

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем  
Кафедра телекомунікацій**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій КРАВЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

**Дипломна робота**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування  
інфокомунікацій»**

**спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка**

**на тему: «Побудова системи Інтернету Речей на базі мережі 5G»**

Виконала:

студентка ІV курсу, групи ТЗ-91  
Мацюк Еліна Олексіївна

\_\_\_\_\_

Керівник:

Доцент кафедри ТК НН ІТС, к.т.н., с.н.с.,  
Міночкін Дмитро Анатолійович

\_\_\_\_\_

Рецензент:

Доцент кафедри ІКТС НН ІТС, к.т.н., доцент,  
Новогрудська Ріна Леонідівна

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших авторів  
без відповідних посилань.

Студентка \_\_\_\_\_

Київ – 2023 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем**  
**Кафедра телекомунікацій**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій КРАВЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломну роботу студентці**

**Мацюк Еліни Олексіївни**

1. Тема роботи «Побудова системи Інтернету речей на базі мережі 5 G», керівник роботи Міночкін Дмитро Анатолійович, к.т.н., с.н.с., затверджені наказом по університету від «22» травня 2023 р. № 1884-с.
2. Термін подання студентом роботи 13 червня 2023 року.
3. Вихідні дані до роботи: інформаційні матеріали про архітектури та функціонування Інтернету речей, інформаційні матеріали про 5G. Структурований план порядку розробки матеріалів дипломної роботи.
4. Зміст роботи: Здійснити огляд існуючих архітектур та принципів дії Інтернету речей. Проаналізувати систему інтернету речей на базі мережі 5G. Розглянути найпопулярніші протоколи, які використовуються в екосистемах IoT. Розглянути використання IoT. Проаналізувати ключові переваги 5G для IoT. Дослідити чотири основні технології 5G-IoT. Провести порівняльний аналіз існуючих архітектур IoT. Розробити свою власну архітектуру IoT на базі 5G. Провести порівняння критеріїв існуючих архітектур IoT із запропонованою.
5. Перелік ілюстративного матеріалу:
  - 1) Тема, актуальність, мета та задачі дипломної роботи;
  - 2) Архітектура Інтернету речей;

- 3) Порівняльний аналіз архітектур Інтернету речей;
- 4) Технології 5G IoT;
- 5) Запропонована архітектура 5G IoT;
- 6) Загальні висновки по роботі.

6. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 20 лютого 2023 р.

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розробка, оформлення, узгодження та затвердження технічного завдання на роботу. Аналітичний огляд інформаційних матеріалів. Підбір та опрацювання необхідної науковотехнічної літератури.	20.02.2023-07.03.2023	Виконано
2	Вивчення та розбір основних відомостей про IoT: основні складові IoT, рівні стандартних архітектур. Ознайомлення з архітектурою інтернету речей: Існуючі в літературі архітектури IoT; Загальна трирівнева архітектура; Архітектура на основі SDN; Архітектура на основі QoS; Архітектура на основі SoA; Архітектура MobilityFirst; Архітектура CloudThings; IoT-A (IoT Architecture); S-IoT (Semantic Internet of Things). Порівняльний аналіз існуючих архітектур IoT.	08.03.2023-24.03.2023	Виконано
3	Ознайомлення з основними технологіями 5G-IoT: Віртуалізація функції бездротової мережі; архітектура 5G-IoT; неоднорідна мережа Heterogeneous Network (HetNet); зв'язок між пристроями Device to Device (D2D) Communication. Ознайомлення з найпопулярнішими протоколами, в екосистемах IoT. Розробка власної архітектуру IoT на базі 5G. Проведення порівняння критеріїв існуючих архітектур IoT із запропонованою.	25.03.2023-23.04.2023	Виконано
4	Підготовка матеріалів до друку та оформлення пояснювальної записки	28.04.2023-20.05.2023	Виконано
5	Підготовка та оформлення презентації для доповіді	25.05.2023-08.06.2023	Виконано

Студент

Еліна МАЦЮК

Керівник

Дмитро МІНОЧКІН

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить 93 сторінки, 42 рисунки, 3 таблиці. Було використано 53 джерела інформації.

**Актуальність роботи.** 5G радикально змінить спосіб побудови мереж у світі. Мине зовсім небагато часу і всьому світу доведеться адаптуватися до нового способу технологічного життя в різних галузях, на ринках та регіонах. Цей новий технологічний стандарт обіцяє набагато більше ніж просто подальший розвиток існуючих технологій мобільного зв'язку. Окрім постійної уваги до мережевих технологій у рамках 5G IoT, першорядне значення матиме оптимальне задоволення зростаючих потреб мережного суспільства.

Всебічна цифровізація суспільства та економіки торкнеться практично всіх сфер життя та діяльності людини. Досі основною метою було розширення інфраструктурних умов звичайних мереж у всіх напрямках, щоб забезпечити їхню велику доступність для мобільних пристроїв. У найближчі роки, окрім продовження роботи в рамках 5G IoT, основна увага приділятиметься задоволенню зростаючих потреб мережного суспільства.

**Мета** роботи полягає у проведенні аналізу архітектурних концепцій Інтернету речей на базі мережі 5G. Розуміння основних принципів побудови та можливостей застосування. Розробка системи Інтернету Речей на базі мережі 5G.

У майбутньому LTE буде недостатньо, щоб відповідати стандартам та очікуванням нових технологій. LTE в першу чергу було розроблено та оптимізовано для використання на смартфонах, тоді як 5G буде мобільним стандартом для всіх підключених речей. 5G IoT виходить на новий рівень у всіх аспектах. Пропускна здатність у новій мережі має досягати 20 гігабіт на секунду, що дозволить скоротити час відгуку. З 5G можна буде також передавати дані в режимі реального часу. Це означає, що 100 мільярдів мобільних пристроїв у всьому світі будуть доступні одночасно. Іншими словами, густина підключення приблизно один мільйон пристроїв на

квадратний кілометр. У той же час нова технологія дасть покращення зв'язку під час руху, це означає, що якість зв'язку буде набагато стабільнішою до швидкості 500 кілометрів на годину, що принесе величезні переваги, особливо для користувачів мережі, що подорожують.

**Об'єкт дослідження** – системи Інтернету речей на базі мережі 5 G.

**Предмет досліджень** – Архітектури Інтернету речей.

**Методи дослідження.** В роботі використовуються підходи критичного та порівняльного аналізу, протягом дослідження теорії та обладнання систем Інтернету речей.

**Отримані результати.** Результати отримані внаслідок порівнянь систем Інтернету речей дали змогу зрозуміти, що кожна з них є в якійсь мірі унікальною у використанні, має свої переваги та недоліки протягом використання. Деякі системи є застарілими і потребують вдосконалень. Розглянуто перспективну архітектуру IoT на базі 5G.

**Галузь застосування.** Результати роботи можна використовувати під час створення систем Інтернету речей. Результати можуть допомогти зрозуміти яку систему IoT доцільно буде побудувати у певному випадку та сформулювати бачення перспектив у своїй галузі.

**Ключові слова:** Інтернет речей, архітектура IoT, архітектурна концепція Інтернету речей, 5G.

## ABSTRACT

The thesis contains 93 pages, 42 figures, and 3 tables. A total 53 of sources were used.

**Relevance of the work.** 5G will radically change the way networks are built around the world. It will not be long before the whole world has to adapt to a new way of technological life in various industries, markets, and regions. This new technological standard promises much more than just further development of existing mobile communication technologies. In addition to the constant attention to network technologies within 5G IoT, the optimal satisfaction of the growing needs of the network society will be of paramount importance.

Comprehensive digitization of society and the economy will affect practically all areas of human life and activity. Until now, the main goal was to expand the infrastructure conditions of ordinary networks in all directions to ensure their high availability for mobile devices. In the coming years, in addition to continuing work within 5G IoT, the main focus will be on satisfying the growing needs of the network society.

**Goal.** The goal of this work is to analyze the architectural concepts of the Internet of Things based on the 5G network. Understanding the main principles of construction and application possibilities. In the future, LTE will be insufficient to meet the standards and expectations of new technologies. LTE was primarily developed and optimized for use on smartphones, while 5G will be the mobile standard for all connected things. 5G IoT takes everything to a new level. The bandwidth in the new network can reach 20 gigabits per second, which will reduce response time. With 5G, data can also be transmitted in real-time. This means that 100 billion mobile devices worldwide will be available simultaneously. In other words, the connection density will be approximately one million devices per square kilometer. At the same time, the new technology will improve connectivity while moving, meaning that the quality of connectivity will be much more stable

up to speeds of 500 kilometers per hour, which will bring huge benefits, especially for network users who travel.

**The object** of the research is Internet of Things systems based on the 5G network.

**The subject** of the research is the architectures of Internet of Things.

**Research methods.** The critical and comparative analysis approaches are used in the study of the theory and equipment of Internet of Things systems.

**Results obtained.** The results obtained through comparisons of Internet of Things systems have enabled us to understand that each system is unique to some extent in its use, has its advantages and disadvantages during use. Some systems are outdated and require improvement. A promising architecture for IoT based on 5G is considered.

**Field of application.** The results of the work can be used in the creation of Internet of Things systems. The results can help understand which IoT system will be appropriate to build in a particular case and shape the vision of prospects in the field.

**Key words:** Internet of Things, IoT architecture, IoT architectural concept, 5G.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	11
РОЗДІЛ 1 .....	13
АРХІТЕКТУРА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ.....	13
1.1 Загальні відомості Інтернету речей .....	13
1.1.1 Семирівнева архітектура IoT (рис.1.20). Рівень сприйняття: перетворення аналогових сигналів у цифрові дані та навпаки. Датчики та приводи .....	18
1.1.2 Рівень підключення: увімкнення передачі даних.....	21
1.1.3 Граничний або туманний обчислювальний рівень: зменшення затримки системи.....	26
1.1.4 Рівень обробки: використання необроблених даних .....	27
1.1.5 Прикладний рівень: вирішення бізнес-вимог .....	28
1.1.6 Бізнес-рівень: впровадження рішень на основі даних .....	29
1.2 Використання інтернету речей.....	30
1.2.1 Створення кращих корпоративних рішень .....	32
1.2.2 Інтеграція розумних будинків .....	33
1.2.3 Інноваційне сільське господарство .....	33
1.2.4 Створення розумніших міст .....	35
1.2.5 Модернізація управління ланцюгом поставок.....	37
1.2.6 Трансформація охорони здоров'я.....	38
1.2.7 Встановлення розумних мереж .....	40
1.2.8 Революція в носінні .....	41
1.2.9 Інтеграція підключених фабрик .....	42
1.2.10 Переформатування гостинності .....	44
Висновки .....	45
РОЗДІЛ 2 .....	46
СИСТЕМА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ НА БАЗІ МЕРЕЖІ 5G.....	46
2.1 5G для IoT.....	46
2.1.1 Ключові переваги 5G для IoT .....	47
2.2. Чотири основні технології 5G–IoT .....	51
2.2.1 Віртуалізація функції бездротової мережі: Wireless Network Function Virtualization (WNFV).....	51
2.2.2 Неоднорідна мережа Heterogeneous Network (HetNet) .....	53
2.2.3 Зв'язок між пристроями Device to Device (D2D) Communication.....	54

2.2.4 Зв'язок машинного типу (МТС) .....	56
2.3 Існуючі в літературі архітектури IoT .....	57
2.3.1 Загальна трирівнева архітектура IoT .....	57
2.3.2 Чотирирівнева архітектура IoT .....	61
2.3.3 П'ятирівнева архітектура IoT .....	63
2.3.4 Архітектура на основі SDN .....	67
2.3.5 Архітектура на основі QoS .....	67
2.3.6 Архітектура на основі SoA .....	68
2.3.7 Архітектура MobilityFirst .....	69
2.3.8 Архітектура CloudThings .....	70
2.3.9 Архітектура IoT-A .....	71
2.3.10 Архітектура S-IoT .....	72
Висновки .....	74
РОЗДІЛ 3 .....	76
ЗАПРОПОНОВАНА АРХІТЕКТУРА ІОТ НА БАЗІ 5G.....	76
3.1 Рівень фізичного пристрою .....	76
3.2 Рівень зв'язку .....	77
3.3 Обчислювальний рівень Edge (Fog).....	78
3.4 Рівень зберігання даних .....	78
3.5 Рівень служби керування. ....	78
3.6 Прикладний рівень .....	79
3.7 Рівень співпраці та процесів .....	80
3.8 Рівень безпеки .....	80
Висновки .....	83
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ .....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	87

**ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ**

<b>AMQP</b>	Advanced Message Queuing Protocol
<b>CoAP</b>	Constrained Application Protocol
<b>DDS</b>	Data Distribution Service
<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>LPWAN</b>	Low-power Wide-area Network
<b>MQTT</b>	Message Queue Telemetry Transport
<b>NFV</b>	Network function virtualization
<b>STN</b>	Smart Things

## ВСТУП

Глобальний обсяг даних постійно збільшується, що робить розвинення 5G необхідним і неминучим фактом. Внаслідок такого величезного зростання обсягів даних у середньостроковій перспективі існуючі технології більше не відповідатимуть вимогам світу IoT. Німеччина - добрий приклад зростання споживання трафіку даних. У 2017 році країна досягла обсягу даних в один мільярд гігабайт – вже вдвічі більше, ніж у 2015 році. У 2025 році кількість підключених пристроїв у всьому світі становитиме від 75 до 500 мільярдів. Це величезний потенціал для нашої глобальної економіки, оскільки демонструє необхідність мереж 5G: такий великий обсяг даних у поєднанні з кількістю пристроїв IoT та індивідуальними потребами щодо мереж IoT можливий лише за допомогою більш швидкісних технологій 5G.

Незалежно від смартфонів, збільшення обсягів даних неминуче в інших сферах застосування. З цих та багатьох інших причин 5G IoT стане новою ключовою технологією підключення.

Зрозуміло, що нині існуючі IoT-рішення створювалися з урахуванням можливостей мереж передачі даних. Але головним фактором нарощування числа IoT-пристроїв у мережах 5G стане значно зросла пропускна спроможність каналів передачі даних і докорінно зменшилася їх латентність. В результаті стає можливим використання критично важливих додатків, де це життєво важливо: телехірургії або авіатаксі.

У цьому офіційному документі ми досліджуємо шлях до цифрової трансформації з підтримкою 5G. Ця подорож займе кілька років, оскільки мережі та можливості 5G поступово стають доступними, а паралельно з цим припиняються попередні покоління мереж.

Інтернет речей (IoT) на базі 5G - це майбутнє об'єднання двох технологій, що забезпечують взаємозв'язок між об'єктами, забезпечують мережеву підтримку, передачу даних та інформацію.

Завдяки 5G, Інтернет речей матиме значні переваги перед попередніми версіями технології. 5G забезпечує високу швидкість передачі даних, низьку затримку та більш велику пропускну здатність, що дозволяє працювати з великою кількістю підключених пристроїв.

Це дозволить збільшити точність та швидкість збору даних, що дає можливість побудувати більш точну модель об'єкта та розподілити навантаження між підключеними до системи пристроями.

Інтернет речей на базі 5G може знайти застосування в різних галузях, таких як медицина, автомобільна промисловість, будівництво, транспорт та інші. Вона може допомогти у зборі та аналізі даних про здоров'я пацієнтів, моніторингу роботи транспортних засобів та машин на заводах, а також підвищити рівень автоматизації в будівельній сфері.

# РОЗДІЛ 1

## АРХІТЕКТУРА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

### 1.1 Загальні відомості Інтернету речей

Термін «Інтернет речей» був запропонований у 1999 році засновником дослідницького центру AutoID Center в Массачусетському технологічному інституті Кевіном Ештоном (рис. 1.1), який припустив, що згодом у кожній з речей реального фізичного світу в IoT буде цифровий двійник, її віртуальне представлення. [3]



Рис.1.1. Кевін Ештон (винахідник IoT) [22]

Цифрова трансформація докорінно змінює суспільство, бізнес і спосіб нашого життя. Незважаючи на стрімкий прогрес, досягнутий за останні роки, ми все ще перебуваємо на початковій стадії подорожі завдяки повсюдним обчисленням, накопичувачам, живленню акумуляторів і мережам. Мобільні мережі є ключовим чинником цієї трансформації. Сьогодні він забезпечує глобальне, надійне та безпечне підключення до понад 6 мільярдів мобільних широкосмугових пристроїв, а також майже 2 мільярдів підключених пристроїв до кінця 2022 року. Прогнозується, що до 2025 року кількість абонентів стільникового зв'язку IoT зростатиме зі зведеним річним темпом зростання (CAGR) на 16,6 відсотка, щоб наприкінці періоду досягти 3,74

мільярда. IoT відіграє ключову роль у цифровій трансформації, і завдяки швидкому розгортанню 5G впровадження IoT (рис.1.2) прискориться.[1]

**Інтернет речей (IoT)** - це мережа фізичних об'єктів (речей), які мають вбудовані датчики, програмне забезпечення та здатність передавати та отримувати дані через Інтернет. Ці об'єкти можуть бути будь-якої форми та розміру, від домашніх приладів, таких як пральні машини та холодильники, до великих промислових установок, таких як фабрики та сільськогосподарські землі.



Рис.1.2. Впровадження IoT «Місто в телефоні» [23]

Основні складові IoT включають (рис. 1.3):

- Речі: фізичні об'єкти, які можуть бути з'єднані з Інтернетом.
- Датчики: датчики вбудовуються в речі та забезпечують збір інформації про стан речі, яка пов'язана з температурою, вологістю, рівнем заповнення тощо.
  - Мережа: IoT-речі повинні бути підключені до Інтернету, щоб передавати дані.
  - Обробка даних: дані, що отримуються з IoT-речей, повинні бути оброблені та зрозумілі для аналізу.
  - Аналіз даних: інформація, отримана з IoT-речей, може бути аналізована, щоб зрозуміти тренди та прийняти рішення.

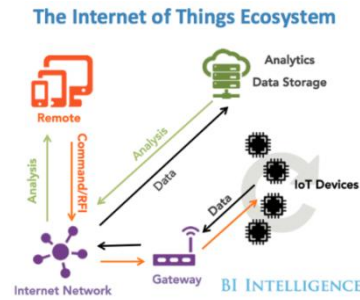


Рис.1.3. Екосистема IoT [24]

IoT використовується в багатьох галузях, включаючи медицину, сільське господарство, промисловість та домашній комфорт. Використання IoT може допомогти покращити ефективність та продуктивність, зменшити витрати та сприяти більш ефективному використанню ресурсів.

Основною задачею для платформи IoT є з'єднання точки доступу та мережі передачі даних для додатків кінцевого користувача в нову екосистему Інтернету Речей. Це дозволяє компаніям автоматизувати свої процеси і аналізувати дані.

Рішення IoT будуть об'єднувати велику кількість функцій, які включають в себе: датчики і контролери, пристрій шлюзів для збору даних і відправки їх на сервер, мережа зв'язку для передачі даних, засоби аналізу даних і програмного забезпечення для візуалізації даних, тощо [2].

Архітектура Інтернету речей (IoT) складається з трьох основних компонентів (рис. 1.4) : пристроїв IoT, хмарної інфраструктури та додатків для користувачів. Кожен з цих компонентів має важливу роль в системі Інтернету речей.

Пристрої IoT: це різноманітні пристрої, які забезпечують збір даних з навколишнього середовища і взаємодію з мережею Інтернет. Пристрої IoT можуть бути сенсорами, контролерами, реле або іншими пристроями, які мають можливість збирати і передавати дані.

Хмарна інфраструктура: це система серверів та інфраструктури, яка забезпечує збереження та обробку даних, які отримуються з пристроїв IoT.

Це можуть бути великі центри обробки даних, хмарні платформи або сервери, які знаходяться на кількох рівнях, щоб забезпечити відповідну пропускну здатність та швидкість обробки.

Додатки для користувачів: це програмне забезпечення, яке забезпечує взаємодію з користувачами.Dodatki для користувачів можуть бути веб-сайтами, мобільними додатками або програмним забезпеченням, яке встановлюється на різних пристроях. Ці додатки забезпечують користувачам можливість контролювати та отримувати інформацію з пристроїв IoT.

Загалом, архітектура Інтернету речей має за мету забезпечити ефективну взаємодію між пристроями IoT, хмарною інфраструктурою та додатками для користувачів, щоб забезпечити надійну та ефективну роботу цієї системи.

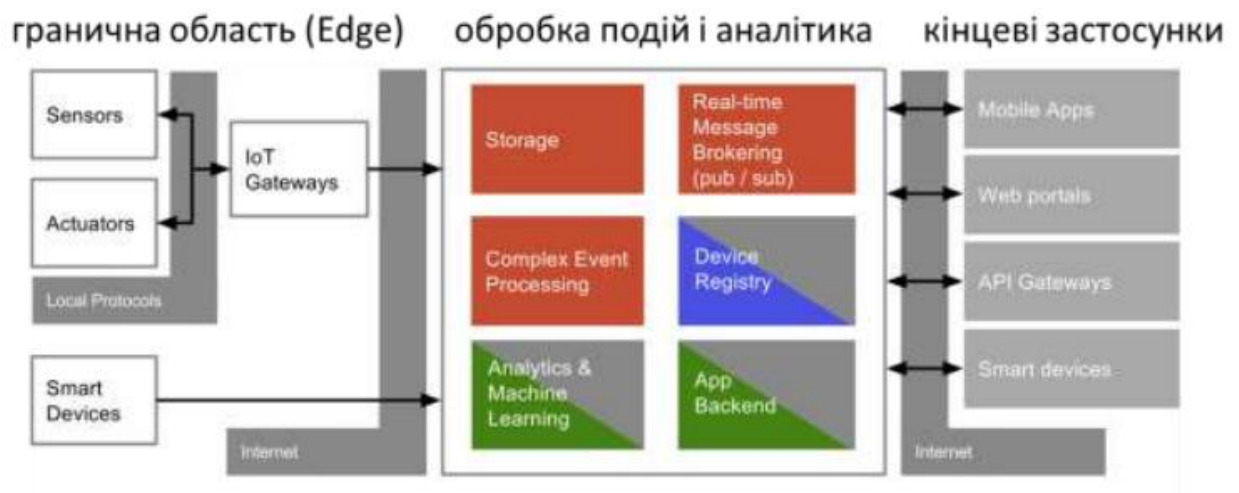


Рис. 1.4. Архітектура Інтернету речей [25]

За допомогою датчиків та виконавчих механізмів здійснюється взаємодія з різними об'єктами. Гранична область (Edge) створюється за допомогою інфраструктури датчиків та інтеграції з мережею Інтернет, де дані обробляються та зберігаються згідно з потребами задачі (рівень обробки подій і аналітики, event processing, Platform).

На цьому рівні дані зберігаються (storage), обробляються (Event Processing) та передаються потрібним додаткам (Real-Time Message

Brokering, Stream Processing). Тут також відбувається керування пристроями з граничної області та їх адміністрування (Device Registry, Edge Device Management). Дані обробляються з використанням аналітичних сервісів (Analytics) на їхній основі проводиться машинне навчання (Machine Learning), яке дає можливість зробити висновки про об'єкт. Цей рівень реалізований з використанням хмарних (Cloud) або туманних (Fog) обчислень. "

Через кінцеві застосунки з використанням Internet відбувається отримання результатів, контроль, віддалене керування та адміністрування системи.[3]

На рис.1.5 зображено схожу попередній архітектуру, але уже у вигляді сервісів. Область Edge зображена у вигляді датчиків (Sensors), Device Hub/Gateway (збір та маршрутизація даних) та Device Management (керування пристроями). Вони виконуються як хмарні обчислення і на граничних пристроях. Функції первинної обробки подій та збереження (даних) зведені до Data Management. Інші функції обробки показані як додатки PaaS, які взаємодіють з сервісами керування даних через API (Application Program Interface).

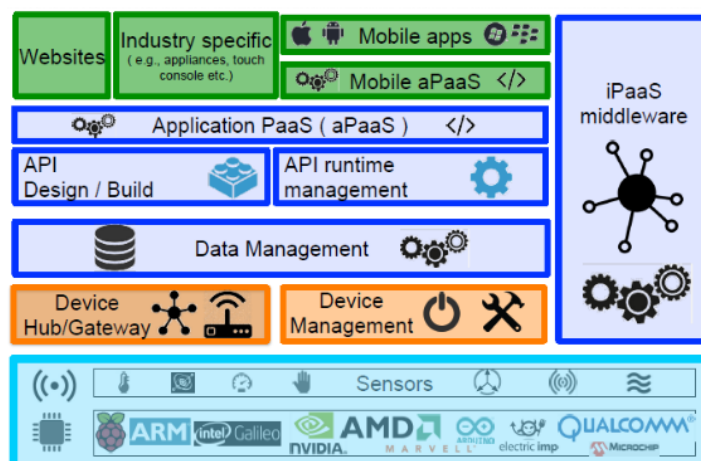


Рис.1.5. Архітектура IoT у вигляді сервісів [25]

Ключові будівельні блоки (рис. 1.6) будь-якої структури IoT завжди однакові, а саме:

- розумні речі ;
- мережі та шлюзи, що дозволяють малопотужним пристроям виходити у Інтернет;
- проміжне програмне забезпечення або платформи Інтернету речей , що забезпечують простори для зберігання даних і передові обчислювальні механізми разом з аналітичними можливостями;
- додатків, що дозволяє кінцевим користувачам отримувати користь від IoT і маніпулювати фізичним світом. [5]

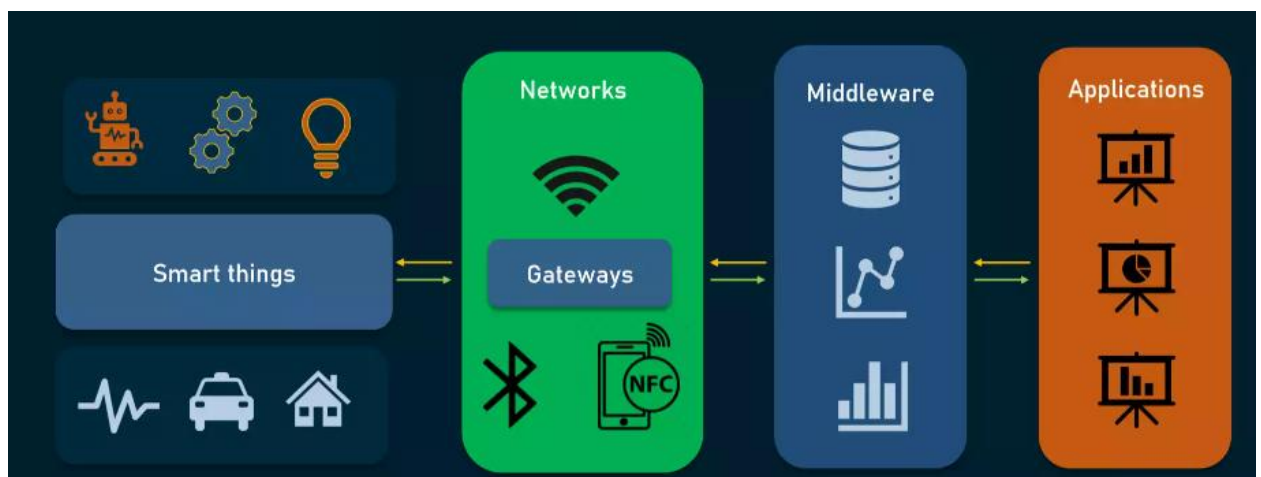


Рис. 1.6. Ключові блоки IoT [26]

**1.1.1 Семирівнева архітектура IoT (рис.1.20). Рівень сприйняття: перетворення аналогових сигналів у цифрові дані та навпаки. Датчики та приводи**

У IoT датчики застосовують, щоб збирати інформацію з різних пристроїв (рис. 1.7) : розумних браслетів, верстатів, автомобілів. Вони можуть вимірювати різні фізичні показники: від температури повітря рівня інфрачервоного випромінювання. Для цього датчики оснащують чутливими

елементами, наприклад, світлочутливими діодами або металевими пластинками, що змінюють властивості залежно від середовища.

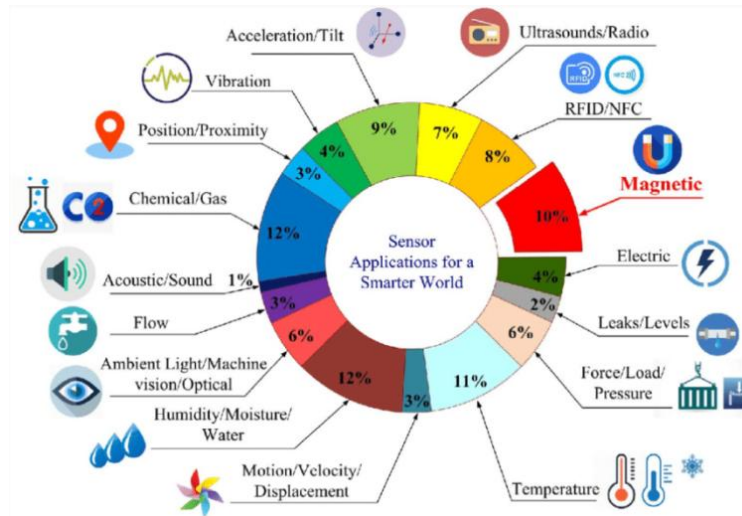


Рис.1.7. Показники, які можуть вимірювати датчики IoT [27]

Для передачі інформації на звичайний сервер або хмару, де вона буде оброблена і використана далі, датчики оснащують модулем, що передає. У IoT це зазвичай модуль бездротового зв'язку, наприклад: Bluetooth, NFC, RF чи Wi-Fi. Іноді кілька датчиків підключають до одного модуля, що передає.

Будь-які датчики збирають аналогові дані (рис.1.8). Такі дані безперервні – їх можна подати у вигляді звивистої лінії, безперервного потоку інформації. Передавати такі дані за допомогою кабелю або бездротового зв'язку не можна — спочатку сигнал потрібно перетворити на цифрові дані.

Цифрові дані - це послідовність з нулів та одиниць. Щоб перетворити аналогові дані на цифрові, безперервну аналогову лінію потрібно поділити кілька окремих ділянок, і кожному ділянці присвоїти конкретне значення.

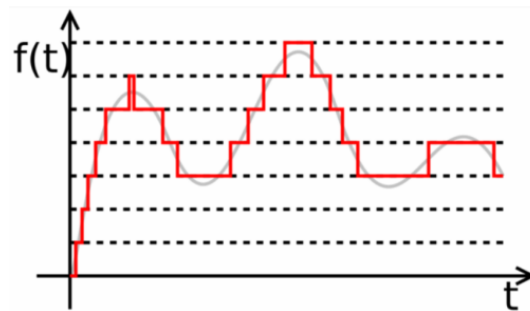


Рис.1.8. Хвиляста лінія - безперервний аналоговий сигнал, червона уривчаста - цифровий сигнал. Кожній окремій сходинці цифрового сигналу присвоєно своє значення з комбінації нулів та одиниць – його можна передавати кабелем або бездротовою мережею. [28]

Приводи у свою чергу перетворюють дані, що були згенеровані розумними об'єктами, у дії.

Давайте уявимо розумну систему регулювання температури у будинку (рис. 1.9) . Датчики збирають всі необхідні дані, потім система аналізує ситуацію і керує приводами вмикати кондиціонер на певну температуру. Кондиціонер залишається ввімкнутим поки датчики не повідомлять про встановлення потрібної температури повітря.

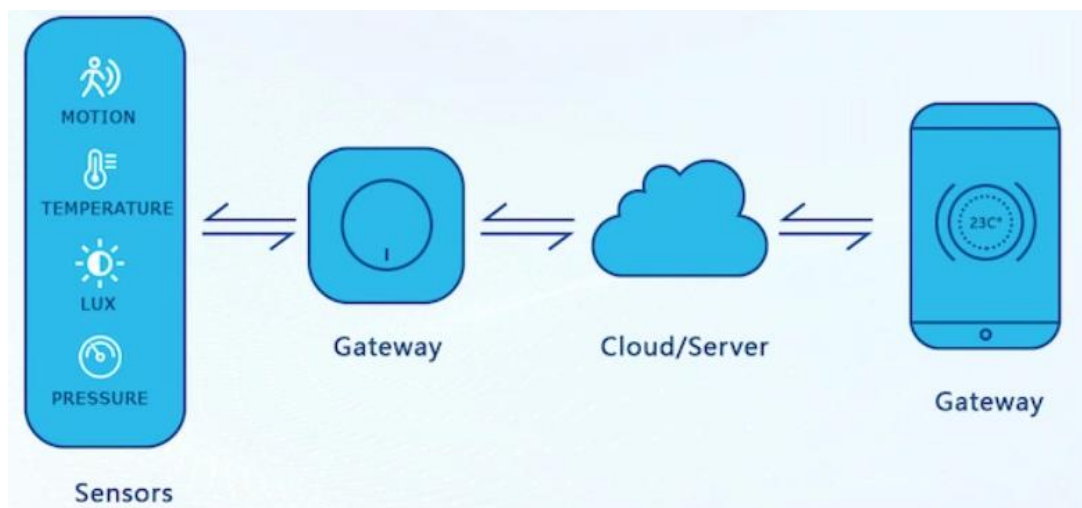


Рис. 1.9. Робота датчиків та приводів Іот [29]

### 1.1.2 Рівень підключення: увімкнення передачі даних

Другий рівень відповідає за всі комунікації між пристроями, мережами та хмарними сервісами, які складають інфраструктуру IoT.

З'єднання між фізичним рівнем і хмарою досягається двома способами (рис.1.10):

1. напряду, використовуючи стек TCP або UDP/IP;
2. через шлюзи — апаратні або програмні модулі, що виконують трансляцію між різними протоколами, а також шифрування та дешифрування даних IoT.

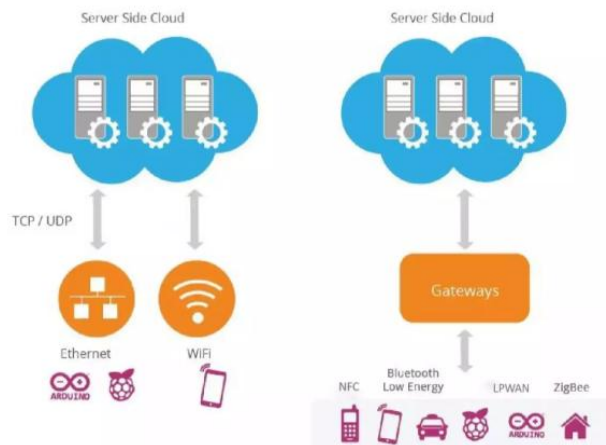


Рис. 1.10. Дві ключові моделі підключення між фізичним і хмарним рівнями в IoT. [30]

**Ethernet** підключає стаціонарні або стаціонарні пристрої IoT (рис.1.11), такі як камери безпеки та відеоканери, стаціонарне промислове обладнання та ігрові консолі.

**WiFi**, найпопулярніша технологія бездротових мереж, чудово підходить для рішень IoT з інтенсивним об'ємом даних, які легко заряджати та працювати в межах невеликої території. Хорошим прикладом

використання є пристрої розумного будинку, підключені до електричної мережі.



Рис.1.11. Ethernet та WiFi [31]

**NFC** (Near Field Communication) (рис.1.12) забезпечує простий і безпечний обмін даними між двома пристроями на відстані 4 дюйми (10 см) або менше.



Рис.1.12. Near Field Communication [32]

**Bluetooth** широко використовується носимими пристроями для зв'язку на короткій відстані (рис.1.13). Щоб задовольнити потреби малопотужних пристроїв IoT, був розроблений стандарт Bluetooth Low-Energy (BLE). Він передає лише невеликі порції даних і не працює для великих файлів.



Рис.1.13. Використання Bluetooth [33]

**LPWAN** (Low-power Wide-area Network) була створена спеціально для пристроїв IoT (рис.1.14). Він забезпечує бездротове з'єднання на великій відстані за низького енергоспоживання та час роботи батареї понад 10 років. Надсилаючи дані періодично невеликими порціями, технологія відповідає вимогам розумних міст, розумних будівель і розумного сільського господарства (польовий моніторинг).



Рис.1.14. Використання Low-power Wide-area Network [34]

**ZigBee** — це малопотужна бездротова мережа для передачі невеликих пакетів даних на короткі відстані. Особливістю ZigBee є те, що він може обслуговувати до 65 000 вузлів. Створений спеціально для домашньої автоматизації (рис.1.15), він також працює з малопотужними пристроями на промислових, наукових і медичних об'єктах.

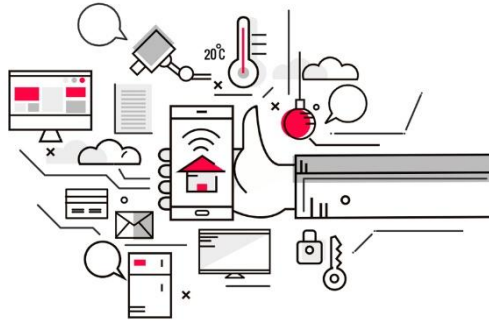


Рис.1.15. Використання ZigBee [35]

**Стільникові мережі** (рис.1.17) пропонують надійну передачу даних і майже глобальне покриття. Є два стільникових стандарти, розроблені спеціально для речей IoT.

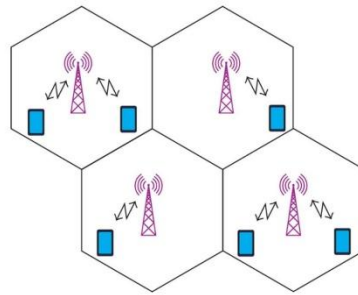


Рис.1.16. Стільниковий зв'язок [36]

**LTE-M** (Long Term Evolution for Machines) дозволяє пристроям спілкуватися безпосередньо з хмарою та обмінюватися великими обсягами даних (рис. 1.17).

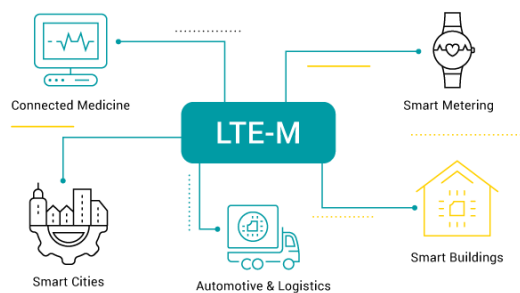


Рис.1.17. Використання Long Term Evolution for Machines [37]

**NB-IoT** або вузькосмуговий IoT використовує низькочастотні канали для надсилення невеликих пакетів даних (рис.1.18).

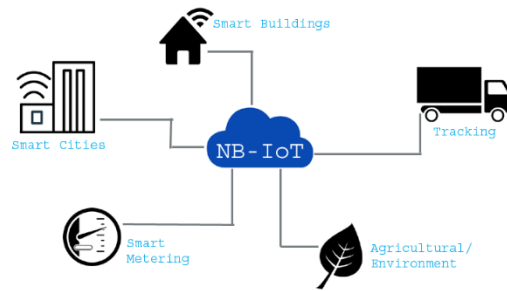


Рис.1.18. Використання NB-IoT [38]

Після того, як частини рішення IoT об'єднані в мережу, їм все одно потрібні протоколи обміну повідомленнями для обміну даними між пристроями та з хмарою.

Найпопулярніші протоколи, які використовуються в екосистемах IoT (рис.1.19):

- **DDS (служба розповсюдження даних)**, яка безпосередньо пов'язує речі IoT один з одним і з додатками, що відповідають вимогам систем реального часу;
- **AMQP (Advanced Message Queuing Protocol)**, призначений для однорангового обміну даними між серверами;
- **CoAP (протокол обмеженого застосування)**, програмний протокол, розроблений для обмежених пристроїв — кінцевих вузлів з обмеженою пам'яттю та потужністю (наприклад, бездротові датчики). Це дуже схоже на HTTP, але використовує менше ресурсів;
- **MQTT (телеметричний транспорт черги повідомлень)** — легкий протокол обміну повідомленнями, створений на основі стеку TCP/IP для централізованого збору даних із малопотужних пристроїв.

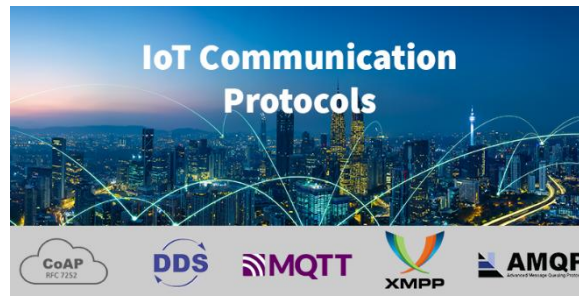


Рис.1.19. Протоколи IoT [39]

### 1.1.3 Граничний або туманний обчислювальний рівень: зменшення затримки системи

Цей рівень необхідний для того, щоб системи IoT відповідали вимогам до швидкості, безпеки та масштабу мобільної мережі 5-го покоління або 5G. Новий бездротовий стандарт обіцяє більш високу швидкість, меншу затримку та здатність працювати з більшою кількістю підключених пристроїв, ніж поточний стандарт 4G.

Ідея периферійних або туманних обчислень полягає в тому, щоб обробляти та зберігати інформацію якомога раніше та якомога ближче до її джерел. Цей підхід дозволяє аналізувати та перетворювати великі обсяги даних у реальному часі локально, на межі мереж. Таким чином, ви економите час та інші ресурси, які в іншому випадку знадобилися б для надсилання всіх даних до хмарних служб. Результатом є скорочення затримки системи, що веде до відповідей у реальному часі та підвищення продуктивності.

Граничні обчислення відбуваються на шлюзах, локальних серверах або інших периферійних вузлах, розкиданих по мережі.

На цьому рівні дані:

- оцінюються, щоб визначити, чи потребує подальшої обробки на вищих рівнях,
- відформатовуються для подальшої обробки,
- розшифровуються,
- фільтруються,

- переспрямовуються до додаткового пункту призначення

Підсумовуючи, перші три шари бачать дані в русі, оскільки вони постійно рухаються та змінюються. Лише після переходу на наступний рівень дані нарешті перебувають у стані спокою та доступні для використання споживчими програмами.

#### **1.1.4 Рівень обробки: використання необроблених даних**

Рівень обробки накопичує, зберігає та обробляє дані, які надходять із попереднього рівня. Усі ці завдання зазвичай виконуються через платформи Інтернету речей і включають два основні етапи.

##### ***Етап накопичення даних***

Дані в режимі реального часу збираються через API і залишаються в стані спокою, щоб відповідати вимогам додатків, які не працюють у режимі реального часу. Етап компонента накопичення даних працює як транзитний центр між генерацією даних на основі подій і споживанням даних на основі запитів.

Серед іншого етап визначає, чи відповідають дані вимогам бізнесу та де їх слід розмістити. Він зберігає дані в різноманітних сховищах, від озер даних, здатних зберігати неструктуровані дані, такі як зображення та відеопотоки, до сховищ подій і баз даних телеметрії. Загальна мета — відсортувати велику кількість різноманітних даних і зберегти їх найефективнішим способом.

##### ***Етап абстракції даних***

Тут завершується підготовка даних, щоб програми-користувачі могли використовувати їх для генерування розуміння. Весь процес складається з наступних кроків:

1. поєднання даних з різних джерел;
2. узгодження кількох форматів даних;

3. агрегування даних в одному місці або надання доступу до них незалежно від місця розташування за допомогою віртуалізації даних.

Так само дані, зібрані на прикладному рівні, переформатуються тут для надсилання на фізичний рівень, щоб пристрої могли їх «зрозуміти».

Разом етапи накопичення та абстракції даних завуальовують деталі апаратного забезпечення, підвищуючи сумісність інтелектуальних пристроїв. Більш того, вони дозволяють розробникам програмного забезпечення зосередитися на вирішенні конкретних бізнес-завдань, а не на заглибленні в специфікації пристроїв від різних виробників.

### **1.1.5 Прикладний рівень: вирішення бізнес-вимог**

На цьому рівні інформація аналізується програмним забезпеченням, щоб дати відповіді на ключові питання бізнесу. Існують сотні додатків IoT, які відрізняються за складністю та функціями, використовують різні стеки технологій та операційні системи.

Деякі приклади:

- програмне забезпечення для моніторингу та керування пристроєм,
- мобільні програми для простої взаємодії,
- служби бізнес-аналітики 1
- аналітичні рішення з використанням машинного навчання.

Наразі програми можна створювати безпосередньо на платформах IoT, які пропонують інфраструктуру розробки програмного забезпечення з готовими до використання інструментами для аналізу даних, розширеної аналітики та візуалізації даних . В іншому випадку програми IoT використовують API для інтеграції з проміжним програмним забезпеченням.

### 1.1.6 Бізнес-рівень: впровадження рішень на основі даних

Інформація, згенерована на попередніх рівнях, приносить цінність, якщо тільки вона призводить до вирішення проблеми та досягнення бізнес-цілей. Нові дані повинні ініціювати співпрацю між зацікавленими сторонами, які, у свою чергу, запроваджують нові процеси для підвищення продуктивності.

У прийнятті рішень зазвичай бере участь більше ніж одна особа, яка працює з більш ніж одним програмним рішенням. З цієї причини бізнес-рівень визначається як окремий етап, вищий, ніж один прикладний рівень.

### 1.1.7 Рівень безпеки: запобігання витоку даних

Само собою зрозуміло, що має бути рівень безпеки, який охоплює всі вищезгадані рівні.

**Безпека Інтернету речей** – велика тема, яка варта окремої статті. Тут ми лише вкажемо на основні особливості безпечної архітектури на різних рівнях.

**Безпека пристрою.** Сучасні виробники пристроїв IoT зазвичай інтегрують функції безпеки як в апаратне забезпечення, так і в вбудоване програмне забезпечення.

Це включає:

- вбудовані мікросхеми TPM (Trusted Platform Module) з криптографічними ключами для автентифікації та захисту кінцевих пристроїв;
- безпечний процес завантаження, який запобігає запуску несанкціонованого коду на увімкненому пристрої;
- регулярне оновлення патчів безпеки;
- фізичний захист, як-от металеві екрани для блокування фізичного доступу до пристрою.

**Безпека підключення.** Незалежно від того, чи надсилаються дані через пристрої, мережі чи програми, вони мають бути зашифровані. В іншому випадку конфіденційну інформацію може прочитати будь-хто, хто перехопить інформацію під час передачі. Орієнтовані на IoT протоколи обміну повідомленнями, такі як MQTT, AMQP і DDS, можуть використовувати стандартний криптографічний протокол безпеки транспортного рівня (TSL) для забезпечення наскрізного захисту даних.

**Хмарна безпека.** Дані, які зберігаються в хмарі, також мають бути зашифровані, щоб зменшити ризики розкриття конфіденційної інформації зловмисникам. Хмарна безпека також передбачає механізми автентифікації та авторизації для обмеження доступу до додатків IoT. Іншим важливим методом безпеки є керування ідентифікацією пристрою, щоб перевірити надійність пристрою, перш ніж дозволити йому підключитися до хмари. [5]

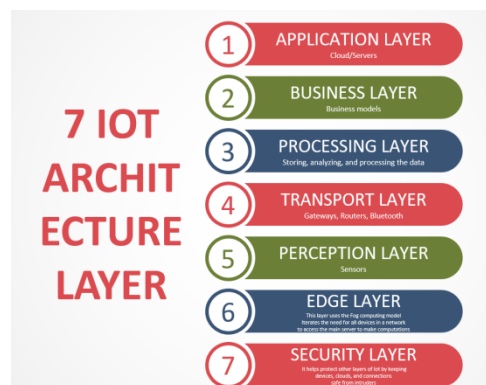


Рис.1.20. 7 рівнева архітектура IoT.

## 1.2 Використання інтернету речей

Згідно з оновленою інформаційною панеллю Global IoT Enterprise Spending Dashboard IoT Analytics за березень 2022 року, прогнозується, що розмір ринку IoT зросте на 22% CAGR і досягне оцінки в 525 мільярдів доларів до 2027 року.

Причиною такого розповсюдження рішень IoT є переважно розвиток технологій. Зараз у великій кількості доступне недороге апаратне

забезпечення з низьким споживанням енергії, наприклад датчики та мітки RFID. Бездротові мережі та новіші стільникові мережі забезпечують високу пропускну здатність, необхідну для роботи системи IoT. Алгоритми машинного навчання стали складними та вдосконаленими, що забезпечує швидкий аналіз даних. Крім того, хмарні обчислення дозволяють системам легко зберігати, передавати та аналізувати дані.

Окрім технологічного прогресу, поточні глобальні проблеми вимагають, щоб усі галузі шукали рішення в Інтернеті речей. Наприклад, «The Climate Pledge» — це ініціатива, до якої приєдналися такі міжнародні організації, як Mercedes Benz, Amazon, Microsoft і Unilever. У ньому зазначається амбітна мета – звести до 2040 року чисті викиди вуглекислого газу. Посилення екстремальних погодних явищ, таких як лісові пожежі та повені, зіграло певну роль у виникненні цієї ініціативи. Компанії інвестують в управління енергією та ресурсами на основі IoT, щоб це стало реальністю.

У більших масштабах уряди починають усвідомлювати необхідність скорочення споживання викопного палива. Провідні автомобільні компанії, такі як Ford, працюють над подвоєнням своїх електропарків. Збільшення кількості електромобілів також спричинило інтелектуальні мережі та інвестиції в розумне містобудування.

Пандемія прискорила впровадження дистанційної роботи, телемедицини, дистанційної освіти та автоматизації кількох переважно ручних процесів.

Хмарні постачальники все більше зосереджуються на IoT-хмарі, щоб не відставати від цих змін. Ці хмари забезпечують комунікаційні послуги та галузеві рішення для організацій, які створюють або використовують системи IoT.

В результаті цих факторів у просторі IoT з'являються безмежні програми. Деякі з них все ще є експериментальними, а інші добре зарекомендували себе.

## Застосування IoT (рис. 1.21):



Рис. 1.21. Використання Інтернету речей

### 1.2.1 Створення кращих корпоративних рішень

Великі підприємства виділяють ІТ-спеціаліст для створення, підтримки та моніторингу своєї технологічної інфраструктури.

- Рішення безпеки на основі IoT використовує дані в реальному часі, щоб забезпечити тактику пом'якшення та запобігання атакам на кібербезпеку . Він навіть може підготувати відповіді на інциденти та політики безпеки на основі мережевої активності.
- Ще одним очевидним застосуванням Інтернету речей є прийняття рішень на основі аналізу клієнтів . Ніколи раніше підприємства не мали стільки даних у реальному часі для роботи.
- Бібліотека інфраструктури інформаційних технологій (ITIL) містить докладні методи управління ІТ-активами та послугами . Ці практики зосереджені на узгодженні ІТ-послуг із вимогами бізнесу. Зараз інфраструктура підприємства складніша, ніж будь-коли: різні пристрої взаємодіють один з одним, щоб забезпечити роботу системи.

Під час створення ІТІЛ слід стратегічно розглядати практику ІТІЛ, оскільки ІоТ зрештою живить саму бібліотеку.

### 1.2.2 Інтеграція розумних будинків

Найпомітнішим застосуванням Інтернету речей є розумний дім (рис.1.22) . Він використовує датчики для контролю та підтримки освітлення, управління ресурсами та систем безпеки. Розумний дім – це менша, незалежна версія розумного міста.

Прикладом системи розумного будинку на основі ІоТ є Jarvis Марка Цукерберга. Система розумного будинку Цукерберга використовує обробку природної мови для контекстної обробки голосових команд. Він має інтернет-перемикачі для керування підключеними до них приладами. Система піклується про освітлення кімнат залежно від кількості людей і навіть про відтворення персоналізованої музики залежно від того, хто знаходиться в кімнаті. Його система безпеки використовує розпізнавання обличчя, щоб попередити родину про особу їхніх відвідувачів.



Рис.1.22. Інтеграція розумних будинків [40]

### 1.2.3 Інноваційне сільське господарство

Сільське господарство як галузь може отримати величезну користь від Інтернету речей (рис. 1.23). Очікується, що до 2050 року населення світу зросте приблизно до 10 мільярдів. Таким чином, уряди вважають пріоритетом розширення сільськогосподарських систем. Це, у поєднанні зі зміною клімату, змушує фермерів поєднувати технології з вирощуванням.

Датчики використовуються для отримання детальної інформації про **хімічний склад ґрунту та профілі добрив**. Рівень CO<sub>2</sub>, вологість, температура, рівень кислотності та наявність відповідних поживних речовин впливають на те, наскільки хорошим буде врожай.

**Розумне зрошення** – це додаток Інтернету речей для регулювання та ефективного використання води для сільського господарства. Система IoT починає потік води лише тоді, коли ґрунт досягає певного рівня сухості. Він також припиняє подачу, коли досягається певний рівень вологості. Це зменшує втрати, спричинені людськими помилками.

**Відстеження худоби** передбачає використання чіпів RFID для відстеження життєво важливих показників тварини, відомостей про вакцинацію та місцезнаходження.

**Розумна теплиця** використовує мікроклімат для вирощування врожаю замість того, щоб покладатися на мінливі погодні умови. Датчики контролюють і контролюють всі параметри і мають автоматизовані системи для світла і води.

**Предикативне землеробство** – це практика використання інформації, зібраної з часом, для вдосконалення та впровадження сільськогосподарських практик. Дані, що надаються цими датчиками, дозволяють фермерам визначитися з ідеальними параметрами росту та відповідними добривами.

Sainthus, дублінська компанія, що займається баченням, використовує прогнози зображення для моніторингу худоби. Він відстежує ключові дані, такі як споживання їжі та води, моделі поведінки та виявлення тепла. Фермери можуть використовувати цю інформацію для прийняття рішень щодо виробництва молока, управління відтворенням і загального здоров'я тварин. Він навіть може похвалитися власним програмним забезпеченням для розпізнавання тварин на основі шаблонів шкіри і розпізнавання облич.



Рис.1.23. Інноваційне сільське господарство [41]

### 1.2.4 Створення розумніших міст

Розумне місто (рис. 1.24) – це міське місто, яке використовує датчики та стільникову або бездротову технологію, розміщену у повсюдних місцях, таких як ліхтарні стовпи та антени. Є кілька аспектів, у яких можна включити ІоТ у функціонування міста:

- **Управління дорожнім рухом:** датчики на дорогах і світлофори надсилають дані в системи ІоТ. Ці дані, накопичені з часом, дозволяють чиновникам аналізувати моделі трафіку та години пік. Це також допомагає створювати рішення для вузьких місць. Пасажири можуть використовувати цю інформацію, щоб визначити, які райони перевантажені та які альтернативні маршрути можна використовувати. Версія цього вже існує в сторонніх картографічних службах, таких як Google Maps.

- **Моніторинг забруднення:** Нагальною проблемою, з якою стикається кожна країна світу, є забруднення повітря. За допомогою існуючих датчиків можна легко вимірювати такі параметри, як температура, рівень CO<sub>2</sub>, дим і вологість. Розумні міста використовують це для збору даних про якість повітря та розробки методів пом'якшення.

- **Управління ресурсами:** найважливішими факторами, які впливають на життєздатність міста, є управління відходами, водою та електроенергією.

При управлінні водою датчики прикріплюються всередині або зовні до лічильників води. Ці датчики надають інформацію для розуміння моделей споживання. Вони виявляють несправності в подачі та автоматично починають необхідний курс дій. Тенденції у втратах води можна використовувати для розробки ефективної системи рециркуляції води.

Системи управління відходами з підтримкою Інтернету речей створюють географічне відображення виробництва відходів. Ці системи самі запускають процес оформлення; наприклад, генеруючи сповіщення, коли кошик заповнений. Вони також надають більше інформації про розділення відходів і про те, як люди можуть покращити переробку відходів.

Управління електроенергією здійснюється у вигляді розумної електромережі, про яку детально розповідається в цій статті.

- **Рішення щодо паркування:** проблеми з паркуванням, хоч і здаються незначними, відіграють важливу роль в управлінні дорожнім рухом. Розумні рішення для паркування надають водіям інформацію про наявні вільні місця в реальному часі.

- **Управління інфраструктурою:** утримання громадської інфраструктури, такої як вуличні ліхтарі, дороги, парки та лінії газопостачання, коштує багато. Ремонтні роботи в будь-якому з них призводять до збоїв у повсякденному функціонуванні. Системи технічного обслуговування та моніторингу на основі Інтернету речей виявляють ознаки зносу під час аналізу моделей. Такий проактивний підхід може заощадити місту багато грошей.

- **Управління стихійними лихами:** Інтернет речей можна використовувати для підключення зон, схильних до стихійних лих, до системи сповіщень. Лісову пожежу, наприклад, можна виявити та приборкати до того, як вона виходить з-під контролю.

У 2017 році Іспанія оголосила, що перетворює свої Балеарські острови на лабораторію Інтернету речей. На існуючих теле- та радіощоглах встановлено датчики для відстеження рівня забруднення повітря та шуму. Чиновники також планують використовувати IoT для туризму та управління натовпом.

У Пало-Альто, штат Каліфорнія, на паркувальних місцях у місті впроваджено розумну систему паркування. Він направляє водіїв до найближчого паркувального місця та, як доведено, зменшує затори.



Рис.1.24. Розумне місто [42]

### 1.2.5 Модернізація управління ланцюгом поставок

**Управління ланцюгом поставок (SCM)** (рис.1.25) — це процес, який спрощує потік товарів і послуг від закупівлі сировини до клієнтів. Це включало управління запасами, управління автопарком, відносини з постачальниками та планове технічне обслуговування.

Під час пандемії багато компаній постраждали від проблем із ланцюгом поставок, особливо коли це призвело до глобального припинення роботи на початку 2020 року. Оскільки операції перейшли на дистанційний режим, організаціям доцільно було розглянути можливість інтеграції IoT у свої процеси SCM.

- Інтернет речей використовується на кількох рівнях процесу SCM. Транспортні компанії використовують **трекери**, щоб стежити за активами. Вони також аналізують маршрути доставки, щоб

визначити найшвидші та найбільш економічні маршрути. Інші параметри, такі як температура та вологість контейнера, також можна відстежувати та контролювати за допомогою IoT.

- Система IoT дозволяє менеджерам переглянути процес ланцюжка поставок, **дозволяючи розумний вибір маршрутів**. Це означає, що підприємства можуть бути впевнені в стійкості ланцюга поставок.

- **Керування автопарками** в режимі реального часу та дистанційне керування забезпечує безперебійну роботу для менеджерів і клієнтів. Про будь-які затримки або проблеми з транспортуванням можна автоматично повідомити відповідний персонал.

IoT в управлінні автопарком забезпечує наскрізне з'єднання між транспортними засобами та менеджерами, а також транспортними засобами та водіями. Окрім управління активами, IoT також піклується про справність транспортних засобів, забезпечуючи дотримання правил, наприклад щодо викидів забруднюючих речовин.



Рис.1.25. Модернізація управління ланцюгом поставок [43]

### 1.2.6 Трансформація охорони здоров'я

Пандемія прискорила використання IoT в галузі охорони здоров'я. Інтернет речей забезпечує набагато ефективніший зв'язок між пацієнтами, лікарями та фармацевтичними препаратами (рис. 1.26). Традиційно реактивні медичні цикли тепер можуть бути проактивними.

- Прикріплення датчиків до пацієнта вдома дозволяє **лікарям дистанційно контролювати його стан**. Постійне порушення параметрів негайно попереджає лікаря, створюючи попереджувальні дії. Лікарі можуть використовувати це для моніторингу пацієнтів групи ризику, таких як літні люди та ті, хто страждає на хронічні захворювання.

- Окрім моніторингу, Інтернет речей також може **оптимізувати медичні записи пацієнтів і доступ до них**, роблячи дані в реальному часі доступними для всіх відділень.

- **Медичні дослідження** до сьогоднішнього дня завжди базувалися на даних, створених у контрольованому середовищі, або даних, отриманих постфактум. Такі дані в реальному часі, зібрані у великих кількостях, можуть значно покращити дослідження.

- IoT використовується для **оптимізації виробничого процесу у фармацевтичній частині**. Прямим результатом цього є зниження цін на ліки. Він також використовується для **інтелектуального управління запасами**.

- Під час боротьби з пандемією COVID-19 Інтернет речей використовувався в багатьох сферах. **Телемедицина та моніторинг холодового ланцюга вакцин** були двома впровадженнями IoT.

- Zipline – це компанія з доставки медичної продукції, яка використовувала дрони для **доставки ліків та інструментів** до сільських медичних центрів, таких як ті, що знаходяться в Руанді та Гані.

- **Безперервні монітори рівня глюкози (CGM)**, такі як Medtronic і Dexcom, контролюють пацієнтів із діабетом за допомогою датчиків, вставлених у шкіру. Ці системи дають можливість побачити структуру глікемії у вагітних жінок з діабетом з висоти пташиного польоту. Безперервні дані цих систем у режимі реального часу дозволяють лікарям змінювати ліки та рекомендувати зміни, якщо це необхідно.



скоротити витрати, коли вартість енергії досягає піку, як це сталося в Європі через українсько-російську війну.

Енергію можна створювати як на традиційних електростанціях, так і на сонячних і вітрових електростанціях. Розумні електромережі дозволяють плавно перемикатися між різними джерелами живлення. Вони забезпечують підтримку правильних параметрів, наприклад напруги, при цьому.

Як і в будь-якій іншій системі IoT, інтелектуальні електромережі дозволяють передбачити технічне обслуговування. Це значно скорочує витрати.

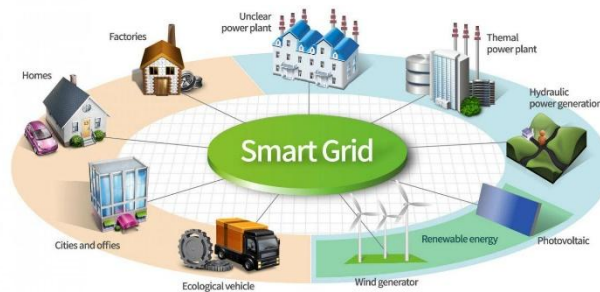


Рис.1.27. Розумні мережі [45]

### 1.2.8 Революція в носінні

Ще одним видимим впровадженням Інтернету речей є **технологія, що носить**. Носимі технології включають розумні годинники, фітнес-трекери, розумні окуляри та навіть пов'язану тканину.

- Функціональність **розумних годинників** варіюється від читання текстових повідомлень і показу сповіщень до відстеження місцезнаходження та показу нагадувань. Ці носії корисні для батьків, які відстежують своїх дітей.

- Носимі речі відіграють важливу роль у **догляді за людьми похилого віку**. Постійний моніторинг і моніторинг місця розташування разом тримають опікунів у курсі подій. Це не зупиняється на досягнутому. Наносенсори можуть кількісно передбачити ризик можливих

захворювань, таких як рак. Раннє виявлення та профілактика є ключовими застосуваннями носимих технологій на фронті медицини.

- У поєднанні з наголовним обладнанням доповненої реальності (AR) носіння також надає хірургам історію пацієнтів, старі дані та поточні дані в реальному часі під час операції.
- Носимі пристрої досліджуються у заводських умовах, щоб зменшити кількість нещасних випадків на виробництві. Військові також використовують їх для бою.

Найвидатнішим прикладом технології IoT, що носить, є Fitbit (рис.1.28). Fitbit відстежує активність користувачів і режим сну, щоб стимулювати здоровий спосіб життя.



Рис.1.28. Fitbit [46]

### 1.2.9 Інтеграція підключених фабрик

Інтернет речей — це надання фізичним пристроям більшої цифрової популярності. Яке краще застосування для цього, ніж на **заводі** ?

Промисловий IoT (IIoT) — це Інтернет речей на заводському рівні. IIoT часто називають четвертою хвилею промислової революції або Індустрією 4.0.

- Більшість заводів підписуються на корпоративне управління активами (EAM) і комп'ютеризовані системи управління технічним обслуговуванням (CMMS) для управління технічним

**обслуговуванням** . Поєднання їх із сенсорами з підтримкою Інтернету речей подовжує фізичний термін служби машин і забезпечує доступність і надійність.

- Моніторинг пристроїв у режимі реального часу забезпечує прогнозований догляд і оптимальний стан **машини** . Технічне обслуговування на основі умов (CBM) — це стратегія технічного обслуговування, яка відстежує справність активів і виконує технічне обслуговування лише за необхідності. IoT дозволяє це зробити та скорочує витрати.

- ПоТ виходить за рамки управління ланцюгом поставок і управління технічним обслуговуванням. Зведені дані допомагають оптимізувати **розробку продукту та перевірку якості** . Він може покращити все, від упаковки до управління. ПоТ може автоматизувати багато функцій ручного обслуговування, що, у свою чергу, автоматизує масове виробництво.

Volkswagen вирішив перетворити свій головний завод у Вольфсбурзі, Німеччина, на розумну фабрику (рис1.29). Він залучив Nokia до створення системи IoT, зосередженої на автономній мережі 5G. Наразі він тестує сценарії використання розумної фабрики для точного налаштування та відкриття нових можливостей.



Рис.1.29. Розумна фабрика [47]

### 1.2.10 Переформатування гостинності

Індустрія гостинності пережила кілька потрясінь через безпрецедентну пандемію. Вартість персоналу та утримання не встигала за обмеженнями на подорожі, встановленими по всьому світу.

- Один із способів компенсувати витрати — звернутись до Інтернету речей для **автоматизації** (рис.1.30). Взаємодії можна звести до мінімуму відповідно до норм соціального дистанціювання, які, здається, приходять і йдуть. Мобільні електронні ключі, наприклад, позбавляють від необхідності особисто заселятися в готель.
- За допомогою **електронних ключів** керівництво готелю інформує про місцезнаходження гостя в готелі. Додаткові запити також можна стягувати безпосередньо на льоту.
- **Запити на обслуговування номерів і прибирання** можна зробити за допомогою мобільного телефону.
- **Розумне освітлення та побутова техніка** забезпечують гарний досвід клієнтів.

Готель YOTEL у Сінгапурі може похвалитися всіма цими системами IoT. У них також є регульовані смарт-ліжка, регульоване освітлення та смарт-телевізори. У готелі навіть є роботи, які виконують основні завдання з прибирання.

Тренди IoT, такі як безпілотні автомобілі, сюди не включені. Хоча вони вже деякий час у грі, залишилося ще багато роботи, щоб зробити це бездоганною реальністю. Безпілотні автомобілі та незліченна кількість інших програм — це те, на що світ з нетерпінням чекає в найближчому майбутньому. [4]



Рис.1.30. Розумний готель. [48]

## Висновки

В даному розділі було розглянуто архітектуру Інтернету речей та її складові; технології, які використовує ІоТ за для забезпечення ефективної роботи та виконання поставлених задач. Було розглянуто два основних стільникових стандарти, які було створено для ІоТ та найпопулярніші протоколи, які використовуються в ІоТ. Було також докладно розглянуто застосування ІоТ та як це вплинуло на сучасне життя.

## РОЗДІЛ 2

### СИСТЕМА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ НА БАЗІ МЕРЕЖІ 5G

Цифрова трансформація докорінно змінює суспільство, бізнес і спосіб нашого життя. Незважаючи на стрімкий прогрес, досягнутий за останні роки, ми все ще перебуваємо на початковій стадії подорожі завдяки повсюдним обчисленням, накопичувачам, живленню акумуляторів і мережам. Мобільні мережі є ключовим чинником цієї трансформації. Сьогодні він забезпечує глобальне, надійне та безпечне підключення до понад 6 мільярдів мобільних ширококутових пристроїв, а також майже 2 мільярдів підключених пристроїв до кінця 2022 року. Прогнозується, що до 2025 року кількість абонентів стільникового зв'язку IoT зростатиме зі зведеним річним темпом зростання (CAGR) на 16,6 відсотка, щоб наприкінці періоду досягти 3,74 мільярда. IoT відіграє ключову роль у цифровій трансформації, і завдяки швидкому розгортанню 5G впровадження IoT прискориться.

Завдяки 5G покоління мобільних мереж було вперше розроблено з нуля для підтримки випадків використання IoT. 5G постачається зі спеціальними можливостями, адаптованими для різних типів додатків IoT, замість того, щоб адаптувати більш загальний мобільний зв'язок, до якого вдавалися попередні покоління мереж.

#### 2.1 5G для IoT

Передбачається, що п'яте покоління внесе кілька важливих покращень: зменшить затримку (тобто час відповіді), щоб забезпечити зв'язок у реальному часі, а також покращить передачу даних, особливо швидкість висхідного потоку. На перший погляд може здатися, що 5G — це не реалізація нових, проривних ідей, як колись мобільних телефонів, а вдосконалення існуючих. Однак це не зовсім так, оскільки використання цього неймовірного потенціалу може створити цілий світ рішень, які досі

здавалися немислимими. Насправді сам стандарт 5G використовує нові технології та вдосконалює існуючі, щоб забезпечити безпрецедентну передачу даних. [6]

5G — це наступний еволюційний крок у мобільному зв'язку, на якому мобільні мережі раніше розвивалися від 2G до 3G до 4G. Не дивлячись на ажіотаж, 5G дійсно пропонує низьку затримку та високу швидкість підключення. Для багатьох додатків IoT це буде критично важливою технологією, але більшість IoT і надалі добре обслуговуватиметься 4G і підключенням, таким як LTE-M і NB-IoT.

LTE-M (також LTE-MTC і LTE Cat M) технологія LPWAN, яка дозволяє повторно використовувати встановлену базу LTE із розширеним покриттям. LTE-M найбільше підходить для глобального розгортання для пристроїв, які потребують оновлення по повітрю.

NB-IoT (вузькосмуговий IoT) — це радіотехнологія, що розгортається в мобільних мережах, яка особливо підходить для покриття всередині приміщень, має низьку вартість, тривалий час автономної роботи та велику кількість пристроїв.

### **2.1.1 Ключові переваги 5G для IoT**

- Покращений мобільний широкосмуговий доступ;
- Наднадійний зв'язок із низькою затримкою;
- Набагато швидше дані в містах, міських районах і локальних мережах;
- Покращено функції енергозбереження для пристроїв, що використовуються в приміщенні;
- Підключення до епохи Інтернету в сільській місцевості, оскільки застарілі 2G і 3G будуть замінені сучасними 5G.

### **Міліметрові хвилі (mmWave)**

Міліметрові хвилі – тобто радіочастоти від 30 до 300 ГГц – очевидно, не є чимось новим. Насправді перші дослідження про них відносяться до

сутінків 19 століття! Вони мають низку різноманітних застосувань, однак досі вони мало використовувалися в телекомунікаціях, хоча вони обіцяють незрівнянно вищу швидкість передачі. Це пояснюється тим, що вони мають відносно короткий радіус дії через високе затухання, тобто їхню тенденцію втрачати міцність, коли вони поглинаються повітрям або вологістю.

Існує негативна кореляція між частотою та її діапазоном (чим вища частота, тим коротший діапазон). Ось чому, говорячи про 5G, ми розрізняємо низький (600-850 МГц), середній (2,5-3,7 ГГц) і високий (25-39 ГГц) діапазон, оскільки кожен має різні особливості. Вищі діапазони чітко пропонують кращі швидкості, але за меншу відстань.

### Дрібні клітини (рис.2.1)

Щоб компенсувати обмежений діапазон, технології 5G вимагають так званих малих комірок. Їх «маленькість» по відношенню до звичних нам зараз розмірів веж стільникового зв'язку. Оскільки вони відповідно мають менший радіус дії, ідея полягає в тому, щоб створити щільну мережу цих стільників, щоб забезпечити належне покриття з підтримкою фемтосот, що забезпечує покриття в приміщенні (вдома або в невеликих офісах).

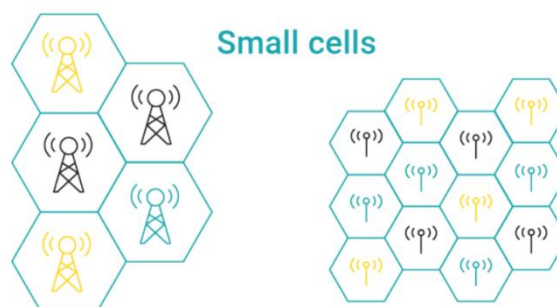


Рис. 2.1 .Дрібні клітини [49]

Це може здатися як витратна, так і трудомістка ідея. Дійсно, це має свої недоліки, але більша кількість клітин має і свої переваги. Кожен пристрій у комірці (чи то мікро-, чи макрокомірка) зв'язується з антеною по спеціальному каналу. Тому, враховуючи, що кількість доступних каналів

обмежена, розгортання менших стільників із меншим радіусом дії окупується збільшенням кількості доступних каналів . Таким чином менші камери можуть вмістити більше пристроїв.

### Формування променя (рис.2.2)

Крім того, стільники 5G використовують технологію обробки сигналу під назвою формування променя . Це дозволяє їм спрямовувати хвилі на певний пристрій за допомогою сигналу від кількох антен .

Зазвичай сигнал поширюється в усіх напрямках. Але якщо кілька антен, розташованих поблизу, транслюють один і той же сигнал в однаковий час, це спричиняє перешкоди. Для деяких хвиль ця інтерференція буде конструктивною (тобто понесе сигнал далі), а для деяких – деструктивною (послабить). Таким чином, ви можете створити спрямований «промінь», а не невибірково «бублик» сигналу.



Рис.2.2. Формування променя [49]

Формування променя не є абсолютно новою концепцією, і навіть зараз використовується в деяких пристроях WiFi корпоративного рівня для посилення сигналу. І хоча покращена якість сигналу, безперечно, є приємною перевагою, для 5G формування променя є головною перевагою . Як ми вже пояснювали, частоти, які використовуються в мережах 5G, набагато більш сприйнятливі до перешкод і не можуть справді добре проходити через перешкоди, такі як стіни. Тому здатність направляти сигнал стає вирішальним фактором для технологій 5G .

### Масивний MIMO (рис.2.3)

З формуванням променя пов'язана інша технологія: масивна MIMO (множинні входи, багаторазові виходи) . MIMO загалом дає змогу передавати й отримувати більше потоків даних одночасно. Масивний MIMO дає змогу робити це з ще більшою кількістю антен, ніж раніше.

До цього часу пристрої зазвичай оброблялися в порядку живої черги. Це означає, що кожен пристрій мав чекати своєї черги. Тепер за допомогою цієї технології можна одночасно обслуговувати кілька пристроїв . Оскільки масивний MIMO дозволяє використовувати сотні антен, кількість пристроїв, що обслуговуються одночасно, також зростає.



Рис. 2.3. Масивний MIMO [49]

### Нарізка мережі

Останнім елементом цієї технологічної головоломки є нарізка мережі . Це тип мережевої архітектури, який дає змогу створювати повністю незалежні віртуальні «зрізи» у фізичній мережі , кожен із яких задовольняє певні потреби.

Це особливо важливо в контексті Інтернету речей . Зрозуміло, що всі проекти IoT загалом потребують багато мереж . Однак не всі елементи проекту мають однакові вимоги до мережі, особливо тому, що проекти IoT, як правило, дуже широкі та різноманітні, охоплюючи багато різних пристроїв і програм. За допомогою нарізки мережі можна «налаштувати» параметри мережі для різних програм, щоб більш ефективно розподіляти ресурси . Наприклад, основні операції матимуть більш високі вимоги до рівня

обслуговування та завжди матимуть пріоритет, навіть у критичних умовах.  
[6]

## 2.2. Чотири основні технології 5G–IoT

Технології 5G–IoT (рис.2.4), що зосереджуються у чотирьох основних категоріях (рис.2.5):

- Віртуалізація функції бездротової мережі;
- Архітектура 5G–IoT;
- Неоднорідна мережа Heterogeneous Network (HetNet);
- Зв'язок між пристроями Device to Device (D2D) Communication. [7]

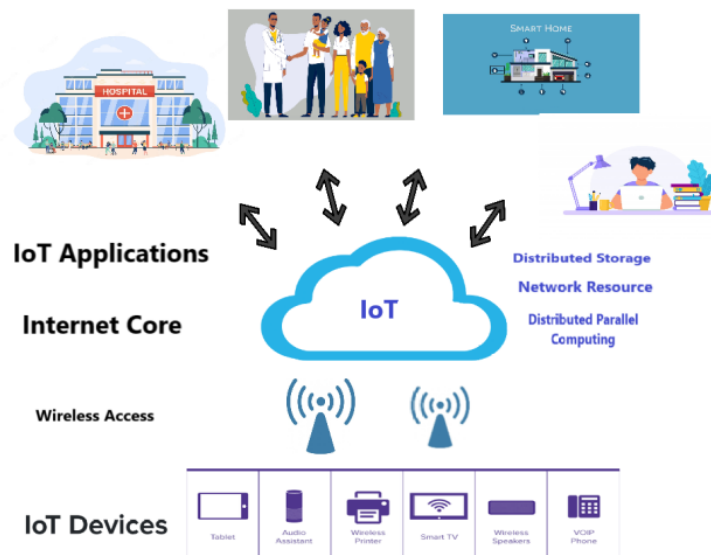


Рис. 2.4. Схема архітектури 5G–IoT

### 2.2.1 Віртуалізація функції бездротової мережі: Wireless Network Function Virtualization (WNFV)

Віртуалізація функцій бездротової мережі (WNFV) — це підхід до проектування та впровадження бездротової мережі, який передбачає віртуалізацію мережевих функцій у спільній хмарній інфраструктурі. Метою WNFV є покращення гнучкості, масштабованості та ефективності

бездротових мереж шляхом відокремлення мережевих функцій від основного обладнання та надання більш динамічної та гнучкої платформи для надання послуг. [9]

У традиційних бездротових мережевих архітектурах кожна функція мережі (така як маршрутизація, брандмауер і керування трафіком) реалізована на спеціальному апаратному забезпеченні, яке може бути дорогим, негнучким і складним у управлінні. За допомогою WNFV ці мережеві функції натомість віртуалізовані та працюють у спільній хмарній інфраструктурі, яку можна динамічно розподіляти та масштабувати відповідно до змін мережевого попиту.

***У поєднанні WNFV і 5G IoT пропонують кілька переваг для бездротової мережі, зокрема:***

Покращена масштабованість: поєднання WNFV і 5G IoT дозволяє мережам обробляти велику кількість пристроїв і ефективно керувати ними.

Знижена вартість: шляхом віртуалізації мережевих функцій WNFV зменшує потребу у дорогому пропрієтарному обладнанні, що робить розгортання додатків 5G IoT і керування ними більш економічно ефективним.

Підвищена гнучкість: WNFV робить мережу більш гнучкою та адаптованою, дозволяючи їй швидше та ефективніше реагувати на мінливі вимоги та вимоги мережі.

Покращена безпека: 5G IoT забезпечує надійні функції безпеки, такі як нарізка мережі та безпечне завантаження, тоді як WNFV забезпечує додаткову безпеку завдяки використанню технології віртуалізації.

Швидше надання послуг. Завдяки віртуалізації мережевих функцій і забезпеченню зв'язку в реальному часі WNFV і 5G IoT забезпечують швидке надання послуг і розгортання програм IoT.

Загалом, поєднання WNFV і 5G IoT є важливою інновацією в бездротових мережах, що дозволяє розгортати великомасштабні додатки IoT з високою надійністю, низькою затримкою та надійною безпекою.

	Периферійне підключення	Локальна (домашня мережа)	Глобальна мережа
<b>Типовий діапазон</b>	<30 ft.	<300 ft.	Outdoor (miles)
<b>Розповсюдження контенту</b> Зосередься на вискій швидкості передачі даних Споживання енергії вторинне	Bluetooth®	Wi-Fi IEEE 802.11ax IEEE 802.11n	4G LTE 5G GSM GPRS LTE Cat-M NB-IoT
<b>Чуття і контроль</b> Низьке енергоспоживання/тривалий термін служби акумулятора Швидкість передачі даних має другорядне значення	Bluetooth® SMART	ZigBee® Sub-GHz	LoRa® SIGFOX INGENU
<b>Власні рішення</b>	ANT	enocean®	
<b>Типові застосування</b>	Особиста техніка (браслет, розумний годинник, лічильник кроків, клавіатура, миша, вказівник тощо)	(Інтернет, електронна пошта, телефон, безпека, управління енергією, моніторинг розумного будинку тощо)	Зовнішні мережі (смартфон, інтернет, місто, промисловість 4.0, сільське господарство, розумна логістика тощо)

Рис. 2.5. Технології, пов'язані з 5G-IoT [8]

## 2.2.2 Неоднорідна мережа Heterogeneous Network (HetNet)

Неоднорідна мережа (HetNet) (рис.2.6) — це тип мережі, яка поєднує різні типи мережевих технологій і архітектур для забезпечення кращого покриття та пропускної здатності. У контексті 5G IoT HetNets стають все більш важливими для вирішення проблем підключення різноманітних пристроїв із різними вимогами. Очікується, що мережі 5G IoT підтримуватимуть велику кількість пристроїв із різною пропускною здатністю вимоги та затримки. HetNets може допомогти вирішити цю проблему, поєднавши декілька доступ до таких технологій, як стільниковий зв'язок, Wi-Fi та глобальні мережі з низьким енергоспоживанням (LPWAN), щоб забезпечують безперебійне покриття та підключення для пристроїв IoT. Наприклад, HetNet може використовувати комбінацію малих і макростільників для забезпечення покриття в міських районах, використовуючи технології LPWAN, такі як LoRaWAN або Sigfox, для сільських або віддалених районів. Цей підхід може допомогти зменшити перевантаження мережі, підвищити надійність і знизити витрати на розгортання.

HetNets також може забезпечити кращу безпеку мережі, використовуючи кілька рівнів захисту протоколи та механізми автентифікації для захисту пристроїв і даних IoT. Крім того, вони може допомогти оптимізувати продуктивність мережі та використання ресурсів за допомогою динамічного розподілу ресурси на основі попиту на трафік і характеристик пристроїв. Загалом, HetNets є ключовим інструментом для мереж 5G IoT і мають важливе значення для задоволення вимог різноманітних пристроїв і програм, які будуть підключені до мережі.

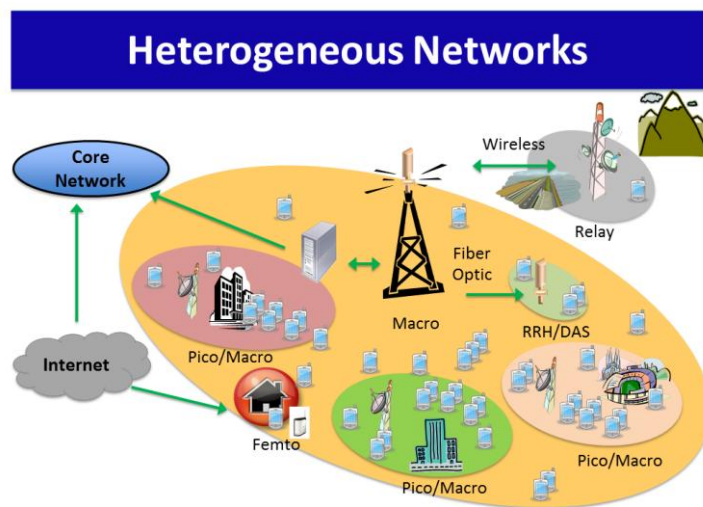


Рис.2.6. Heterogeneous Network [50]

### 2.2.3 Зв'язок між пристроями Device to Device (D2D) Communication

Зв'язок між пристроями (D2D) (рис.2.7) у 5G IoT означає прямий зв'язок між двома чи більше пристроями без проходження через центральну мережеву інфраструктуру. Комунікація D2D може створити широкий спектр нових випадків використання, включаючи локальний обмін вмістом, кооперативне визначення та спільне обчислення.

У 5G IoT зв'язок D2D можна використовувати різними способами. Одним із підходів є використання зв'язку D2D як додаткової технології до стільникових мереж, де пристрої можуть спілкуватися один з одним безпосередньо, коли вони знаходяться поблизу, таким чином зменшуючи

навантаження на стільникову мережу. Це може призвести до більш ефективного використання мережевих ресурсів, кращого покриття та меншої затримки. Зв'язок D2D також може використовуватися для підтримки нових додатків, таких як зв'язок між транспортними засобами (V2V), коли автомобілі можуть спілкуватися один з одним для підвищення безпеки та руху транспорту. Зв'язок D2D також можна використовувати для кооперативного зондування, коли пристрої IoT можуть працювати разом, щоб виявляти та ідентифікувати об'єкти, такі як транспортні засоби чи пішоходи, і обмінюватися інформацією з іншими пристроями в режимі реального часу.

Щоб увімкнути зв'язок D2D у 5G IoT, необхідно вирішити кілька технічних проблем, таких як керування перешкодами, розподіл ресурсів і безпека. Щоб пом'якшити перешкоди, зв'язок D2D можна реалізувати з використанням різних частот або часових інтервалів, а розподіл ресурсів можна оптимізувати на основі характеристик пристроїв і попиту на трафік. Безпеку можна забезпечити за допомогою шифрування, автентифікації та інших заходів безпеки. Загалом зв'язок D2D є важливою технологією в 5G IoT, яка може забезпечити нове використання випадків і підвищити ефективність і надійність мережі.

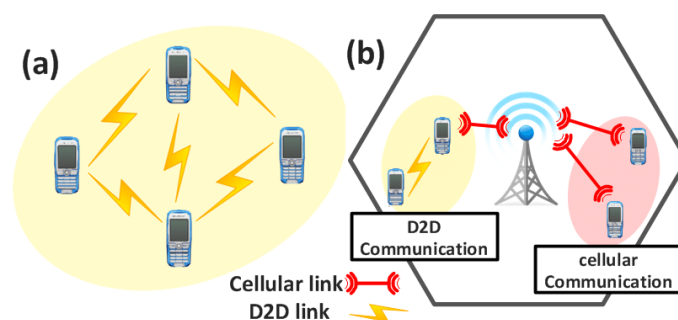


Рис.2.7. Device to Device (D2D) Communication [51]

### 2.2.4 Зв'язок машинного типу (МТС)

Це тип зв'язку, за якого велика кількість пристроїв може бути підключена до Інтернету та спілкуватися один з одним та іншими пристроями без втручання людини. МТС є ключовим фактором Інтернету речей (IoT) і є важливим аспектом мереж 5G. Багато МТС у 5G можна використовувати для широкого спектру додатків, таких як розумні будинки, розумні міста, розумні заводи та підключені транспортні засоби. Це може дозволити пристроям спілкуватися один з одним, обмінюватися даними та приймати рішення на основі даних, без участі людини. Однією з ключових переваг МТС у 5G IoT є можливість підтримувати велику кількість пристроїв, у тому числі малопотужних із тривалим часом автономної роботи. Мережі 5G МТС можуть підтримувати до мільйона пристроїв на квадратний кілометр, що дає можливість підключати велику кількість пристроїв на невеликій території. Щоб підтримувати МТС у 5G IoT, необхідно вирішити кілька технічних проблем, таких як масштабованість мережі, енергоспоживання та безпека. Одним із підходів до вирішення цих проблем є використання малопотужних глобальних (LPWA) мереж, таких як вузькосмугова мережа (NB-IoT) і LTE-M, які розроблені для підтримки малопотужних пристроїв із тривалим часом автономної роботи.

МТС у 5G IoT може забезпечити широкий спектр нових варіантів використання та бізнес-моделей, включаючи прогнозоване обслуговування, віддалений моніторинг і відстеження активів. Це також може підвищити ефективність, зменшити витрати та створити нові джерела доходу.

## 2.3 Існуючі в літературі архітектури IoT

### 2.3.1 Загальна трирівнева архітектура IoT

Включає зондування, транспортування та застосування. Трирівнева архітектура (рис.2.8) є елементарною для IoT, яка була розроблена та реалізована в ряді систем. У [13] пропонується самоконфігурована та масштабована архітектура для великомасштабної мережі IoT.

IoT можна визначити на трьох рівнях:

- інтернет-орієнтований,
- датчики та виконавчі механізми,
- знання.

Загальновідомо, що впровадження технології IoT є близьким до сучасної цивілізації, де пристрої та суспільство об'єднані практично в інформаційні системи за допомогою бездротових датчиків [14].

Зазвичай архітектура IoT класифікується на три основні рівні (рис.2.9) :

- 1-рівень сприйняття,
- 2-рівень мережі,
- 3-рівень додатків.

Сенсорний рівень, також відомий як рівень сприйняття, реалізований як нижній рівень в архітектурі IoT. Передача, також відома як мережевий рівень, реалізована як середній рівень в архітектурі IoT. Бізнес-рівень, який також відомий як прикладний рівень, реалізований як верхній рівень в архітектурі IoT [15]. Приклади включають розумні міста, розумний транспорт, розумну мережу тощо.

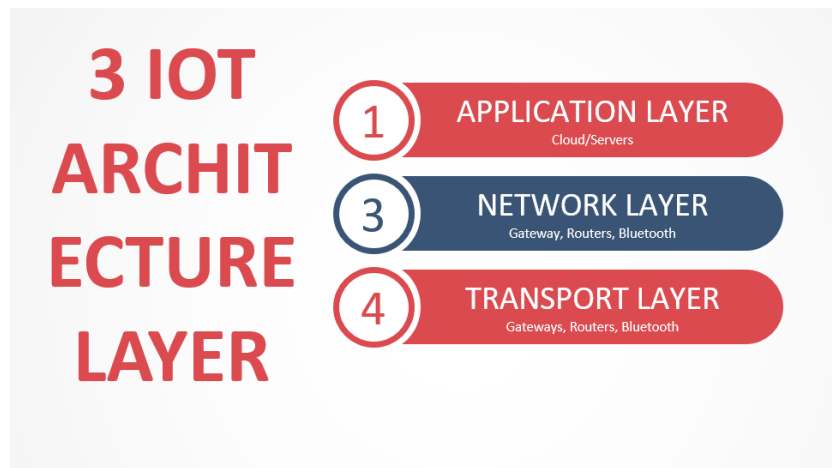


Рис.2.8. Трирівнева архітектура IoT

### Рівень сприйняття

Це головний шар, який також відомий як сенсорний рівень. Мається на увазі всі види датчиків, які можна використовувати в пристроях IoT. Вони вимірюють певні параметри. Потім вони перетворюють сигнали від взаємодіючих з ними датчиків навколишнього середовища в цифрову інформацію. Датчики можуть допомогти створити розумні системи обслуговування приміщень. Найпопулярнішими з них, які представляють перший рівень архітектури IoT, є датчики температури, тиску та інфрачервоні датчики.

Датчики температури: Цей тип датчиків використовується практично в будь-якій галузі. Вони допомагають контролювати температуру води в побутових системах опалення. Також вони використовуються в холодильниках, комп'ютерах і автомобілях.

Датчики вологості: вони широко використовуються в системах HVAC. Крім того, датчики вологості надзвичайно важливі для промислових приміщень. Для виробництва певної якості продукції життєво важливо підтримувати необхідний рівень вологості.

Датчики тиску: за допомогою цього типу датчика люди можуть вимірювати потік повітря або рідин. Вони використовуються в розробці техніки.

Датчики рівня: їх можна знайти майже в будь-якому автомобілі, холодильнику чи будинку. Датчики рівня вимірюють кількість рідини в резервуарах або газу в повітрі.

Інфрачервоні датчики: цей тип датчиків може виявляти рух. Інфрачервоні датчики в основному використовуються в цілях безпеки. Крім того, вони допомагають знизити споживання електроенергії.

### ***Поширені загрози безпеці***

Рівень сприйняття – це пристрої, які збирають інформацію та отримують команди від користувачів. Це один із найбільш чутливих рівнів архітектури IoT. У результаті шахраї проводять багато різних атак, щоб отримати контроль над ними та отримати доступ до даних, які вони збирають. Нижче ви знайдете найпопулярніші загрози цього рівня.

**Підслуховування.** Багато пристроїв IoT допомагають людям спілкуватися один з одним. Найпопулярнішою є бездротова камера дзвінка або розумна колонка. Однак, якщо пристрій уразливий, існує велика ймовірність того, що хакер атакує його, щоб отримати доступ до особистих розмов людей.

**Захоплення вузла.** Цей тип атаки спрямований на викрадення даних, що зберігаються на пристроях IoT. Для досягнення мети зловмисники отримують доступ до важливого вузла, який допомагає отримати доступ до пам'яті пристрою.

**Атака за часом.** Це складний тип атаки, який потребує від зловмисників аналізу часу, необхідного пристроям IoT для відповіді. Якщо пристрої мають низьку обчислювальну потужність і потребують багато часу для відповіді, хакери можуть знайти вразливі місця для використання.

### **Мережевий рівень**

Він відомий як рівень шлюзу, який допомагає створити логічну структуру IoT шляхом підключення пристроїв до платформи. Дані, отримані датчиками, передаються по дротах або радіо до внутрішніх служб IoT.

Передані дані захищені для запобігання несанкціонованому доступу. У більшості випадків інформація, що передається, зашифрована.

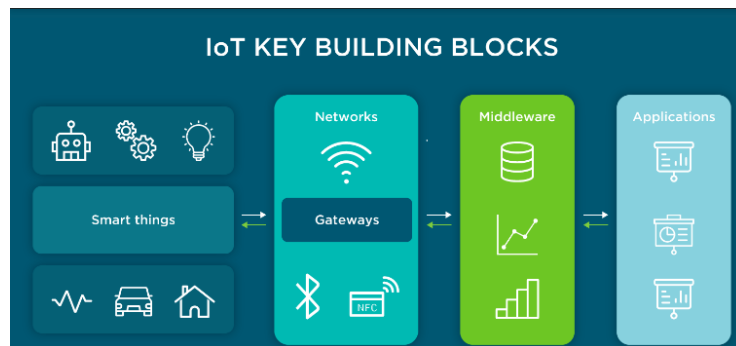


Рис.2.9. Ключові блоки IoT [52]

### ***Поширені загрози безпеці***

Мережні рівні є найважливішими в архітектурі Інтернету речей, оскільки вони з'єднують користувачів із пристроями. Тому багато хакерів атакують цей рівень. Вони прагнуть отримати несанкціонований доступ до систем IoT і маніпулювати ними без дозволу. Ось три найпопулярніші типи атак.

**Атака «людина посередині» (MiTM).** Це серйозна атака на еталонну архітектуру IoT, оскільки вона дозволяє хакерам маніпулювати пристроями в режимі реального часу. Під час атаки цього типу хакер перехоплює запити між відправником і одержувачем і оновлює їх.

**Атака на сховище.** Більшість систем IoT зберігають дані, зібрані з датчиків пристроїв. Дані зберігаються на жорстких дисках у пристроях або хмарах. Хакери часто атакують сховища, щоб завантажити зібрані дані.

**Експлойтна атака.** Це тип атаки, який вимагає від шахраїв аналізу конкретних моделей зв'язку IoT. Зробивши це, вони знаходять лазівки та використовують їх для несанкціонованого доступу до систем IoT.

### **Рівень програми**

Що таке прикладний рівень в архітектурі IoT? Це останній рівень у цій еталонній моделі IoT. Він представляє всі пристрої, які використовують пристрої або розгорнуті системи IoT. Це можуть бути розумні пристрої, які

допомагають підтримувати ваші будинки в чистоті та безпеці, або цілі системи розумного будинку, якими можна керувати за допомогою смартфона. На прикладному рівні кінцеві користувачі взаємодіють з усіма підключеними пристроями.

### ***Поширені загрози безпеці***

Шар має багато різних проблем, які потрібно вирішити. Однак питання безпеки є найважливішими. Існує багато різних способів атакувати пристрої на цьому рівні, щоб отримати несанкціонований доступ. Найпопулярнішими є наступні:

**Міжсайтовий скриптинг.** Більшість веб-сайтів, які допомагають взаємодіяти з пристроями IoT, безпечні. Тим не менш, деякі з них мають лазівки, якими користуються хакери. Щоб отримати доступ до конфіденційних даних користувачів або отримати контроль над пристроями IoT, вони вставляють фрагмент коду та запускають його як адміністратори сайту.

**Атака шкідливим кодом.** Усі програми вразливі до атак зловмисного коду. Таким чином, комп'ютерні віруси, поширені по всьому Інтернету, можуть легко завдати шкоди певним пристроям IoT або навіть зруйнувати складну модель IoT .

### **2.3.2 Чотирирівнева архітектура IoT**

Що таке 4 рівні архітектури IoT (рис.2.10)? Архітектура, яка використовує чотири рівні IoT, схожа на базову. Дані також збираються датчиками та передаються в систему зберігання мережевим рівнем. Однак ця еталонна архітектура IoT має один додатковий рівень, який розпізнається як рівень підтримки. Це допомагає вирішити головну проблему базової архітектури IoT , а саме слабку безпеку. Рівень підтримки розміщується між рівнями мережі та сприйняття.

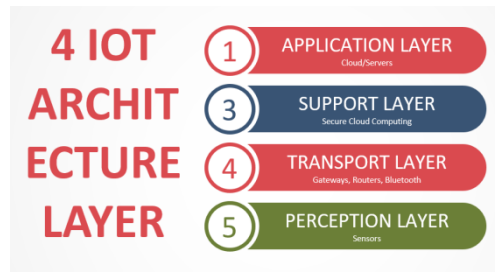


Рис.2.10. Чотирирівнева архітектура IoT

### ***Рівень підтримки***

Існує багато загроз, з якими стикався трирівневий логічний дизайн IoT. Тому було запропоновано додати ще один рівень, який міг би вирішити більшість питань. Він також відомий як Secure, оскільки він спрямований на те, щоб зробити моделі зв'язку IoT більш захищеними від можливих загроз.

Рівень підтримки перевіряє, чи надсилається інформація від автентифікованого користувача. У більшості випадків паролі або спільні ключі використовуються як методи автентифікації. Після перевірки користувача рівень підтримки надсилає інформацію, отриману від датчиків пристроїв IoT, на мережевий рівень. Він є третім у цій багаторівневій архітектурі IoT.

### ***Поширені загрози безпеці***

Рівень підтримки допомагає підвищити безпеку. Однак він не захищає всі рівні архітектури IoT від інших загроз. Оскільки ці атаки дуже важко здійснити, рівень підтримки значно підвищує безпеку еталонної моделі IoT.

#### **Дві найпоширеніші загрози:**

- DoS-атака (відмова в обслуговуванні). У двох словах, йому потрібен хакер, щоб надсилати багато запитів на мережевий рівень, тому він не зможе обробити їх усі одночасно. У такому випадку перевантажена система перестане працювати.
- Інсайдерська атака. Для його проведення шахраю необхідно отримати облікові дані для входу існуючого користувача системи IoT. Зробивши це, вони можуть завантажити шкідливий код у систему, щоб зруйнувати її або отримати конфіденційну інформацію.

### 2.3.3 П'ятирівнева архітектура IoT

Хорошим рішенням була модель, яка передбачає чотири рівні архітектури IoT. Це допомогло підвищити безпеку логічного дизайну IoT. Однак це було не ідеально. Архітектура не задовольняла всіх запитів користувачів. Крім того, були деякі проблеми безпеки. Тому була розроблена п'ятирівнева архітектура.

Але ця архітектура не є розширеною версією чотирирівневої ітерації. Натомість цей складається з базової архітектури, яка передбачає два додаткові рівні архітектури Інтернету речей. Два нових рівні – «Обробка» та «Бізнес».

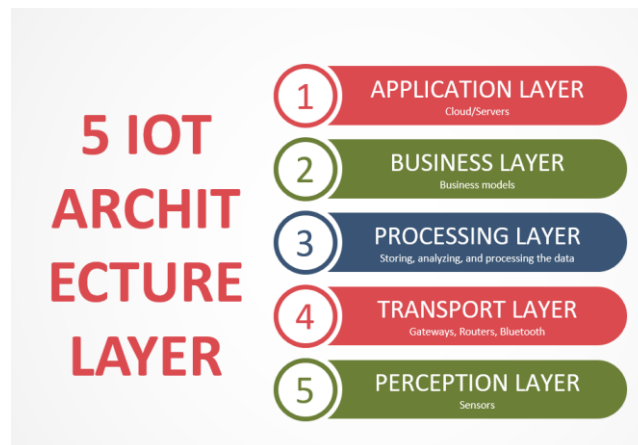


Рис.2.11. П'ятирівнева архітектура IoT

#### Шар обробки

Це рівень, який збирає всі дані, надані рівнями сприйняття через мережу. Вся інформація зберігається та аналізується. Це один із найважливіших рівнів IoT, оскільки він приймає рішення на основі аналізу даних. Крім того, прикладний рівень взаємодіє з користувачем, щоб керувати своїми пристроями IoT і керувати ними. Цей рівень розміщується між мережевим і прикладним рівнями в логічній структурі архітектури IoT.

### Існує два основних етапи обробки даних цього рівня:

- Накопичення даних. Усі дані, зібрані датчиками пристроїв IoT, не потрібно використовувати одночасно. Таким чином, він зберігається на жорстких дисках пристроїв або передається в озера даних або різні типи баз даних для подальшого використання та аналізу. Основна мета — відсортувати зібрані дані для їх ефективного зберігання.
- Абстракція даних. На цьому етапі зібрані дані використовуються для отримання корисної інформації. Зазвичай він доповнюється даними, наданими пристроями, які не є IoT, щоб отримати корисну статистику. На цьому етапі дані уніфікуються або узгоджуються з певними форматами. Нарешті, він збирається в одному місці, щоб полегшити доступ для користувачів із різних місць.

### **Поширені загрози безпеці**

Додавши новий рівень, який безпечно зберігає зібрані дані, розробники підвищили безпеку базової архітектури Інтернету речей . Однак це не забезпечує 100% безпеки системи.

#### Найпопулярніші загрози:

- Шкідливе програмне забезпечення . Оскільки цей рівень збирає масу даних, існує ймовірність того, що трояни або комп'ютерні віруси потраплять у систему. Крім того, вони можуть надавати шахраям несанкціонований доступ до озер даних і баз даних.
- Виснаження . Це може спричинити інша атака, наприклад DoS. Цей тип атаки має на меті розрядити батарею пристрою або забрати 100% обчислювальної потужності та пам'яті комп'ютера, тому він не зможе виконувати інші завдання.

### **Бізнес-рівень**

Усі комунікаційні моделі IoT прагнуть забезпечити зручність споживання інформації для кінцевих користувачів. Це верхній рівень, який розташований над прикладним рівнем. Бізнес-рівень гарантує, що користувачі можуть безпроблемно використовувати системи IoT. Наприклад,

він отримує необроблені дані та формує статистичні дані у вигляді графіків і діаграм. Цей рівень пов'язаний із прийняттям рішень, оскільки він взаємодіє із зацікавленими сторонами.

### ***Поширені загрози безпеці***

Цей шар вважається безпечним. Таким чином, немає серйозних загроз для цієї багаторівневої архітектури IoT . Єдине, про що користувачі повинні знати, це логічна атака. Хакерам потрібно знайти будь-які недоліки в коді розробників і використовувати їх для отримання несанкціонованого доступу до важливих даних. Крім того, завжди є шанс, що цей рівень може мати вразливість нульового дня .

### **Граничний рівень** – додатковий рівень архітектури IoT

Додатковий рівень може покращити архітектуру, що передбачає п'ять рівнів архітектури IoT . Попит на цьому рівні з'явився через те, що кількість даних, які обробляються пристроями IoT, значно зросла. Крім того, це допомагає побудувати масштабну еталонну модель IoT . Рівень розміщується між мережевим і обробним рівнями.

Цей рівень використовує обчислювальну модель Fog , яка покращує масштабні системи IoT. Це позбавляє всіх пристроїв у мережі доступу до головного сервера для виконання обчислень. Натомість більшість обчислень виконується на пристроях локально. Крім того, це допомагає зменшити зберігання та передачу даних, оскільки більшість інформації зберігається локально на пристроях.

Порівняння існуючих в літературі архітектур IoT наведено в таблиці 2.1.

## Порівняння архітектур IoT

Архітектура IoT	Рівні	Загрози безпеці
Трирівнева	Сприйняття Мережі Додатків	Підслуховування Захоплення вузла Атака за часом Атака «людина посередині» (MiTM) Атака на сховище Експлойтна атака Міжсайтовий скриптинг Атака шкідливим кодом
Чотирирівнева	Сприйняття Мережі Додатків Підтримки	DoS-атака (відмова в обслуговуванні). Інсайдерська атака
П'ятирівнева	Шар обробки Бізнес-рівень Сприйняття Транспортний Прикладний Граничний (додатковий)	Логічна атака Шкідливе програмне забезпечення виснаження

### 2.3.4 Архітектура на основі SDN

Архітектура на основі SDN для IoT для забезпечення високого рівня якості обслуговування (QoS) для різних завдань IoT у гетерогенних середовищах бездротової мережі розроблена Qin та ін. [16].

Архітектура Інтернету речей (IoT) на основі програмної мережі (SDN) забезпечує більш гнучке та ефективне управління мережею IoT-пристроїв.

SDN є концепцією управління мережами, яка відрізняється від традиційних методів керування мережами. У SDN, керування мережею здійснюється централізованою програмною платформою, яка забезпечує управління мережевими елементами через протоколи керування. Це дозволяє забезпечити гнучкість та простоту управління мережею, що є особливо важливим для мереж IoT, що складаються з великої кількості пристроїв.

Архітектура IoT на основі SDN включає в себе централізовану програмну платформу керування мережею, яка забезпечує управління IoT-пристроями через протоколи керування. Ця програмна платформа може включати в себе елементи, такі як контролер мережі, віртуальні мережі, протоколи керування мережею та інші компоненти, які забезпечують гнучке та ефективне управління мережею IoT-пристроїв.

### 2.3.5 Архітектура на основі QoS

У [17] Jin та ін. пропонують чотири різні архітектури IoT, які дозволяють різним програмам розумного міста включати свої вимоги до QoS.

#### **Запропоновані мережеві архітектури:**

1. автономні, які підтримують відключені мережі Інтернет;
2. всюдисущий, де мережі Smart Things (STN) є частиною Інтернету;
3. накладення на рівні програми, яке використовує NFV для зменшення стресу та перевантаженості між вузлами;
4. орієнтований на сервіс, де конкретні шлюзи взаємоділи з внутрішньою неоднорідністю середовища IoT.

Архітектура Інтернету речей (IoT) на основі сервісно-орієнтованої архітектури (SoA) відображає підхід до розробки програмного забезпечення, який забезпечує взаємодію між різними пристроями та послугами у Інтернеті речей. Ця архітектура базується на принципах SoA, що передбачає поділ програмного забезпечення на окремі функціональні блоки, які називаються сервісами. Кожен сервіс надає конкретну функціональність та може використовуватись різними пристроями IoT.

Архітектура IoT на основі SoA містить такі основні компоненти:

**Пристрої:** це різноманітні сенсори та пристрої, які вимірюють та збирають дані, а також діють як виконавчі механізми для взаємодії з зовнішнім світом.

**Сервіси:** це функціональні блоки програмного забезпечення, які відповідають за обробку даних та надання певних послуг. Сервіси можуть взаємодіяти між собою та з пристроями.

**Брокери повідомлень:** це програмні компоненти, які дозволяють різним пристроям та сервісам спілкуватись між собою та передавати дані. Брокери повідомлень допомагають управляти великим обсягом даних та допомагають підтримувати масштабованість системи.

**Хмарні сервіси:** це сервіси, які надаються в хмарі та використовуються для обробки даних та аналізу великих обсягів інформації.

### **2.3.6 Архітектура на основі SoA**

Як правило, SoA — це модель на основі компонентів, яка може бути розроблена для з'єднання різних функціональних розділів (також відомих як сервіси) програми через протоколи та інтерфейси [18]. SoA зосереджується на розробці процесу скоординованих послуг і оптимізації сегментів програмного та апаратного забезпечення, збільшуючи ймовірність використання SOA в розробці архітектури IoT [18].

Архітектура IoT на основі SoA складається з чотирьох рівнів, які взаємодіють між собою:

- 1-рівень сприйняття,
- 2-рівень мережі,
- 3-рівень обслуговування,
- 4-рівень додатків.

У чотирирівневій архітектурі IoT на основі SoA рівень сприйняття виконується як нижній рівень архітектури та використовується для визначення, зберігання й аналізу даних, пов'язаних із фізичними пристроями.

### 2.3.7 Архітектура MobilityFirst

У [19] показано, що майбутня Інтернет-архітектура (FIA), яка називається MobilityFirst, здатна вирішити багато проблем пов'язані зі смартфонами, які діють як випадкові шлюзи WSANS в системах IoT.

MobilityFirst є мережевою архітектурою, спроектованою для покращення мобільності та безпеки в мережах наступного покоління. Основна ідея полягає в тому, щоб замінити традиційну адресацію IP на імена, що відображають контекст мережі та відомості про мобільність користувачів. Це дозволяє зробити мережі більш мобільними, а також забезпечує більшу приватність та безпеку.

Архітектура MobilityFirst складається з трьох основних компонентів: імені, маршрутизаторів та вузлів користувача.

Кожен вузол мережі MobilityFirst має своє унікальне ім'я, яке використовується для ідентифікації в мережі. Імена можуть містити інформацію про роль вузла, місцезнаходження, час та інші контекстуальні дані, що допомагають маршрутизаторам знаходити найкращий шлях для доставки даних.

Маршрутизатори MobilityFirst використовують імена для маршрутизації даних через мережу. Вони взаємодіють між собою для

визначення оптимального шляху для передачі даних до призначення. Це може включати маршрутизацію через мережі різних провайдерів, використання різних мережевих протоколів та інші методи.

Вузли користувача MobilityFirst виконують роль кінцевих вузлів у мережі. Вони взаємодіють з маршрутизаторами для передачі даних до та від інших вузлів мережі. Вузли користувача можуть бути реалізовані як мобільні пристрої, такі як смартфони та планшети, або як сервери або інші мережеві пристрої.

### **2.3.8 Архітектура CloudThings**

Архітектура CloudThings була запропонована на основі хмарної платформи IoT. У [20] Хао та ін. запропонувати архітектуру під назвою Хмари даних, засновану на інформаційно-орієнтованій мережі (ICN), щоб покращити створення послуг для Інтернету наступного покоління.

CloudThings - це архітектура для систем Інтернету речей, яка базується на хмарних технологіях та розроблена з метою забезпечення зручного та безпечного доступу до даних, зібраних з різних пристроїв, що забезпечується за рахунок зберігання даних у хмарних серверах.

Архітектура CloudThings містить такі компоненти:

Пристрій - це пристрій Інтернету речей, який забезпечує збір даних з навколишнього середовища та передачу їх до хмарного сервера.

Хмарний сервер - це сервер, який забезпечує зберігання та обробку даних, що надходять від пристроїв. На цьому сервері можуть бути реалізовані різні застосування для аналізу та обробки даних, такі як системи моніторингу, прогнозування або управління.

Програмний інтерфейс - це інтерфейс, що забезпечує взаємодію між пристроєм та хмарним сервером. Цей інтерфейс може використовуватись для передачі даних з пристрою на сервер або для зчитування даних з сервера на пристрій.

Аплікаційне програмне забезпечення - це програмне забезпечення, що забезпечує роботу системи, що може бути реалізоване на стороні пристрою або на стороні хмарного сервера.

Однією з переваг архітектури CloudThings є те, що вона забезпечує збереження даних у безпечному та доступному для віддаленого доступу місці, що дозволяє забезпечити зручний та ефективний контроль за системами Інтернету речей. Крім того, така архітектура може знизити вартість інфраструктури Інтернету речей.

### **2.3.9 Архітектура IoT-A**

Іншою важливою архітектурою є еталонна архітектура європейського проекту IoT-A [19], для розробки структури для проекту Європейського Союзу RERUM FP7, який дозволяє додаткам IoT додавати механізми конфіденційності та безпеки на ранніх стадіях проектування.

IoT-A (IoT Architecture) - це архітектурна модель для систем Інтернету речей, розроблена в рамках європейського проекту з дослідження IoT. Основна мета IoT-A - це створення стандартної архітектури, яка б дозволила забезпечити сумісність різних систем Інтернету речей, забезпечити їх інтеграцію та забезпечити безпеку та конфіденційність даних, що передаються між пристроями.

#### Архітектура IoT-A складається з трьох рівнів:

Рівень сприйняття - це рівень датчиків та пристроїв, які здійснюють збір даних з навколишнього середовища. На цьому рівні здійснюється збір даних та їх локальна обробка.

Рівень мережі - це рівень, на якому здійснюється передача даних між різними пристроями. На цьому рівні забезпечується інтеграція пристроїв в єдину мережу, що дозволяє забезпечити їх взаємодію та обмін даними.

Рівень застосування - це рівень, на якому здійснюється аналіз та обробка даних, зібраних з різних джерел. На цьому рівні можуть бути

реалізовані різні застосування, такі як системи моніторингу та керування, системи контролю за якістю повітря, системи автоматизації виробництва та інші.

Архітектура IoT-A також містить модуль захисту даних, який забезпечує захист даних та приватності користувачів.

### **2.3.10 Архітектура S-IoT**

У [21] Atzori та ін. об'єднали IoT і соціальні мережі та визначили соціальний Інтернет речей (S-IoT). Вони описують архітектуру, яка дозволяє інтегрувати речі в соціальну мережу та аналізує компоненти запропонованої мережевої структури за допомогою моделювання.

S-IoT (Semantic Internet of Things) - це архітектура, яка поєднує в собі принципи Інтернету речей (IoT) та Семантичного вебу (Semantic Web), щоб забезпечити ефективність та надійність мережі IoT.

#### ***S-IoT складається з трьох рівнів:***

Рівень даних IoT: цей рівень включає датчики, пристрої IoT, що збирають дані, а також IoT платформи, які обробляють та зберігають дані.

Рівень даних Semantic Web: на цьому рівні дані з рівня даних IoT інтерпретуються та аналізуються з використанням методів та стандартів Семантичного вебу, що дозволяє забезпечити їх інтелектуалізацію та розуміння.

Рівень застосування: на цьому рівні дані та інформація, які були отримані на рівнях даних IoT та Semantic Web, використовуються для створення різноманітних застосувань та послуг, що базуються на мережі IoT.

Основна ідея архітектури S-IoT полягає у забезпеченні можливості автоматичного розуміння та інтелектуалізації даних, які генеруються в мережі IoT. Це дозволяє вирішувати проблему несумісності між пристроями та платформами IoT, а також допомагає забезпечити надійність та безпеку мережі IoT.

Порівняння всіх вище наведених архітектур зображено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Порівняння архітектур IoT

Архітектура	Опис	Рівень архітектури	Ключові особливості
<b>S-IoT</b>	Архітектура, що зменшує різноманітні технології Інтернет-речей і створює одну спільну інфраструктуру для забезпечення безпеки та простоти взаємодії	Трирівнева	Безпека, ефективність, обробка даних на більш високому рівні, гнучкість
<b>IoT-A</b>	Архітектура, що забезпечує прозорість інтероперабельності між пристроями IoT, заснована на підході REST та інших технологіях	Трирівнева	Шарова архітектура, протоколи, інтеграція зі стандартами інтернету речей
<b>CloudThings</b>	Архітектура, що базується на облачних технологіях, включає платформу для розробки та взаємодії з пристроями IoT	Дворівнева	Масштабованість, розширюваність, обробка даних в Cloud, мінімізація затримок
<b>MobilityFirst</b>	Архітектура, що забезпечує мобільний зв'язок між пристроями IoT та іншими пристроями в мережі	Трирівнева	Мобільна мережа, підтримка рухомих IoT-пристроїв, зменшення енергоспоживання

## Продовження таблиці 2.1

<b>Архітектура на основі SoA</b>	<b>Архітектура, що забезпечує розподілений підхід до розробки програмного забезпечення та взаємодії з пристроями IoT</b>	<b>Трирівнева</b>	<b>Інтеграція, гнучкість, розширюваність, стандартизація</b>
<b>Архітектура на основі QoS</b>	Архітектура, що забезпечує забезпечення якості обслуговування в пристроях IoT	Трирівнева	Налаштування якості обслуговування, зменшення затримок, гарантії надійності, пропускну здатність
<b>Архітектура на основі SDN</b>	Архітектура, яка використовує програмне забезпечення для забезпечення гнучкості та керування мережею IoT	Трирівнева	Керування мережею, гнучкість, зменшення затримок
<b>Трирівнева архітектура IoT</b>	Загальна архітектура Інтернету речей, яка включає рівні пристроїв, мереж та додатків	Трирівнева	Масштабованість, гнучкість, стандартизація, розширюваність, надійність, безпека

### Висновки

У найближчі роки 5G буде сприяти цифровій трансформації в усьому світі, стимулюючи індустрії та інновації. Оскільки провідні підприємства галузі постійно звертаються до мереж наступного покоління та Інтернету речей, життя людей, бізнес і суспільство значно покращаться.

Зараз саме час підготуватися до того, що чекає нас в майбутньому. Щоб залишатися попереду конкурентів, підприємства повинні розуміти наслідки 5G і перспективи, які вона принесе тим, хто має найкращі можливості для впровадження IoT.

У цьому розділі було розглянуто кілька існуючих архітектур IoT в літературі. Зараз більшість цих архітектур впроваджено в промисловості або розумних містах. Незважаючи на те, що ці архітектури підходять на даний момент, вони більше не будуть перспективними в сенсі надійності та продуктивності через майбутні виклики, і тому їх потрібно буде переглянути.

Також було розглянуто чотири основні технології 5G–IoT.

5G є ключовою технологією для Інтернету речей (IoT). Вона надає значно більшу швидкість передачі даних, надійність і масштабованість, що робить її ідеальним вибором для підключення мільйонів різних пристроїв в Інтернеті речей.

5G може підтримувати велику кількість пристроїв на одній базовій станції, що дозволяє підключати масштабовані мережі Інтернету речей. Вона також забезпечує низьку затримку (лаг) і високу пропускну здатність, що дозволяє в реальному часі збирати, обробляти та передавати дані з пристроїв IoT.

Це забезпечує більш точний збір даних, покращує прогнозування, робить системи більш ефективними, покращує безпеку та забезпечує більш швидку реакцію на події.

Крім того, 5G може забезпечити стабільне з'єднання з високою швидкістю передачі даних навіть у віддалених та труднодоступних місцях, що дає змогу використовувати IoT-пристрої у більш широкому діапазоні застосувань.

Отже, 5G є важливою технологією для розвитку Інтернету речей і дозволяє прискорити та поліпшити обробку даних від пристроїв IoT, що сприяє покращенню ефективності та безпеки в різних сферах, таких як медицина, промисловість, транспорт, енергетика та інші.

## РОЗДІЛ 3

### ЗАПРОПОНОВАНА АРХІТЕКТУРА ІОТ НА БАЗІ 5G

Архітектура складається з восьми пов'язаних між собою шарів з можливістю двостороннього обміну даними, як показано на рис. 3.1. Другий шар і п'ятий шар складаються з двох і трьох підшарів, відповідно, і рівень безпеки покриває всі інші рівні. Ці шари вибрано для забезпечення найкращої продуктивності та щоб одночасно підтримувати модульність архітектури. [53]

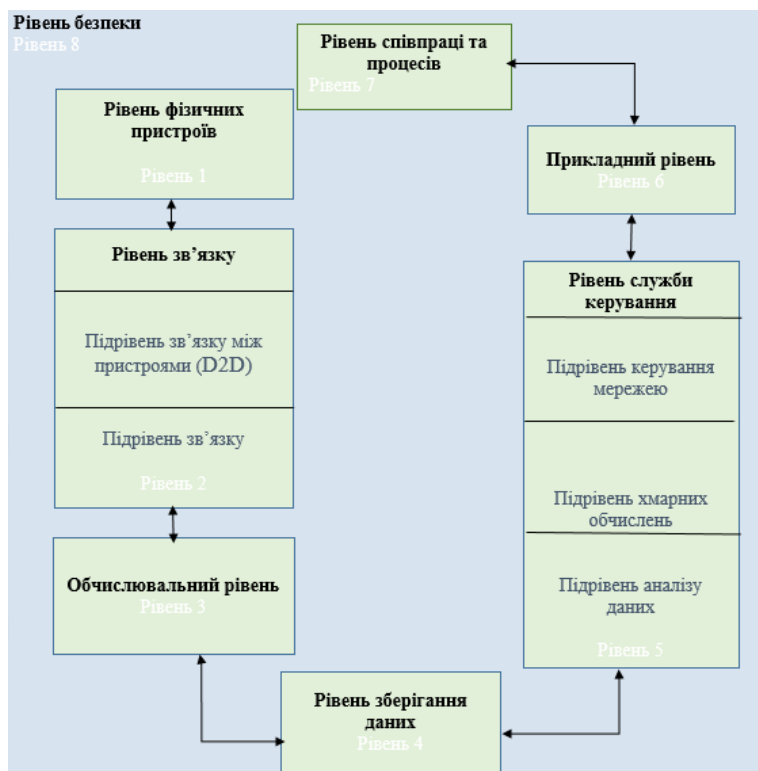


Рис. 3.1. Архітектура 5G-IoT [10]

### 3.1 Рівень фізичного пристрою

Цей рівень складається з бездротових датчиків, приводів і контролерів, які насправді є «речами» ІоТ. Фізичні пристрої є загальним рівнем у всіх архітектурах. У цьому шарі мають бути використані пристрої невеликого розміру, такі як наночіпи щоб збільшити обчислювальну потужність і зменшити потужність споживання. Наночіпи здатні виробляти велику

кількість початково оброблених даних, які підходять для Big Data в аналітичному рівні (рівень 5) [53]

### 3.2 Рівень зв'язку

Цей шар складається з двох підшарів. Зв'язок D2D і рівні підключення.

Підрівень прямого зв'язку між пристроями (D2D). Завдяки збільшенню обчислювальної потужності та інтелекту фізичних пристроїв (вузлів) вони містять свої власну ідентичність та особистість і можуть створювати власні дані. Для підвищення ефективності і можливості IoT системи, ці пристрої повинні формувати Неоднорідну мережу (HetNet) для спілкуватися один з одним. На цьому підрівні використовуються сучасні протоколи зв'язку бездротової сенсорної мережі (WSN). Вузли можуть створювати кластери або навіть вибирати лідера (голову кластера) для відповідної мережі. Одинією з найважливіших технологій, які покращують цей підрівень, це mmWave (міліметрові хвилі).

Крім того, на цьому підрівні 5G є ще одна додаткова технологія, яка здатна покращити D2D спілкування. 5G розглядається як важливий кандидат для забезпечення підключення до МТС пристроїв. Завдяки підтримці високої швидкості передачі даних та інші важливих функцій МТС 5G-Plus-HetNet

розглядається як сильне технологічне рішення в запропонованій архітектурі 5G-IoT, яка забезпечує низьку затримку для IoT.

Підрівень зв'язку. На цьому підрівні пристрої підключаються до центрів зв'язку, таких як базові станції. Крім того, вони надсилають і аналізують свої дані через центри через підключення до внутрішньої мережі до блоку зберігання. На даний момент цей підрівень IoT має певні проблеми: можна обробляти лише обмежену кількість підключень пристроїв; у програмах, таких як автономні транспортні засоби, обмін даними для різних типів даних не застосовується; великий обсяг даних навряд чи можна обробити в режимі реального часу через велику затримку зв'язку.

Найближчим часом розгортання 5G робить значну еволюцію на цьому підрівні в сенсі надійності, продуктивності та гнучкості.

Іншою технологією цього підрівня є Advanced SSIM. Завдяки цій технології пристрої IoT отримують можливість вибору відповідного спектру (діапазонів частот) із достатньо низькими перешкодами. Насправді методи SSIM є корисними для використання можливостей спільного використання спектру на основі когнітивного радіо. Цей підрівень, розроблений в архітектурі, забезпечує низьку затримку, надійність з'єднань і підтримку різних типів даних. [53]

### **3.3 Обчислювальний рівень Edge (Fog).**

На цьому рівні дані обробляються вузлами або їх лідерами для прийняття рішень на рівні Edge. З появою технології 5G і розвитком мобільних пристроїв (таких як смартфони) технологія MEC стане більш потужною для подолання викликів і зробить значний внесок на цьому рівні. [53]

### **3.4 Рівень зберігання даних**

Цей рівень містить блоки зберігання даних, у яких зберігається інформація, отримана від обробки периферії фізичних пристроїв, а також необроблені дані. Цей рівень потребує особливого захисту з точки зору безпеки, а також повинен реагувати на величезний обсяг даних і трафік майбутніх програм.[53]

### **3.5 Рівень служби керування.**

Цей рівень складається з трьох підрівнів.

Підрівень керування мережею. Управління мережею передбачає зміну типу зв'язку між пристроями та центрами обробки даних. Найважливішою

технологією, задіяною в цьому підрівні, є WNFV. WNFV може одночасно оновлювати топологію мережі та тип протоколів зв'язку, наприклад 5G-IoT або ZigBee, для покращення якості структури IoT. Іншою корисною технологією на цьому підрівні є WSDN. WSDN керує мережею IoT і дозволяє змінювати конфігурацію мережі замість традиційного моніторингу мережі для підвищення продуктивності.

Підрівень хмарних обчислень. На цьому підрівні дані та інформація з периферійних обчислень (повторно) обробляються в хмарі, щоб можна було отримати остаточну оброблену інформацію. Завдяки впровадженню технології 5G мобільні пристрої можуть виконувати цей тип обчислень, який називається MCC, у режимі реального часу. Таким чином, операції обробки будуть розподілені між мобільними пристроями паралельно, щоб зробити систему IoT більш ефективною, стійкою, масштабованою та швидшою.

Підрівень аналізу даних. На цьому підрівні використовуються нові методи аналізу даних [11] для створення цінності (інформації, яку можна маніпулювати) із вихідних даних. Будь-яке вдосконалення алгоритмів великих даних покращить обробку даних на цьому підрівні. Насправді роль цього домінуюча у найближчому майбутньому, коли кількість зібраної інформації збільшиться завдяки інтеграції 5G та IoT. [53]

### **3.6 Прикладний рівень**

На цьому рівні програмне забезпечення взаємодіє з попередніми рівнями та даними, які перебувають у стані спокою, тому немає необхідності працювати на швидкості мережі. Додатки здатні революціонізувати вертикальні ринки та бізнес-потреби, керуючи програмами, вертикальними та мобільними додатками, бізнес-аналітикою та аналітикою. Фактично, прикладний рівень дозволяє бізнесменам робити правильні речі в потрібний час з потрібними даними. [53]

### **3.7 Рівень співпраці та процесів**

Система IoT та інформація, що надходить із попередніх рівнів, не корисні, якщо вони не створюють акт. Люди використовують програми та пов'язані з ними дані для власних потреб. Іноді кілька осіб використовують одну програму для різних цілей. Насправді люди повинні мати можливість співпрацювати та спілкуватися, щоб зробити IoT придатним для обслуговування. [53]

### **3.8 Рівень безпеки**

Цей рівень вважається окремим. Насправді цей рівень охоплює та захищає всі попередні шари, але кожен розділ (точка перетину цього шару з іншим) має власну функціональність. Рівень безпеки запропонованої архітектури передбачає різні терміни функцій безпеки, включаючи шифрування даних, автентифікацію користувачів, контроль доступу до мережі та захист хмари [12]. Крім того, рівень безпеки також запобігає та передбачає небезпеки та кібератаки, включаючи криміналістику для виявлення типу атаки та її поразки. [53]

У другому розділі були представлені найважливіші архітектури IoT. Порівняльну таблицю цих архітектур із запропонованою нами архітектурою наведено в таблиці 3.1.

## Порівняння критеріїв архітектури IoT

Критерії/ Архітектури	Низька затримка	Надійність з'єднання	Підтримка різних типів даних	Реконфігурація	Широке покриття
Трирівнева архітектура	Залежить від використовуваної технології зв'язку та конфігурації мережі	Залежить від використовуваної технології зв'язку та конфігурації мережі	Підтримка різних типів даних через використання різних протоколів та форматів даних, таких як MQTT, CoAP, JSON, XML та інші.	Обмежена можливість реконфігурації, оскільки рівні архітектури розробляються окремо та зв'язок між ними може бути складним.	Так, забезпечує підтримку різних типів мереж та пристроїв, що дозволяє використовувати її в різних місцях
SDN	Низька затримка завдяки програмно- керованій мережі	Висока надійність завдяки механізмам маршрутизації та контролю мережі	Підтримка різних типів даних через використання механізмів управління мережею та керування трафіком.	Можливість динамічної реконфігурації мережі, використовуючи програмований підхід до управління мережею.	Так, дозволяє динамічно керувати мережею та забезпечувати оптимальну передачу даних у різних місцях
QoS	Залежить від використовуваної технології зв'язку та конфігурації мережі	Висока надійність завдяки механізмам контролю якості обслуговування	Підтримка різних типів даних через використання механізмів контролю якості обслуговування.	Можливість динамічної реконфігурації залежно від показників якості обслуговування.	Так, забезпечує гарантовану якість обслуговування та приділяє пріоритет певним послугам

## Продовження таблиці 3.1

На основі SOA	Залежить від використовуваної технології зв'язку та конфігурації мережі	Залежить від використовуваної технології зв'язку та конфігурації мережі	Підтримка різних типів даних через використання сервісів, які можуть бути незалежними від типів даних.	Можливість реконфігурації на основі потреб користувачів та зміни бізнес-потреб.	Так, може бути використана для розгортання послуг в будь-якому місці з доступом до мережі
IoT-A	Залежить від використовуваної технології зв'язку та конфігурації мережі	Залежить від використовуваної технології зв'язку та конфігурації мережі	Підтримка різних типів даних через використання стандартів і протоколів, таких як CoAP, MQTT, HTTP і інших.	Має обмежену здатність до реконфігурації через жорсткий контроль ресурсів та обмеження на використання ресурсів	Так, може забезпечувати широке покриття великих територій
S-IoT	Залежить від використовуваної технології зв'язку та конфігурації мережі	Залежить від використовуваної технології зв'язку та конфігурації мережі	Підтримка різних типів даних через використання стандартів і протоколів, таких як CoAP, MQTT, HTTP і інших.	Має здатність до реконфігурації, що дозволяє адаптувати архітектуру до різних змінних умов	Так, може забезпечувати широке покриття великих територій

## Продовження таблиці 3.1

Пропонована архітектура	Так Завдяки підтримці високої швидкості передачі даних та інші важливих функцій MTC 5G-Plus-HetNet розглядається як сильне технологічне рішення в запропонованій архітектурі 5G-IoT, яка забезпечує низьку затримку для IoT.	Так Підрівень зв'язку забезпечує надійність з'єднань.	Так Підрівень зв'язку забезпечує підтримку різних типів даних.	Так WSDN керує мережею IoT і дозволяє змінювати конфігурацію мережі замість традиційного моніторингу мережі для підвищення продуктивності.	Так, може забезпечувати широке покриття великих територій
-------------------------	---	--	---	---	---

### Висновки

Як ми вже згадували, додатки IoT наступного покоління та їхні послуги, такі як розумна фабрика та розумне місто, вимагають таких спеціальних атрибутів: підтримка різноманітних типів даних, підтримка великої кількості клієнтів і вимог, гнучкість, гнучкість, надійність з'єднання, надійний зв'язок з низькою затримкою. Сучасні архітектури IoT з їх комунікаційними та мережевими технологіями страждають від забезпечення вищевказаних вимог. Проте архітектури, засновані на технології зв'язку 5G, здатні задовольнити вищевказані вимоги та забезпечити такі характеристики: простота управління, надійність, можливість реконфігурації, високий рівень безпеки, легке та швидке усунення несправностей, широке покриття, низька вартість розгортання. Архітектура, розроблена в цьому документі, забезпечує низьку затримку завдяки використанню комунікацій 5G і D2D, а також надійність з'єднань завдяки MTC і Het-Net.

Крім того, він підтримує різні типи даних завдяки перевагам 5G. Фактично, завдяки інтеграції 5G та IoT багато інших технологій, таких як MTC і WNFV, можуть взяти участь в архітектурах IoT наступного покоління. Відповідна комбінація цих технологій може створити більш комплексну структуру, яка відповідає переліченим вимогам додатків IoT наступного покоління.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Цифрова трансформація в області мережевих підключень вже стає очевидною і явно визначається її потенціал. Грунтуючись на цифрах, що стосуються пропускної спроможності мережі та щільності пристроїв 5G, створюється картина інфраструктури з вражаючими можливостями застосування. Добре функціонуюче середовище зі стабільним підключенням - найважливіша основа створення мереж IoT незалежно від їх масштабу. Завдяки підключенню до мережі 5G на ринок виводяться багато нових бізнес-ідей, які продовжують змінювати наш цифровий світ. Ще невідомо, коли технологія 5G досягне ринкової зрілості, але одне можна сказати, напевно: технологія працює і світ готовий до ще одного гігантського стрибка в цифрове майбутнє.

У дипломній роботі було досліджено існуючі архітектури IoT. Було вивчено загальні відомості про IoT: основні складові, ключові будівельні блоки будь-якої структури IoT. Докладно розглянуто кожен рівень архітектури Інтернету речей. Було розглянуто використання та застосування IoT. Також досліджено використання 5g в IoT: переваги та недоліки.

Розглянуто чотири основні технології 5G IoT:

- Віртуалізація функції бездротової мережі.
- Архітектура 5G-IoT.
- Неоднорідна мережа Heterogeneous Network (HetNet).
- Зв'язок між пристроями Device to Device (D2D)

Communication. [7]

У роботі була розроблена архітектура IoT, яка забезпечує низьку затримку завдяки використанню комунікацій 5G і D2D, а також надійність з'єднань завдяки MTC і Het-Net. Було докладно розглянуто та проаналізовано кожен рівень архітектури.

В результаті були проведені порівняння архітектур за ключовими параметрами, визначеними в процесі дослідження предметної області,

кожній з розглянутих технологій була надана оцінка. У цьому документі запропоновано нову архітектуру, яка враховує майбутні вимоги до нових програм IoT та створених ними даних. Крім того, він представляє нову модель, яка використовує нові технології, такі як зв'язок між пристроями (D2D), мережа зв'язку 5G, зв'язок машинного типу (MTC), віртуалізація функції бездротової мережі (WNFV), бездротові програмно-визначені мережі (WSDN), Mobile Edge Computing (MEC) і Mobile Cloud Computing (MCC). Архітектура є модульною, ефективною, масштабованою, надійною, простою та здатною підтримувати високу швидкість обробки даних програми. Дійсно, запропонована архітектура здатна задовольнити потреби додатків IoT наступного покоління та допомогти експертам з IoT розробити більш ефективні та масштабовані системи IoT.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 5G and IoT: What can 5G do for IoT business? [Electronic resource] – Mode of access: <https://iot.telenor.com/iot-insights/5g-and-iot/>
2. 10 Ways Machine Learning Is Revolutionizing Manufacturing <http://www.forbes.com/sites/louiscolombus/2016/06/26/10-waysmachine-learning-is-revolutionizing-manufacturing/#57d0ec792d7f> Retrieved: Oct, 2016
3. Навчальний посібник «Технології Інтернету речей» [Електронний ресурс] – Б.Ю. Жураковський, І.О. Зенів – Режим доступу до ресурсу: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42078/1/Zhurakovskiy\\_B\\_Zeniv\\_Tehnologii\\_internet\\_rechey.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42078/1/Zhurakovskiy_B_Zeniv_Tehnologii_internet_rechey.pdf)
4. Top 10 Applications of IoT in 2022[Electronic resource] – Mode of access: <https://www.spiceworks.com/tech/iot/articles/top-applications-internet-of-things/>
5. IoT Architecture: the Pathway from Physical Signals to Business Decisions[Electronic resource] – Mode of access: <https://www.altexsoft.com/blog/iot-architecture-layers-components/>
6. 5G IoT: What does 5G mean for IoT? [Electronic resource] – Mode of access: <https://www.avsystem.com/blog/5g-iot/>
7. Comprehensive Survey of Key Technologies Enabling 5G-IoT [Electronic resource] – Mode of access: [https://www.researchgate.net/publication/332407851\\_Comprehensive\\_Survey\\_of\\_Key\\_Technologies\\_Enabling\\_5G-IoT](https://www.researchgate.net/publication/332407851_Comprehensive_Survey_of_Key_Technologies_Enabling_5G-IoT)
8. John Blyler, “Top 5 RF Technologies for 5G in the IoT”, [Available online 15 Jan 2018], <http://www.mwrf.com/systems/top5-rf-technologies5g-iot>
9. I.F. Akyildiz, A. Lee, P. Wang, M. Luo, W. Chou, A roadmap for traffic engineering in sdn-openflow networks, Comput. Net w. J. 71 (2014) 130.
10. A Novel IoT Architecture based on 5G-IoT and Next Generation Technologies [Electronic resource] – Mode of access:

[https://www.researchgate.net/figure/The-proposed-5G-IoT-architecture\\_fig1\\_330477820](https://www.researchgate.net/figure/The-proposed-5G-IoT-architecture_fig1_330477820)

11. Y. Wang, L. Kung, W. Y. C. Wang, and C. G. Cegielski, "An integrated big data analytics-enabled transformation model: Application to health care," *Inf. Manag.*, vol. 55, no. 1, pp. 64–79, 2018.
12. M. Conti, A. Dehghantanha, K. Franke, and S. Watson, "Internet of Things security and forensics: Challenges and opportunities." Elsevier, 2018.
13. S. Cirani et al., "A scalable and self-configuring architecture for service discovery in the internet of things," *IEEE Internet Things J.*, vol. 1, no. 5, pp. 508–521, 2014.
14. C.-W. Tsai, C.-F. Lai, and A. V Vasilakos, "Future Internet of Things: open issues and challenges," *Wirel. Networks*, vol. 20, no. 8, pp. 2201–2217, 2014
15. A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015.
16. Z. Qin, G. Denker, C. Giannelli, P. Bellavista, and N. Venkatasubramanian, "A software defined networking architecture for the internet-of-things," in *Network Operations and Management Symposium (NOMS)*, 2014 IEEE, 2014, pp. 1–9.
17. D. P. Abreu, K. Velasquez, M. Curado, and E. Monteiro, "A resilient Internet of Things architecture for smart cities," *Ann. Telecommun.*, vol. 72, no. 1–2, pp. 19–30, 2017.
18. L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The internet of things: A survey," *Comput. networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.
19. J. Li, Y. Zhang, Y.-F. Chen, K. Nagaraja, S. Li, and D. Raychaudhuri, "A mobile phone based WSN infrastructure for IoT over future internet architecture," in *Green Computing and Communications (GreenCom)*, 2013 IEEE and *Internet of Things (iThings/CPSCoM)*, IEEE International

- Conference on and IEEE Cyber, Physical and Social Computing, 2013, pp. 426–433.
20. H. Yue, L. Guo, R. Li, H. Asaeda, and Y. Fang, “DataClouds: Enabling community-based data-centric services over the Internet of Things,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 1, no. 5, pp. 472–482, 2014.
21. L. Atzori, A. Iera, G. Morabito, and M. Nitti, “The social internet of things (siot)–when social networks meet the internet of things: Concept, architecture and network characterization,” *Comput. networks*, vol. 56, no. 16, pp. 3594–3608, 2012.
22. Історія виникнення Інтернету речей. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://itsinternetofthings.blogspot.com/p/blog-page\\_50.html](https://itsinternetofthings.blogspot.com/p/blog-page_50.html)
23. Що таке smart city: в світі та в Києві. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://hmarochos.kiev.ua/2015/07/22/shho-take-smart-city-v-sviti-ta-v-kiyevi/>
24. The Synergy between Big Data and the Internet of Things. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.opensourceforu.com/2017/07/synergy-big-data-internet-things/>
25. Основи Інтернету Речей. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://edu.asu.in.ua/mod/book/tool/print/index.php?id=112>
26. IoT Architecture: the Pathway from Physical Signals to Business Decisions. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.altexsoft.com/blog/iot-architecture-layers-components/>
27. Sensors. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://www.researchgate.net/figure/Common-sensor-categories-including-magnetic-sensors-in-IoT-applications-Magnetic-sensors\\_fig1\\_334760981](https://www.researchgate.net/figure/Common-sensor-categories-including-magnetic-sensors-in-IoT-applications-Magnetic-sensors_fig1_334760981)
28. Цифровий формат. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

- [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9\\_%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%82](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%82)
29. Види Інтернету речей. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:  
<https://www.mokosmart.com/uk/internet-of-things-sensors/>
30. A Reference Architecture For The Internet of Things. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://wso2.com/whitepapers/a-reference-architecture-for-the-internet-of-things/>
31. Что такое беспроводные технологии. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://ipkey.com.ua/faq/965-wireless-technologies.html>
32. ЧТО ТАКОЕ ТЕХНОЛОГИЯ NFC И КАК ОНА ПОЯВИЛАСЬ? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://idcard.com.ua/blog/chto-takoe-tehnologiya-nfc-istoriya-ee-vozniknoveniya/>
33. Different Bluetooth Versions: The Emergence of Bluetooth 5.0. ? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mokoblue.com/bluetooth-versions-5-0/>
34. What is LPWAN? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.avsystem.com/blog/LPWAN/>
35. Resideo Joins Zigbee Alliance Board of Directors. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.electronicweekly.com/news/resideo-joins-zigbee-alliance-board-directors-2020-01/>
36. Стільниковий зв'язок - це Принцип роботи стільникового зв'язку. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://hi-news.pp.ua/tehnka-tehnologiyi/print:page,1,16101-stlnikoviy-zvyazok-ce-princip-roboti-stlnikovogo-zvyazku.html>

37. What is LTE-M? [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.avsystem.com/blog/LTE-M/>
38. Narrow Band (NB) IoT – The next level Communication Network for Internet of Things. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://circuitdigest.com/article/narrow-band-nb-iot-next-level-communication-network-for-internet-of-things>
39. CoAP, MQTT, AMQP, XMPP & DDS: Which Protocol Should You Choose for IoT? [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.nexpcb.com/blog/different-data-protocols-which-one-to-choose>
40. РОЗУМНИЙ ДІМ ДЛЯ КВАРТИРИ. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://smarttech.com.ua/rozumnij-dim-dlya-kvartiri/>
41. С чего начать внедрение точного земледелия в хозяйстве. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://aggeek.net/ru-blog/s-chego-nachat-vnedrenie-tochnogo-zemledeliya-v-hozyajstve>
42. Convergence of technologies undergird the Smart City revolution and paves way for a smarter future. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.geospatialworld.net/blogs/technologies-undergird-smart-city-revolution/>
43. ФРАНЧАЙЗИНГ В УКРАИНЕ. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.sat.ua/ru/about/news/franchayzing-v-ukraine-1/>
44. Минздрав и Минцифры планируют интегрировать систему eHealth в мобильное приложение "Дія". [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.unian.net/science/ehealth-sistemu-ehealth-planiruyut-integrirovat-v-mobilnoe-prilozhenie-diya-novosti-11051195.html>

45. Что такое Smart Grid? [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.volta.com.ua/blog/chto-takoe-smart-grid/>
46. TECH TRANSFORMERS. Fitbit short interest at record high ahead of earnings. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.cnbc.com/2016/11/02/fitbit-earnings-short-interest-on-stock-at-record-high.html>
47. Как выглядит автомобильный завод будущего? [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://knaufautomotive.com/ru/kak-vyglyadit-avtomobilnyy-zavod-budushchego/>
48. РОЗУМНІ ГОТЕЛІ: ЯК ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІНЮЮТЬ ІНДУСТРІЮ ГОСТИННОСТІ. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: [https://tourlib.net/statti\\_ukr/babushko3.htm](https://tourlib.net/statti_ukr/babushko3.htm)
49. 5G IoT: What does 5G mean for IoT? [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.avsystem.com/blog/5g-iot/>
50. Heterogeneous Network : A Latest Approach Towards Networking. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://itresearchreport.blogspot.com/2014/02/heterogeneous-network-new-way-of.html>
51. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: [https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.semantic-scholar.org%2Fpaper%2FSurvey-on-device-to-device-communications%253A-and-Alkurd-Shubair%2F6994c1b00c910c702d6401528ca3725d59fc5161&psig=AOvVaw2LUNz3QN7WQsZUMdQIWol\\_&ust=1685566846508000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjRxqFwoTCNCm4JSFfv8CFQAAAAAdA AAAABAE](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.semantic-scholar.org%2Fpaper%2FSurvey-on-device-to-device-communications%253A-and-Alkurd-Shubair%2F6994c1b00c910c702d6401528ca3725d59fc5161&psig=AOvVaw2LUNz3QN7WQsZUMdQIWol_&ust=1685566846508000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjRxqFwoTCNCm4JSFfv8CFQAAAAAdA AAAABAE)
52. What Are the 7 Layers of IoT Architecture? [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://jelvix.com/blog/iot-architecture-layers>

53.СИСТЕМА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ НА БАЗІ МЕРЕЖІ 5G Міночкін  
Д.А., Мацюк Е.О. [Електронний ресурс] – Режим доступу до  
ресурсу:<http://conferenc.its.kpi.ua/2023/paper/view/27752/15727>