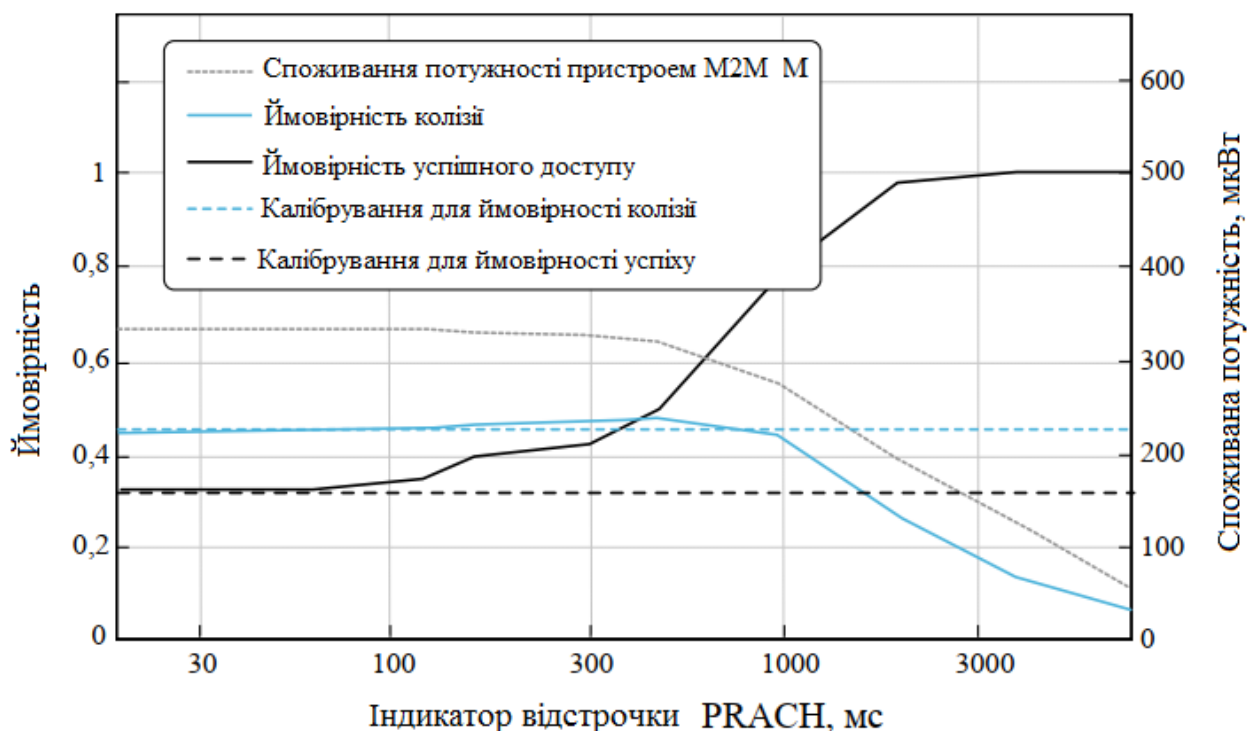


Рисунок 4.8 — Характеристики початкового входу в мережу для стільникової системи M2M

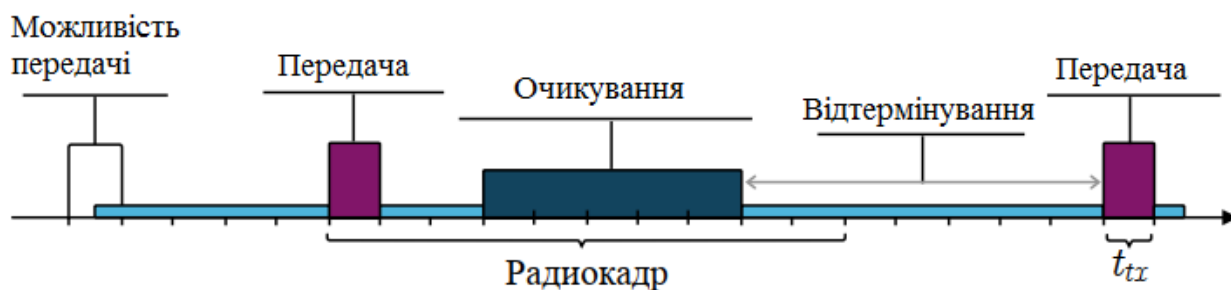


Рисунок 4.9 — Рівні споживаної облаштуванням M2M потужності

Далі в приведеному тут аналізі вивчаються аспекти, пов'язані з енергетичним споживанням M2M -устройств. Важливо відмітити, що відносно коротка тривалість циклу опитування (paging cycles) в системі LTE може бути украй неефективна для облаштувань M2M, особливо при значних інтервалах між надходженнями даних з урахуванням порівняльної стійкості до затримки послуг M2M. Як наслідок, збільшення тривалості циклу опитування в режимі простою дозволяє таким терміналам знаходитися в режимі очікування

триваліший час і тим самим економити ресурс своєї батареї. Для визначення споживаної потужності вимагається побудувати адекватну модель, яка могла б врахувати типові параметри трафіку M2M -устройств (див. рисунок 3.10). Приведені дані показують, що збільшення максимальної тривалості циклу опитування і періоду непостійного прийому DRX дозволяє досягти істотного приросту енергетичної ефективності терміналів (см також рисунок 3.11).

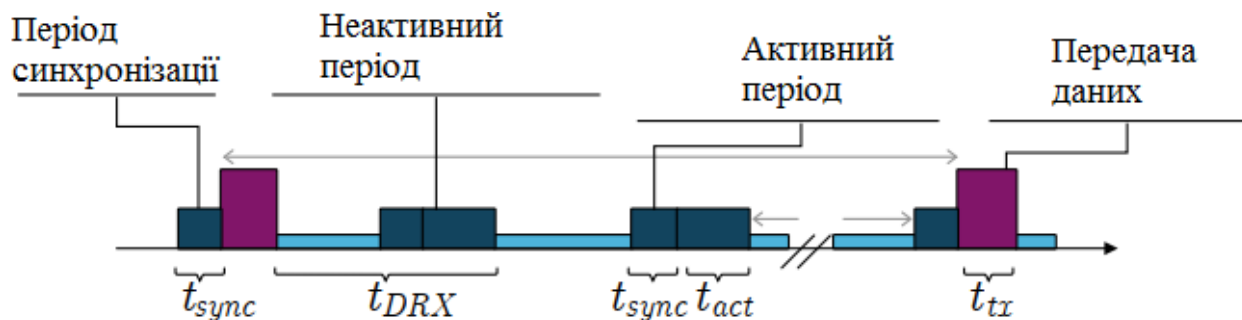


Рисунок 4.10 — Моделювання споживаної облаштуванням M2M потужності

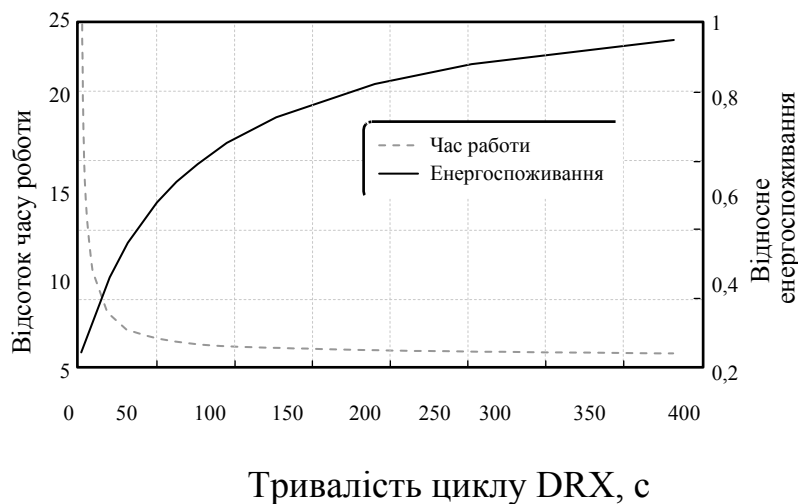


Рисунок 4.11 – Підвищення енергетичної ефективності M2M -устройств

В умовах, коли облаштування M2M можуть переносити деяке підвищення затримки, можна використати прямі з'єднання D2D для подальшого зниження споживаної ними потужності. Приміром, одне з M2M -устройств могло б агрегувати і потім пересилати в мережу доступу дані від сусідніх

терміналів, що спостерігають низьку якість інфраструктурного з'єднання. Подібні механізми ретрансляції по каналах D2D дозволяють зменшувати число повторних передач і тим самим знижувати енергетичне споживання терміналів, особливо тих, які розміщуються на краю стільниці і передають дані малого об'єму. Інакше, якщо введення додаткової затримки неприпустимо (як, наприклад, в застосуваннях промислової автоматизації), додаткове зниження затримки доступу може бути досягнуте за рахунок скорочення процедури PRACH, як показано на рисунку 3.9. Крім того, представляє інтерес розробка схем, дозволяючих M2M -устройствам відправляти дані малого об'єму без значних накладних витрат, характерних для технології LTE.

рисунком 3.12 відтворює поточну структуру кадру LTE (для смуги пропускання в 5 МГц) у вигляді прямокутної сітки ресурсних блоків. Їх групи складені з різних каналів, передбачених системою, таких як канал PRACH з радіоресурсами, що періодично виділяються, і фізичний канал управління по лінії вгору PUCCH з безперервно доступними радіоресурсами. Оскільки місткості обох каналів, PUCCH і PRACH, можуть виявитися недостатніми при обслуговуванні великого числа терміналів, то для передачі додаткового трафіку M2M можливо використати долю радіоресурсів фізичного колективного каналу по лінії вгору PUSCH, який застосовується для обміну інформацією між людьми H2H. Відповідний протокол дозволяє скоротити число повідомлень, що управляють, необхідних для дозволу колізій. Його застосування призводить до ефективнішого використання радіоресурсів, зменшення затримки доступу, а також значного зниження споживаної об'ємом M2M енергії (див. рисунок 3.13).

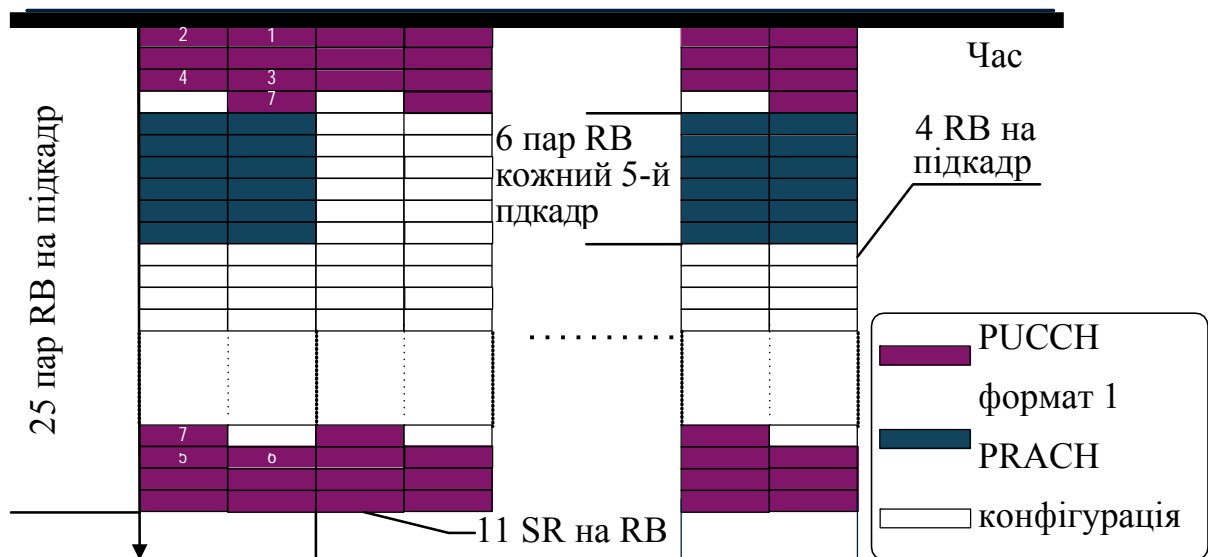


Рисунок 4.12 – Типова структура кадру LTE для стільникової системи M2M

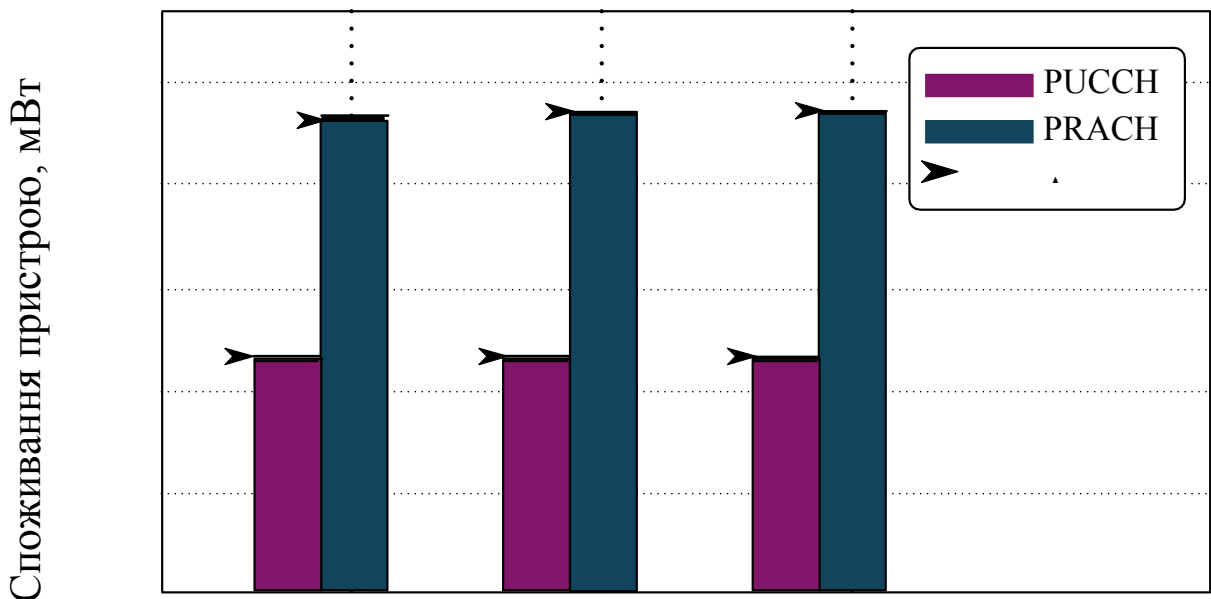


Рисунок 4.13 — Характеристики передачі даних малого об'єму

Носійні безпроводні пристрої є піком розвитку сучасної мініатюрної електроніки, дозволяючи вбудувати функціонал облаштування мобільного зв'язку, наприклад, в наручні години. На сьогодні ринок носійних пристроїв нестримно набирає оберти у міру того, як на ній виникає все більше виробників устаткування, розробників застосувань і творців відповідного контенту. Попри те, що окремі застосування ношеної електроніки з'явилися вже більше 20 років

тому (в основному, для спеціального застосування у вигляді елементів військової форми, окулярів нічного бачення, вбудованих камер і так далі), вони довго залишалися великогабаритними, незручними у використанні і недостатньо естетичними. У результаті широке поширення отримали лише безпроводні навушники.

## **Висновки з розділу**

1. В результаті запропонована модель стільникової мережі з конкурентним обслуговуванням великого числа користувачів, що враховує особливості протоколу множинного доступу, дозволяє вивчати показники ефективності функціонування системи зв'язки, що включають середнє число спроб передачі, а також вірогідність успішного встановлення з'єднання і затримку доступу в мережу.

2. Побудована модель мережі радіодоступу для обслуговування безлічі щільно розміщених ношених пристроїв, що враховує характер споживання ними енергії і особливості протоколу конкурентного доступу, застосовна для оцінки показників ефективності функціонування системи зв'язку і, зокрема, енергетичної ефективності передачі потокового трафіку користувачів.

## ВИСНОВКИ З РОБОТИ

1. Енергетичні системи стоять на порозі нової перехідної ери. Широкомасштабне впровадження ПРЕВ у розподілених енергетичних системах та потреба в ефективному використанні енергії вимагає загальносистемних інтегрованих підходів до мінімізації соціально-економічного та екологічного впливу енергетичних систем. У цьому відношенні сучасні технології, такі як IoT, можуть допомогти енергетичному сектору перетворитися з центрального ієрархічного ланцюга поставок до децентралізованої, розумної та оптимізованої системи.

2. Класифіковано різні варіанти використання Інтернету речей у кожному розділі ланцюга постачання енергії, від виробництва через енергетичні мережі до секторів кінцевого використання. Обговорюються переваги систем енергоменеджменту на основі IoT у підвищенні енергоефективності та інтеграції відновлюваної енергії та підсумовуються результати. Обговорюємо різні компоненти системи Інтернету речей, включаючи можливості комунікації та сенсорні технології щодо їх застосування в енергетичному секторі, наприклад, датчики температури, вологості, світла, швидкості, пасивного інфрачервоного випромінювання та наближення. Обговорюємо хмарні обчислення та платформи для аналізу даних, які є інструментами аналізу та візуалізації даних, які можна використовувати для різних розумних додатків в енергетичному секторі, від будівель до розумних міст.

3. Розглянуто застосування IoT в ланцюжку постачання енергії на різних рівнях, включаючи розумні міста, розумні мережі, розумні будівлі та інтелектуальний транспорт. Обговорено деякі з проблем застосування IoT в енергетичному секторі, включаючи проблему ідентифікації об'єктів, управління великими даними, проблеми з'єднання та невизначеність, інтеграцію підсистем, безпеку та конфіденційність, енергетичні вимоги систем IoT, стандартизацію та архітектурне проектування. Виділяємо деякі рішення для цих проблем, наприклад, блокчейн і зелений IoT як майбутні напрямки

досліджень. Проведено аналіз енергоефективності для режиму з'єднання M2M. Збільшення максимальної тривалості циклу опитування і періоду непостійного прийому DRX дозволяє досягти істотного приросту енергетичної ефективності терміналів.

## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Stearns, P.N. Reconceptualizing the Industrial Revolution. *J. Interdiscip. Hist.* **2011**, *42*, 442–443.
2. Mokyr, J. The second industrial revolution, 1870–1914. In *Storia dell'Economia Mondiale*; Citeseer; 1998; pp. 219–245. Available online: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.481.2996&rep=rep1&type=pdf> (accessed on 16 January 2020).
3. Jensen, M. The Modern Industrial Revolution, Exit, and the Failure of Internal Control Systems. *J. Financ.* **1993**, *48*, 831–880.
4. Kagermann, H.; Helbig, J.; Hellinger, A.; Wahlster, W. *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry*; Final Report of the Industrie 4.0 Working Group; Forschungsunion: Frankfurt/Main, Germany, 2013.
5. Witchalls, C.; Chambers, J. *The Internet of Things Business Index: A Quiet Revolution Gathers Pace*; The Economist Intelligence Unit: London, UK, 2013; pp. 58–66.
6. Datta, S.K.; Bonnet, C. MEC and IoT Based Automatic Agent Reconfiguration in Industry 4.0. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), Indore, India, 16–19 December 2018; pp. 1–5.
7. Shrouf, F.; Ordieres, J.; Miragliotta, G. Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. In Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Selangor Darul Ehsan, Malaysia, 9–12 December 2014; pp. 697–701.
8. Bandyopadhyay, D.; Sen, J. Internet of Things: Applications and Challenges in Technology and Standardization. *Wirel. Pers. Commun.* **2011**, *58*, 49–69.
9. International Energy Agency (IEA). Global Energy & CO<sub>2</sub> Status Report.

2019. Available online: <https://www.iea.org/geco/> (accessed on 27 September 2019).

10. Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC). Global Warning of 1.5 °C: Summary for Policymakers. 2018. Available online: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/> (accessed on 27 September 2019).

11. Zakeri, B.; Syri, S.; Rinne, S. Higher renewable energy integration into the existing energy system of Finland—Is there any maximum limit? *Energy* **2015**, *92*, 244–259.

12. Connolly, D.; Lund, H.; Mathiesen, B. Smart Energy Europe: The technical and economic impact of one potential 100% renewable energy scenario for the European Union. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *60*, 1634–1653.

13. Grubler, A.; Wilson, C.; Bento, N.; Boza-Kiss, B.; Krey, V.; McCollum, D.L.; Rao, N.D.; Riahi, K.; Rogelj, J.; De Stercke, S.; et al. A low energy demand scenario for meeting the 1.5 C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nat. Energy* **2018**, *3*, 515–527.

14. UN. *Special Edition: Progress towards the Sustainable Development Goals*; UN: New York, NY, USA, 2019.

15. Tan, Y.S.; Ng, Y.T.; Low, J.S.C. Internet-of-things enabled real-time monitoring of energy efficiency on manufacturing shop floors. *Procedia CIRP* **2017**, *61*, 376–381.

16. Bhattacharyya, S.C. *Energy Economics: Concepts, Issues, Markets and Governance*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011.

17. Tamilselvan, K.; Thangaraj, P. Pods—A novel intelligent energy efficient and dynamic frequency scalings for multi-core embedded architectures in an IoT environment. *Microprocess. Microsyst.* **2020**, *72*, 102907.

18. Zhou, K.; Yang, S.; Shao, Z. Energy Internet: The business perspective. *Appl. Energy* **2016**, *178*, 212–222.

19. Motlagh, N.H.; Khajavi, S.H.; Jaribion, A.; Holmstrom, J. An IoT-based automation system for older homes: A use case for lighting system. In Proceedings of the 2018 IEEE 11th Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA), Paris, France, 19–22 November 2018; pp. 1–6.

20. Da Xu, L.; He, W.; Li, S. Internet of Things in Industries: A Survey. *IEEE Trans. Ind. Inform.* **2014**, *10*, 2233–2243.
21. Talari, S.; Shafie-Khah, M.; Siano, P.; Loia, V.; Tommasetti, A.; Catalão, J. A review of smart cities based on the internet of things concept. *Energies* **2017**, *10*, 421.
22. Ibarra-Esquer, J.; González-Navarro, F.; Flores-Rios, B.; Burtseva, L.; Astorga-Vargas, M. Tracking the evolution of the internet of things concept across different application domains. *Sensors* **2017**, *17*, 1379.
23. Swan, M. Sensor mania! the internet of things, wearable computing, objective metrics, and the quantified self 2.0. *J. Sens. Actuator Netw.* **2012**, *1*, 217–253.
24. Gupta, A.; Jha, R.K. A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies. *IEEE Access* **2015**, *3*, 1206–1232.
25. Stojkoska, B.L.R.; Trivodaliev, K.V. A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions. *J. Clean. Prod.* **2017**, *140*, 1454–1464.
26. Hui, H.; Ding, Y.; Shi, Q.; Li, F.; Song, Y.; Yan, J. 5G network-based Internet of Things for demand response in smart grid: A survey on application potential. *Appl. Energy* **2020**, *257*, 113972.
27. Petros, anu, D.M.; Cařrut,as, u, G.; Cařrut,as, u, N.L.; Pırjan, A. A Review of the Recent Developments in Integrating Machine Learning Models with Sensor Devices in the Smart Buildings Sector with a View to Attaining Enhanced Sensing, Energy Efficiency, and Optimal Building Management. *Energies* **2019**, *12*, 4745.
28. Luo, X.G.; Zhang, H.B.; Zhang, Z.L.; Yu, Y.; Li, K. A New Framework of Intelligent Public Transportation System Based on the Internet of Things. *IEEE Access* **2019**, *7*, 55290–55304.
29. Khatua, P.K.; Ramachandaramurthy, V.K.; Kasinathan, P.; Yong, J.Y.; Pasupuleti, J.; Rajagopalan, A. Application and Assessment of Internet of Things toward the Sustainability of Energy Systems: Challenges and Issues. *Sustain. Cities Soc.* **2019**, 101957.
30. Haseeb, K.; Almogren, A.; Islam, N.; Ud Din, I.; Jan, Z. An Energy-

Efficient and Secure Routing Protocol for Intrusion Avoidance in IoT-Based WSN. *Energies* **2019**, *12*, 4174.

31. Zouinkhi, A.; Ayadi, H.; Val, T.; Boussaid, B.; Abdelkrim, M.N. Auto-management of energy in IoT networks. *Int. J. Commun. Syst.* **2019**, *33*, e4168.

32. Höller, J.; Tsiatsis, V.; Mulligan, C.; Avesand, S.; Karnouskos, S.; Boyle, D. *From Machine-to-Machine to the Internet of Things: Introduction to a New Age of Intelligence*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2014.

33. Atzori, L.; Iera, A.; Morabito, G. The Internet of Things: A survey. *Comput. Netw.* **2010**, *54*, 2787–2805.

34. Hui, T.K.; Sherratt, R.S.; Sánchez, D.D. Major requirements for building Smart Homes in Smart Cities based on Internet of Things technologies. *Future Gener. Comput. Syst.* **2017**, *76*, 358–369.

35. Evans, D. The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet is Changing Everything. *CISCO White Pap.* **2011**, *1*, 1–11.

36. Motlagh, N.H.; Bagaa, M.; Taleb, T. Energy and Delay Aware Task Assignment Mechanism for UAV-Based IoT Platform. *IEEE Internet Things J.* **2019**, *6*, 6523–6536.

37. Ramamurthy, A.; Jain, P. *The Internet of Things in the Power Sector: Opportunities in Asia and the Pacific*; Asian Development Bank: Mandaluyong, Philippines, 2017.

38. Jia, M.; Komeily, A.; Wang, Y.; Srinivasan, R.S. Adopting Internet of Things for the development of smart buildings: A review of enabling technologies and applications. *Autom. Constr.* **2019**, *101*, 111–126.

39. Karunarathne, G.R.; Kulawansa, K.T.; Firdhous, M.M. Wireless Communication Technologies in Internet of Things: A Critical Evaluation. In Proceedings of the 2018 International Conference on Intelligent and Innovative Computing Applications (ICONIC), Plaine Magnien, Mauritius, 6–7 December 2018; pp. 1–5.

40. Li, S.; Da Xu, L.; Zhao, S. 5G Internet of Things: A survey. *J. Ind. Inf. Integr.* **2018**, *10*, 1–9.

41. Watson Internet of Things. Securely Connect with Watson IoT Platform. 2019. Available online: <https://www.ibm.com/internet-of-things/solutions/iot-platform/watson-iot-platform> (accessed on 15 October 2019).
42. Kelly, S.D.T.; Suryadevara, N.K.; Mukhopadhyay, S.C. Towards the Implementation of IoT for Environmental Condition Monitoring in Homes. *IEEE Sens. J.* **2013**, *13*, 3846–3853.
43. Newark Element. Smart Sensor Technology for the IoT. 2018. Available online: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/features/articles/33212> (accessed on 25 December 2019).
44. Rault, T.; Bouabdallah, A.; Challal, Y. Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey. *Comput. Netw.* **2014**, *67*, 104–122.
45. Di Francia, G. The development of sensor applications in the sectors of energy and environment in Italy, 1976–2015. *Sensors* **2017**, *17*, 793.
46. ITFirms Co. 8 Types of Sensors that Coalesce Perfectly with an IoT App. 2018. Available online: <https://www.itfirms.co/8-types-of-sensors-that-coalesce-perfectly-with-an-iot-app/> (accessed on 27 September 2019).
47. Morris, A.S.; Langari, R. Level Measurement. In *Measurement and Instrumentation*, 2nd ed.; Morris, A.S., Langari, R., Eds.; Academic Press: Boston, MA, USA, 2016; Chapter 17, pp. 531–545.
48. Pérez-Lombard, L.; Ortiz, J.; Pout, C. A review on buildings energy consumption information. *Energy Build.* **2008**, *40*, 394–398.
49. Moram, M. Lighting Up Lives with Energy Efficient Lighting. 2012. Available online: <http://aglobalvillage.org/journal/issue7/waste/lightinguplives/> (accessed on 27 December 2019).
50. Riyanto, I.; Margatama, L.; Hakim, H.; Hindarto, D. Motion Sensor Application on Building Lighting Installation for Energy Saving and Carbon Reduction Joint Crediting Mechanism. *Appl. Syst. Innov.* **2018**, *1*, 23.
51. Kim, W.; Mechitov, K.; Choi, J.; Ham, S. On target tracking with binary proximity sensors. In Proceedings of the IPSN 2005—Fourth International

Symposium on Information Processing in Sensor Networks, Los Angeles, CA, USA, 25–27 April 2005; pp. 301–308.

52. Pepperl+Fuchs. Sensors for Wind Energy Applications. 2019. Available online: <https://www.pepperl-fuchs.com/global/en/15351.htm> (accessed on 27 December 2019).

53. Kececi, E.F. Actuators. In *Mechatronic Components*; Kececi, E.F., Ed.; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2019; Chapter 11, pp. 145–154.

54. Nesbitt, B. *Handbook of Valves and Actuators: Valves Manual International*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2011.

55. Ray, R. Valves and Actuators. *Power Eng.* **2014**, *118*, 4862.

56. Blanco, J.; García, A.; Morenas, J. Design and Implementation of a Wireless Sensor and Actuator Network to Support the Intelligent Control of Efficient Energy Usage. *Sensors* **2018**, *18*, 1892. [PubMed]

57. Martínez-Cruz.; Eugenio, C. Manufacturing low-cost wifi-based electric energy meter. In Proceedings of the 2014 IEEE Central America and Panama Convention (CONCAPAN), Panama City, Panama, 12–14 November 2014; pp. 1–6.

58. Rodriguez-Diaz, E.; Vasquez, J.C.; Guerrero, J.M. Intelligent DC Homes in Future Sustainable Energy Systems: When efficiency and intelligence work together. *IEEE Consum. Electron. Mag.* **2016**, *5*, 74–80.

59. Karthika, A.; Valli, K.R.; Srinidhi, R.; Vasanth, K. Automation Of Energy Meter And Building A Network Using Iot. In Proceedings of the 2019 5th International Conference on Advanced Computing Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, India, 15–16 March 2019; pp. 339–341.

60. Lee, T.; Jeon, S.; Kang, D.; Park, L.W.; Park, S. Design and implementation of intelligent HVAC system based on IoT and Big data platform. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas, NV, USA, 8–10 January 2017; pp. 398–399.

61. Lee, Y.; Hsiao, W.; Huang, C.; Chou, S.T. An integrated cloud-based smart home management system with community hierarchy. *IEEE Trans. Consum.*

*Electron.* **2016**, *62*, 1–9.

62. Kabalci, Y.; Kabalci, E.; Padmanaban, S.; Holm-Nielsen, J.B.; Blaabjerg, F. Internet of Things applications as energy internet in Smart Grids and Smart Environments. *Electronics* **2019**, *8*, 972.

63. Jain, S.; Pradish, M.; Paventhan, A.; Saravanan, M.; Das, A. Smart Energy Metering Using LPWAN IoT Technology. In *ISGW 2017: Compendium of Technical Papers*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018; pp. 19–28.

64. Lee, J.; Su, Y.; Shen, C. A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. In Proceedings of the IECON 2007—33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Taipei, Taiwan, 5–8 November 2007; pp. 46–51.

65. Choi, M.; Park, W.; Lee, I. Smart office energy management system using bluetooth low energy based beacons and a mobile app. In Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas, NV, USA, 9–12 January 2015; pp. 501–502.

66. Collotta, M.; Pau, G. A Novel Energy Management Approach for Smart Homes Using Bluetooth Low Energy. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **2015**, *33*, 2988–2996.

67. Collotta, M.; Pau, G. A solution based on bluetooth low energy for smart home energy management. *Energies* **2015**, *8*, 11916–11938.

68. Craig, W.C. *Zigbee: Wireless Control that Simply Works*; Zigbee Alliance ZigBee Alliance: Davis, CA, USA, 2004.

69. Froiz-Míguez, I.; Fernández-Caramés, T.; Fraga-Lamas, P.; Castedo, L. Design, implementation and practical evaluation of an IoT home automation system for fog computing applications based on MQTT and ZigBee-WiFi sensor nodes. *Sensors* **2018**, *18*, 2660.

70. Erol-Kantarci, M.; Mouftah, H.T. Wireless Sensor Networks for Cost-Efficient Residential Energy Management in the Smart Grid. *IEEE Trans. Smart Grid* **2011**, *2*, 314–325.

71. Han, D.; Lim, J. Smart home energy management system using IEEE

802.15.4 and zigbee. *IEEE Trans. Consum. Electron.* **2010**, *56*, 1403–1410.

72. Han, J.; Choi, C.; Park, W.; Lee, I.; Kim, S. Smart home energy management system including renewable energy based on ZigBee and PLC. In Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas, NV, USA, 4–6 January 2014; pp. 544–545.

73. Batista, N.; Melício, R.; Matias, J.; Catalão, J. Photovoltaic and wind energy systems monitoring and building/home energy management using ZigBee devices within a smart grid. *Energy* **2013**, *49*, 306–315.

74. Augustin, A.; Yi, J.; Clausen, T.; Townsley, W. A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors* **2016**, *16*, 1466.

75. Mataloto, B.; Ferreira, J.C.; Cruz, N. LoBEMS—IoT for Building and Energy Management Systems. *Electronics* **2019**, *8*, 763.

76. Javed, A.; Larijani, H.; Wixted, A. Improving Energy Consumption of a Commercial Building with IoT and Machine Learning. *IT Prof.* **2018**, *20*, 30–38.

77. Ferreira, J.C.; Afonso, J.A.; Monteiro, V.; Afonso, J.L. An Energy Management Platform for Public Buildings. *Electronics* **2018**, *7*, 294.

78. Gomez, C.; Veras, J.C.; Vidal, R.; Casals, L.; Paradells, J. A Sigfox energy consumption model. *Sensors* **2019**, *19*, 681.

79. Piti, A.; Verticale, G.; Rottondi, C.; Capone, A.; Lo Schiavo, L. The role of smart meters in enabling real-time energy services for households: The Italian case. *Energies* **2017**, *10*, 199.

80. Mekki, K.; Bajic, E.; Chaxel, F.; Meyer, F. Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), Athens, Greece, 19–23 March 2018; pp. 197–202.

81. Nair, V.; Litjens, R.; Zhang, H. Optimisation of NB-IoT deployment for smart energy distribution networks. *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.* **2019**, *2019*, 186.

82. Pennacchioni, M.; Di Benedette, M.; Pecorella, T.; Carlini, C.; Obino, P.

NB-IoT system deployment for smart metering: Evaluation of coverage and capacity performances. In Proceedings of the 2017 AEIT International Annual Conference, Cagliari, Italy, 20–22 September 2017; pp. 1–6.

83. Li, Y.; Cheng, X.; Cao, Y.; Wang, D.; Yang, L. Smart Choice for the Smart Grid: Narrowband Internet of Things (NB-IoT). *IEEE Internet Things J.* **2018**, *5*, 1505–1515.

84. Shariatmadari, H.; Ratasuk, R.; Iraj, S.; Laya, A.; Taleb, T.; Jäntti, R.; Ghosh, A. Machine-type communications: Current status and future perspectives toward 5G systems. *IEEE Commun. Mag.* **2015**, *53*, 10–17.

85. Lauridsen, M.; Kovacs, I.Z.; Mogensen, P.; Sorensen, M.; Holst, S. Coverage and Capacity Analysis of LTE-M and NB-IoT in a Rural Area. In Proceedings of the 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Montreal, QC, Canada, 18–21 September 2016; pp. 1–5.

86. Deshpande, K.V.; Rajesh, A. Investigation on imcp based clustering in lte-m communication for smart metering applications. *Eng. Sci. Technol. Int. J.* **2017**, *20*, 944–955.

87. Emmanuel, M.; Rayudu, R. Communication technologies for smart grid applications: A survey. *J. Netw. Comput. Appl.* **2016**, *74*, 133–148.

88. Webb, W. Weightless: The technology to finally realise the M2M vision. *Int. J. Interdiscip. Telecommun. Netw. (IJITN)* **2012**, *4*, 30–37.

89. Sethi, P.; Sarangi, S.R. Internet of things: Architectures, protocols, and applications. *J. Electr. Comput. Eng.* **2017**, *2017*.

90. Wei, J.; Han, J.; Cao, S. Satellite IoT Edge Intelligent Computing: A Research on Architecture. *Electronics* **2019**, *8*, 1247.

91. Sohraby, K.; Minoli, D.; Occhiogrosso, B.; Wang, W. A review of wireless and satellite-based m2m/iot services in support of smart grids. *Mob. Networks Appl.* **2018**, *23*, 881–895.

92. De Sanctis, M.; Cianca, E.; Araniti, G.; Bisio, I.; Prasad, R. Satellite Communications Supporting Internet of Remote Things. *IEEE Internet Things J.* **2016**, *3*, 113–123.

93. GSMA. *Security Features of LTE-M and NB-IoT Networks*; Technical Report; GSMA: London, UK, 2019.
94. Sigfox. *Make Things Come Alive in a Secure Way*; Technical Report; Sigfox: Labège, France, 2017.
95. Sanchez-Iborra, R.; Cano, M.D. State of the art in LP-WAN solutions for industrial IoT services. *Sensors* **2016**, *16*, 708.
96. Siekkinen, M.; Hiienkari, M.; Nurminen, J.K.; Nieminen, J. How low energy is bluetooth low energy? comparative measurements with zigbee/802.15. 4. In Proceedings of the 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference workshops (WCNCW), Paris, France, 1 April 2012; pp. 232–237.
97. Lee, J.S.; Dong, M.F.; Sun, Y.H. A preliminary study of low power wireless technologies: ZigBee and Bluetooth low energy. In Proceedings of the 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Auckland, New Zealand, 15–17 June 2015; pp. 135–139.
98. Fraire, J.A.; Céspedes, S.; Accettura, N. Direct-To-Satellite IoT-A Survey of the State of the Art and Future Research Perspectives. In Proceedings of the 2019 International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless, Luxembourg, 1–3 October 2019; pp. 241–258.
99. Jaribion, A.; Khajavi, S.H.; Hossein Motlagh, N.; Holmström, J. [WiP] A Novel Method for Big Data Analytics and Summarization Based on Fuzzy Similarity Measure. In Proceedings of the 2018 IEEE 11th Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA), Paris, France, 19–22 November 2018; pp. 221–226.
100. Chen, M.; Mao, S.; Liu, Y. Big Data: A Survey. *Mob. Netw. Appl.* **2014**, *19*, 171–209.
101. Stojmenovic, I. Machine-to-Machine Communications With In-Network Data Aggregation, Processing, and Actuation for Large-Scale Cyber-Physical Systems. *IEEE Internet Things J.* **2014**, *1*, 122–128.
102. Chen, H.; Chiang, R.H.; Storey, V.C. Business intelligence and analytics: From big data to big impact. *MIS Q. Manag. Inf. Syst.* **2012**, *36*, 1165–1188.

103. Intel IT Centre. *Big Data Analytics: Intel's IT Manager Survey on How Organizations Are Using Big Data*; Technical Report; Intel IT Centre: Santa Clara, CA, USA, 2012.
104. Stergiou, C.; Psannis, K.E.; Kim, B.G.; Gupta, B. Secure integration of IoT and Cloud Computing. *Future Gener. Comput. Syst.* **2018**, *78*, 964–975.
105. Josep, A.D.; Katz, R.; Konwinski, A.; Gunho, L.; Patterson, D.; Rabkin, A. A view of cloud computing. *Commun. ACM* **2010**, *53*.
106. Ji, C.; Li, Y.; Qiu, W.; Awada, U.; Li, K. Big Data Processing in Cloud Computing Environments. In Proceedings of the 2012 12th International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms and Networks, San Marcos, TX, USA, 13–15 December 2012; pp. 17–23.
107. Foster, I.; Zhao, Y.; Raicu, I.; Lu, S. Cloud Computing and Grid Computing 360-Degree Compared. In Proceedings of the 2008 Grid Computing Environments Workshop, Austin, TX, USA, 16 November 2008; pp. 1–10.
108. Hamdaqa, M.; Tahvildari, L. *Cloud Computing Uncovered: A Research Landscape*; Advances in Computers; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2012; Volume 86, pp. 41–85.
109. Khan, Z.; Anjum, A.; Kiani, S.L. Cloud Based Big Data Analytics for Smart Future Cities. In Proceedings of the 2013 IEEE/ACM 6th International Conference on Utility and Cloud Computing, Dresden, Germany, 9–12 December 2013; pp. 381–386.
110. Mahmud, R.; Kotagiri, R.; Buyya, R. Fog computing: A taxonomy, survey and future directions. In *Internet of Everything*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018; pp. 103–130.
111. Verma, M.; Bhardwaj, N.; Yadav, A.K. Real time efficient scheduling algorithm for load balancing in fog computing environment. *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.* **2016**, *8*, 1–10.
112. Atlam, H.F.; Walters, R.J.; Wills, G.B. Fog computing and the internet of things: A review. *Big Data Cogn. Comput.* **2018**, *2*, 10.
113. Bhardwaj, A. *Leveraging the Internet of Things and Analytics for Smart*

*Energy Management*; TATA Consultancy Services: Mumbai, India, 2015.

114. Sigfox, Inc. Utilities & Energy. 2019. Available online: <https://www.sigfox.com/en/utilities-energy/> (accessed on 27 September 2019).

115. Immelt, J.R. *The Future of Electricity Is Digital*; Technical Report; General Electric: Boston, MA, USA, 2015.

116. Al-Ali, A. Internet of things role in the renewable energy resources. *Energy Procedia* **2016**, *100*, 34–38.

117. Karnouskos, S. The cooperative internet of things enabled smart grid. In Proceedings of the 14th IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE2010), Braunschweig, Germany, 7–10 June 2010; pp. 7–10.

118. Lagerspetz, E.; Motlagh, N.H.; Zaidan, M.A.; Fung, P.L.; Mineraud, J.; Varjonen, S.; Siekkinen, M.; Nurmi, P.; Matsumi, Y.; Tarkoma, S.; et al. MegaSense: Feasibility of Low-Cost Sensors for Pollution Hot-spot Detection. In Proceedings of the 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Helsinki-Espoo, Finland, 23–25 July 2019.

119. Ejaz, W.; Naeem, M.; Shahid, A.; Anpalagan, A.; Jo, M. Efficient energy management for the internet of things in smart cities. *IEEE Commun. Mag.* **2017**, *55*, 84–91.

120. Mohanty, S.P. Everything you wanted to know about smart cities: The Internet of things is the backbone. *IEEE Consum. Electron. Mag.* **2016**, *5*, 60–70.

121. Hossain, M.; Madlool, N.; Rahim, N.; Selvaraj, J.; Pandey, A.; Khan, A.F. Role of smart grid in renewable energy: An overview. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *60*, 1168–1184.

122. Karnouskos, S.; Colombo, A.W.; Lastra, J.L.M.; Popescu, C. Towards the energy efficient future factory. In Proceedings of the 2009 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics, Cardiff, UK, 23–26 June 2009; pp. 367–371.

123. M. Avci, M.E.; Asfour, S. Residential HVAC load control strategy in real-time electricity pricing environment. In Proceedings of the 2012 IEEE Conference on Energytech, Cleveland, OH, USA, 29–31 May 2012; pp. 1–6.

124. Vakiloroyaya, V.; Samali, B.; Fakhar, A.; Pishghadam, K. A review of

different strategies for HVAC energy saving. *Energy Convers. Manag.* **2014**, *77*, 738–754.

125. Arasteh, H.; Hosseinnezhad, V.; Loia, V.; Tommasetti, A.; Troisi, O.; Shafie-khah, M.; Siano, P. IoT-based smart cities: A survey. In Proceedings of the 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, Italy, 7–10 June 2016; pp. 1–6.

126. Lee, C.; Zhang, S. Development of an Industrial Internet of Things Suite for Smart Factory towards Re-industrialization in Hong Kong. In Proceedings of the 6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation, Manchester, UK, 10–11 November 2016.

127. Reinfurt, L.; Falkenthal, M.; Breitenbücher, U.; Leymann, F. Applying IoT Patterns to Smart Factory Systems. In Proceedings of the 2017 Advanced Summer School on Service Oriented Computing (Summer SOC), Hersonissos, Greece, 25–30 June 2017.

128. Kaur, N.; Sood, S.K. An energy-efficient architecture for the Internet of Things (IoT). *IEEE Syst. J.* **2015**, *11*, 796–805.

129. Shaikh, F.K.; Zeadally, S.; Exposito, E. Enabling technologies for green internet of things. *IEEE Syst. J.* **2015**, *11*, 983–994.

130. Lin, Y.; Chou, Z.; Yu, C.; Jan, R. Optimal and Maximized Configurable Power Saving Protocols for Corona-Based Wireless Sensor Networks. *IEEE Trans. Mob. Comput.* **2015**, *14*, 2544–2559.

131. Anastasi, G.; Conti, M.; Di Francesco, M.; Passarella, A. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Netw.* **2009**, *7*, 537–568.

132. Shakerighadi, B.; Anvari-Moghaddam, A.; Vasquez, J.C.; Guerrero, J.M. Internet of Things for Modern Energy Systems: State-of-the-Art, Challenges, and Open Issues. *Energies* **2018**, *11*, 1252.

133. Anjana, K.; Shaji, R. A review on the features and technologies for energy efficiency of smart grid. *Int. J. Energy Res.* **2018**, *42*, 936–952.

134. Boroojeni, K.; Amini, M.H.; Nejadpak, A.; Dragic'evic', T.; Iyengar, S.S.; Blaabjerg, F. A Novel Cloud-Based Platform for Implementation of Oblivious

Power Routing for Clusters of Microgrids. *IEEE Access* **2017**, *5*, 607–619.

135. Kounev, V.; Tipper, D.; Levesque, M.; Grainger, B.M.; Mcdermott, T.; Reed, G.F. A microgrid co-simulation framework. In Proceedings of the 2015 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), Seattle, WA, USA, 13 April 2015; pp. 1–6.

136. Wong, T.Y.; Shum, C.; Lau, W.H.; Chung, S.; Tsang, K.F.; Tse, C. Modeling and co-simulation of IEC61850-based microgrid protection. In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Sydney, Australia, 6–9 November 2016; pp. 582–587.

137. Porambage, P.; Ylianttila, M.; Schmitt, C.; Kumar, P.; Gurtov, A.; Vasilakos, A.V. The quest for privacy in the internet of things. *IEEE Cloud Comput.* **2016**, *3*, 36–45.

138. Chow, R. The Last Mile for IoT Privacy. *IEEE Secur. Priv.* **2017**, *15*, 73–76.

139. Jayaraman, P.P.; Yang, X.; Yavari, A.; Georgakopoulos, D.; Yi, X. Privacy preserving Internet of Things: From privacy techniques to a blueprint architecture and efficient implementation. *Future Gener. Comput. Syst.* **2017**, *76*, 540–549.

140. Roman, R.; Najera, P.; Lopez, J. Securing the internet of things. *Computer* **2011**, *44*, 51–58.

141. Fhom, H.S.; Kuntze, N.; Rudolph, C.; Cupelli, M.; Liu, J.; Monti, A. A user-centric privacy manager for future energy systems. In Proceedings of the 2010 International Conference on Power System Technology, Hangzhou, China, 24–28 October 2010; pp. 1–7.

142. Dorri, A.; Kanhere, S.S.; Jurdak, R.; Gauravaram, P. Blockchain for IoT security and privacy: The case study of a smart home. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), Kona, HI, USA, 13–17 March 2017; pp. 618–623.

143. Poyner, I.; Sherratt, R.S. Privacy and security of consumer IoT devices for the pervasive monitoring of vulnerable people. In Proceedings of the Living in the

Internet of Things: Cybersecurity of the IoT—2018, London, UK, 28–29 March 2018; pp. 1–5.

144. Li, Z.; Shahidehpour, M.; Aminifar, F. Cybersecurity in distributed power systems. *Proc. IEEE* **2017**, *105*, 1367–1388.

145. Song, T.; Li, R.; Mei, B.; Yu, J.; Xing, X.; Cheng, X. A privacy preserving communication protocol for IoT applications in smart homes. *IEEE Internet Things J.* **2017**, *4*, 1844–1852.

146. Roman, R.; Lopez, J. Security in the distributed internet of things. In Proceedings of the 2012 International Conference on Trusted Systems, London, UK, 17–18 December 2012; pp. 65–66.

147. Meddeb, A. Internet of things standards: Who stands out from the crowd? *IEEE Commun. Mag.* **2016**, *54*, 40–47.

148. Banafa, A. IoT Standardization and Implementation Challenges. 2016. Available online: <https://iot.ieee.org/newsletter/july-2016/iot-standardization-and-implementation-challenges.html> (accessed on 15 October 2021).

149. Chen, S.; Xu, H.; Liu, D.; Hu, B.; Wang, H. A Vision of IoT: Applications, Challenges, and Opportunities With China Perspective. *IEEE Internet Things J.* **2014**, *1*, 349–359.

150. Al-Qaseemi, S.A.; Almulhim, H.A.; Almulhim, M.F.; Chaudhry, S.R. IoT architecture challenges and issues: Lack of standardization. In Proceedings of the 2016 Future Technologies Conference (FTC), San Francisco, CA, USA, 6–7 December 2016; pp. 731–738.

151. Kshetri, N. Can Blockchain Strengthen the Internet of Things? *IT Prof.* **2017**, *19*, 68–72.

152. Dorri, A.; Kanhere, S.S.; Jurdak, R. Towards an optimized blockchain for IoT. In Proceedings of the Second International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation, Pittsburgh, PA, USA, 18–21 April 2017; pp. 173–178.

153. Huh, S.; Cho, S.; Kim, S. Managing IoT devices using blockchain platform. In Proceedings of the 2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Bongpyeong, Korea, 19–22 February 2017;

pp. 464–467.

154. Alladi, T.; Chamola, V.; Rodrigues, J.J.; Kozlov, S.A. Blockchain in Smart Grids: A Review on Different Use Cases. *Sensors* **2019**, *19*, 4862.

155. Christidis, K.; Devetsikiotis, M. Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things. *IEEE Access* **2016**, *4*, 2292–2303.

156. Korpela, K.; Hallikas, J.; Dahlberg, T. Digital Supply Chain Transformation toward Blockchain Integration. In Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences, Waikoloa, HI, USA, 4–7 January 2017.

157. Hawlitschek, F.; Notheisen, B.; Teubner, T. The limits of trust-free systems: A literature review on blockchain technology and trust in the sharing economy. *Electron. Commer. Res. Appl.* **2018**, *29*, 50–63.

158. Conoscenti, M.; Vetro, A.; De Martin, J.C. Blockchain for the Internet of Things: A systematic literature review. In Proceedings of the 2016 IEEE/ACS 13th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA), Agadir, Morocco, 29 November–2 December 2016; pp. 1–6.

159. Boudguiga, A.; Bouzerna, N.; Granboulan, L.; Olivereau, A.; Quesnel, F.; Roger, A.; Sirdey, R. Towards better availability and accountability for iot updates by means of a blockchain. In Proceedings of the 2017 IEEE European Symposium on Security and Privacy Workshops (EuroS&PW), Paris, France, 26–28 April 2017; pp. 50–58.

160. Samaniego, M.; Deters, R. Blockchain as a Service for IoT. In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData), Chengdu, China, 15–18 December 2016; pp. 433–436.

161. Zhu, C.; Leung, V.C.M.; Shu, L.; Ngai, E.C. Green Internet of Things for Smart World. *IEEE Access* **2015**, *3*, 2151–2162.

162. Abedin, S.F.; Alam, M.G.R.; Haw, R.; Hong, C.S. A system model for energy efficient green-IoT network. In Proceedings of the 2015 International

Conference on Information Networking (ICOIN), Siem Reap, Cambodia, 12–14 January 2015; pp. 177–182.

163. Nguyen, D.; Dow, C.; Hwang, S. An Efficient Traffic Congestion Monitoring System on Internet of Vehicles. *Wirel. Commun. Mob. Comput.* **2018**, *2018*.

164. Namboodiri, V.; Gao, L. Energy-Aware Tag Anticollision Protocols for RFID Systems. *IEEE Trans. Mob. Comput.* **2010**, *9*, 44–59.

165. Li, T.; Wu, S.S.; Chen, S.; Yang, M.C.K. Generalized Energy-Efficient Algorithms for the RFID Estimation Problem. *IEEE/ACM Trans. Netw.* **2012**, *20*, 1978–1990.

166. Xu, X.; Gu, L.; Wang, J.; Xing, G.; Cheung, S. Read More with Less: An Adaptive Approach to Energy-Efficient RFID Systems. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* **2011**, *29*, 1684–1697.

167. Klair, D.K.; Chin, K.; Raad, R. A Survey and Tutorial of RFID Anti-Collision Protocols. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* **2010**, *12*, 400–421.

168. Lee, C.; Kim, D.; Kim, J. An Energy Efficient Active RFID Protocol to Avoid Overhearing Problem. *IEEE Sens. J.* **2014**, *14*, 15–24.

# Дипломна робота

магістра із спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

- тема роботи:** **Технологія змінного енергоспоживання для пристроїв IoT**
- Студент:** **Любарський Михайло Володимирович, гр. ТРМ-20-1**
- Керівник** **к.т.н., доц. Макаришкін Денис Анатолійович**
- Мета роботи:** визначення факторів застосування технології 5G на прикладі застосування M2M з'єднань за забезпечення задачі зменшення енерговитрат для передачі інформації з метою зменшення апаратних витрат та покращення виявлення завад в каналах при передачі інформаційних посилок
- Об'єкт дослідження:** технологія передачі інформації із застосуванням M2M пристроїв
- Предмет дослідження:** теоретичний аналіз стану мережі передачі інформації стандарту 5G, моделі підключення до вузлів мережі, моделі формування сигналів, практичне зображення за допомогою інструментів візуального моделювання

## ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Проаналізувати існуючі тенденції та апаратні рішення щодо впровадження технології 5G, що мають місце на сучасному ринку телекомунікаційних послуг.
2. Розглянути різні варіанти використання Інтернету речей у кожному розділі ланцюга постачання енергії. Обговорити різні компоненти системи Інтернету речей.
3. Розглянути застосування IoT в ланцюжку постачання енергії на різних рівнях на прикладі M2M з'єднання.

### **Науково-практичне значення отриманих результатів**

На основі проведених досліджень, представлено оцінку стійкості мережі до забезпечення одночасності підключення ряду пристроїв між собою. Показано особливості взаємодії та розроблено практичні рекомендації щодо впровадження.

# СТАН ЗАДАЧІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПРИБОРАМИ ІОТ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ

Світовий попит на енергію зростає. На основі порядку денного Цілей сталого розвитку ООН [14], енергоефективність є одним із ключових чинників сталого розвитку. Більше того, енергоефективність пропонує економічні вигоди в довгостроковій перспективі за рахунок зниження вартості імпорту/постачання палива, виробництва енергії та скорочення викидів у енергетичному секторі. Для підвищення енергоефективності та більш оптимального управління енергією ефективний аналіз даних в реальному часі в ланцюжку постачання енергії відіграє ключову роль.

Ланцюжок постачання енергії, від видобутку ресурсів до доставки їх у корисній формі кінцевим споживачам, включає три основні частини: (i) постачання енергії, включаючи процеси нафтопереробного заводу; (ii) процеси перетворення енергії, включаючи передачу та розподіл (T&D) енергоносіїв; та (iii) сторона потреби в енергії, яка включає використання енергії в будівлях, транспортному секторі та промисловості

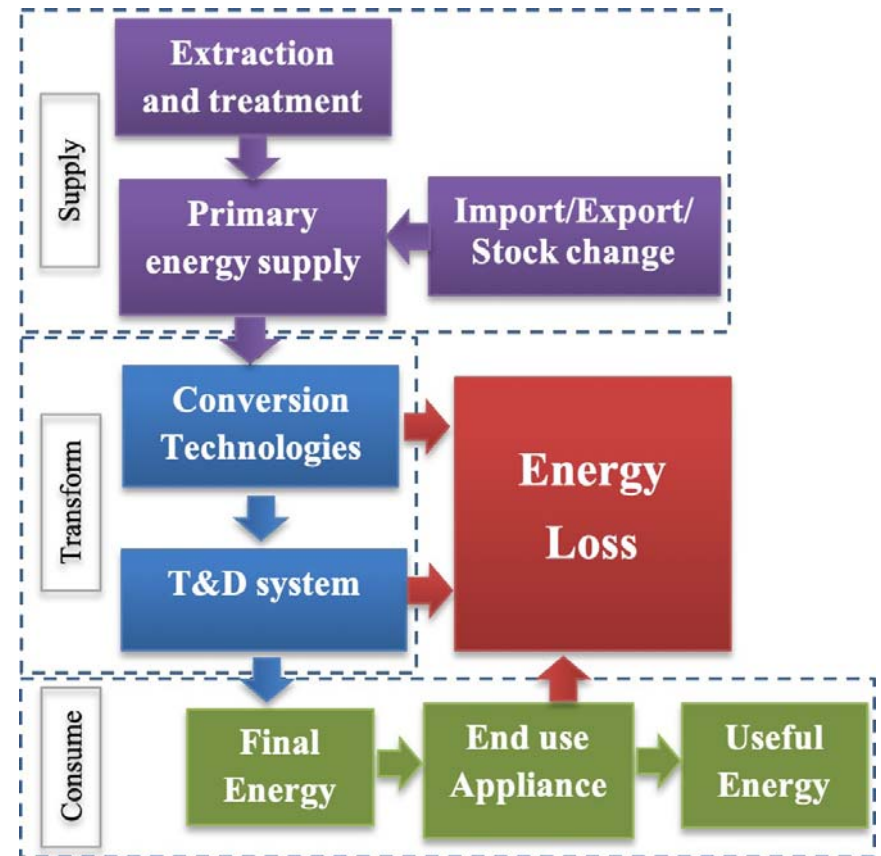


Рисунок 1 – Ланцюжок постачання енергії (згідно звіту ООН)

# ТЕХНОЛОГІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІОТ

ІоТ — це парадигма, в якій об'єкти та елементи системи, оснащені датчиками, виконавчими механізмами та процесорами, можуть спілкуватися один з одним для надання значущих послуг

## 1 Сенсорні пристрої

Датчики є ключовими драйверами ІоТ. Датчики забезпечують розумну систему управління енергією та забезпечують оптимізацію енергії в режимі реального часу.

## 2 Комунікаційні технології

Системи бездротового зв'язку відіграють головну роль в активації ІоТ.

### Бездротові технології для додатків ІоТ в енергетичному секторі

Широко досліджуються бездротові технології малого радіусу дії, наприклад **Wireless Fidelity (Wi-Fi)**. Через високі вимоги до потужності Wi-Fi ця технологія не є найкращим рішенням в енергетиці. Технології зв'язку малопотужної глобальної мережі (**LPWAN**), такі як **вузькосмуговий ІоТ (NB-IoT)**; **ZigBee**; технології **Bluetooth** з низьким споживанням енергії (**BLE**); а також новітні технології **LPWAN**, такі як **LoRa**, **Sigfox** та **LTE-M**, що працюють у неліцензійному діапазоні.

# ПОРІВНЯННЯ МІЖ РІЗНИМИ БЕЗПРОВІДНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

Параметр Технологія	Відстані	Швидкість Передач даних	Енергетичне Використання (Життя Батарей)	Безпека	Інсталяційна Вартість	Додаток Прикладу
<b>LoRA</b>	<50 км.	0.3–38.4 kbps	Дуже low (8-10 років)	Високо	Низька	Кмітливі будівлі (розумно, освітлюючи)
<b>NB-IoT</b>	<50 км.	<100 kbps	Високо (1-2 роки)	Високо	Низька	Кмітлива grid комунікація
<b>LTE-m</b>	<200 км.	0.2–1 Mbps	Low (7-8 років)	Високо	Помірна	Кмітливий метр
<b>Sigfox</b>	<50 км.	100 bps	Low (7-8 років)	Високо	Помірна	Кмітливі будівлі (штепсельні вилки)
<b>Невагомий</b>	<5 км.	100 kbps	Low (Дуже Довго)	Високо	Низька	Кмітливий метр
<b>Bluetooth</b>	<50 m	1 Mbps	Low (Декілька місяців)	Високо	Низька	Кмітливі домашні побутові прилади
<b>Zigbee</b>	<100 m	250 Kbps	Дуже Low (5-10 років)	Low	Низька	Розумно, вимірюючи в поновлюваних енергіях
<b>Супутник</b>	Дуже Довго >1500 км.	100 kbps	Високо	Високо	Висока	Установки енергії сонячного & вітру

# ЗАСТОСУВАННЯ ІОТ В ЕНЕРГЕТИЧНОМУ СЕКТОРІ: РЕГУЛЮВАННЯ, РИНОК ТА ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

	Додаток	Сектор	Опис	Виплати
Регулювання і ринок	Демократизація енергії	Регулювання	Забезпечуючи доступ до ґрат, бо багато маленьких кінцевих користувачів для рівні до рівної електрики торгують і вибираючи постачальника вільно.	Полегшуючи ієрархію в енергії гнучко ланцюгова, ринкова влада, і централізував гнучко; перетворюючи на рідину ринок енергії і знижуючи ціни для споживачів; і створюючи усвідомлення на використанні енергії і ефективності.
	Скупчення маленького prosumers (віртуальні енергетичні установки)	Ринок енергії	Залучаючий вантаж і покоління групи кінцевих користувачів, щоб запропонувати електриці, балансує, або запасні ринки.	Мобілізуючи маленькі вантажі, щоб брати участь в конкурентоздатних ринках; допомога ґратам, скорочуючи вантаж в пікових часах; Обгороджування ризику високих рахунків електрики в пікових годинах; і покращуючи гнучкість ґрат і скорочуючи потребу у балансуванні активів; Пропозиція прибутковості споживачам.
	Профілактика	Розташована вгору за течією нафтогазова промисловість/ компанії користі	Дефект, витік, і втома, моніторинг, аналізуючи великих даних, зібрала через статичні і мобільні датчики або камери.	Скорочення ризику відмови, виробничої втрати і ремонтного простою; скорочення вартості М О&; і запобігаючи нещасним випадкам і збільшуючи безпеку.
Енергія гнучко	Підтримка дефекту	Розташована вгору за течією нафтогазова промисловість/ компанії користі	Ідентифікуючи відмови і проблеми в мережах енергії і можливо виправляючи їх фактично.	Поліпшення надійності обслуговування; поліпшення швидкості в установці витоку в районному нагріванні або відмов в ґратах електрики; і скорочуючи ремонтний час і ризик оздоровчої/безпеки.
	Зберігання енергії і аналітика	Індустріальні постачальники або корисні компанії	Аналіз ринкових даних і можливостей для формування вибору гнучкості як наприклад зберігання енергії в системі.	Скорочуючи ризик постачання і вимагають нестійкість; збільшуючи прибутковість в енергії торгують оптимальним використанням гнучкого і storage вибору; і гарантуючи оптимальну стратегію для storage активів.
	Енергетика Digitalized	Оператор системи корисних компаній &	Аналізуючи великі дані і управляючи багатьма одиницями покоління в масштабах різного часу.	Поліпшення безпеки постачання; поліпшення використання активу і управління; скорочення вартості забезпеченості резервною місткістю; прискорення відповіді до втрати вантажу; і скорочуючи ризик пропуску.

## ЗАСТОСУВАННЯ ІОТ В ЖИТТЕВИХ СФЕРАХ: РОЗУМНІ МІСТА ТА РОЗУМНА МЕРЕЖА

У розумному місті різними процесами, наприклад, передачею та зв'язком інформації, інтелектуальною ідентифікацією, визначенням місцезнаходження, відстеженням, моніторингом, контролем забруднення та управлінням ідентифікацією можна ідеально керувати за допомогою технології ІоТ. До датчиків можна підключити будівлі, міську інфраструктуру, транспорт, енергетичні мережі та комунальні послуги.

Під час спільної комунікації між різними секторами інтелектуальна мережа може попереджати операторів за допомогою розумних пристроїв, перш ніж виникне будь-яка гостра проблема.

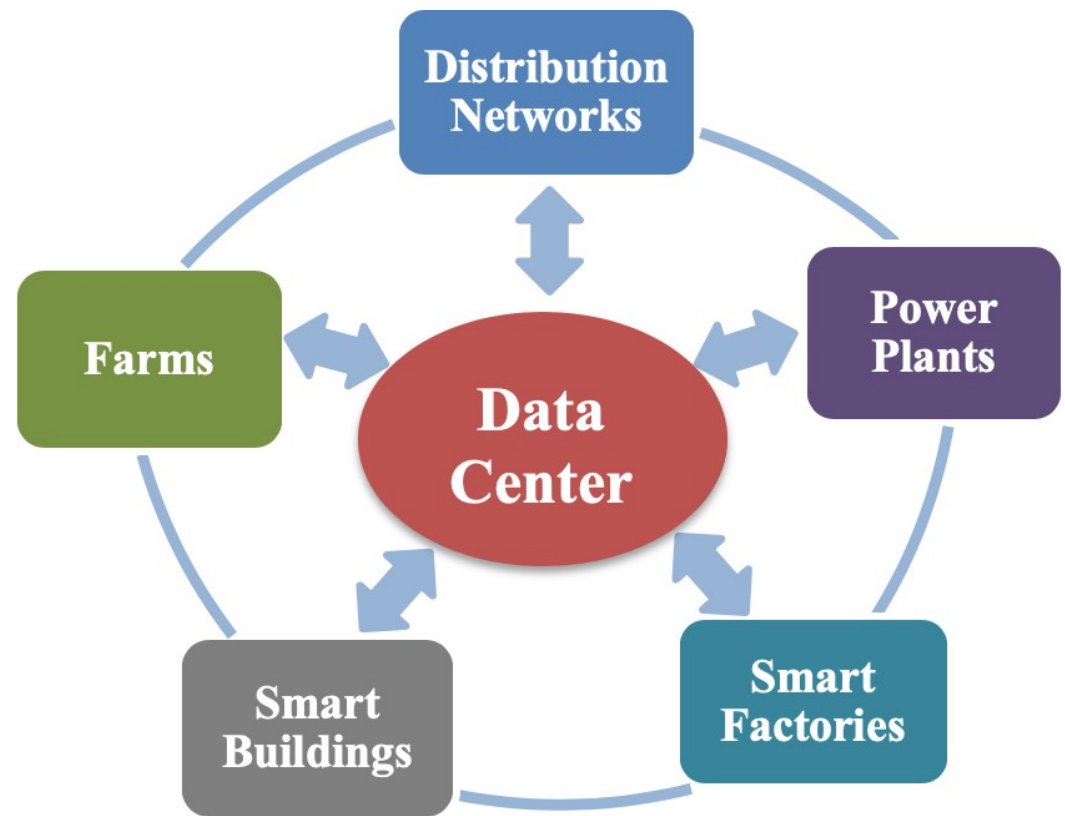
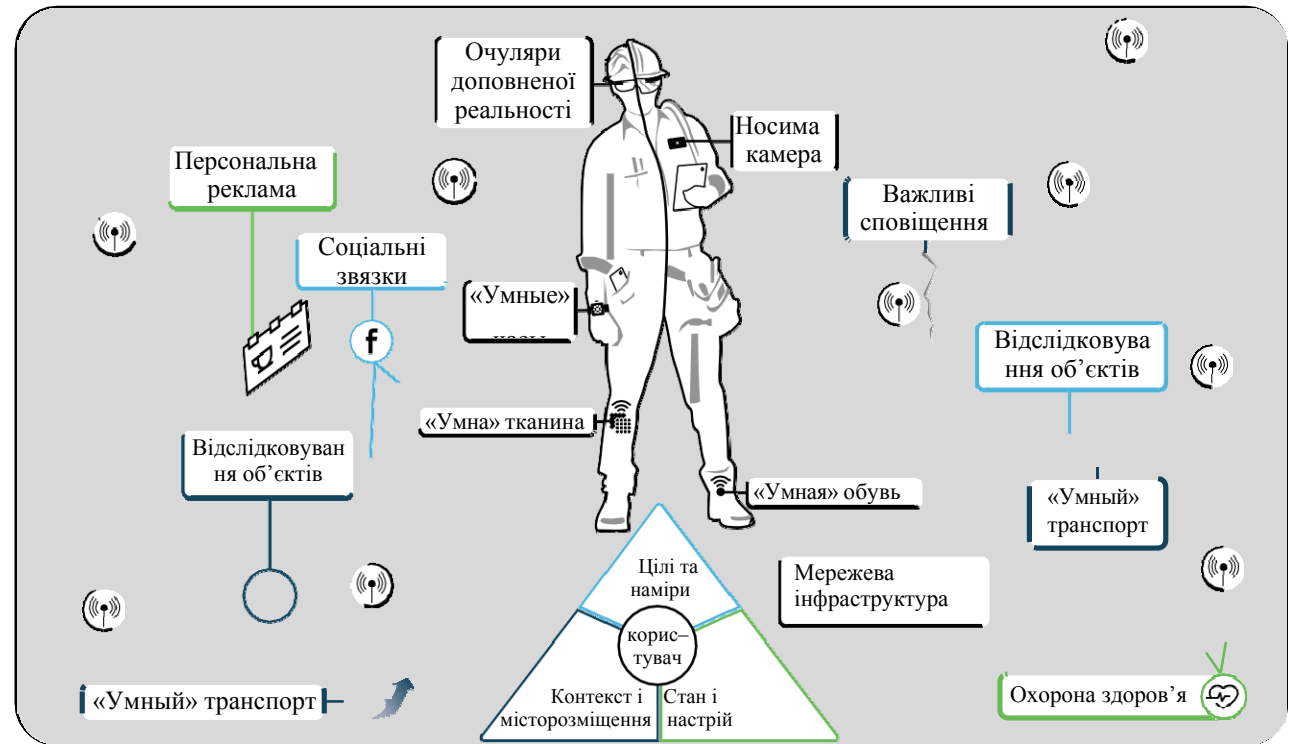


Рисунок 2 – Централізоване підключення даних у концепції розумного міста

# ЗАСАДНИЧІ ТЕХНОЛОГІЇ У РАМКАХ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОНЦЕПЦІЇ МІЖМАШИННОЇ ВЗАЄМОДІЇ M2M

На сьогодні сервіси M2M включають широкий спектр застосувань - від ношених пристроїв для фітнеса і медичних цілей до автономних і безпілотних автомобілів. Це обумовлює бурхливий ріст числа підключених M2M -пристроїв з **поточних 10 мільярдів до 24-50 мільярдів** в самому найближчому майбутньому, що підтверджується прогнозами таких компаній і асоціацій, як Cisco, Ericsson і GSMA. У найближче десятиліття очікується, що предмети повсякденного ужитку, включаючи меблі, харчові контейнери і навіть паперові документи, зможуть отримати можливість доступу в мережу Інтернет.



Споживчі сценарії

Промислові сценарії

Рисунок 3 — Споживче та промислове застосування M2M-пристроїв

контейнери і навіть паперові документи, зможуть отримати

# ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРСПЕКТИВНИХ M2M -РАДІОТЕХНОЛОГІЙ

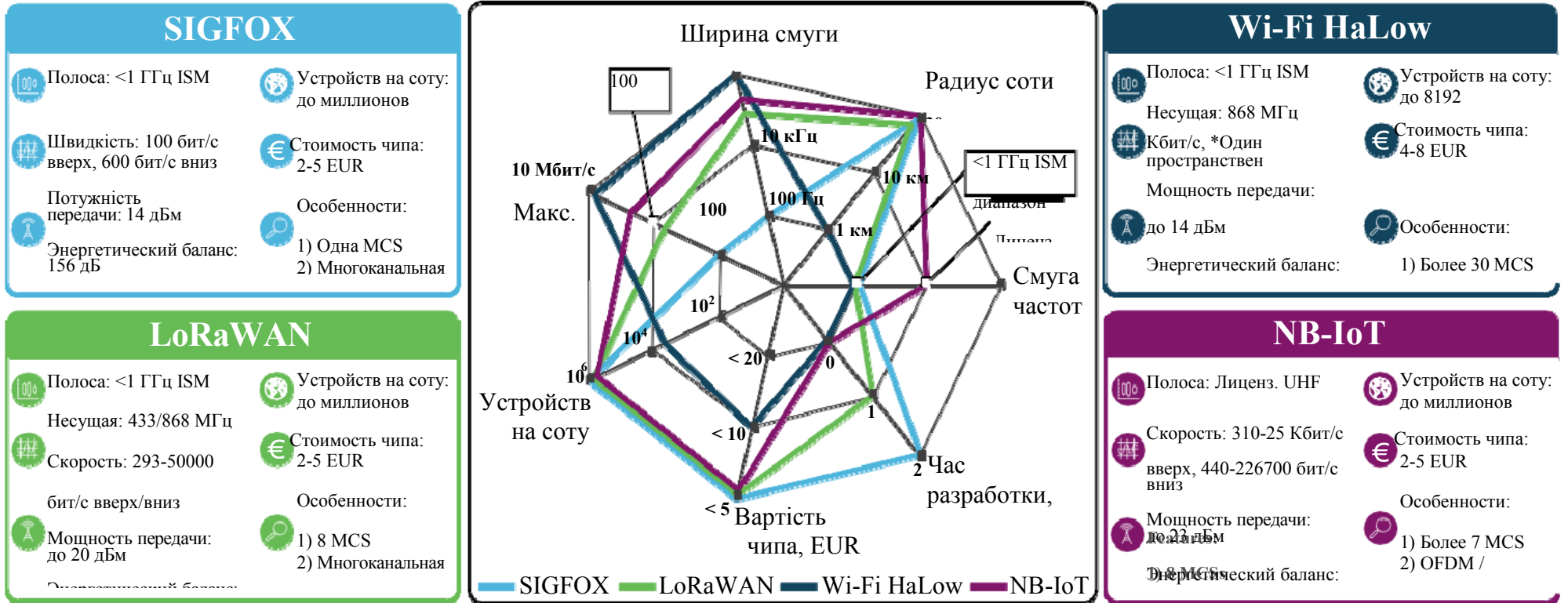


Рисунок 4 — Основні характеристики перспективних M2M -радіотехнологій

## ОРГАНІЗАЦІЯ З'ЄДНАННЯ M2M -УСТРОЙСТВ З МЕРЕЖЕЮ

Для встановлення початкового з'єднання з мережею LTE облаштування M2M, такі як сенсори, лічильники і вимірники, можуть використати канал випадкового доступу RACH.

Процедура випадкового доступу в системі LTE приведена на рис. 5. Спочатку термінал посилає на БС LTE повідомлення Msg 1, що називається преамбулою, використовуючи при цьому фізичний канал випадкового доступу PRACH. Слід зазначити, що число доступних для організації випадкового доступу послідовностей може бути менший, ніж найбільше можливе їх число в 64 преамбули, залежно від налаштувань мережі доступу. Якщо два термінали або більше вибрали ідентичні преамбули, а потім відправили їх до одного і того ж моменту часу, на стороні БС може виникнути колізія. Преамбули також можуть не досягти БС при недостатньому значенні випромінюваної терміналом потужності.

Якщо преамбула була прийнята успішно, то БС LTE (що називається також eNodeB) підтверджує цей факт шляхом відправки у відповідному інтервалі повідомлення Msg 2, відомого як відповідь випадкового доступу RAR. Для цього терміналу висилається покажчик на радіоресурси фізичного колективного каналу по лінії вниз PDSCH, які містять його повідомлення RAR. Оскільки eNodeB повинна встановити, який з терміналів передав яку преамбулу, ініціюється так званий процес дозволу колізії. Після закінчення деякого часу обробки повідомлення RAR термінали, що беруть участь, передають повідомлення Msg 3, яке є запитом на встановлення контролю за радіоресурсами RRC. Його відправка відбувається у фізичному колективному каналі по лінії вгору PUSCH з використанням радіоресурсів, вказаних в повідомленні Msg 2. Процедура випадкового доступу завершується після успішного прийому від eNodeB повідомлення Msg 4, яке називається налаштуванням з'єднання RRC.



Рисунок 5 — Порядок процедури випадкового доступу в системі LTE

Рисунок 5 — Порядок процедури випадкового доступу в системі LTE

# АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ СТІЛЬНИКОВИХ СИСТЕМ M2M

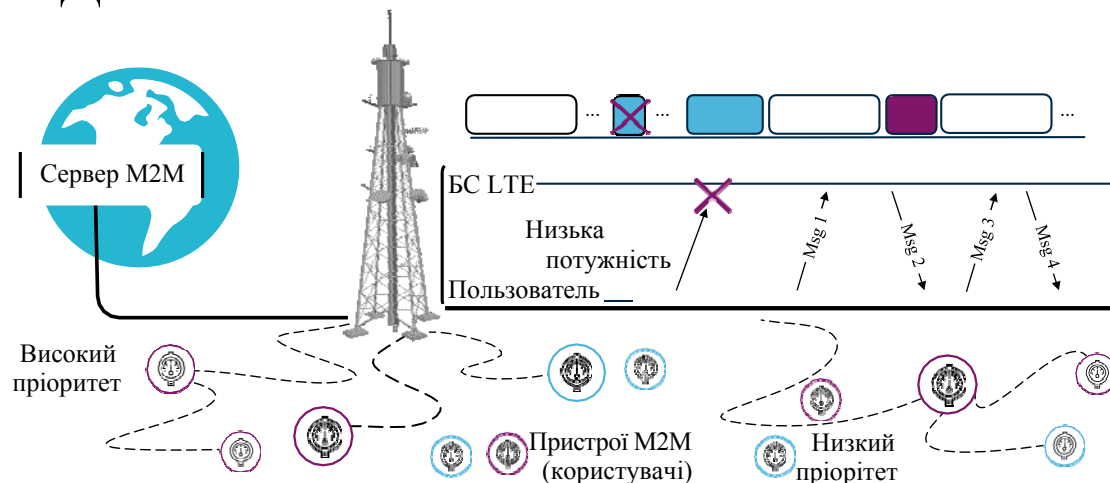


Рисунок 6 — Типовий сценарій M2M з великим числом пристроїв

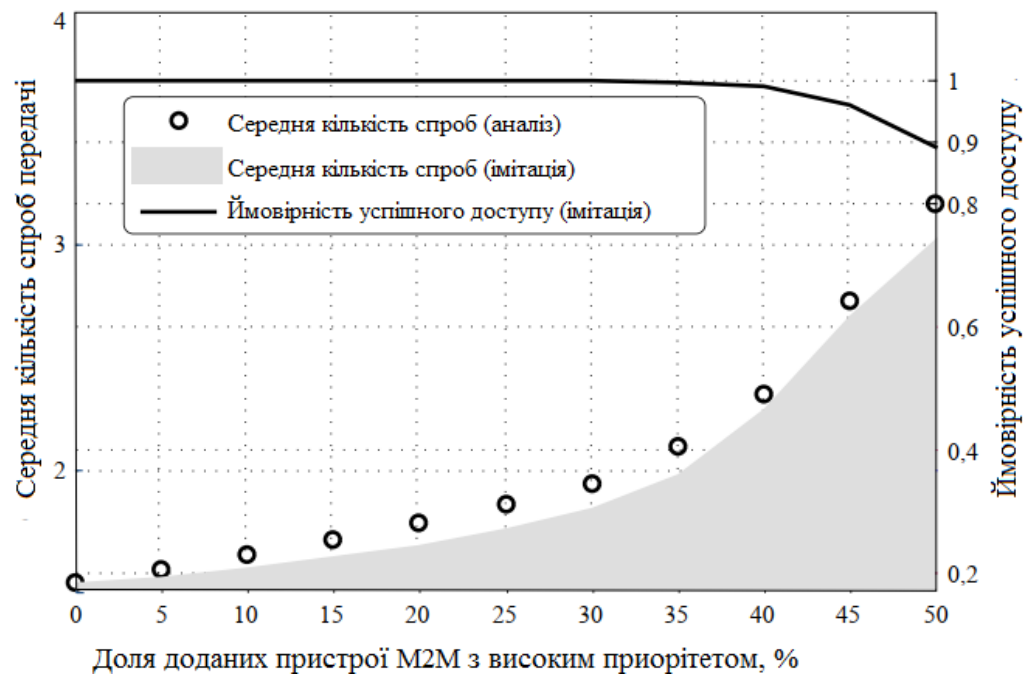


Рисунок 7 – Характеристики доступу M2M-пристроїв з різними пріоритетами

# ПРАКТИЧНІ ЗАСАДИ РЕАЛІЗАЦІЇ M2M

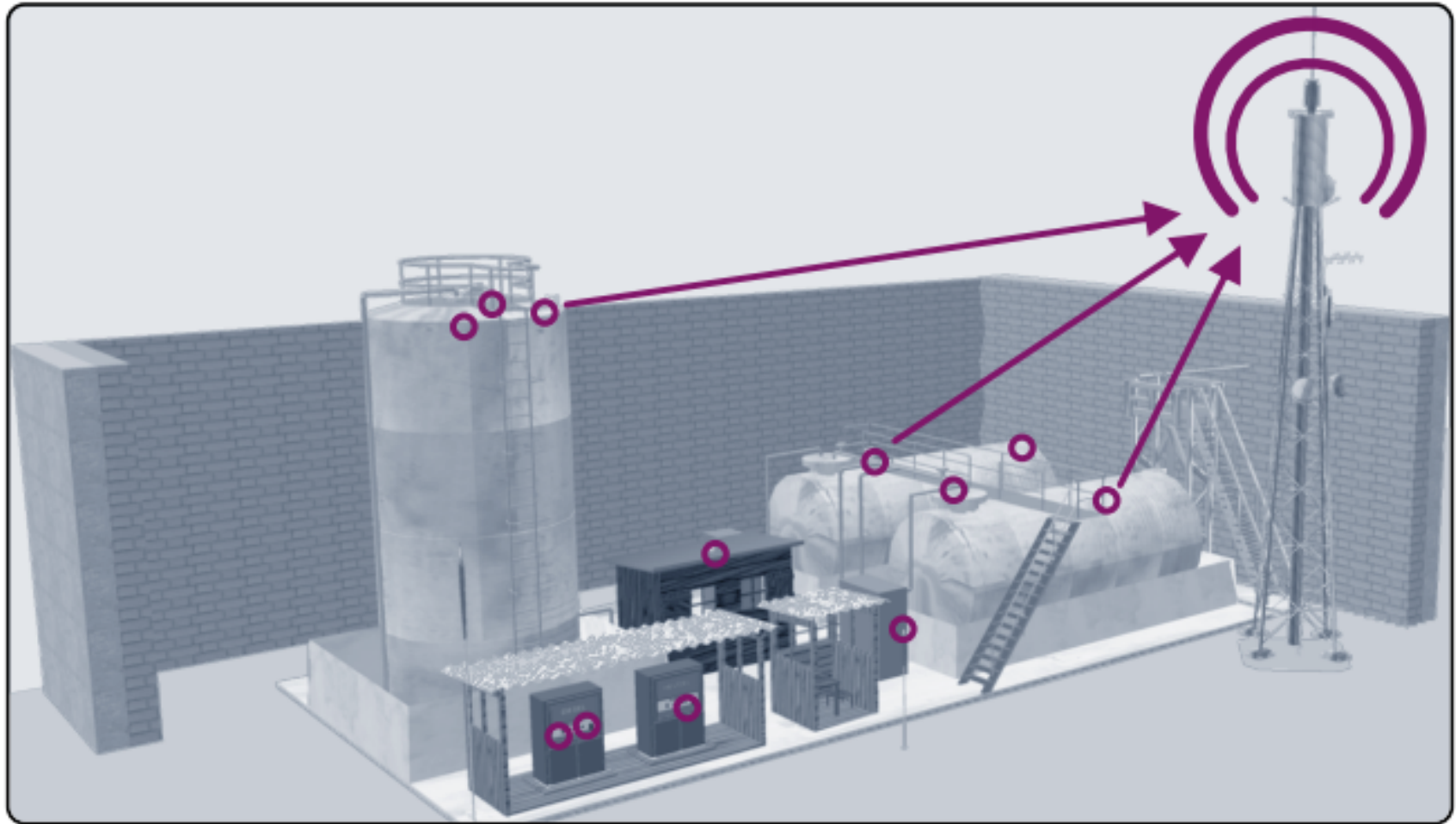


Рисунок 7 — Приклад розміщення M2M -системи для автоматизації виробництва

# ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ І ПЕРЕДАЧА ДАНИХ МАЛОГО ОБ'ЄМУ

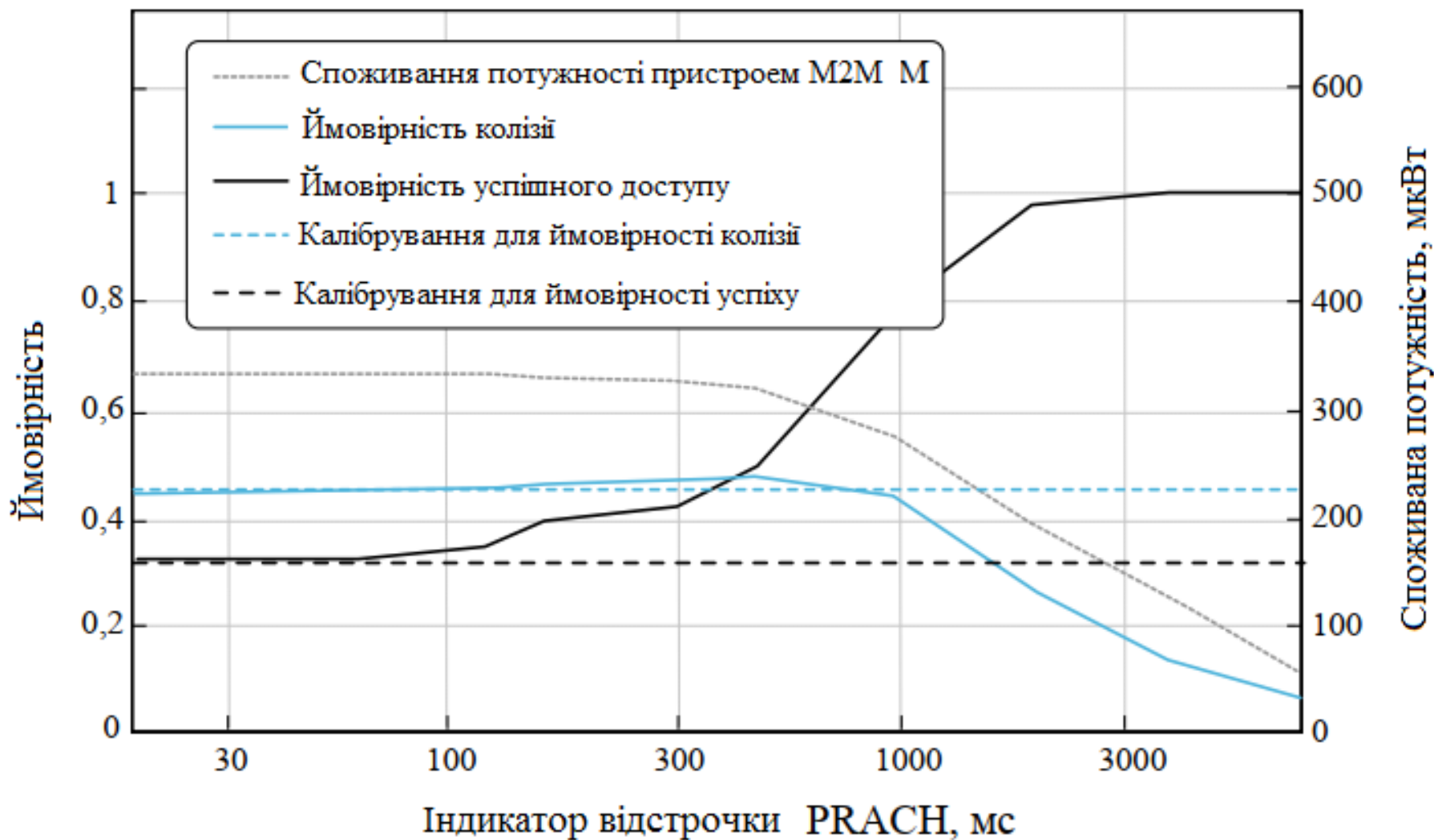


Рисунок 8 — Характеристики початкового входу в мережу для стільникової системи M2M

# МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНІСТІ М2М ПРИСТРОЇВ

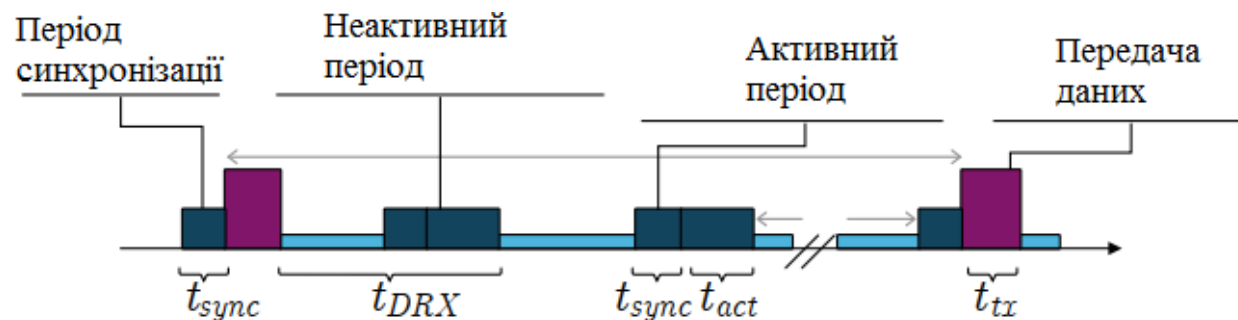


Рисунок 9 — Моделювання споживаної обладнанням М2М потужності

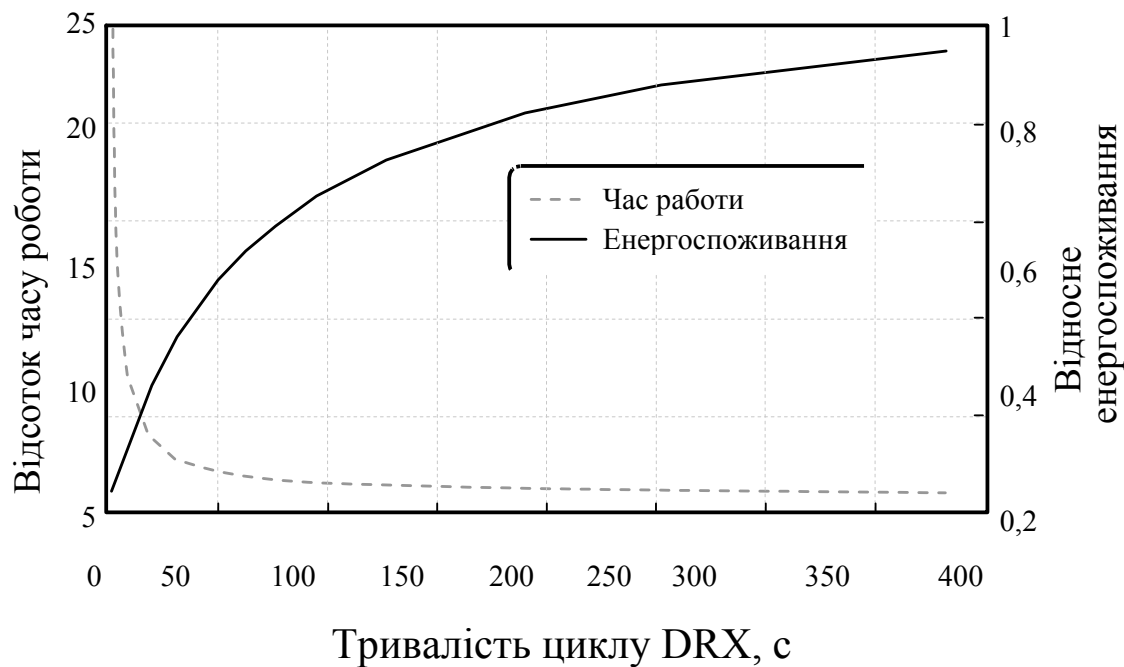


Рисунок 10 – Підвищення енергетичної ефективності М2М -устройств

## ВИСНОВКИ

1. Енергетичні системи стоять на порозі нової перехідної ери. Широкомасштабне впровадження ПРЄВ у розподілених енергетичних системах та потреба в ефективному використанні енергії вимагає загальносистемних інтегрованих підходів до мінімізації соціально-економічного та екологічного впливу енергетичних систем. У цьому відношенні сучасні технології, такі як IoT, можуть допомогти енергетичному сектору перетворитися з центрального ієрархічного ланцюга поставок до децентралізованої, розумної та оптимізованої системи.

2. Класифіковано різні варіанти використання Інтернету речей у кожному розділі ланцюга постачання енергії, від виробництва через енергетичні мережі до секторів кінцевого використання. Обговорюються переваги систем енергоменеджменту на основі IoT у підвищенні енергоефективності та інтеграції відновлюваної енергії та підсумовуються результати. Обговорюємо різні компоненти системи Інтернету речей, включаючи можливості комунікації та сенсорні технології щодо їх застосування в енергетичному секторі, наприклад, датчики температури, вологості, світла, швидкості, пасивного інфрачервоного випромінювання та наближення. Обговорюємо хмарні обчислення та платформи для аналізу даних, які є інструментами аналізу та візуалізації даних, які можна використовувати для різних розумних додатків в енергетичному секторі, від будівель до розумних міст.

3. Розглянуто застосування IoT в ланцюжку постачання енергії на різних рівнях, включаючи розумні міста, розумні мережі, розумні будівлі та інтелектуальний транспорт. Обговорено деякі з проблем застосування IoT в енергетичному секторі, включаючи проблему ідентифікації об'єктів, управління великими даними, проблеми з'єднання та невизначеність, інтеграцію підсистем, безпеку та конфіденційність, енергетичні вимоги систем IoT, стандартизацію та архітектурне проектування. Виділяємо деякі рішення для цих проблем, наприклад, блокчейн і зелений IoT як майбутні напрямки досліджень. Проведено аналіз енергоефективності для режиму з'єднання M2M. Збільшення максимальної тривалості циклу опитування і періоду непостійного прийому DRX дозволяє досягти істотного приросту енергетичної ефективності терміналів.

**ДЯКУЮ**

**ЗА**

**УВАГУ !**

Завідувачу кафедри

АКС

Лебунюк РР

здобувача вищої освіти (студента  
ПІБ, факультет, «курс», «група»)

Лебунюк РР

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

03.12.2021

дата

РР

підпис

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ ПО КАФЕДРИ АКІТ  
 ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Технологія змінного енергоспоживання для процесів IoT

Автор: М.В. Любарський

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма: Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: Д.А. Макашик

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	<u>Відповідає</u>
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та дорацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

03.12.2021

03.12.2021

Дата

Макашик Д.А.

Макашик Д.А.

Любарський М.В.

Підписи

## Anti-Plagiarism v-15.257

**Максимальне співпадіння з одним документом 6.0%**

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. **Помилки в документах: 9%**

ID: 98309 Назва: Магістерська кваліфікаційна робота Додано в БД: 2021-12-07 Автора: Любарський М.В. Керівники: Макаришкін Д.А. Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	91469	689	6244 (7%)	50 (7%)

### Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

Ім'я користувача:  
Кафедра АКІТіТК

ID перевірки:  
1009607533

Дата перевірки:  
09.12.2021 08:27:51 EET

Тип перевірки:  
Doc vs Internet

Дата звіту:  
09.12.2021 08:29:47 EET

ID користувача:  
100005862

Назва документа: 02-1\_Любарський

Кількість сторінок: 77 Кількість слів: 13022 Кількість символів: 102862 Розмір файлу: 1.67 MB ID файлу: 1009575609

## 2.87% Схожість

Найбільша схожість: 1.01% з Інтернет-джерелом (<http://elar.khnu.km.ua/jspui/bitstream/123456789/9626/1/%D0%9A%D>).

2.87% Джерела з Інтернету

112

Сторінка 79

Пошук збігів з Бібліотекою не проводився

## 0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

## 0% Вилучень

Немає вилучених джерел

## РЕЦЕНЗІЯ

на дипломну роботу студента групи ТРМ-20-1

Любарського Михайла Володимировича

### "Технологія змінного енергоспоживання для пристроїв IoT"

В дипломній роботі розглянуто фактори застосування технології 5G на прикладі застосування M2M з'єднань за забезпечення задачі зменшення енерговитрат для передачі інформації з метою зменшення апаратних витрат та покращення виявлення завад в каналах при передачі інформаційних посилок.

Сучасні технології, такі як Інтернет речей (IoT), пропонують широку кількість застосувань в енергетичному секторі, тобто в постачаннях, передачі та розподілу енергії та попиті. IoT можна використовувати для підвищення енергоефективності, збільшення частки відновлюваної енергії та зменшення впливу використання енергії на навколишнє середовище. У цій роботі розглядається актуальна тематика щодо застосування IoT в енергетичних системах загалом і в контексті розумних мереж зокрема.

В дипломній роботі магістра ставиться та виконується ряд завдань, серед яких:

- проаналізовано існуючі тенденції та апаратні рішення щодо впровадження технології 5G, що мають місце на сучасному ринку телекомунікаційних послуг.
- розглянуто варіанти використання Інтернету речей у кожному розділі ланцюга постачання енергії, розглянуто різні компоненти системи Інтернету речей.
- представлено застосування IoT в ланцюжку постачання енергії на різних рівнях на прикладі M2M з'єднання.
- побудовано модель мережі радіодоступу для обслуговування безлічі щільно розміщених носієвих пристроїв, що враховує характер споживання ними енергії і особливості протоколу конкурентного доступу, застосовна для оцінки показників ефективності функціонування системи зв'язку і, зокрема, енергетичної ефективності передачі потокового трафіку користувачів.

Результати дослідження показують, що система енергоменеджменту на основі IoT може контролювати споживання енергії в режимі реального часу та підвищувати рівень обізнаності про енергетичні характеристики на будь-якому рівні ланцюга поставок.

Викладення матеріалу є послідовним та логічно зв'язаним з поставленими задачами, застосовується велика кількість ілюстрацій та додатків.

За своїм складом, робота складається з 4-х розділів, загальним обсягом 107 сторінок. В роботі використано 168 посилань на літературні джерела.

За змістом робота є цілісною. В роботі використані посилання на літературні джерела в середовищі Інтернет, а висновки з отриманих результатів сформовані технічно грамотно.

Мова викладення роботи є технічно грамотною, зрозумілою та не перенасиченою спеціальними термінами. Оформлення пояснювальної записки знаходиться на належному рівні, граматичних та стилістичних помилок дуже обмежена кількість.

Серед позитивних сторін магістерської роботи слід відмітити наступне:

1. Показано, що розвиток технології 5G в цілому та при застосуванні до сфери IoT вивчається лише з акцентом на попит на енергію. Роль IoT у підвищенні енергоефективності в будівлях і громадському транспорті обговорювалася в багатьох роботах.

2. Розгортання Інтернету речей в енергетичному секторі представляє проблеми, які потребують вирішення, а саме: Забезпечення надійного наскрізного з'єднання; Інтеграція IoT з підсистемами; Стандартизація; Безпека IoT; Призначена для користувача конфіденційність.

3. Технологія IoT є надмірно розгалуженою і складною неоднорідною екосистемою, яка включає різноманіття технологій M2M, такі як ZigBee, WirelessHART, 6LowPAN, WiFi, Bluetooth, ISA100.11a, MiWi, BACnet, Z - Wave і багато інших. Таким чином, створення універсальної безпроводної інфраструктури стає усе більш актуальним завданням.

В цілому дипломна робота магістра Любарського Михайла Володимировича "Технологія змінного енергоспоживання для пристроїв IoT" повністю відповідає вимогам до кваліфікаційних робіт магістра та заслуговує на оцінку "відмінно", а її автор – на присвоєння кваліфікаційного рівня магістра зі спеціальності 172 – "Телекомунікації та радіотехніка".

Рецензент:

Професор кафедри телекомунікаційних, медійних та інтелектуальних технологій, д.т.н., проф.



Юлій БОЙКО

## ВІДГУК

на дипломну роботу студента групи ТРМ-20-1

Любарського Михайла Володимировича

### **"Технологія змінного енергоспоживання для пристроїв IoT"**

Тематика дослідження охоплює сучасні технології, такі як Інтернет речей (IoT). У роботі розглядається актуальна тематика щодо застосування IoT в енергетичних системах загалом і в контексті розумних мереж зокрема. пропонують широку кількість застосувань в енергетичному секторі, тобто в постачаннях, передачі та розподілу енергії та попиті.

Дипломна робота складається з 4-х розділів, загальним обсягом 107 сторінок.

В першому розділі показано, що розвиток технології 5G в цілому та при застосуванні до сфери IoT вивчається лише з акцентом на попит на енергію. Роль IoT у підвищенні енергоефективності в будівлях і громадському транспорті обговорювалася в багатьох роботах. Показано, що під час планування програми IoT, яка є першим кроком у проектуванні систем IoT, вибір компонентів IoT, таких як сенсорний пристрій, протокол зв'язку, зберігання даних та обчислення, має відповідати передбачуваному застосуванню. Платформи IoT пропонують гнучкість вибору типу комунікаційних технологій (кожна має свої особливості) відповідно до потреб програми. Прикладами цих технологій є Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee та стільникові технології, такі як мережі LTE-4G та 5G.

Другий розділ присвячено впровадженню технології IoT для енергоменеджменту. Так, за допомогою IoT можна досягти більш ефективного використання енергії, використовуючи алгоритми машинного навчання, які допомагають визначити оптимальний баланс різних технологій попиту та пропозиції. Наприклад, використання алгоритмів штучного інтелекту може збалансувати вихідну потужність теплової електростанції з джерелами власного виробництва електроенергії, наприклад, об'єднавши багато невеликих сонячних фотоелектричних панелей. Тому основним завданням є інтеграція системи IoT в підсистеми енергетичної системи.

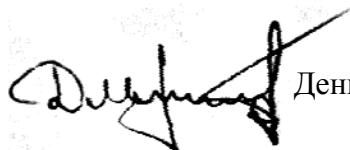
Третій розділ покликано показати способи організації безпроводного доступу речей в сучасних мережах. Засадничі технології у рамках Інтернету речей базуються на концепції міжмашинної взаємодії M2M, надаючи автономним і автоматичним пристроям (таким як сенсори, силові приводи, промислові роботи, інтелектуальні вимірники і так далі) можливість взаємодіяти один з одним, а також з мережею Інтернет при мінімальному залученні користувача системи. На сьогодні сервіси M2M включають широкий спектр застосувань - від ношених пристроїв для фітнеса і медичних цілей до автономних і безпілотних автомобілів. Це

обумовлює бурхливий ріст числа підключених M2M -устройств з поточних 10 мільярдів до 24-50 мільярдів в самому найближчому майбутньому, що підтверджується прогнозами таких компаній і асоціацій, як Cisco, Ericsson і GSMA.

У четвертому розділі проведено дослідження застосування сучасних систем IoT для забезпечення енергоефективних рішень. Проведено моделювання перевантажень в мережі доступу. У даному типовому сценарії стільника системи зв'язку 3GPP LTE містить M ідентичних M2M-пристроїв. Виконано аналіз продуктивності стільникових систем M2M. Особливо проаналізовано енергетичну ефективність роботи пристроїв при передачі даних малого об'єму. У тісному взаємозв'язку із затримкою і вірогідністю успішного доступу знаходиться енергетична ефективність з'єднань M2M, яку необхідно враховувати, оскільки M2M-прилади зазвичай мають малі габарити і живляться від батареї.

В цілому дипломна робота магістра Любарського Михайла Володимировича "Технологія змінного енергоспоживання для пристроїв IoT" повністю відповідає вимогам до кваліфікаційних робіт магістра та заслуговує на оцінку "відмінно", а її автор – на присвоєння кваліфікаційного рівня магістра зі спеціальності 172 – "Телекомунікації та радіотехніка".

доцент кафедри автоматизації,  
комп'ютерно-інтегрованих  
технологій, к.т.н., доц.



Денис МАКАРИШКІН

## Д О В І Д К А

Засвідчує те, що стаття авторів МАКАРИШКІН Д.А., ЛЮБАРСЬКИЙ М.В. "СУЧАСНІ РАДІОТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ЗВ'ЯЗКУ М2М" прийнята до друку і буде надрукована в науковому журналі "Вісник хмельницького національного університету" № 6 за 2020 р. серії "Технічні науки".

Видання "Вісник Хмельницького національного університету" серії "Технічні науки" затверджений як фахове видання і включено до наукометричних баз: РИНЦ, Google Scholar, Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography.

3 грудня 2020 р.

Начальник відділу  
інтелектуальної власності та  
трансферу технологій,  
відповідальний секретар Вісника ХНУ



Ю.В. Кравчик